

Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής II

Ηλεκτρισμός
Μαγνητισμός
Οπτική

Ελευθερία Σεργάκη
Παναγιώτης Πετράκης



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

HEALLINK
Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΧΡΕΩΣΗ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Εργαστηριακές Ασκήσεις

Φυσικής II

Ηλεκτρισμός – Μαγνητισμός – Οπτική

Συγγραφή:

Ελευθερία Σεργάκη

Διδάκτωρ ΗΜΜΥ Πολυτεχνείο Κρήτης, Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης ΗΜΜΥ Πολυτεχνείο Κρήτης, Πτυχίο Φυσικής Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Διδάσκουσα Σχολής ΗΜΜΥ Πολυτεχνείου Κρήτης / ΕΔΙΠ ΗΜΜΥ, elfsergaki@ece.tuc.gr

Παναγιώτης Πετράκης

M.Sc. πανεπιστήμιο KENT, Πτυχίο Φυσικής, Πανεπιστήμιο EAST ANGLIA, Υποψήφιος διδάκτορας Σχολής ΜΠΔ Πολυτεχνείου Κρήτης. ΕΔΙΠ ΜΠΔ Πολυτεχνείου Κρήτης, panpetrakis@isc.tuc.gr

Κριτικός αναγνώστης:

Γιώργος Σταυρακάκης

Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης, Σχολή ΗΜΜΥ, gstavr@electronics.tuc.gr

Συντελεστές έκδοσης:

Γλωσσική Επιμέλεια: **Ελένη Νίκα**, Φιλολόγος, nika.eleni.1973@gmail.com

Γραφιστική Επιμέλεια, Τεχνική Επεξεργασία: **Νίκος Αφεντάκης**, ΜΠΔ / Σχεδιαστής, www.memorymag.net

ISBN: 978-960-603-185-4

Copyright © ΣΕΑΒ, 2015



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού – Μη Εμπορική Χρήση – Παρόμοια Διανομή 3.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/gr/>

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

www.kallipos.gr

*Αφιερωμένο στις οικογένειές μας
που μας στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια
Ε. Σ και Π. Π.*

Περιεχόμενα

Πίνακας συμβόλων.....	v
Συντομεύσεις & ακρωνύμια.....	vii
Ορολογία.....	viii
Πρόλογος.....	xiii
Λίγα λόγια για την ασφάλεια	xiv
ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου	17
1.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	18
1.2 Απαραίτητες γνώσεις	18
1.3 Πείραμα 1	23
1.4 Πείραμα 2	25
1.5 Πείραμα 3	26
1.6 Πείραμα 4	27
1.7 Πείραμα 5	28
1.8 Ενδεικτική βιβλιογραφία.....	29
ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά.....	31
2.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	31
2.2 Απαραίτητες γνώσεις	31
2.3 Πείραμα 1	31
2.4 Πείραμα 2	32
2.5 Πείραμα 3	36
2.6 Πείραμα 4	37
2.7 Ενδεικτική βιβλιογραφία.....	41
ΑΣΚΗΣΗ 3 Γέφυρα Wheatstone.....	43
3.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	43
3.2 Απαραίτητες γνώσεις	43
3.3 Πείραμα	43
3.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία.....	48
ΑΣΚΗΣΗ 4 Φαινόμενο Hall	49
4.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	49
4.2 Απαραίτητες γνώσεις	49
4.3 Πείραμα	49
4.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία.....	55
ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών	57
5.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	57
5.2 Απαραίτητες γνώσεις	58
5.3 Πείραμα 1	58
5.4 Πείραμα 2	65
5.5 Πείραμα 3	66
5.6 Πείραμα 4	67
5.7 Πείραμα 5	69
5.8 Πείραμα 6	71
5.9 Ενδεικτική βιβλιογραφία.....	72
ΑΣΚΗΣΗ 6 Μέτρηση πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος	73
6.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	73
6.2 Απαραίτητες γνώσεις	73
6.3 Πείραμα	73
6.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία.....	79
ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου	81
7.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	81
7.2 Απαραίτητες γνώσεις	81
7.3 Πείραμα 1	81
7.4 Πείραμα 2	85
7.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία.....	88

ΑΣΚΗΣΗ 8 Μελέτη φακών	89
8.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	89
8.2 Απαραίτητες γνώσεις	89
8.3 Πείραμα 1	89
8.4 Πείραμα 2	98
8.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία	100
ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson.....	103
9.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	103
9.2 Απαραίτητες γνώσεις	103
9.3 Πείραμα 1	103
9.4 Πείραμα 2	112
9.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία	116
ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός	117
10.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	117
10.2 Απαραίτητες γνώσεις	117
10.3 Πείραμα	117
10.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία	129
ΑΣΚΗΣΗ 11 Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών	131
11.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	131
11.2 Απαραίτητες γνώσεις	131
11.3 Πείραμα 1	131
11.4 Πείραμα 2	137
11.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία	138
ΑΣΚΗΣΗ 12 Ταχύτητα του ήχου στον αέρα με το συμβολόμετρο Quinke	139
12.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	139
12.2 Απαραίτητες γνώσεις	139
12.3 Πείραμα	139
12.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία	146
ΑΣΚΗΣΗ 13 Υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου στα ρευστά.....	147
13.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	147
13.2 Απαραίτητες γνώσεις	147
13.3 Πείραμα	147
13.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία	153
ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος	155
14.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	155
14.2 Απαραίτητες γνώσεις	156
14.3 Πείραμα 1	156
14.4 Πείραμα 2	166
14.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία	168
ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED.....	169
15.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά	169
15.2 Απαραίτητες γνώσεις	169
15.3 Πείραμα	169
15.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία	173

Πίνακας συμβόλων

Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τα κυριότερα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στο παρόν σύγγραμμα. Σύμβολα που δεν περιέχονται σε αυτόν, εξηγούνται στο σημείο του κειμένου, όπου εμφανίζονται. Όταν κάποιο σύμβολο χρησιμοποιείται για περισσότερα του ενός μεγέθη, επαναπροσδιορίζεται, όπου χρειάζεται. Τα σύμβολα συνοδεύονται από κατάλληλους δείκτες προκειμένου να περιγράψουν μια συγκεκριμένη κατάσταση ή λειτουργία. Για παράδειγμα, Z_L η σύνθετη επαγωγική αντίσταση, Z_C η σύνθετη χωρητική αντίσταση. Όλες οι μονάδες δίνονται στο Διεθνές Σύστημα (SI).

Σύμβολο	Μονάδες	Περιγραφή
B	T, Tesla	Μαγνητική επαγωγή
C	F, (Farad)	Πυκνωτής
c	m s ⁻¹ , (meter/second)	Ταχύτητα φωτός
d	m, (meter)	Διάμετρος
e	V, (Volt)	Στιγμιαία τιμή τάσης
E	V, (Volt)	Επαγόμενη τάση
E	N Cb ⁻¹ , (Newton/ Coulomb)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου
F	N, (Newton)	Δύναμη
f	Hz, (Hertz)	Συχνότητα περιοδικού σήματος
f	m, (meter)	Εστιακή απόσταση
H	A/m, (Ampere/meter)	Ένταση μαγνητικού πεδίου
i	A, (Ampere)	Στιγμιαία τιμή ρεύματος
I	A, (Ampere)	Ρεύμα
I	Cd, (candela)	Φωτεινή ένταση
L	H, (Henry)	Πηνίο
L	m, (meter)	Μήκος
M	-	Μεγέθυνση
n	-	Δείκτης διάθλασης
n	-	Βαθμός απόδοσης
N	-	Αριθμός σπειρών πηνίου, αριθμός σχισμών φράγματος περίθλασης
p	m s, (meter-second)	Ορμή
p	N m ⁻² , (Newton/meter ²)	Πίεση
P	dpt, (1dioptr=1m ⁻¹)	Ισχύς φακού
P	W, (Watt)	Ενεργός ισχύς
Q	VAr, (Volt–Ampere–Reactance)	Άεργος ισχύς
Q	-	Παράγοντας ποιότητας
q	Cb, (Coulomb)	Ηλεκτρικό φορτίο
R	Ω, (Ohm)	Ωμική αντίσταση
R	m, (meter)	Ακτίνα καμπυλότητας
R	-	Διακριτική ικανότητα
R_H	m ³ Cb ⁻¹ , (meter ³ /coulomb)	Σταθερά του Hall
s	m ² , (meter ²)	Εμβαδόν
S	VA, (Volt–Ampere)	Φαινόμενη ισχύς
t	s, (second)	Χρόνος
T	°K, (Kelvin)	Θερμοκρασία
T	s, (second)	Περίοδος περιοδικού σήματος
u	m s ⁻¹ , (meter/second)	Ταχύτητα

V	V, (Volt)	Τάση
W	J, (Joule)	Ενέργεια
X	Ω , (Ohm)	Άεργη αντίσταση
Z	Ω , (Ohm)	Σύνθετη αντίσταση ή εμπέδηση
λ	m, (meter)	Μήκος κύματος
ρ	Ω m, (Ohm-meter)	Ειδική αγωγιμότητα
σ	-	Απόκλιση μέσης τιμής
φ	$^{\circ}$, (μοίρες)	Γωνία
Φ	Wb, (Weber)	Μαγνητική ροή
ω	rad/s, (radians/second)	Γωνιακή ταχύτητα

Συντομεύσεις & ακρωνύμια

Συντόμευση - ακρωνύμιο	Αγγλική περιγραφή	Ελληνική περιγραφή	Άσκηση
AC	Alternative Current	Εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
back-emf	Back-electromotive force	Αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
BNC	British Naval Connector	Είδος βύσματος για συνδεσμο- λογία ομοαξονικού καλωδίου	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
CAL	Calibration	Ρύθμιση	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
DC	Direct Current	Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
emf	Electromotive force	Ηλεκτρεγερτική δύναμη	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
EXT	External Triggering	Εξωτερικός συγχρονισμός	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
GND	Ground	Γείωση	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
HF	High Frequency	Υψηλή συχνότητα	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
INT	Intensity	Ένταση	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
LASER	Light Amplification by Simulated Emission of Radiation	Λείζερ	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson
LED	Led Emission Diode	Δίοδος εκπομπής φωτός	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου, ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φω- τοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
LF	Low frequency	Χαμηλή συχνότητα	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
PIV	Peak Inverse Voltage	Κορυφή ανάστροφης τάσης	ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντί- στασης και χαρακτηριστι- κής καμπύλης διόδου
p-p	peak to peak	Από κορυφή σε κορυφή	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
rms	root mean square	Τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
AHEΔ	Back-electromotive force	Αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
HEΔ	Ηλεκτρεγερτική δύναμη	Electromotive force	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
M/Σ	Transformer	Μετασχηματιστής	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών

Ορολογία

Αγγλικός όρος	Ελληνικός όρος	Κεφάλαιο
Active power	Πραγματική ισχύς	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών, ΑΣΚΗΣΗ 6 Μέτρηση πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος
Aparrent power	Φαινόμενη ισχύς	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 6 Μέτρηση πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος
Back-electromotive force	Αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Band-pass	Φίλτρο διέλευσης	ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος
Bandwidth	Ζώνη εύρους	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά
Barrier potential	Φραγμός δυναμικής ενέργειας	ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου
Breadboard	Πλακέτα γρήγορης συνδεσμολογίας ηλεκτρονικών στοιχείων	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου
Capacitance	Χωρητικότητα	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Capacitor	Πυκνωτής	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά
Chromatic aberration	Χρωματικό σφάλμα φακών	ΑΣΚΗΣΗ 8 Μελέτη φακών
Circularly polarized light	Κυκλικά πολωμένο φως	ΑΣΚΗΣΗ 11 Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών
Coil	Πηνίο	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά
Conduction band	Ζώνη αγωγιμότητας	ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου
Converging lenses	Συγκλίνοντες φακοί	ΑΣΚΗΣΗ 8 Μελέτη φακών
Depletion region (junction region)	Ζώνη απογύμνωσης	ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου
Diffraction	Περίθλαση	ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός
Diffraction at slit split	Περίθλαση σε μονή σχισμή	ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός
Diffraction grating	Φράγμα περίθλασης	ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος
Diffraction uncertainty	Απροσδιοριστία περίθλασης	ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός
Diffusion	Διάχυση	ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδίοδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
Diode	Δίοδος	ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου

Dispersion	Διασκεδασμός	ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος
Diverging lenses	Αποκλίνοντες φακοί	ΑΣΚΗΣΗ 8 Μελέτη φακών
Electric charge	Ηλεκτρικό φορτίο	ΑΣΚΗΣΗ 4 Φαινόμενο Hall
Electromagnetic induction (induced emf)	Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή (επαγόμενη ΗΕΔ)	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Emission line spectrum	Γραμμικό φάσμα εκπομπής	ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος
Energy gap	Ενεργειακό χάσμα	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson, ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
Flux linkage	Μαγνητική ροή μέσα από ολόκληρο σωληνοειδές	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Forward bias	Ορθή πόλωση	ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου
Half-shade principle	Αρχή μισής σκιάς	ΑΣΚΗΣΗ 11 Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών
Hall coefficient	Σταθερά του hall	ΑΣΚΗΣΗ 4 Φαινόμενο Hall
Impedance	Σύνθετη αντίσταση	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Index of refraction	Δείκτης διάθλασης	ΑΣΚΗΣΗ 8 Μελέτη φακών, ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος
Induced voltage	Επαγόμενη τάση	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Inductance	Επαγωγή	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Interference	Συμβολή	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson, ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός, ΑΣΚΗΣΗ 12 Ταχύτητα του ήχου στον αέρα με το συμβολόμετρο Quinke
Interference fringes	Κροσσοί συμβολής	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson, ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός
Junction	Επαφή	ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου, ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
Loaded transformer	Μετασχηματιστής με φορτίο	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Long/short-pass filters	Οπτικά φίλτρα αποκοπής	ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος
Longitudinal waves	Διαμήκη κύματα	ΑΣΚΗΣΗ 12 Ταχύτητα του ήχου στον αέρα με το συμβολόμετρο Quinke, ΑΣΚΗΣΗ 13 Υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου στα ρευστά
Magnetic flux	Μαγνητική ροή	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών

Magnification	Μεγέθυνση	ΑΣΚΗΣΗ 8 Μελέτη φακών
Majority carriers	Φορείς πλειονότητας	ΑΣΚΗΣΗ 4 Φαινόμενο Hall
Optical axis	Οπτικός άξονας	ΑΣΚΗΣΗ 11 Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών
Optical activity	Οπτική ενεργότητα	ΑΣΚΗΣΗ 11 Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών
Optical fiber	Οπτική ίνα	ΑΣΚΗΣΗ 8 Μελέτη φακών, ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
Optical pumping	Οπτική άντληση	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson
Optical resonator	Οπτικό αντηχείο	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson
Oscilloscope	Παλμογράφος	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
Phase angle	Γωνία φάσης	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson
Phase difference	Διαφορά φάσης	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου, ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός
Photoconductivity	Φωτοαγωγιμότητα	ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
Photoelectric effect	Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
Photovoltaic effect	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
Piezoelectric effect	Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	ΑΣΚΗΣΗ 12 Ταχύτητα του ήχου στον αέρα με το συμβολόμετρο Quinke
Polarimeter	Πολωσίμετρο	ΑΣΚΗΣΗ 11 Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών
Polaroid	Πολωτικό φίλτρο (υλικό που παράγει πολωμένο φως από μη πολωμένο λόγω του φαινομένου διχρωϊσμού)	ΑΣΚΗΣΗ 11 Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών
Population inversion	Αντιστροφή πληθυσμού	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson
Power factor	Συντελεστής ισχύος	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, 6
Primary coil	Πρωτεύον πηνίο	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Principal maxima	Κύρια μέγιστα	ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός
Progressive wave function	Εξίσωση διάδοσης κύματος	ΑΣΚΗΣΗ 12 Ταχύτητα του ήχου στον αέρα με το συμβολόμετρο Quinke
Quality factor	Παράγοντας ποιότητας	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά
Reactance of capacitor	Χωρητικότητα πυκνωτή	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών

Reactance of inductor	Χωρητικότητα πηνίου	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Reactive power	Άεργος ισχύς	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 6 Μέτρηση πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος
Resistance	Αντίσταση	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 3 Γέφυρα Wheatstone, ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών, ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου
Resistivity	Ειδική αγωγιμότητα	ΑΣΚΗΣΗ 3 Γέφυρα Wheatstone, ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Resolution	Διακριτική ικανότητα	ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος
Resonance	Συντονισμός	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά
Resonant frequency	Συχνότητα συντονισμού	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά
Reverse bias	Ανάστροφη πόλωση	ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου
Rotary power	Στροφική ικανότητα	ΑΣΚΗΣΗ 11 Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών
Saturation current	Ρεύμα κορεσμού	ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου
Secondary coil	Δευτερεύον πηνίο	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Self-induction	Αυτεπαγωγή	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά, ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Semiconductor	Ημιαγωγός	ΑΣΚΗΣΗ 4 Φαινόμενο Hall, ΑΣΚΗΣΗ 7 Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου, ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
Series connection	Συνδεσμολογία στη σειρά	ΑΣΚΗΣΗ 2 Συντονισμός RLC σε σειρά
Specific rotation	Ειδική στροφική ικανότητα	ΑΣΚΗΣΗ 11 Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών
Spectrometer-goniometer	Φασματόμετρο	ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος
Spherical aberration	Σφαιρικό σφάλμα φακών	ΑΣΚΗΣΗ 8 Μελέτη φακών
Spontaneous emission	Αυθόρμητη εκπομπή	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson
Stationary longitudinal waves	Στάσιμα διαμήκη κύματα	ΑΣΚΗΣΗ 12 Ταχύτητα του ήχου στον αέρα με το συμβολόμετρο Quinke, ΑΣΚΗΣΗ 13 Υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου στα ρευστά
Stimulated emission	Παρακινούμενη εκπομπή	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson
Subsidiary maxima	Δευτερεύοντα μέγιστα	ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός

Total internal reflection	Ολική εσωτερική ανάκλαση	ΑΣΚΗΣΗ 8 Μελέτη φακών, ΑΣΚΗΣΗ 14 Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος
Transformer	Μετασχηματιστής	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Triggering	Συγχρονισμός ή σκανδαλισμός	ΑΣΚΗΣΗ 1 Μελέτη παλμογράφου
Ultrasonic wave	Υπέρηχος	ΑΣΚΗΣΗ 13 Υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου στα ρευστά
Uncertainty of location and momentum	Αβεβαιότητα θέσης και ορμής	ΑΣΚΗΣΗ 10 Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός
Unloaded transformer	Μετασχηματιστής χωρίς φορτίο	ΑΣΚΗΣΗ 5 Μελέτη μετασχηματιστών
Valence band	Ζώνη σθένους	ΑΣΚΗΣΗ 9 Συμβολόμετρο Michelson, ΑΣΚΗΣΗ 15 Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED
Wheatstone bridge	Γέφυρα Wheatstone	ΑΣΚΗΣΗ 3 Γέφυρα Wheatstone

Πρόλογος

Στο βιβλίο αυτό μπορείτε να βρείτε δεκαπέντε οργανωμένες, αναλυμένες και δοκιμασμένες εργαστηριακές ασκήσεις Φυσικής, κατάλληλες να διδαχθούν σε φοιτητές σχολών ανώτατης εκπαίδευσης. Η συγκεκριμένη ενότητα ασκήσεων (εργαστηριακές ασκήσεις Φυσικής II) πραγματεύεται θέματα ηλεκτρισμού, μαγνητισμού, κυματικής και γεωμετρικής οπτικής.

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που απαιτούν είναι εξειδικευμένος και αναλυτική του παρουσίαση γίνεται στην αρχή της κάθε άσκησης. Κάθε άσκηση περιλαμβάνει συνήθως περισσότερα του ενός πειράματα, τα οποία κατά περίπτωση μπορούν να εκτελεστούν και ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Κάθε πείραμα οργανώνεται σε διακριτά βήματα θεωρίας, εκτέλεσης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων.

Το βιβλίο αυτό αντιπροσωπεύει εικοσιπενταετή εμπειρία στην αίθουσα διδασκαλίας και στο εργαστήριο. Σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα η ύλη του αναθεωρήθηκε και εμπλουτίστηκε αρκετές φορές, τόσο λόγω της αλληλεπίδρασής μας με πολυάριθμους φοιτητές και φοιτήτριες, όσο και λόγω της εξέλιξης της επιστημονικής έρευνας και γνώσης.

Πέρα από το βασικό στόχο του βιβλίου που είναι η πειραματική μελέτη φυσικών φαινομένων, φιλοδοξούμε να προσφέρουμε βασική και πρακτική υποδομή:

- Στη μεθοδολογία - μεθοδικότητα για την καταγραφή πειραματικών δεδομένων (χρόνος και συνθήκες εκτέλεσης πειραμάτων, στοιχεία που είναι σημαντικά για την κατοχύρωση πνευματικών δικαιωμάτων και στην έρευνα).
- Στην επεξεργασία των μετρήσεων (ακρίβεια και κριτική που αφορούν στη φυσική σημασία των αποτελεσμάτων).
- Στην εξοικείωση χρήσης σύγχρονων τεχνολογικά συσκευών (στην κάθε άσκηση δίνεται πλήρης περιγραφή των συσκευών και των οργάνων που χρησιμοποιούνται), δίνοντας πάντα σημασία στα θέματα ασφαλούς χρήσης εξοπλισμού και ασφαλών συνθηκών διεξαγωγής των πειραμάτων.
- Στη διασύνδεση των φυσικών φαινομένων - εφαρμογής τους στην τεχνολογία, καθώς και στη θεωρητική κατανόησή τους, γιατί μόνο τότε γίνεται δυνατή η περαιτέρω βελτίωση και η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών (στο βιβλίο δίνονται συγκεντρωμένα σημαντικά στοιχεία και λεπτομέρειες της θεωρίας από τις πιο έγκυρες και σχετικές βιβλιογραφικές πηγές).

Ελπίζουμε η εργασία μας αυτή να σας εμπνεύσει και να σας βοηθήσει στην υλοποίηση των μαθησιακών ή/και διδακτικών σας στόχων με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Πρόθεση και επιδίωξή μας παραμένει η ρήση: *πειραματίσου ελεύθερα – μάθε καλύτερα!*

Χανιά 2015
Οι συγγραφείς

Λίγα λόγια για την ασφάλεια

Ασφάλεια στο εργαστήριο

Τα σύμβολα ασφαλείας είναι διεθνώς αναγνωρισμένα σχήματα που τοποθετούνται όπου και όταν πρέπει να δηλωθεί κάποιο είδος κινδύνου στο προσωπικό, στους χρήστες και στους επισκέπτες ενός χώρου. Τα διεθνή σύμβολα ασφαλείας (πάντα σε κίτρινο φόντο) που μπορείτε να δείτε στους χώρους ενός εργαστηρίου, με την εξήγησή τους, φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Σύμβολο	Σημασία	Σύμβολο	Σημασία
	Επικίνδυνη τάση		Απαιτούνται γυαλιά
	Εκρηκτικό		Απαιτούνται γάντια
	Εύφλεκτο		Απαιτείται κράνος
	Ραδιενέργεια		Απαιτούνται ωτοασπίδες
	Επιβλαβές ή ερεθιστικό		Χώρος για πλύσιμο με νερό (ντους)
	Διαβρωτικό		Χώρος ή κουτί πρώτων βοηθειών
	Ακτινοβολία Λέιζερ		
	Τοξικό		
	Άλλος κίνδυνος που δεν δηλώνεται		

Καμία εργαστηριακή συσκευή δεν πρέπει να αποσυναρμολογείται από μη ειδικευμένο προσωπικό. Αυτό υπαγορεύεται τόσο από την πολυπλοκότητα και την ακρίβεια της ρύθμισής τους όσο και από την επικινδυνότητά τους, για κάποιες.

Ασφάλεια και λέιζερ

Ο σπουδαιότερος κανόνας ασφάλειας για τα λέιζερ είναι η βασική αρχή του να θεωρούμε τη δέσμη τους πάντα επιβλαβή και επικίνδυνη! Σε κάθε περίπτωση πρέπει να γνωρίζουμε τη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης, η οποία μπορεί να φτάσει σε εμάς, κατευθείαν ή από ανάκλαση, και να προκαλέσει ζημιά.

Ακόμη και μικρής ισχύος λέιζερ (λίγων mW), όπως αυτά που πωλούνται στα περίπτερα, μπορούν να γίνουν επικίνδυνα, εάν χρησιμοποιούνται εσφαλμένα. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος είναι από τις δέσμες που μπορεί να στοχεύσουν στο μάτι. Η βλάβη που μπορεί να πάθει το μάτι, όταν χτυπηθεί από δέσμη λέιζερ, εξαρτάται από την ισχύ, το μήκος κύματος, τη χρονική διάρκεια του παλμού του λέιζερ και τα μέσα προστασίας που πιθανόν να προστατεύουν τον άνθρωπο, π.χ. ειδικά γυαλιά.

Η δέσμη λέιζερ μπορεί να εστιαστεί από τον ίδιο το φακό του ματιού σε ένα πολύ μικρό σημείο του αμφιβληστροειδούς και να καταστρέψει ανεπανόρθωτα κάποια σημεία του (κάψιμο του ιστού), προκαλώντας μερική ή ολική τύφλωση. Σημειώστε ότι τα μάτια μας είναι ευαίσθητα μόνο στο ορατό φάσμα, και επομένως μόνο σε λέιζερ που εκπέμπουν ορατές ακτίνες.

Διάφοροι οργανισμοί (ANSI, OSHA, FDA–CDRH, NRPB, Στρατός) έχουν εκδώσει πρότυπα ασφάλειας, σύμφωνα με τα οποία έχουν κωδικοποιηθεί τα λέιζερ ανάλογα με την επικινδυνότητά τους. Γενικά δεχόμαστε διεθνώς έξι ομάδες λέιζερ σύμφωνα με το πόσο επικίνδυνα μπορούν να γίνουν και εκδίδουμε σαφείς και αναλυτικές οδηγίες για τη χρήση τους.

Από τις έξι κλάσεις λέιζερ μόνο εκείνα που ανήκουν στις τρεις πρώτες κατηγορίες (I, II και IIIa) είναι ακίνδυνα για το μάτι, δεδομένου ότι η ισχύς τους είναι μικρή και το μάτι προλαβαίνει να κλείσει ανακλαστικά και έγκαιρα σε περίπτωση που η δέσμη του λέιζερ πέσει πάνω του.

Η κλάση I (0 ως 0,39mW) ομαδοποιεί λέιζερ χαμηλής ισχύος, που δεν είναι επικίνδυνα ακόμη και όταν βλέπουμε συνεχώς τη δέσμη τους ή είναι έτσι τοποθετημένα που εμποδίζουν τη θέα της δέσμης κατευθείαν.

Η κλάση II (0,39 ως 1mW) περιλαμβάνει λέιζερ ορατού φωτός, που δεν επιτρέπεται να έρχονται σε άμεση επαφή με τα μάτια. Παρόλα αυτά δεν προκαλούν βλάβη για χρονική έκθεση μικρότερη από 0,25s, π.χ. σαρωτές γραμμωτού κώδικα.

Η κλάση II (0 ως 1mW) περιλαμβάνει λέιζερ ορατού φωτός, που δεν είναι επικίνδυνα υπό φυσιολογικές συνθήκες αλλά η έκθεση στο φως τους για κάποιο χρονικό διάστημα θα μπορούσε να επιφέρει βλάβες στα μάτια, για χρόνο μεγαλύτερο από 0,25s, όπως συμβαίνει και με τις συμβατικές πηγές φωτισμού, π.χ. δυνατά φλας φωτογραφικών μηχανών.

Η κλάση IIIa (1 ως 5mW) ομαδοποιεί λέιζερ που φυσιολογικά δεν προκαλούν βλάβη στα μάτια, αν η δέσμη περάσει στιγμιαία από μπροστά τους, αλλά αποτελούν σοβαρό κίνδυνο, αν συνδυαστούν με διατάξεις οπτικής που μεγεθύνουν, όπως τα μικροσκόπια και τα τηλεσκόπια, οι οποίες εστιάζουν τη δέσμη, π.χ. δείκτες παρουσιάσεων).

Στην κλάση IIIb (5 ως 500 mW) περιλαμβάνονται λέιζερ που είναι επικίνδυνα κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης με τα μάτια και το δέρμα.

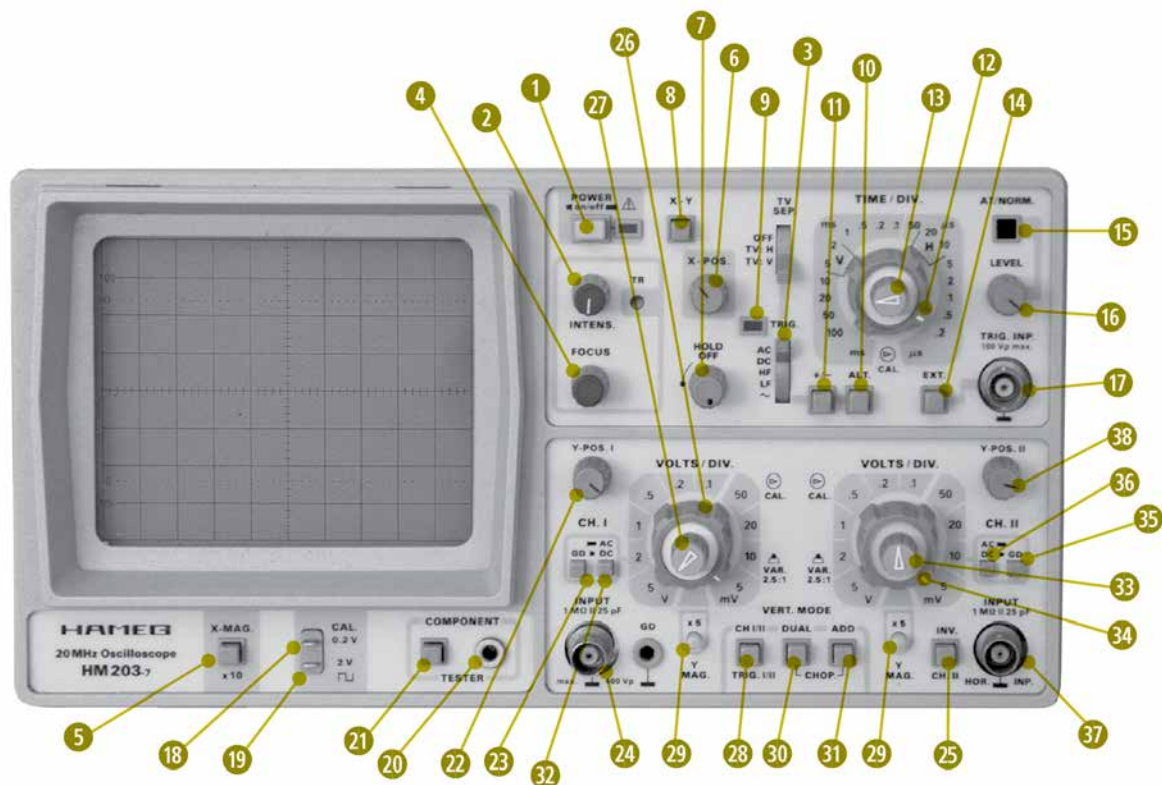
Τέλος στην κλάση IV (500mW και άνω) περιλαμβάνονται όλα τα λέιζερ, που αποτελούν όχι μόνο σοβαρό κίνδυνο τραυματισμού αλλά επιπλέον μπορούν να προκαλέσουν βλάβες λόγω δευτερογενούς παραγωγής σωματιδίων και ακτινοβολίας επικίνδυνης για τα βιολογικά κύτταρα. Επίσης μπορούν να προκαλέσουν ανάφλεξη σε εύφλεκτα υλικά.

Η ειδική υποχρεωτική σήμανση που πρέπει να διαθέτουν οι συσκευές λέιζερ παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:

Κλάση	Μέγιστη ισχύς (mW)	Ετικέτα (Ελληνικά και Αγγλικά)	Μορφή ετικέτας
I	μέχρι 0,39	(Δεν απαιτείται ετικέτα)	
IIa	0,39 ως 1,0	(Δεν απαιτείται ετικέτα)	
II	0 ως 1,0	ΠΡΟΣΟΧΗ, Ακτινοβολία Laser – Μην κοιτάτε τη δέσμη (CAUTION, Laser Radiation – Do not stare into beam).	
IIIa	1,0 ως 5	ΠΡΟΣΟΧΗ, Ακτινοβολία Laser – Αποφύγετε έκθεση των ματιών στη δέσμη (CAUTION, Laser Radiation – Avoid Direct Eye Exposure to Beam).	
IIIb	5 ως 500	ΚΙΝΔΥΝΟΣ, Ακτινοβολία Laser – Αποφύγετε την έκθεση στη δέσμη (DANGER, Laser Radiation – Avoid Direct Exposure to Beam).	
IV	500 και άνω	ΚΙΝΔΥΝΟΣ, Ακτινοβολία Laser – Αποφύγετε την έκθεση των ματιών και του δέρματος στη δέσμη (DANGER, Laser Radiation – Avoid Eye or Skin Exposure to Beam).	

ΑΣΚΗΣΗ 1

Μελέτη παλμογράφου



α/α	Όνομα	Περιγραφή
►1	POWER ON/OFF	Διακόπτης λειτουργίας (τροφοδοσίας) του παλμογράφου. Η λειτουργία επιβεβαιώνεται από ενδεικτικό LED.
►2	INTENS	Ρυθμίζει τη φωτεινότητα της δέσμης στην οθόνη.
►3	TR	Περιστρέφει τη δέσμη ως προς το κέντρο της οθόνης για την οριζοντίωσή της. HF παρεμβάλλεται ένα φίλτρο υψηλών συχνοτήτων με συχνότητα μισής ισχύος 1kHz. LF παρεμβάλλεται ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων με συχνότητα αποκοπής 1kHz. LINE το σήμα σκανδαλισμού είναι το σήμα της τάσης του δικτύου (50Hz) και χρησιμοποιείται, όταν τα σήματα εισόδου σχετίζονται με το δίκτυο.
►4	FOCUS	Εστιάζει τη δέσμη πάνω στην οθόνη.
►5	X-MAG×10	Μεγεθύνει την κλίμακα χρόνου (οριζόντια) ×10.
►6	X-POS	Ρυθμίζει την οριζόντια θέση της δέσμης στην οθόνη.
►7	HOLD-OFF	Λεπτομερειακή ρύθμιση του νεκρού χρόνου μεταξύ δύο σαρώσεων της βάσης χρόνου.
►8	X-Y	Επιλέγει τη λειτουργία X-Y. Αποσυνδέει την εσωτερική γεννήτρια βάσης χρόνου και συνδέει το κανάλι Ι ή ΙΙ στην είσοδο του ενισχυτή X. Προσοχή: Ο φώσφορος καταστρέφεται χωρίς σήμα X!
►9	TR LED	Ενδεικτικό LED που ανάβει, όταν γίνεται σκανδαλισμός. Επιλέγει τον τρόπο σύζευξης του σκανδαλισμού. Ανάλογα με τον τρόπο σύζευξης, που επιλέγουμε, ενεργοποιείται εσωτερικά ένας κατάλληλος παλμός, για να ενεργοποιήσει τη γεννήτρια σάρωσης του παλμογράφου, ώστε το σήμα που εξετάζουμε να εμφανίζεται ακίνητο στην οθόνη.
	TRIG -AC	10Hz - 100MHz.
	TRIG -DC-	DC - 100MHz.
	TRIG -LF	DC - 1,5kHz.
	TRIG -TV	Σήμα βίντεο.
►10	TRIG LINE	50Hz.
	ALT	Επιλέγει την εναλλαγή σκανδαλισμού εναλλακτικά και των δυο καναλιών, χρησιμοποιείται σε λειτουργία DUAL.

► 11	SLOPE +/-	Επιλέγει σκανδαλισμό στο ανερχόμενο ή κατερχόμενο τμήμα παλμού.
► 12	TIME/DIV	Διακόπτης περιστροφικός 20 θέσεων για την επιλογή της βάσης χρόνου (time base). Ανάλογα σε ποια θέση έχει επιλεγεί ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται το σήμα που εξετάζουμε, για να κινηθεί κατά μήκος ενός τετραγώνου της οθόνης.
► 13	TIME/DIV	Μεταβλητός έλεγχος χρόνου. Ποτενσιόμετρο για συνεχή μεταβολή της βάσης χρόνου. Κανονικά πρέπει να βρίσκεται στη θέση CAL. Επιλέγει την περίοδο της πρωτογενούς τάσης και προσδιορίζει την κλίμακα του οριζόντιου άξονα της οθόνης του παλμογράφου.
► 14	EXT	Επιλέγει λειτουργία εξωτερικού σκανδαλισμού.
► 15	AT/NORM	Στην έξω θέση έχουμε αυτόματο peak σκανδαλισμό και στη μέσα θέση κανονικό. Ο σκανδαλισμός γίνεται με τη βοήθεια του ρυθμιστή του επιπέδου σκανδαλισμού. Στη θέση αυτή, όταν δεν υπάρχει συγχρονισμός, δεν εμφανίζεται σήμα στην οθόνη.
► 16	LEVEL	Στον κανονικό σκανδαλισμό NORM ρυθμίζει σε ποίο ύψος της κυματομορφής θα αρχίσει ο σκανδαλισμός.
► 17	TRIG. INP	Βύσμα BNC για εξωτερική πηγή σκανδαλισμού.
► 18	CAL -1kHz/1MHz	Επιλέγει τη συχνότητα τετραγωνικών παλμών.
► 19	CAL -0.2V-2V	Έξοδος τετραγωνικών παλμών.
► 20	COMP- TESTER	Βύσματα για την σύνδεση ακροδεκτών της συσκευής ελέγχου ηλεκτρονικών στοιχείων, π.χ. διόδων κ.λπ.
► 21	COMPONENT TESTER	Ενεργοποιεί το κύκλωμα του component tester. Μετατρέπει τον παλμογράφο σε όργανο ελέγχου ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Απεικονίζει την <i>i-V</i> χαρακτηριστική καμπύλη ηλεκτρικών στοιχείων.
► 22/38	Y-POS. I/II	Ρυθμίζει την κάθετη θέση του σήματος για το κανάλι I και II αντίστοιχα.
► 23/36	CH I/II	Σύζευξη εισόδου για καθένα από τα δυο κανάλια με βύσμα τύπου BNC.
► 24/37	INP- CH I/II	Βύσμα εισόδου για κανάλια I και II (παρουσιάζει 1MΩ/20pF).
► 25	INVERT CH I	Αναστρέφει την απεικόνιση του καναλιού I.
► 26/34	VOLT/DIV	Περιστροφικοί διακόπτες 12 θέσεων, για την ευαισθησία των ενισχυτών κατακόρυφης απόκλισης (2mV/cm - 10V/cm).
► 27/33	Μεταβλητός έλεγχος ενισχύσεως	Ποτενσιόμετρο για συνεχή μεταβολή του πλάτους. Όταν μετράμε το πλάτος του σήματος που εξετάζουμε, ο εσωτερικός διακόπτης πρέπει να είναι κλειδωμένος τέρμα δεξιά ή τέρμα αριστερά, δηλαδή όπου βρίσκεται η θέση CAL. Ο εξωτερικός διακόπτης ανάλογα με τη θέση που έχει επιλεγεί ορίζει την τάση που αντιστοιχεί σε κάθε τετράγωνο της οθόνης.
► 28	CH I/II - TRIG. I/II	Επιλέγει ποιο κανάλι από τα I ή II θα συγχρονίζεται με το σκανδαλισμό.
► 29	YMAG ×5	Μεγεθύνει τον κάθετο άξονα με συντελεστή ×5 αυξάνοντας την ευαισθησία των καναλιών έως 1mV/cm.
► 30	DUAL	Επιλέγει λειτουργία μόνο του ενός καναλιού ή και των δυο καναλιών.
► 31	ADD - CHOP	ADD δίνει το άθροισμα των κυματομορφών των δυο καναλιών ή τη διαφορά με INVERT. CHOP σε συχνότητες κάτω του 1kHz, όπου η πελεκημένη απεικόνιση είναι πιο κατάλληλη.
► 32/35	AC/DC/GND	DC: Απευθείας σύζευξη (χωρίς πυκνωτή). Επιλέγουμε, όταν εξετάζουμε συνεχή σήματα και στις χαμηλές συχνότητες όπου χρησιμοποιείται κανονικός σκανδαλισμός. AC: Σύζευξη μέσω πυκνωτή. Επιλέγουμε, όταν εξετάζουμε εναλλασσόμενα σήματα. GND: Γειωμένη είσοδος. Επιλέγουμε, όταν θέλουμε να δούμε πού βρίσκεται η στάθμη του μηδενός.

Πίνακας 1.1 – Επεξήγηση των διακοπών ρύθμισης στην πρόσωση ενός τυπικού παλμογράφου.

1.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

Παλμογράφος.

1.2 Απαραίτητες γνώσεις

1.2.1 Περιγραφή του παλμογράφου

Ο παλμογράφος (oscilloscope) είναι ένα από τα πιο χρήσιμα ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης ενός εργαστηρίου ηλεκτρονικών, γιατί παρέχει οπτική απεικόνιση των ηλεκτρικών σημάτων που μελετά. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε πολλούς τομείς της έρευνας και της τεχνολογίας. Χρησιμοποιείται για την παρατήρηση και τη μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών

ενός ηλεκτρονικού ή ηλεκτρικού κυκλώματος. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτά μεγέθη είναι:

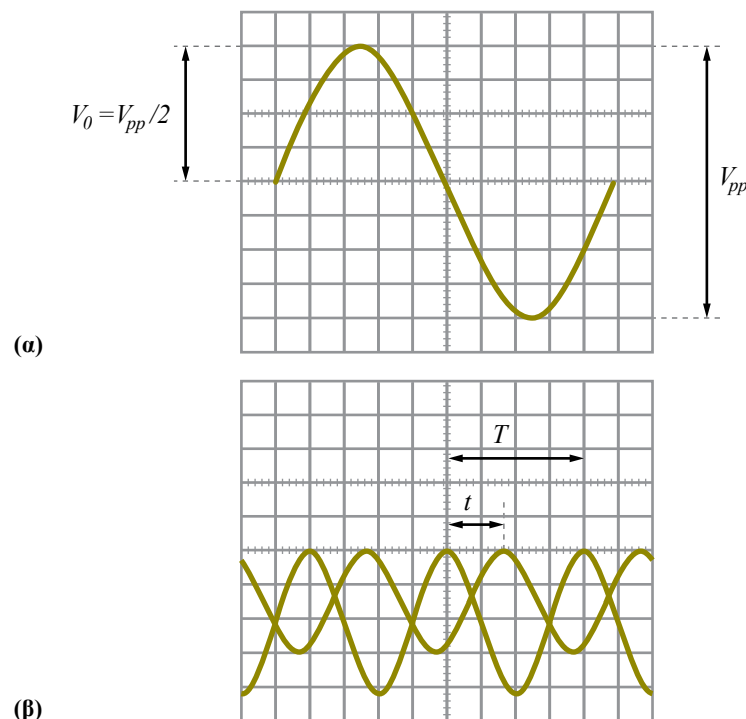
- Το σχήμα μιας κυματομορφής.
- Το χρόνο και ειδικότερα τη συχνότητα μιας κυματομορφής.
- Το πλάτος μιας κυματομορφής.
- Τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο κυματομορφών.

Τα περισσότερα όργανα που μετρούν τάσεις χρησιμοποιούν μηχανικά μέσα που έχουν μεγάλη αδράνεια και δεν μπορούν να παρακολουθήσουν γρήγορες μεταβολές και, για το λόγο αυτό, δε μετρούν στιγμιαίες τιμές τάσης, αλλά μέσες ή ενεργές τιμές. Αντίθετα, στον παλμογράφο δεν υπάρχουν μηχανικά κινούμενα μέρη. Το «κινητό» μέρος είναι η δέσμη των ηλεκτρονίων, που έχει αμελητέα «αδράνεια» και, γι' αυτό, είναι σε θέση να απεικονίζει γρήγορες μεταβολές της τάσης.

1.2.2 Η οθόνη του παλμογράφου

Στην οθόνη του παλμογράφου έχει σχεδιασθεί ένα πλέγμα που είναι διαιρεμένο σε τετράγωνα πλευράς 1cm. Το 1cm είναι διαιρεμένο σε 5 υποδιαίρεσεις. Άρα η μικρότερη υποδιαίρεση δηλώνει 0,2cm. Το κατακόρυφο μήκος του πλέγματος μετατρέπεται σε τάση (V, mV) πολλαπλασιάζοντας με την ένδειξη του συντελεστή τάσης VOLT/DIV ► 26/34. Το οριζόντιο μήκος του πλέγματος μετατρέπεται σε χρόνο (ms, μ s) πολλαπλασιάζοντας με την ένδειξη του συντελεστή χρόνου TIME/DIV ► 13. Όταν δεν έχετε εισάγει ηλεκτρικό σήμα στον παλμογράφο, στην οθόνη του πρέπει να φαίνεται μια οριζόντια φωτεινή γραμμή αναφοράς, κατά μήκος της οθόνης, που αναπαριστά τη μηδενική τάση, δηλαδή την τάση γείωσης. Αυτή η γραμμή μπορεί να μετακινηθεί σε οποιαδήποτε περιοχή της οθόνης με τα περιστροφικά κουμπιά X ► 6, Y position ► 22/38. Συνήθως την τοποθετείτε στη μέση της οθόνης όταν θέλετε να μελετήσετε εναλλασσόμενο σήμα, και στο κάτω μέρος της οθόνης για μελέτη θετικών συνεχών σημάτων. Όταν στην οθόνη σας απεικονίζεται μόνο μια φωτεινή κηλίδα, πιθανό να σημαίνει ότι πρέπει να απενεργοποιήσετε τη X-Y σύζευξη ► 8. Όταν στην οθόνη σας απεικονίζεται μέρος φωτεινής γραμμής πιθανό να σημαίνει ότι πρέπει να απενεργοποιήσετε την επιλογή TEST COMPONENT ► 20.

1.2.3 Μετρήσεις του πλάτους τάσης



Σχήμα 1.1 – (α) Μετρήσεις τάσης στην οθόνη του παλμογράφου, (β) Μέτρηση διαφοράς φάσης δύο σημάτων ίδιας περιόδου T στην οθόνη του παλμογράφου.

Γενικά, οι τιμές των εναλλασσόμενων δυναμικών στη μηχανική των ηλεκτρονικών, αναφέρονται σε ενεργές τιμές ($rms = \text{root mean square} = \text{ρίζα της μέσης τιμής}$).

Στις μετρήσεις με τον παλμογράφο μπορεί να μετρηθεί πάνω στο πλέγμα της οθόνης του παλμογράφου, στην κατακόρυφη διεύθυνση, η τάση από κορυφή σε κορυφή ($\text{peak to peak}, V_{pp}$). Αυτή αντιστοιχεί στην πραγματική διαφορά δυναμικού μεταξύ του μεγαλύτερου θετικού και του ελάχιστου αρνητικού σημείου της κυματομορφής.

Για τα ημιτονοειδή ηλεκτρικά σήματα ισχύει:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_p^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}} = \frac{V_{pp}}{2,83} = 0,707V_{pp} \quad (1.1)$$

Η σχέση μεταξύ των διαφορετικών εκφράσεων της τάσης δείχνονται στο σχήμα 1.1.α. Το μέτρο της τάσης είναι το γινόμενο του μήκους του πλέγματος DIV επί τον επιλεγμένο συντελεστή VOLTS/DIV ► 26/34.

1.2.4 Μετρήσεις χρόνου (περίοδος) και διαφοράς φάσης

Στις μετρήσεις με τον παλμογράφο μπορεί να μετρηθεί ο χρόνος πάνω στο πλέγμα της οθόνης, στην οριζόντια διεύθυνση. Η τιμή του χρόνου είναι το γινόμενο του μήκους του πλέγματος DIV επί τον επιλεγμένο συντελεστή χρόνου TIME/DIV ► 12, σχήμα 1.1.β.

Η διαφορά φάσης (phase difference) σε μοίρες υπολογίζεται από τις μετρήσεις χρόνου (t, T) από τη σχέση $\varphi = 2\pi t/T \text{ rad}$ ή:

$$\varphi = 360^\circ \frac{t}{T} \quad (1.2)$$

όπου t είναι η απόσταση μεταξύ του μεγίστου (ή ελαχίστου) του ενός σήματος και του άλλου και T η περίοδος των σημάτων (και τα δύο σήματα έχουν ίδια περίοδο). Για παράδειγμα, για μετρήσεις χρόνου $T = 4,0\text{DIV}$, $t = 1,6\text{DIV}$ τότε $\varphi = 144^\circ$ ή $\varphi = 2,5\text{rad}$.

1.2.5 Σύνδεση του παλμογράφου σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα

Η σύνδεση συνήθως γίνεται μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου που συνοδεύει τον παλμογράφο από τον κατασκευαστή. Η μια άκρη του ομοαξονικού καλωδίου φέρει βύσμα τύπου BNC και η άλλη άκρη του φέρει δύο ακροδέκτες. Η BNC υποδοχή συνδέεται στον παλμογράφο στην είσοδο του καναλιού I ή II. Ο ακροδέκτης της γείωσης έχει τη μορφή «δαγκάνας» και ο άλλος είναι μεταλλική ακίδα ή φέρει άγκιστρο που το γαντζώνουμε στο σημείο της μέτρησης. Αν οι ακροδέκτες είναι βύσματα τύπου μπανάνας, τότε η μια μπανάνα είναι μαύρη και η άλλη κόκκινη, για να ξεχωρίζουμε τη γείωση. Ο μαύρος ακροδέκτης μπανάνα συνδέεται πάντα στη γείωση (κοινό σημείο) του κυκλώματος. Ο κόκκινος συνδέεται στο σημείο από το οποίο θέλουμε να πάρουμε το ηλεκτρικό σήμα.

Εάν η σύνδεση γίνει λάθος, π.χ. ο κόκκινος ακροδέκτης συνδεθεί στη γείωση (κοινό σημείο) του κυκλώματος, δε θα μπορέσετε να δείτε το σήμα στην οθόνη του παλμογράφου.

1.2.6 Περιγραφή των εισόδων σήματος του παλμογράφου (κανάλια I και II)

Ο παλμογράφος έχει δύο εισόδους που ονομάζονται κανάλι Y1 ή CHI ► 24 και κανάλι Y2 ή CHII ► 37. Αυτές οι εισοδοί χρησιμοποιούνται και σαν X και Y στην X-Y σύζευξη ► 8. Επειδή η οθόνη είναι κοινή και για τις δύο εισόδους, μπορεί να απεικονισθούν και οι δύο εισοδοί ταυτόχρονα ενεργοποιώντας, το κουμπί DUAL ► 30, ή και ξεχωριστά, αν ενεργοποιηθεί το κουμπί CHI ή το κουμπί CHII.

Επιπλέον υπάρχει η είσοδος EXT ► 14. Είναι η είσοδος για εξωτερικό συγχρονισμό (External Triggering).

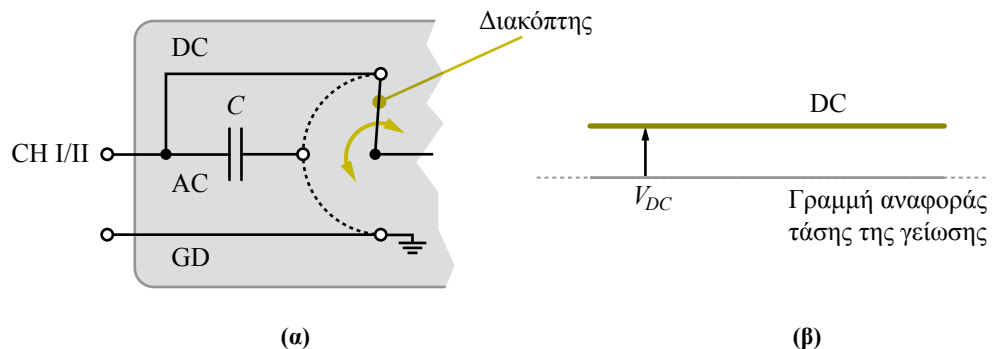
Ο παλμογράφος επιτρέπει συγχρόνως την οπτικοποίηση δύο διαφορετικών ηλεκτρικών σημάτων σε συνάρτηση με το χρόνο (εισάγονται από τις εισόδους Y1 ► 24 και Y2 ► 37, είσοδοι σύζευξης στη φωτογραφία του πάνελ του παλμογράφου) και τη μελέτη ενός ηλεκτρικού σήματος σε συνάρτηση με ένα άλλο (χρήση X-Y σύζευξης) ► 8.

1.2.7 Ρύθμιση των εισόδων ανάλογα με το είδος του σήματος που εισάγεται (σύζευξη AC, DC, GND)

Στην σύζευξη DC ► 23/36 επιτρέπεται η είσοδος σημάτων από 0 έως 10 MHz. Ο παλμογράφος τίθεται σε λειτουργία ενισχυτή DC τάσης (σύζευξη DC), μόνο όταν τα σήματα είναι σε πολύ χαμηλές συχνότητες ή όταν χρειάζεται η μέτρηση των συνεχών συνιστωσών του σήματος. Στις πολύ χαμηλές συχνότητες ($\approx 1,6\text{Hz}$), σε λογικά ή παλμικά σήματα, ή σε καθαρά DC σήματα, συστήνεται η DC σύζευξη. Κατά την DC σύζευξη απεικονίζονται και οι DC και οι συνιστώσες του υπό μελέτη σήματος.

Στην σύζευξη AC ένα φίλτρο πυκνωτή αποκόπτει τις συνεχείς συνιστώσες και εξασθενεί τις χαμηλές συχνότητες με αποτέλεσμα το σήμα να φαίνεται παραμορφωμένο. Γι' αυτό, μετρήσεις σημάτων με φάσμα που περιέχει χαμηλές συχνότητες γίνονται μόνο με DC σύζευξη. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.α, ο διακόπτης έχει και μια τρίτη θέση, που συνδέεται με τη γείωση. Η θέση αυτή χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της στάθμης μηδενός.

Στην σύζευξη GND ο κατακόρυφος έλεγχος, Y-POS δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η οριζόντια φωτεινή γραμμή του παλμογράφου σαν γραμμή αναφοράς της τάσης της γείωσης πριν από κάποια μέτρηση. Μπορεί να τοποθετηθεί κάτω ή πάνω (βλέπε σχήμα 1.2.β) από την κεντρική οριζόντια γραμμή της οθόνης, αντιστοιχώντας μετρήσεις θετικής ή αρνητικής τάσης σε σχέση με το δυναμικό της γείωσης.



Σχήμα 1.2 – (α) Τρόποι σύζευξης του παλμογράφου με την πηγή σήματος, (β) απεικόνιση DC τάσης.

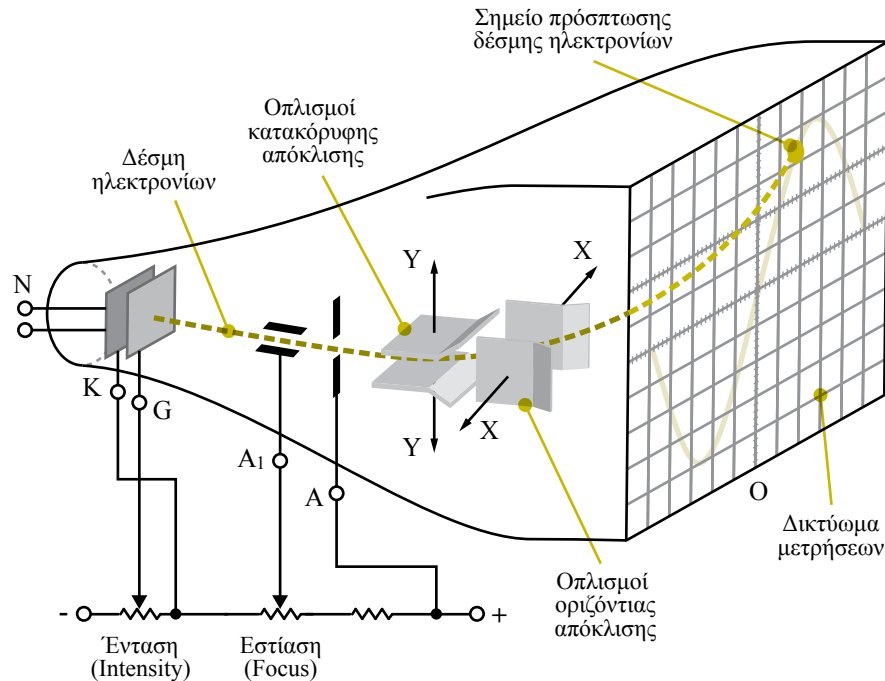
1.2.8 Περιγραφή της εσωτερικής λειτουργίας του παλμογράφου

Το κυριότερο εξάρτημα κάθε παλμογράφου είναι ο σωλήνας καθοδικών ακτίνων ή καθοδικός σωλήνας, που ως προς την αρχή λειτουργίας του μοιάζει με εκείνον της παλιού τύπου συσκευής τηλεόρασης (σχήμα 1.3). Αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα, ο οποίος στο ένα άκρο του έχει μία κάθοδο (K), ενώ κατά το άλλο άκρο του διευρύνεται, σχηματίζοντας χοάνη, και καταλήγει σε μία σχεδόν επίπεδη φθορίζουσα επιφάνεια, την οθόνη (O). Η παραγωγή των ηλεκτρονίων οφείλεται στη θερμιονική εκπομπή της καθόδου (K), που θερμαίνεται από το νήμα (N). Τα ηλεκτρόνια αυτά έλκονται από την άνοδο (A), που έχει σχήμα κυλίνδρου ή δίσκου, με μια μικρή οπή στη μέση, και βρίσκεται σε δυναμικό θετικό κατά μερικά kVolt ως προς την κάθοδο.

Αμέσως μετά την κάθοδο υπάρχει ένα μεταλλικό πλέγμα (G), σε μεταβλητό αρνητικό δυναμικό ως προς την κάθοδο, που αφενός συγκεντρώνει τα ηλεκτρόνια προς το κέντρο της ανόδου και αφετέρου, με κατάλληλη ρύθμιση του αρνητικού δυναμικού, ελέγχει την ένταση της ηλεκτρονικής δέσμης. Μια βοηθητική άνοδος (A_1) μεταξύ ανόδου και καθόδου βρίσκεται σε ενδιάμεσο θετικό μεταβλητό δυναμικό και με τη ρύθμιση του δυναμικού αυτού επιτυγχάνεται η εστίαση της δέσμης πάνω στην οθόνη.

Όσα ηλεκτρόνια περάσουν μέσα από την οπή της ανόδου σχηματίζουν μία λεπτή δέσμη, η οποία, όταν συναντήσει την οθόνη, διεγείρει το φθορίζον υλικό της με αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας φωτεινής κηλίδας.

Μετά την άνοδο υπάρχει ένα ζευγάρι από οριζόντια πλακίδια ή πυκνωτές (YY) και ένα ζευγάρι κατακόρυφα πλακίδια ή πυκνωτές (XX), που είναι τοποθετημένα έτσι, ώστε η δέσμη των ηλεκτρονίων να περνάει ανάμεσά τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3 – Προοπτική αναπαράσταση του καθοδικού σωλήνα του παλμογράφου. K: Κάθοδος, N: Θερμαινόμενο νήμα, G: Αρνητικό πλέγμα, A₁: Βοηθητική άνοδος εστίασης, A: Άνοδος, X, Y, πυκνωτές απόκλισης, O: Οθόνη. Το ποντεσιόμετρο «Ένταση (intensity)» ρυθμίζει την ένταση της φωτεινής κηλίδας και το ποντεσιόμετρο «Εστίαση (focus)» ρυθμίζει την εστίαση της.

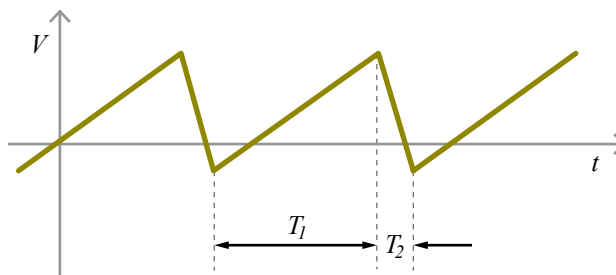
Αν μεταξύ των πλακιδίων XX εφαρμοστεί μία συνεχής διαφορά δυναμικού, το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται είναι οριζόντιο και προκαλεί μία αντίστοιχη οριζόντια απόκλιση της κηλίδας πάνω στην οθόνη, ανάλογη της τάσης που εφαρμόζεται στα πλακίδια XX. Αντίστοιχα, εφαρμογή μιας συνεχούς διαφοράς δυναμικού μεταξύ των πλακιδίων YY, προξενεί μία κατακόρυφη απόκλιση της ηλεκτρονικής δέσμης και, συνεπώς, και της φωτεινής κηλίδας, και πάλι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης. Επομένως, αν σχεδιάσουμε μία κατάλληλη κατακόρυφη (ή οριζόντια) κλίμακα πάνω στην οθόνη, θα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα πλακίδια YY (ή XX) του παλμογράφου για τη μέτρηση τάσεων (βολτόμετρο).

Προφανές είναι ότι, αν στα πλακίδια XX και YY εφαρμοστεί μία εναλλασσόμενη τάση, η φωτεινή κηλίδα θα μετακινείται αντίστοιχα οριζόντια και κατακόρυφα, ακολουθώντας πιστά τις αυξομειώσεις της τάσης. Όταν η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης είναι μικρή, το μάτι μας προλαβαίνει να παρατηρήσει την ταλάντωση της κηλίδας. Όταν όμως η συχνότητα είναι μεγάλη (μεγαλύτερη των 10Hz), δεν προφταίνουμε να δούμε τις διαδοχικές θέσεις της κηλίδας και το μόνο που θα βλέπουμε είναι μία οριζόντια και μία κατακόρυφη γραμμή.

Η κυματομορφή (τάση), που θέλουμε να μελετήσουμε, εφαρμόζεται στα πλακίδια YY, ενώ στα πλακίδια XX εφαρμόζουμε σάρωση (δηλαδή μια πριονωτή τάση), για να αναπτύξουμε στο χρόνο την κυματομορφή της τάσης που εφαρμόζεται στα πλακίδια YY.

Η διαδικασία σταθεροποίησης της εικόνας λέγεται σκανδαλισμός (triggering). Το κύκλωμα σκανδαλισμού έχει την ιδιότητα να παράγει παλμό λεπτού εύρους, όταν το σήμα εισόδου γίνει μεγαλύτερο από το επίπεδο τάσης σκανδαλισμού (σκανδαλισμός με θετική κλίση), ή μικρότερο (σκανδαλισμός με αρνητική κλίση). Μόλις παραχθεί το σήμα σκανδαλισμού, δίνεται εντολή στη γεννήτρια πριονωτής τάσης να αρχίσει να παράγει το σήμα της. Με αυτόν

τον τρόπο, τα δύο σήματα αποκτούν σχεδόν σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ τους, δηλαδή συγχρονίζονται. Η περίοδος της γεννήτριας πριονωτής τάσης ρυθμίζεται εξωτερικά από το χειριστή και, με αυτόν τον τρόπο, καθορίζεται η χρονική κλίμακα του οριζόντιου άξονα (ρύθμιση βάσης χρόνου).



Σχήμα 1.4 – Πριονωτή τάση, όπου T_1 περίοδος ανόδου και T_2 περίοδος καθόδου ($T_1 \gg T_2$).

Όλοι οι παλμογράφοι περιέχουν εσωτερικά μία ηλεκτρονική διάταξη που παράγει πριονωτή τάση (σχήμα 1.4).

Όταν εφαρμοστεί η πριονωτή τάση στα πλακίδια XX του καθοδικού σωλήνα, το ηλεκτρικό πεδίο στο χώρο μεταξύ των πλακιδίων μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο, οπότε η κηλίδα μετακινείται οριζόντια προς τα δεξιά πάνω στην οθόνη και, επειδή η μετακίνηση είναι ανάλογη της τάσης και η τάση ανάλογη του χρόνου, στην πραγματικότητα η μετακίνηση πάνω στην οθόνη είναι ανάλογη του χρόνου.

Η μετακίνηση της κηλίδας γίνεται συνεπώς με σταθερή ταχύτητα σε όλη τη διάρκεια T της ανόδου της πριονωτής τάσης. Μετά όμως από χρόνο μιας περιόδου η κηλίδα ξαναεμφανίζεται αμέσως αριστερά ($T_2 \gg T_1$) στην αρχική της θέση, για να συνεχίσει και πάλι την οριζόντια κίνησή τη προς τα δεξιά.

1.3 Πείραμα 1

1.3.1 Σκοπός

- Αναγνώριση των κουμπιών ελέγχου του παλμογράφου και μετρήσεις τάσης και χρόνου.
- Μέτρηση του πλάτους και της περιόδου εναλλασσόμενου (AC) ημιτονοειδούς σήματος.

1.3.2 Απαραίτητα όργανα και υλικά



1. Παλμογράφος.
2. Γεννήτρια AC/DC σήματος.
3. Κατάλληλα καλώδια για την εισαγωγή των σημάτων στον παλμογράφο.

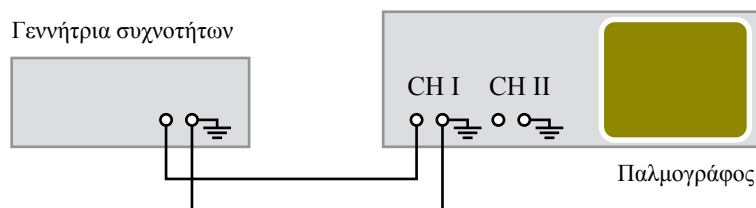
1.3.3 Εκτέλεση

1. Αναγνώριση του panel ελέγχου του παλμογράφου. Ο παλμογράφος είναι κλειστός (power off). Αναγνωρίστε στον παλμογράφο τα κουμπιά ελέγχου, όπως εξηγούνται στην αρχή της άσκησης (εικόνα και πίνακας 1.1).

Για να δείτε στην οθόνη του παλμογράφου το ηλεκτρικό σήμα που δείχνει τη στάθμη της μηδενικής τάσης στον παλμογράφο, πραγματοποιείτε τους παρακάτω χειρισμούς:

- Ανοίξτε τον παλμογράφο (power on) ► 1.
- Γυρίστε το κουμπί intensity ► 2 στο μέσον της διαδρομής.
- Γυρίστε το κουμπί focus ► 4 στο μέσον της διαδρομής.
- Τοποθετήστε τους διακόπτες AC-GND-DC ► 23/36 στη θέση AC.
- Απενεργοποιήστε το διακόπτη TrigExt. ► 14 και επιλέξτε με τον AT/NORM ► 15 κανονικό σκανδαλισμό.
- Τοποθετήστε το ρυθμιστή time/div ► 13 στη θέση π.χ. 5ms.
- Τοποθετήστε το ρυθμιστή volt/div ► 26/34 στη θέση π.χ. 0,2V/s.

2. Απεικόνιση ηλεκτρικού σήματος στην οθόνη του παλμογράφου. Για να πειραματιστείτε στην απεικόνιση ενός AC σήματος στον παλμογράφο, χρησιμοποιήστε σαν σήμα εισόδου του παλμογράφου την έξοδο μιας γεννήτριας AC, π.χ. ημιτονοειδούς σήματος. Το σήμα το εισάγετε σε ένα από τα δύο κανάλια του παλμογράφου, π.χ. στο κανάλι I, χρησιμοποιώντας κατάλληλο καλώδιο. Επειδή οι εισοδοί του παλμογράφου είναι βύσματα τύπου BNC, θα πρέπει και τα καλώδια που οδηγούν τα σήματα στις εισόδους του παλμογράφου να καταλήγουν σε βύσματα τύπου BNC. Αν τα καλώδια καταλήγουν σε βύσμα άλλου τύπου, π.χ. «μπανάνας», χρειάζεται ένας μετατροπέας μπανάνας σε BNC. Επιλέξτε να απεικονίζεται στην οθόνη μόνο το κανάλι που έχετε εισάγει το προς μελέτη σήμα. Επιλέξτε από τη συσκευή της γεννήτριας του ημιτονοειδούς σήματος μια τυχαία συχνότητα, π.χ. της τάξης 1kHz. (Η συχνότητα επιλέγεται από το panel της γεννήτριας από τα κουμπιά ελέγχου της με την ένδειξη Frequency ενώ το πλάτος της από το κουμπί με την ένδειξη Amplitude).
3. Για να δείτε καλή εικόνα του σήματος εισόδου στην οθόνη, θα πρέπει να ρυθμίσετε επιπλέον τη φωτεινότητα και την εστίαση της φωτεινής δέσμης, δηλαδή INTENS. ► 2 και FOCUS ► 4. Επίσης τοποθετήστε το σήμα στην οθόνη σας σε βολική θέση (κουμπιά X-POS ► 6 και Y-POS ► 22) και να φροντίστε να απεικονισθούν δύο περίοδοι του σήματος στην οθόνη. Για να το πετύχετε, επιλέξτε κατάλληλη κλίμακα VOLTS/DIV και TIME/DIV. Παρατηρήστε τις αλλαγές του σήματος όταν αλλάζετε την ενίσχυση, με τα κουμπιά ► 13/33 σε διαφορετικές θέσεις. Ο μεταβλητός έλεγχος ενίσχυσης να βρίσκεται στη θέση CAL. Παρατηρήστε τις αλλαγές του σήματος, όταν αλλάζετε τους περιστροφικούς διακόπτες τάσης και χρόνου ► 26/12).
4. Από το panel της AC γεννήτριας του εργαστηρίου αλλάξτε το σήμα εισόδου. Επιλέξτε σήμα διαφορετικής μορφής, π.χ. τετραγωνικό σήμα. Οι συχνότητες που θα επιλέξετε διαδοχικά να είναι διαφορετικής τάξης, π.χ. 10kHz, 100kHz, 1MHz, 50Hz. Το πλάτος (Amplitude) να το διατηρήσετε ίδιο. Σκοπός σας είναι να απεικονίσετε το σήμα σας όσο καλύτερα γίνεται, ώστε να είναι εφικτή η μέτρησή του.
5. Ρυθμίστε τη γεννήτρια συχνοτήτων, ώστε να σας παρέχει ημιτονοειδές σήμα με συχνότητα $f=2\text{kHz}$ και τυχαίο πλάτος V_0 .
6. Συνδέστε την έξοδο της γεννήτριας συχνοτήτων με το κανάλι I ή II του παλμογράφου (σχήμα 1.5) και ρυθμίστε τον παλμογράφο έτσι ώστε να παρατηρείτε καθαρά το ημιτονοειδές σήμα στην οθόνη του.



Σχήμα 1.5 – Εισαγωγή ηλεκτρικού σήματος στο κανάλι I του παλμογράφου.

- Μετρήστε το πλάτος V_0 και την περίοδο T του σήματος. $V_0 = \dots$, V, $T = \dots$ s.
- Μετρήστε στα άκρα της εξόδου της γεννήτριας συχνοτήτων με το πολύμετρο (ως βολτόμετρο) την ενεργή τιμή V_{rms} της τάσης (πλάτους) του σήματος. $V_{rms} = \dots$ V.

1.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

- Από τη σχέση $f = \frac{1}{T}$ (από την T που μετρήσατε) υπολογίστε τη συχνότητα f .
- Συγκρίνετε την τιμή της συχνότητας f που υπολογίσατε με αυτήν των 2000Hz.
- Από τη σχέση $V_{rms} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$ (από την V_0 που μετρήσατε) υπολογίστε την ενεργή τιμή του

πλάτους V_{rms} .

- Συγκρίνετε την ενεργή τιμή του πλάτους V_{rms} που υπολογίσατε με αυτήν που μετρήσατε με το πολύμετρο.
- Από τη σχέση $\omega = 2\pi f$ υπολογίστε γωνιακή συχνότητα ω του σήματος σας. $\omega = \dots$ rad/s.

Από τη σχέση $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$ γράψτε την εξίσωση που μας δίνει το πλάτος του συγκεκριμένου σήματος της γεννήτριας συχνοτήτων για κάθε χρονική στιγμή t . $V(t) = \dots$ V.

1.4 Πείραμα 2

1.4.1 Σκοπός

Μέτρηση του πλάτους συνεχούς (DC) ηλεκτρικού σήματος.

1.4.2 Απαραίτητα όργανα και υλικά



- Παλμογράφος.
- Γεννήτρια DC σήματος.
- Κατάλληλα καλώδια για την εισαγωγή σημάτων στον παλμογράφο.

1.4.3 Εκτέλεση

Για να πειραματιστείτε στην απεικόνιση ενός DC ηλεκτρικού σήματος, θέστε τη συσκευή της γεννήτριας σε DC λειτουργία (αν έχει αυτή τη δυνατότητα) ή χρησιμοποιήστε την έξοδο ενός DC τροφοδοτικού σαν είσοδο σε ένα από τα κανάλια του παλμογράφου, π.χ. στο κανάλι II ► 24 και επιλέξτε στην οθόνη σας να απεικονίζεται μόνο αυτό το κανάλι.

Επιλέξτε να παρατηρήσετε τη μηδενική τάση αναφοράς (σύζευξη GND ► 36) και να τη μετακινήσετε στη μέση του πλέγματος της οθόνης (Y-POS ► 38).

Να απεικονίσετε το DC σήμα (σύζευξη DC ►32). Παρατηρήστε τις αλλαγές του σήματος, όταν αλλάζετε τα control ενίσχυσης (►27/33) σε διαφορετικές θέσεις. Όταν κάνετε μετρήσεις, τα control ενίσχυσης πρέπει να βρίσκονται στη θέση CAL. Παρατηρήστε τις αλλαγές του σήματος, όταν αλλάζετε τους περιστροφικούς διακόπτες τάσης και χρόνου ►34/12.

Να μετρήσετε στην οθόνη του παλμογράφου την τάση ενός DC σήματος, ως το γινόμενο της απόστασης μεταξύ της μηδενικής τάσης GND και της ζητούμενης τάσης, επί τον επιλεγμένο συντελεστή VOLTS/DIV ►26.

1.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων

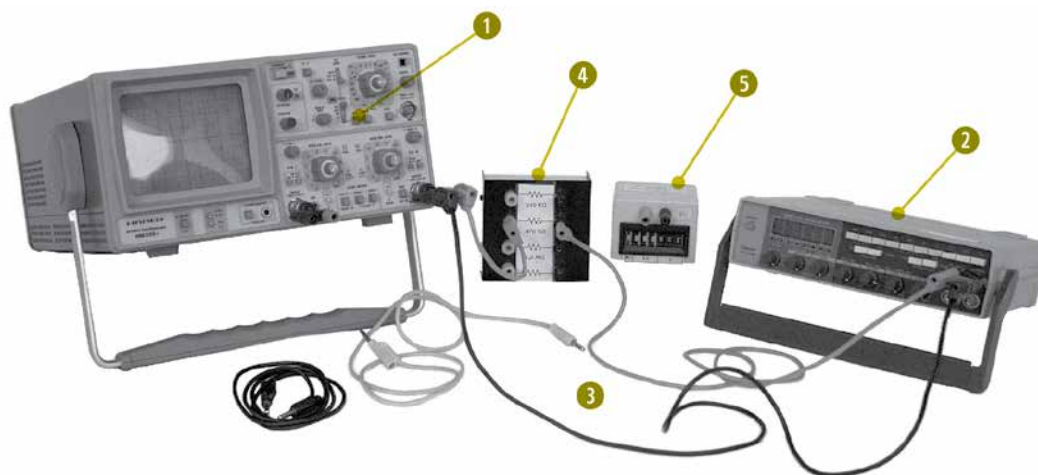
Υπολογίστε το πλάτος V_0 (τάση) του σήματος. $V_0 = \dots V$.

1.5 Πείραμα 3

1.5.1 Σκοπός

Μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης του παλμογράφου με τη μέθοδο του διαιρέτη τάσης (νόμος του Ohm).

1.5.2 Απαραίτητα όργανα και υλικά



1. Παλμογράφος.
2. Γεννήτρια AC σήματος.
3. Κατάλληλα καλώδια για την εισαγωγή των σημάτων στον παλμογράφο.
4. Κιβώτιο αντιστάσεων από 470kΩ έως 10MΩ.
5. Κιβώτιο πυκνωτών.

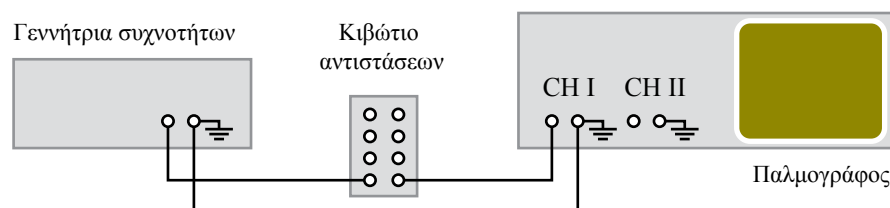
1.5.3 Θεωρία

Η εμπέδιση (σύνθετη αντίσταση) της εισόδου ενός παλμογράφου, όπως σε όλους τους ενισχυτές, δεν είναι άπειρη. Μπορεί να θεωρηθεί ότι η εμπέδιση της εισόδου αποτελείται από μια αντίσταση R_e (της τάξης των MΩ) παράλληλη με ένα πυκνωτή C (της τάξης pF). Σε χαμηλές συχνότητες, η εμπέδιση της εισόδου περιορίζεται στην αντίσταση R_e .

1.5.4 Εκτέλεση

1. Το κύκλωμα που συναρμολογείται δείχνεται στο σχήμα 1.6. Είναι μια κλασσική συνδεσμολογία που επιτρέπει τον υπολογισμό της εισόδου ενός ενισχυτή. Η έξοδος της ηλεκτρικής γεννήτριας εισάγεται στην μια είσοδο του παλμογράφου, π.χ. στην Y1 (κανάλι I) και το πλάτος της ταλάντωσης παρατηρείται στην οθόνη του παλμογράφου. **Προσοχή! Η γείωση της εισόδου του παλμογράφου να συνδεθεί με τη γείωση της γεννήτριας.**

2. Ρυθμίστε τη γεννήτρια συχνοτήτων, ώστε να σας παρέχει ημιτονοειδές σήμα με μια χαμηλή συχνότητα, π.χ. 1kHz (για την οποία η χωρητικότητα της εισόδου είναι αμελητέα) και τυχαίο πλάτος V_θ .



Σχήμα 1.6 – Μέτρηση της αντίστασης εισόδου του παλμογράφου. Ο παλμογράφος συνδέεται σε σειρά με γνωστή ωμική αντίσταση (από το κουτί αντιστάσεων).

3. Συνδέστε την έξοδο της γεννήτριας συχνοτήτων με το κανάλι I ή II του παλμογράφου (όπως στο σχήμα 1.5) και ρυθμίστε τον παλμογράφο έτσι ώστε να παρατηρείτε καθαρά το ημιτονοειδές σήμα στην οθόνη του.
4. Μετρήστε το πλάτος V_θ (τάση) του σήματος, όταν η ωμική αντίσταση $R=0\Omega$. Τότε η τάση της πηγής ισούται με την τάση στα άκρα παλμογράφου. $V_\theta = \dots V$.
5. Συνδέστε σε σειρά με τον παλμογράφο με γνωστή ωμική αντίσταση R (επιλέγετε από το κιβώτιο γνωστών αντιστάσεων, όπως στο σχήμα 1.6).
6. Ενώ παρατηρείτε συνεχώς την τάση στον παλμογράφο, επιλέξτε διαφορετικές τιμές αντιστάσεων μέχρι η τάση στον παλμογράφο να γίνει η μισή της αρχικής (όταν δεν είχατε συνδέσει ωμική αντίσταση). Μετρήστε την $V'_\theta = V_\theta/2 = \dots V$.

1.5.5 Επεξεργασία μετρήσεων

Όταν η τάση της γεννήτριας έχει μοιραστεί στα άκρα παλμογράφου και της εξωτερικής ωμικής αντίστασης, τότε η τιμή της εξωτερικής αντίστασης R που έχετε συνδέσει σε σειρά ισούται με την αντίσταση εισόδου του παλμογράφου R_e και ισχύει, $R=R_e$. Μετρήστε την $R_e = \dots \Omega$.

Στο πείραμα αυτό μπορείτε να χρησιμοποιήσετε αντί AC τάση και συνεχή (DC) τάση. Με το εναλλασσόμενο παρατηρείτε ευκολότερα τη μεταβολή της τάσης στον παλμογράφο;

1.6 Πείραμα 4

1.6.1 Σκοπός

Μέτρηση της χωρητικότητας του παλμογράφου με τη μέθοδο της μέτρησης διαφοράς φάσης.

1.6.2 Απαραίτητα όργανα και υλικά

Βλέπε πείραμα 3.

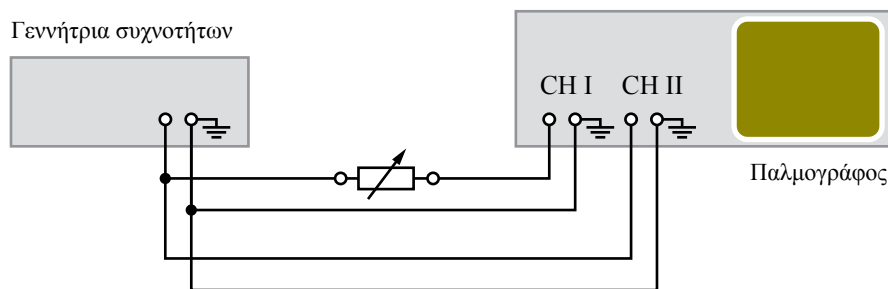
Προσοχή! Στις ηλεκτρικές συνδέσεις χρησιμοποιούνται κοντά ομοαξονικά καλώδια, για να μη δημιουργούνται παράσιτα χωρητικότητας, που μεγαλώνουν τη χωρητικότητα της εισόδου του παλμογράφου.

1.6.3 Θεωρία

Βλέπε πείραμα 3.

1.6.4 Εκτέλεση

Η συνδεσμολογία για τον υπολογισμό της εσωτερικής χωρητικότητας του παλμογράφου είναι ίδια με αυτήν για τη μέτρηση της ωμικής αντίστασης του παλμογράφου, με τη μόνη διαφορά ότι επιπλέον στο κανάλι II του παλμογράφου εισάγεται η τάση της γεννήτριας. Βλέπε συνδεσμολογία σχήματος 1.7. Το κανάλι I ρυθμίζεται σε DC σύζευξη, το κανάλι II σε AC σύζευξη.



Σχήμα 1.7 – Συνδεσμολογία μέτρησης χωρητικότητας παλμογράφου. Το κανάλι I ρυθμίζεται σε DC σύζευξη, το κανάλι II σε AC σύζευξη. Η τάση της γεννήτριας εισάγεται και στα δύο κανάλια.

Επιλέξτε στη μεταβλητή αντίσταση R την τιμή της εσωτερικής αντίστασης του παλμογράφου R_e . Η διαφορά φάσης φ μεταξύ των εισόδων CH I και CH II υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tan \varphi = -\frac{RC\omega}{1 + \frac{R}{R_e}} = -\frac{R_e C \omega}{2} \quad (1.3)$$

για $R=R_e$.

Χρησιμοποιήστε για συχνότητα π.χ. 10kHz και μετρήστε στην οθόνη του παλμογράφου τους χρόνους T και t , βλέπε. σχήμα 1.1.β.

1.6.5 Επεξεργασία μετρήσεων

Από τη σχέση (1.3) υπολογίστε τη χωρητικότητα C της εισόδου του παλμογράφου.

1.7 Πείραμα 5

1.7.1 Σκοπός

Μέτρηση διαφοράς φάσης δύο σημάτων ίδιας συχνότητας.

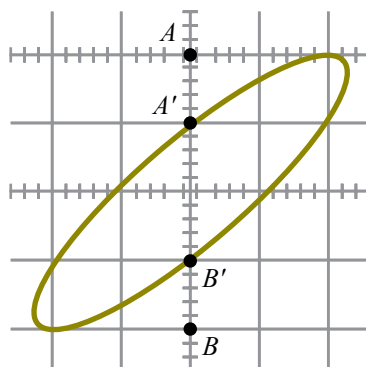
1.7.2 Απαραίτητα όργανα και υλικά

Βλέπε πείραμα 3.

1.7.3 Θεωρία

Το μέτρο της διαφοράς φάσης υπολογίζεται από τη σχέση (1.2), βλέπε Σχήμα 1.1.β.

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης είναι τα σχήματα Lissajous. Τα δύο υπό μελέτη σήματα εισάγονται στα δύο κανάλια του παλμογράφου. Ο παλμογράφος τίθεται σε σύζευξη X-Y ► 8 για να παρατηρηθεί το σχήμα Lissajous, βλέπε σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8 – Μέτρηση της διαφοράς φάσης με τη μέθοδο Lissajous.

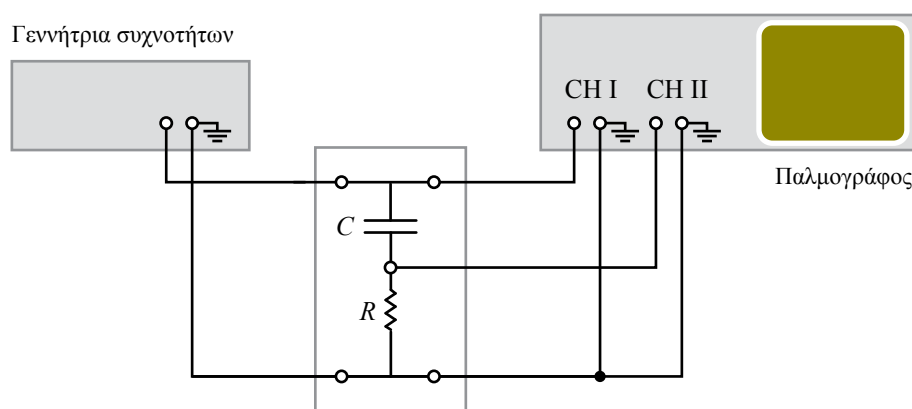
Η γωνία φ δίνεται από τη σχέση:

$$\sin \varphi = \frac{A'B'}{AB} \quad (1.4)$$

Αυτή η μέθοδος είναι πιο ευαίσθητη από την προηγούμενη.

1.7.4 Εκτέλεση

1. Δημιουργήστε δύο ηλεκτρικά σήματα ίδιας περιόδου (συχνότητας) με διαφορά φάσης, κατασκευάζοντας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα RC στη σειρά με γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης, βλέπε σχήμα 1.9. Οι τάσεις V_R και V_{R-C} του κυκλώματος του σχήματος παρουσιάζουν διαφορά φάσης.
2. Εισάγετε τα σήματα διαφορετικής φάσης V_R και V_{R-C} στα δύο κανάλια του παλμογράφου.
3. Να παρατηρήσετε και τα δύο σήματα μαζί (λειτουργία DUAL). Από την παρατήρηση μπορεί κάποιος να δει ποιο σήμα προηγείται του άλλου και να ορίσει το πρόσημο της διαφοράς φάσης, βλέπε σχήμα 1.1.β.
4. Να μετρηθεί η διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων V_R και V_{R-C} (τάση στα άκρα της γεννήτριας) της συνδεσμολογίας στο σχήμα 1.9. Προσέξτε η γείωση (GND) του παλμογράφου να είναι συνδεδεμένη με τη γείωση της γεννήτριας χωρίς να έχει παρεμβληθεί κάποιο στοιχείο μεταξύ τους. Σε αντίθετη περίπτωση, ό,τι στοιχείο συνδεθεί ενδιάμεσα των δύο γειώσεων, βραχυκυκλώνεται και είναι σαν να μη υπάρχει στο κύκλωμα. Αυτό συμβαίνει, διότι οι δύο συσκευές (παλμογράφος και γεννήτρια) επικοινωνούν μεταξύ τους από τις γειώσεις τους μέσω της Γης (το φως της κάθε συσκευής συνδέεται με τη γείωση της πρίζας που είναι κοινή για όλες τις πρίζες του κτιρίου).
5. Απεικονίστε σε χαρτί μιλιμετρέ τα σχήματα που παρατηρήσατε.
6. Θέστε τον παλμογράφο σε X-Y λειτουργία, για να δημιουργηθεί το σχήμα Lissajous. Κάντε τις απαιτούμενες μετρήσεις για τον υπολογισμό της διαφοράς φάσης φ . Απεικονίστε σε χαρτί μιλιμετρέ την εικόνα Lissajous.



Σχήμα 1.9 – Κύκλωμα R-C στη σειρά για τη δημιουργία και την παρατήρηση δύο κυματομορφών ίδιας συχνότητας και διαφορετικής φάσης. Ενδεικτικές τιμές: $R=6,8k\Omega$, $C=0,05\mu F$.

1.7.5 Επεξεργασία μετρήσεων

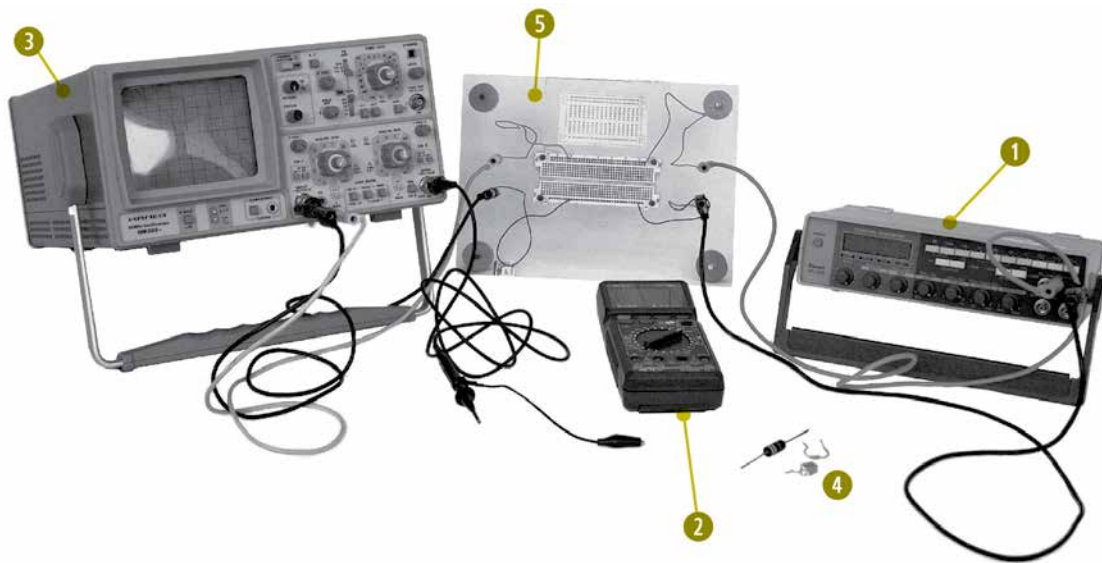
Από τις παραπάνω μετρήσεις να υπολογίσετε τη διαφορά φάσης των δύο σημάτων. Να συγκρίνετε τις τιμές για τις διαφορετικές μεθόδους.

1.8 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] L. Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale: L'électricité*, vol. 4. Pierron, 1996.
- [2] *Manual Oscilloscope HM 303-4*, HAMEG Instruments, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München, Germany, 1995.
- [3] M. Nelkon and P. Parker, "Chapter 20: Electrons: Motion in Fields, The Cathode-Ray Oscilloscope," in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 778-783.

ΑΣΚΗΣΗ 2

Συντονισμός RLC σε σειρά



2.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Γεννήτρια ημιτονικών σημάτων.
2. Πολύμετρο.
3. Παλμογράφος.
4. Ηλεκτρικά στοιχεία όπως: Πυκνωτής C , π.χ. $1\mu\text{F}$ (μη ηλεκτρολυτικός, δηλαδή χωρίς πολικότητα), Πηνίο L , π.χ. 3mH , ωμικές αντιστάσεις R , π.χ. 180Ω , 10Ω .
5. Καλώδια για τις συνδέσεις και πλακέτα για εύκολη συνδεσμολογία (breadboard).

2.2 Απαραίτητες γνώσεις

Εναλλασσόμενο ηλεκτρικό σήμα, διαφορά φάσης, σύνθετη αντίσταση κυκλώματος, φανταστική ή άεργη αντίσταση, ωμική αντίσταση, πηνίο, αυτεπαγωγή, πυκνωτής, συντονισμός, πραγματική και άεργη ισχύς, συντελεστής ισχύος.

2.3 Πείραμα 1

2.3.1 Σκοπός

Εξοικείωση με τις συσκευές του πειράματος.

2.3.2 Εκτέλεση

1. Αναγνωρίστε στον πάγκο σας τις συσκευές (γεννήτρια, παλμογράφο και πολύμετρο). Οι συσκευές της γεννήτριας και του παλμογράφου παίρνουν ρεύμα από το ίδιο δίκτυο. Γι' αυτό επικοινωνούν μέσω της γείωσης της πρίζας.
2. Θέστε το πολύμετρο σε λειτουργία ωμόμετρου και μετρήστε με το πολύμετρο την ωμική αντίσταση του πηνίου και των υπόλοιπων ωμικών αντιστάσεων που έχετε στον πάγκο εργασίας σας.
3. Ανοίξτε (power on) τη γεννήτρια ηλεκτρικού σήματος και επιλέξτε να δίνει στην έξοδό της ημιτονοειδή τάση. Δοκιμάστε να ρυθμίσετε τη συχνότητα και το πλάτος της τάσης. Για παράδειγμα, επιλέξτε συχνότητα 1kHz και τυχαία τιμή τάσης.
4. Ανοίξτε (power on) τον παλμογράφο. Θέστε τα κανάλια I και II σε σύζευξη GND και παρατηρήστε τη φωτεινή οριζόντια γραμμή στην οθόνη του παλμογράφου. Ρυθμίστε έτσι ώστε

να έχετε καλή φωτεινότητα και εστίαση στην οθόνη. Η φωτεινή οριζόντια γραμμή δείχνει πού βρίσκεται η μηδενική τάση πάνω στην οθόνη. Μετακινήστε την οριζόντια γραμμή (γείωση) στο κέντρο της οθόνης. Τέλος, θέσετε τα κανάλια I και II σε σύζευξη AC (Alternative Current).

- Εισάγετε την έξοδο της γεννήτριας (output) με την είσοδο του παλμογράφου, σε ένα από τα δύο κανάλια που διαθέτει. Παρατηρήστε στην οθόνη την εμφάνιση του σήματος ημιτονοειδούς μορφής και μετρήστε την τάση (κατακόρυφη απόσταση από κορυφή σε κορυφή, $V_{\text{peak-peak}} = \dots$) καθώς και την περίοδο (οριζόντια απόσταση από κορυφή σε κορυφή, $T = \dots$).

Επιβεβαιώστε από τη σχέση $f = 1/T$ την τιμή της συχνότητας που δίνει η γεννήτρια.

- Θέστε το πολύμετρο σε λειτουργία βολτόμετρου και μετρήστε την τάση εξόδου της γεννήτριας ($V_{\text{πολύμετρου}} = \dots$). Συγκρίνετε την τιμή $V_{\text{πολύμετρου}}$ με αυτή που διαβάζετε στον παλμογράφο, και επαληθεύστε την:

$$V_{rms} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (2.1)$$

2.4 Πείραμα 2

2.4.1 Σκοπός

Μέτρηση του συντελεστή αυτεπαγωγής $L(H)$ του πηνίου, υπολογισμός της άεργης αντίστασης $X_L(\Omega)$ πηνίου και υπολογισμός της άεργης ισχύος $Q_L(VAR)$ του πηνίου.

2.4.2 Θεωρία

2.4.2.1 Γενικά

Η **στιγμιαία τιμή** ενός σήματος ημιτονοειδούς μορφής περιγράφεται από την εξίσωση:

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

όπου ω η γωνιακή συχνότητα (rad/s). Η έννοια της **ενεργής τιμής** περιγράφει τη μέση τιμή ενός περιοδικού μεγέθους, είτε αυτό είναι θετικό είτε είναι αρνητικό, και ορίζεται σαν η τιμή της ρίζας του μέσου τετραγώνου, rms (root mean square). Η ενεργή τιμή ενός ημιτονοειδούς μορφής σήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

Ο νόμος του Ohm μπορεί να εφαρμοστεί ή με στιγμιαίες τιμές ή με πλάτη τιμών ή με ενεργές τιμές:

$$R = \frac{V_0}{I_0} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (2.4)$$

Η **χωρητικότητα** (capacitance) ενός πυκνωτή (capacitor) C μετριέται σε Farad (F).

Η **επαγωγή** (inductance) ενός πηνίου (coil) L ονομάζεται και **αυτεπαγωγή** (self-induction) ή **συντελεστής αυτεπαγωγής**, και μετριέται σε Henry (H).

Η **ωμική αντίσταση** (resistance) R μετριέται σε Ohm (Ω).

Η **άεργη χωρητική αντίσταση** (reactance of capacitor) ενός πυκνωτή C ορίζεται ως:

$$|X_C| = \frac{1}{C\omega} (\Omega) \quad (2.5)$$

Η **άεργη επαγωγική αντίσταση** (reactance of inductor) ενός πηνίου L ορίζεται ως:

$$X_L = L\omega (\Omega) \quad (2.6)$$

Η **γωνία φάσης** (phase angle) δίνει τη φάση μεταξύ της τάσης και του ρεύματος, όταν δεν συμβαδίζουν, δηλαδή το ένα προηγείται του άλλου, π.χ.

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t) \quad (2.7)$$

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.8)$$

Η γωνία φάσης φ ορίζεται ως το τόξο της εφαπτομένης του πηλίκου της συνολικής άεργης αντίστασης δια της συνολικής ωμικής:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_{ολικη}}{R_{ολικη}} \quad (2.9)$$

$$|X_{ολικη}| = |X_L - X_C| \quad (2.10)$$

2.4.2.2 Κύκλωμα RLC στη σειρά

Η **άεργη αντίσταση** (impedance, μετριέται σε Ω) στο κύκλωμα RLC στη σειρά ορίζεται ως:

$$X_L - X_C = \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) j \quad (2.11)$$

$$|X_L - X_C| = \left| L\omega - \frac{1}{C\omega} \right| \quad (2.12)$$

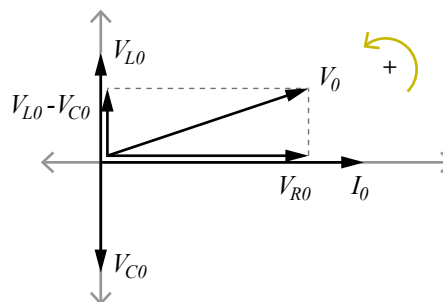
Το j δηλώνει φανταστικό αριθμό.

Η **εμπέδιση** ή **σύνθετη αντίσταση** ενός κυκλώματος RLC σε σειρά που διαρρέεται από ημιτονοειδές ρεύμα, συχνότητας $\omega=2\pi f$, ορίζεται ως ο μιγαδικός:

$$Z = R + (X_L - X_C) j \quad (2.13)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2} \quad (2.14)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων, πάνω στο μιγαδικό επίπεδο, για το κύκλωμα RLC σε σειρά, δείχνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 – Διανυσματικό διάγραμμα στο μιγαδικό επίπεδο του πλάτους των τάσεων σε κύκλωμα RLC σε σειρά. Οι τάσεις μπορεί να αφορούν ή στα πλάτη V_0 , ή στις μέγιστες τιμές V_{pp} , ή στις στιγμιαίες τιμές $V(t)$, ή στις μέσες τιμές V_{rms} .

Η γωνία φάσης φ (rad) μεταξύ της τάσης της πηγής και του ρεύματος του κυκλώματος ορίζεται ως:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R_{ολικη}} \quad (2.15)$$

Ο **συντελεστής ισχύος** (power factor) του κυκλώματος ορίζεται ως ο παράγοντας:

$$\cos \varphi \quad (2.16)$$

Για την περιγραφή του ρυθμού της ροής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι έννοιες της στιγμιαίας ισχύος και της μέσης τιμής ισχύος. Η μέση τιμή ισχύος αναφέρεται στο ολοκλήρωμα της τιμής της στιγμιαίας τιμής της ισχύος σε μια χρονική διάρκεια (π.χ. μια περίοδο).

2.4.2.3 Ροή ενέργειας στο κύκλωμα RLC

Η ροή ενέργειας από την πηγή στα στοιχεία του κυκλώματος RLC περιγράφεται από τις έννοιες της **πραγματικής ισχύος** (active power) P (W), της **άεργης ισχύος** (reactive power) Q (VA) και της **φαινόμενης ισχύος** (apparent power) S (VAR) στη θεωρία της άσκησης 6.

Στο κύκλωμα RLC το πηνίο και ο πυκνωτής αποθηκεύουν ενέργεια. Για παράδειγμα, στην αυτεπαγωγή (πηνίο) για το χρονικό διάστημα που η ροή της ενέργειας είναι από την πηγή προς το πηνίο η στιγμιαία ισχύς είναι θετική. Για το χρονικό διάστημα που ρέει από το πηνίο προς την πηγή είναι αρνητική. Η μέση τιμή της ισχύος σε μια περίοδο είναι μηδέν. Η μέση τιμή της ενέργειας που αποθηκεύτηκε δίνεται από τη σχέση:

$$\langle W_L \rangle = \frac{1}{2} L I_{rms}^2 \quad (2.17)$$

Για παράδειγμα, στη χωρητικότητα (πυκνωτή) για το χρονικό διάστημα που η ροή της ενέργειας είναι από την πηγή προς τον πυκνωτή η στιγμιαία ισχύς είναι θετική. Για το χρονικό διάστημα που ρέει από τον πυκνωτή προς την πηγή είναι αρνητική. Η μέση τιμή της ισχύος σε μια περίοδο είναι μηδέν. Η μέση τιμή της ενέργειας που αποθηκεύτηκε δίνεται από τη σχέση:

$$\langle W_C \rangle = \frac{1}{2} C V_{rms}^2 \quad (2.18)$$

Επίσης να σημειωθεί ότι, κατά τη διάρκεια που το πηνίο δέχεται ενέργεια από την πηγή, ο πυκνωτής δίνει ενέργεια στην πηγή. Ως άεργη ισχύς του κυκλώματος ορίζεται η διαφορά της άεργης ισχύος του πηνίου από την άεργο ισχύ του πυκνωτή σε μια περίοδο και δίνεται από τη σχέση:

$$Q = 2\omega [\langle W_L \rangle - \langle W_C \rangle] = V_{rms,πηγης} I_{rms} \sin \varphi \quad (2.19)$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στο κύκλωμα είναι αυτή στην ωμική αντίσταση R και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P = R I_{rms}^2 = V_{rms,πηγης} I_{rms} \cos \varphi \quad (2.20)$$

Λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας, η συνολική ισχύς της πηγής ισούται με το διανυσματικό άθροισμα της πραγματικής και άεργης ισχύος των ηλεκτρικών στοιχείων του κυκλώματος. Ονομάζεται φαινόμενη ισχύς, συμβολίζεται με S , μετρείται σε VA, είναι μιγαδικό μέγεθος και υπολογίζεται από τη σχέση (2.21). Βλέπε και σχέση (6.6) στην άσκηση 6.

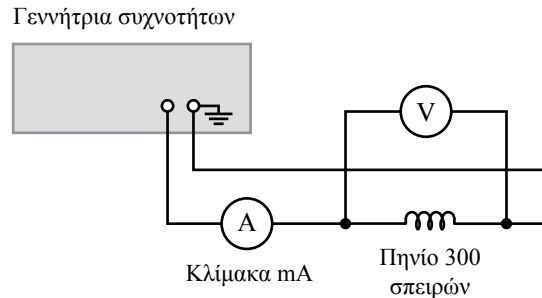
$$S = P + jQ = R I_{rms}^2 + j2\omega [\langle W_L \rangle - \langle W_C \rangle] \quad (2.21)$$

Η σχέση αυτή ισχύει και έχει φυσική σημασία μόνο για γραμμικά κυκλώματα με ημιτονοειδή διέγερση μιας μόνο συχνότητας.

2.4.3 Εκτέλεση

2.4.3.1 Πρώτη μέθοδος

1. Να συναρμολογηθεί το κύκλωμα του σχήματος 2.2. Στη γεννήτρια συχνοτήτων επιλέξτε ημιτονοειδή έξοδο, $f=1\text{kHz}$ και τάση εξόδου $V_o=1\text{V}$, δηλαδή $V(t)=\sin(2\pi t)$.

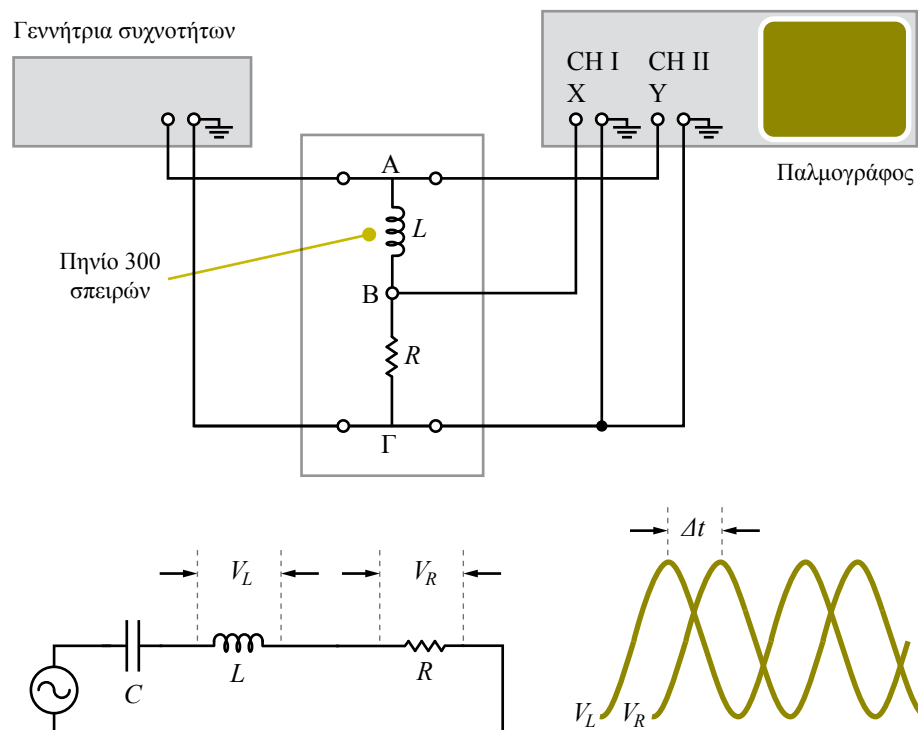


Σχήμα 2.2 – Κύκλωμα για τη μέτρηση του συντελεστή αυτεπαγωγής πηνίου.

2. Μετρήστε με τον παλμογράφο ή με το πολύμετρο σε λειτουργία βολτόμετρου την τάση στα άκρα του πηνίου V_L .
3. Μετρήστε με το πολύμετρο σε λειτουργία αμπερόμετρου (mA) το ρεύμα του κυκλώματος I_{rms} .

2.4.3.2 Δεύτερη μέθοδος

1. Να συναρμολογηθεί το κύκλωμα του σχήματος 2.3. Στη γεννήτρια συχνοτήτων επιλέξτε ημιτονοειδή έξοδο $f=5\text{kHz}$ και τάση εξόδου $V_o=1\text{V}$. Χρησιμοποιήστε την R που βρίσκεται στον πάγκο σας.



Σχήμα 2.3 – Κύκλωμα μέτρησης αυτεπαγωγής L με τη μέθοδο μέτρησης της διαφοράς φάσης των V_L και I_o . Μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ δύο κυματομορφών.

2. Μετρήστε την R με το πολύμετρο σε λειτουργία ωμόμετρου.

3. Ο συντελεστής αυτεπαγωγής πηνίου L μπορεί να μετρηθεί με τον παλμογράφο, από τη διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης του πηνίου V_L και του ρεύματος I_o που το διαρρέει σύμφωνα με τη σχέση (2.9). Για το κύκλωμα του σχήματος 2.3, η σχέση (2.9) παίρνει τη μορφή:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} = \tan^{-1} \frac{L\omega}{R} = \tan^{-1} \frac{L(2\pi f)}{R} \quad (2.22)$$

Επειδή στο κύκλωμα του σχήματος 2.3 η τάση V_R στην αντίσταση R είναι συμφασική με το ρεύμα I_o , για να μετρηθεί η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης V_L και της έντασης I_o του κυκλώματος, αρκεί να μετρηθεί η διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων V_R και V_L .

4. Μετρήστε την μετατόπιση χρόνου μεταξύ των κυματομορφών των τάσεων V_R και V_L . (το t μεταξύ των κορυφών τους).

2.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Όσον αφορά στην πρώτη μέθοδο:

1. Υπολογίστε την άεργη αντίσταση X_L του πηνίου από τον νόμο του Ohm.

$$X_L = \frac{V_o}{I_o} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (2.23)$$

2. Επειδή η ωμική αντίσταση του πηνίου είναι μικρή, θεωρούμε $R_L \approx 0\Omega$ και η αυτεπαγωγή L από τη σχέση (2.6) υπολογίζεται ως εξής:

$$X_L = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \cong L\omega \quad (2.24)$$

Άρα:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.25)$$

3. Υπολογίστε από τις σχέσεις (2.17) και (2.19) την άεργη ισχύ Q_L (VAR) του πηνίου.

2.5 Πείραμα 3

2.5.1 Σκοπός

Μέτρηση της χωρητικότητας C (μF) πυκνωτή, υπολογισμός της άεργης αντίστασης X_C (Ω) πυκνωτή και υπολογισμός της άεργης ισχύος Q_C (VAR) πυκνωτή.

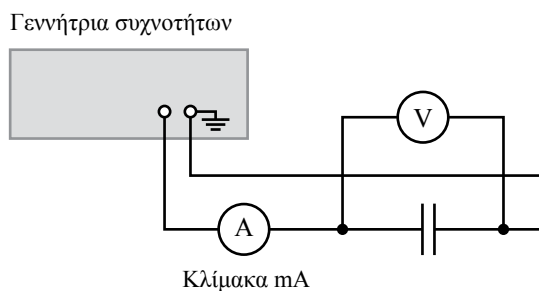
2.5.2 Θεωρία

Βλέπε πείραμα 2.

2.5.3 Εκτέλεση

Στην κατασκευή των κυκλωμάτων θα πρέπει να προσέξετε, αν η γείωση του παλμογράφου είναι απομονωμένη από τη γείωση του πάγκου. Αυτό γίνεται με την παρεμβολή ενός μετασχηματιστή 1:1.

Αν δεν υπάρχει απομόνωση της γείωσης, τότε στα κυκλώματα που φτιάχνετε δεν πρέπει να παρεμβάλλεται μεταξύ του ακροδέκτη της γείωσης της γεννήτριας και του αντίστοιχου της γείωσης του παλμογράφου κάποιο ηλεκτρικό στοιχείο, π.χ. αντίσταση, πυκνωτή ή πηνίο, γιατί τότε το στοιχείο αυτό βραχυκυκλώνεται μέσω της γείωσης του πάγκου του εργαστηρίου.



Σχήμα 2.4 – Κύκλωμα για τη μέτρηση της χωρητικότητας C πυκνωτή.

1. Να συναρμολογηθεί το κύκλωμα του σχήματος 2.4. Στην γεννήτρια συχνοτήτων επιλέξτε $f=2\text{kHz}$ και τάση εξόδου $V_o=1\text{V}$.
2. Μετρήστε με τον παλμογράφο ή με το πολύμετρο (σε λειτουργία βολτόμετρου) την τάση στα άκρα του πυκνωτή.
3. Μετρήστε με το πολύμετρο (σε λειτουργία αμπερομέτρου mA) το ρεύμα του κυκλώματος.

2.5.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Υπολογίστε την άεργη αντίσταση X_C (Ω) του πυκνωτή από τον νόμο του Ohm:

$$X_C = \frac{V_o}{I_o} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (2.26)$$

2. Υπολογίστε τη χωρητικότητα C (μF) από τη σχέση (2.5).
3. Υπολογίστε από τις σχέσεις (2.18) και (2.19) την άεργη ισχύ Q_C (VAR) του πυκνωτή.

2.6 Πείραμα 4

2.6.1 Σκοπός

1. Πειραματικός προσδιορισμός της συχνότητας συντονισμού f_o του κυκλώματος RLC σε σειρά.
2. Μέτρηση της μεταβολής της ηλεκτρικής τάσης στα άκρα της πηγής και της τάσης $V_R(t)$ στα άκρα της ωμικής αντίστασης R , του κυκλώματος RLC σε συνάρτηση με τη μεταβολή της συχνότητας f της ημιτονοειδούς τάσης της πηγής.
3. Μέτρηση της μεταβολής του ρεύματος $I(t)$ του κυκλώματος RLC σε συνάρτηση με τη μεταβολή της συχνότητας f της ημιτονοειδούς τάσης της πηγής.
 - Υπολογισμός του παράγοντα ποιότητας του κυκλώματος Q .
 - Υπολογισμός της άεργης αντίστασης $X_{ολική}$ (Ω) του κυκλώματος.
 - Υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης Z (Ω) του κυκλώματος.
 - Υπολογισμός του συντελεστή ισχύος $\cos\phi$ του κυκλώματος.
 - Υπολογισμός της φαινόμενης ισχύος S (VA) του κυκλώματος.
 - Υπολογισμός της πραγματικής ισχύος P (W) του κυκλώματος.

2.6.2 Θεωρία

2.6.2.1 Γενικά

Βλέπε πείραμα 2 και θεωρία άσκησης 6.

2.6.2.2 Φαινόμενο συντονισμού σε κύκλωμα RLC σε σειρά

Όταν το κύκλωμα RLC σε σειρά (series connection) βρίσκεται σε συντονισμό (resonance), ισχύουν τα ακόλουθα.

- Η τάση στα άκρα του πηνίου V_L έχει μέτρο ίσο με το μέτρο της τάσης στα άκρα του πυκνωτή V_C . Επειδή οι τάσεις αυτές έχουν διαφορά φάσης 180° , το διανυσματικό τους άθροισμα είναι μηδέν:

$$|V_L| = |V_C| \quad (2.27)$$

και:

$$L\omega = \frac{1}{C\omega} \quad (2.28)$$

- Η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος ισούται με την ωμική του αντίσταση:

$$Z = R \quad (2.29)$$

- Η **συχνότητα συντονισμού** (resonant frequency) f_o του κυκλώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2.30)$$

$$L(2\pi f_o) = \frac{1}{C(2\pi f_o)} \quad (2.31)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.32)$$

Ο **παράγοντας ποιότητας** (quality factor) ενός συστήματος είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που έτυχε να καθιερωθεί να συμβολίζεται με το γράμμα Q , χωρίς αυτό να συσχετίζεται με την έννοια της ποιότητας (quality), γιατί η ποιότητα είναι σχετική και ανάλογη με τη σκοπιμότητα του κάθε συστήματος. Επειδή με το σύμβολο Q συμβολίζουμε και την άεργη ισχύ (VAR), σε αυτό το κείμενο θα συμβολίσουμε τον παράγοντα ποιότητας με το γράμμα Q' . Η τιμή του Q' εξαρτάται από την εκάστοτε γωνιακή συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος και δείχνει πόσο υποαποσβεσμένη ή υπεραποσβεσμένη είναι η ταλάντωση του συστήματος. Γενικά ο παράγοντας ποιότητας Q' υπολογίζεται από τη σχέση $Q_{(\omega)} = \omega \times (\text{μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια} / \text{απώλειες ενέργειας})$.

Ο παράγοντας ποιότητας Q' σε ένα κύκλωμα RLC σε σειρά στη συχνότητα συντονισμού δίνεται από τη σχέση:

$$Q'_{(f_o)} = \frac{f_o}{f_2 - f_1} = \frac{f_o L}{R} = \frac{1}{f_o C R} \quad (2.33)$$

όπου f_o η συχνότητα συντονισμού, f_1 και f_2 οι τιμές της συχνότητας που αντιστοιχούν στο $0,707$ ή στο $2^{1/2}/2$ του μέγιστου ρεύματος που μετρείται στη συχνότητα συντονισμού. Η ποσότητα $f_2 - f_1$ ονομάζεται **ζώνη εύρους** (bandwidth).

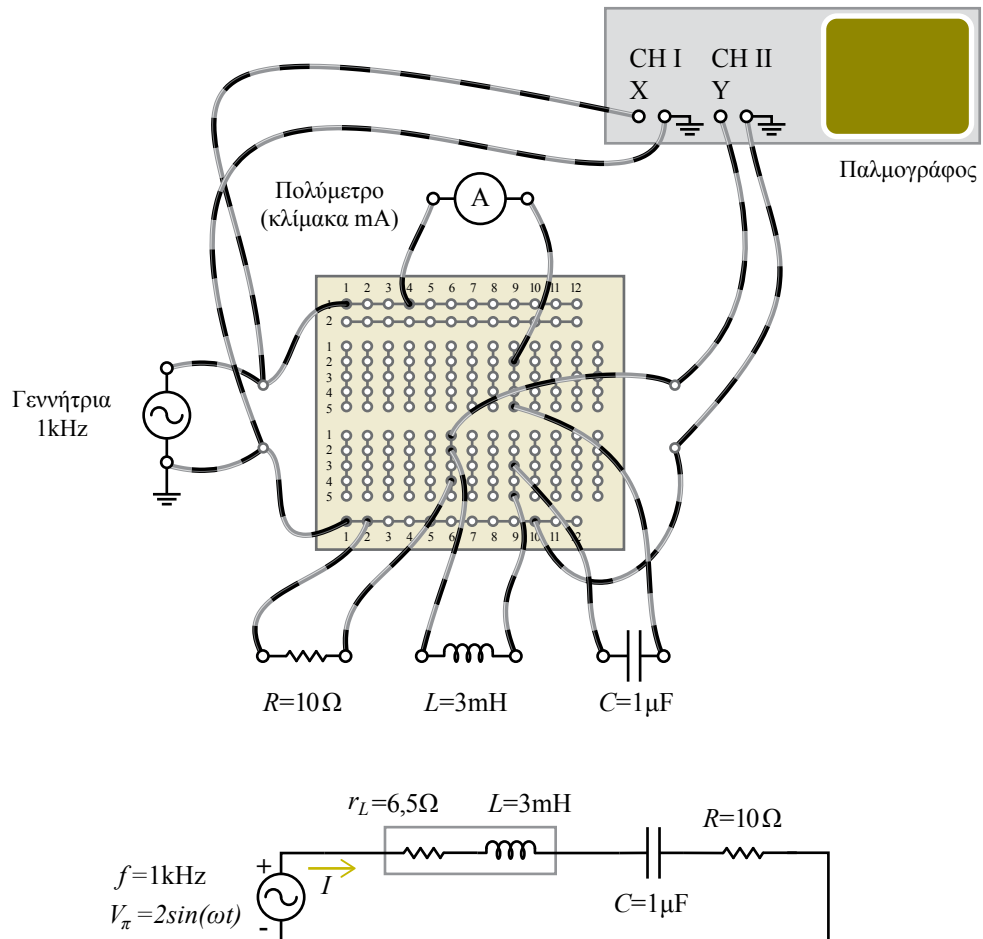
Μεγάλη τιμή του Q' στη συχνότητα συντονισμού σημαίνει ότι σχετικά λιγότερη ενέργεια αποθηκεύεται στα στοιχεία L και C και οι ταλαντώσεις ανταλλαγής ενέργειας φθίνουν σχετικά πιο αργά.

2.6.3 Εκτέλεση

1. Κατασκευή του κυκλώματος RLC σε σειρά.

Κατασκευάστε τη συνδεσμολογία RLC σε σειρά που τροφοδοτείται από γεννήτρια ημιτονοειδούς σήματος, πάνω σε πλακέτα (breadboard), χρησιμοποιώντας τα στοιχεία $R=10\Omega$, $L=3\text{mH}$, $C=1\mu\text{F}$, σύμφωνα με το σχήμα 2.5. Για τις μετρήσεις σας χρησιμοποιήστε πολύμετρο σε λειτουργία μιλιαμπερόμετρου και τα δύο κανάλια του παλμογράφου.

2. **Εύρεση της συχνότητας συντονισμού θεωρητικά.** Από τη σχέση (2.32) υπολογίστε την τιμή της συχνότητας συντονισμού, $f_{o, \text{θεωρητικά}} = \dots \text{Hz}$.



Σχήμα 2.5 – Κύκλωμα συντονισμού RLC στη σειρά.

3. **Εύρεση της συχνότητας συντονισμού πειραματικά.** Στην συχνότητα συντονισμού f_o η τάση V_{R-L-C} έχει την ελάχιστη τιμή της. Ξεκινήστε να αυξάνετε με αργό ρυθμό τη συχνότητα στη γεννήτρια, ξεκινώντας από μικρές τιμές (π.χ. 500Hz), μέχρι να εντοπίσετε τη συχνότητα συντονισμού. Η διαδικασία είναι ότι, καθώς αλλάζετε τη συχνότητα, παρατηρείτε την ολική τάση του κυκλώματος (δηλαδή την V_{R-L-C}) στο κανάλι I του παλμογράφου. Η τάση αυτή ξεκινά από μια μεγάλη τιμή και διαδοχικά με την αύξηση της συχνότητας μειώνεται μέχρι τη συχνότητα συντονισμού. Όταν η συχνότητα αυξηθεί πέραν της συχνότητας συντονισμού f_o , η τάση V_{R-L-C} αρχίζει να αυξάνεται συνεχώς μέχρι κάποιας οριακής τιμής από την οποία και πέρα σταθεροποιείται. Βρείτε την τιμή της συχνότητας συντονισμού, $f_{o,πειραματικά} = \dots \text{Hz}$.
4. Συνδέστε σε σειρά στο κύκλωμα ένα πολύμετρο σε λειτουργία αμπερομέτρου.
5. Μεταβάλετε τη συχνότητα της γεννήτριας με τον ίδιο τρόπο που το κάνατε και στο προηγούμενο βήμα. Θα παρατηρήσετε ότι η τιμή του ρεύματος I_{rms} αρχικά είναι μικρή και σταθερή, στη συνέχεια αυξάνει, μετά μεγιστοποιείται σε κάποια συχνότητα, στη συνέχεια μειώνεται και τέλος σταθεροποιείται σε κάποια μικρή τιμή. Στην τιμή της συχνότητας που θα μεγιστοποιηθεί η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος συμβαίνει συντονισμός. Σημειώστε την τιμή της συχνότητας συντονισμού και συγκρίνετε την τιμή με τη θεωρητική του ερωτήματος 2 και την πειραματική του ερωτήματος 4.
6. Ρυθμίστε τη συχνότητα της γεννήτριας στη συχνότητα συντονισμού.
7. Εισάγετε στο κανάλι I του παλμογράφου την τάση εξόδου της πηγής, εισάγετε στο κανάλι II την τάση στα άκρα της αντίστασης R . Το πολύμετρο το έχετε σε λειτουργία μιλιαμερόμετρου και το έχετε συνδεδεμένο σε σειρά στο κύκλωμα RLC. Μεταβάλλοντας διαδοχικά τη συχνότητα της πηγής από χαμηλές τιμές σε υψηλές: μετρήσετε για κάθε μια από αυτές τις συχνότητες τις τιμές των $V_{πηγής}$, V_R , I , και καταγράψτε τις σε πίνακα της μορφής του πίνακα 2.1.

ΑΣΚΗΣΗ 2 – Συντονισμός RLC σε σειρά

f (kHz)	I_{rms} (mA)*	V_R (V)**	V_{R-L-C} (V)***
$f_1 = 1/8 f_o = \dots$	...	...	...
$f_2 = 1/4 f_o = \dots$			
$f_3 = 1/2 f_o = \dots$			
$f_4 = 0,9 f_o = \dots$			
$f_o =$ συχν. συντονισμού = ...			
$f_5 = 1,1 f_o = \dots$			
$f_6 = 2 f_o = \dots$			
$f_7 = 4 f_o = \dots$			
$f_8 = 5 f_o = \dots$			

Πίνακας 2.1 – Πειραματικές μετρήσεις. Σημειώσεις: *μετρίεται στο πολύμετρο (ενεργή τιμή), **μετρίεται στο CH I παλμογράφο (από κορυφή σε κορυφή), ***μετρίεται στο CH II παλμογράφο (από κορυφή σε κορυφή).

f (kHz)	Z^*	X^{**}	X_L^{***}	X_C^{****}	$I_{rms}^\dagger$	$V_{rms}^{\dagger\dagger}$	$V_{rms}^{\dagger\dagger\dagger}$
$f_1 = 1/8 f_o = \dots$	...	...	...	...	...	...	...
$f_2 = 1/4 f_o = \dots$							
$f_3 = 1/2 f_o = \dots$							
$f_4 = 0,9 f_o = \dots$							
$f_o =$ συχν. συντονισμού = ...							
$f_5 = 1,1 f_o = \dots$							
$f_6 = 2 f_o = \dots$							
$f_7 = 4 f_o = \dots$							
$f_8 = 5 f_o = \dots$							

Πίνακας 2.2 – Θεωρητικές μετρήσεις:

- * σύνθετη αντίσταση $Z = (R^2 + X^2)^{1/2} (\Omega)$,
- ** άεργη αντίσταση $X = X_L - X_C (\Omega)$,
- *** επαγωγική αντίσταση $X_L = 2\pi fL (\Omega)$,
- **** χωρητική αντίσταση $X_C = 1/2\pi fC (\Omega)$,
- $^\dagger I_{rms} = V_{rms}/Z$ (mA),
- †† τάση πηνίου $V_{rms} = I_{rms} X_L$ (V),
- ††† τάση πυκνωτή $V_{rms} = I_{rms} X_C$ (V).

2.6.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των μετρήσεων του πίνακα 2.1 να υπολογίσετε τα ακόλουθα:
 - Παράγοντα ποιότητας κυκλώματος Q' , σχέση (2.33).
 - Γωνία φάσης κυκλώματος φ , σχέση (2.15).
 - Συντελεστής ισχύος κυκλώματος $\cos\varphi$, σχέση (2.16).
 - Πραγματική ισχύς κυκλώματος P , σχέση (2.20).
2. Χρησιμοποιώντας τις πειραματικές μετρήσεις του πίνακα 2.1 να συμπληρώσετε έναν πίνακα της μορφής του πίνακα 2.2.

Από τις τιμές του πίνακα 2.2, να σχεδιάσετε τις γραφικές παραστάσεις, ως συνάρτηση της συχνότητας στον οριζόντιο άξονα:

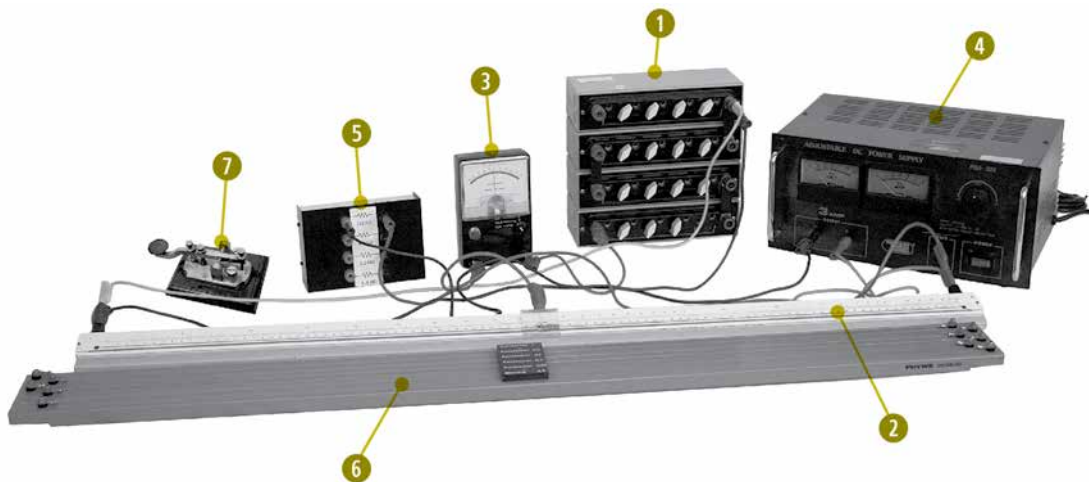
- Του ρεύματος του κυκλώματος, $I(f)$.
- Της συνολικής τάσης του κυκλώματος, $V_{R-L-C}(f)$.
- Της σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος $Z(f)$.

2.7 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 13:A.C. Circuits,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 387-391, pp. 393-402.
- [2] L. Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale: L’électricité*, vol. 4. Pierron, 1996.

ΑΣΚΗΣΗ 3

Γέφυρα Wheatstone



3.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Κιβώτιο ωμικών αντιστάσεων π.χ. $0,1\Omega$ έως 1111Ω .
2. Μεταβλητή ωμική αντίσταση σε μορφή μεταλλικής χορδής που φέρει κινητή μεταλλική επαφή (δρομέα), για να μοιράζεται σε δύο επί μέρους αντιστάσεις, πάνω σε βαθμονομημένο κανόνα.
3. Γαλβανόμετρο.
4. Πηγή DC τάσης $0-5V$.
5. Διάφορες άγνωστες ωμικές αντιστάσεις.
6. Άγνωστες αντιστάσεις σε μορφή χορδής ίδιου υλικού, ίδιου μήκους, διαφορετικής διαμέτρου και άγνωστες αντιστάσεις σε μορφή χορδής, διαφορετικού υλικού (ίδιου μήκους και διαμέτρου).
7. Διακόπτης τύπου Morse.

3.2 Απαραίτητες γνώσεις

Ωμική αντίσταση υλικών, νόμος του Ohm.

3.3 Πείραμα

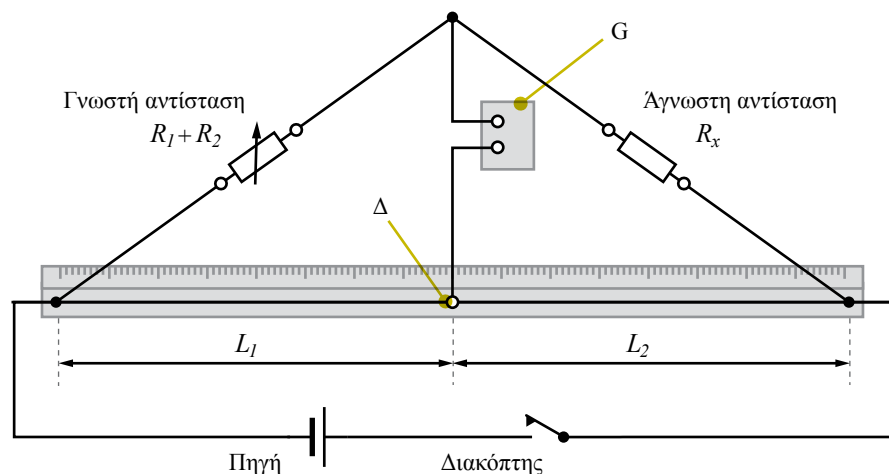
3.3.1 Σκοπός

- Η μέτρηση άγνωστων ωμικών αντιστάσεων (τις συμβολίζουμε με R_x) χρησιμοποιώντας τη διάταξη της γέφυρας Wheatstone και η σύγκριση αυτών των τιμών με τις αναγραφόμενες τιμές των αντιστάσεων πάνω σ' αυτές με το χρωματικό κώδικα.
- Επαλήθευση της σχέσης που υπολογίζει την ωμική αντίσταση ενός αγωγού από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.

3.3.2 Θεωρία

3.3.2.1 Γέφυρα Wheatstone

Με τη βοήθεια του κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone που απεικονίζεται στο σχήμα 3.1, (Wheatstone bridge), μπορούμε να μετρήσουμε την τιμή μιας άγνωστης αντίστασης.



Σχήμα 3.1 – Κύκλωμα της γέφυρας wheatstone.

Διακρίνουμε τα ακόλουθα στοιχεία:

- G : Γαλβανόμετρο (είναι όργανο με το οποίο μπορεί να διαπιστωθεί η ύπαρξη ή να μετρηθεί η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα).
- Πηγή DC τάσης $V=2$ έως $5V$.
- $R_1 + R_2$: Γνωστή μεταβλητή ωμική αντίσταση (π.χ. κιβώτιο αντιστάσεων).
- L_1 και L_2 είναι τα μήκη στα οποία μοιράζεται η μεταλλική χορδή από το δρομέα Δ , για τα οποία ισχύει ότι: $L_1 + L_2 = L$.

Μια μεταλλική χορδή μήκους L , εμβαδού διατομής s και υλικού ειδικής αγωγιμότητας (resistivity) ρ , έχει ωμική αντίσταση (resistance):

$$R = \rho \frac{L}{s} \quad (3.1)$$

Λόγω της σχέσης (3.1) η αναλογία των ωμικών αντιστάσεων R_{L_1} και R_{L_2} των επί μέρους χορδών L_1 και L_2 ισοδυναμεί με αναλογία μηκών, δηλαδή:

$$\frac{R_{L_1}}{R_{L_2}} = \frac{L_1}{L_2} \quad (3.2)$$

Όταν η γέφυρα Wheatstone ισορροπεί, δηλαδή το γαλβανόμετρο δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, ισχύει η αναλογία αντιστάσεων:

$$\frac{R_1 + R_2}{R_x} = \frac{R_{L_1}}{R_{L_2}} \quad (3.3)$$

και λόγω των σχέσεων (3.1) και (3.2) ισχύει:

$$\frac{R_1 + R_2}{R_x} = \frac{L_1}{L_2} \quad (3.4)$$

Σύμφωνα με τη διάταξη και τα σύμβολα του σχήματος 3.1, η τιμή της άγνωστης αντίστασης R_x υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_x = (R_1 + R_2) \frac{L - L_1}{L_1} \quad (3.5)$$

Τη καλύτερη ακρίβεια μετρήσεων την έχουμε, όταν το κύκλωμα της γέφυρας ισορροπεί με $L_1 \approx L_2$. Αυτό πετυχαίνεται, αν επιλέξουμε γνωστή αντίσταση περίπου ίση με την άγνωστη.

Αν παραγωγίσουμε τη σχέση (3.5) ως προς L_1 , τότε προκύπτει ότι:

$$\left| \frac{dR_x}{dL_1} \right| = \frac{L(R_1 + R_2)}{L_1^2} \quad (3.6)$$

Το σχετικό σφάλμα προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{dR_x}{dL_1} = \frac{L}{L_1 L_2} dL_1 \quad (3.7)$$

3.3.2.2 Ισορροπία της γέφυρας Wheatstone

Για να πετύχουμε ισορροπία στο κύκλωμα της γέφυρας, πρέπει να μετακινήσουμε το δρομέα που μοιράζει την ωμική αντίσταση της χορδής μήκους L μέχρι το γαλβανόμετρο G που υπάρχει στο κύκλωμα να δείχνει ένδειξη μηδέν. Τότε ισχύει η σχέση:

$$\frac{R_x}{R_1 + R_2} = \frac{L_2}{L_1} \quad (3.8)$$

Για το σκοπό αυτό, μετακινούμε αρχικά λίγο το δρομέα προς τα αριστερά και πατούμε στιγμιαία το διακόπτη τύπου Morse, κλείνοντας έτσι το κύκλωμα για πολύ λίγο. Στη συνέχεια, μετακινούμε ελαφρά το δρομέα προς τα δεξιά, μέχρι να επιτύχουμε ισορροπία στη γέφυρα. Το στιγμιαίο πάτημα του διακόπτη δίνει τη δυνατότητα στο κύκλωμα να διαρρέεται μόνο για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα από ρεύμα και έτσι αποφεύγουμε την ανεπιθύμητη θέρμανση των ωμικών αντιστάσεων, για όσο διαρκούν οι μετρήσεις μας.

3.3.2.3 Χρωματικός κώδικας ωμικών αντιστάσεων

Παρακάτω περιγράφεται πώς μπορείτε να διαβάζετε σωστά τις τιμές των ωμικών αντιστάσεων σύμφωνα με το χρωματικό κώδικα που αναγράφεται πάνω τους. Ο κώδικας αυτός εμφανίζεται με τη μορφή χρωματικών λωρίδων, οι οποίες τυπώνονται πάνω στην αντίσταση και υποδηλώνουν την τιμή της καθώς και την ανοχή της.

Η πιο συνηθισμένη μορφή χρωματικού κώδικα είναι των τεσσάρων χρωματικών λωρίδων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 – Χρωματικός κώδικας τεσσάρων λωρίδων σε ηλεκτρική αντίσταση.

Η λογική του κώδικα αυτού είναι η εξής:

- Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μία τιμή, όπως περιγράφεται στον πίνακα που ακολουθεί.
- Ξεκινάμε να διαβάζουμε από την άκρη της αντίστασης όπου βρίσκονται οι τρεις λωρίδες που είναι μαζί (η τέταρτη είναι πιο απομονωμένη).
- Η πρώτη λωρίδα (A) αντιστοιχεί στο πρώτο ψηφίο της τιμής της αντίστασης.
- Η δεύτερη λωρίδα (B) αντιστοιχεί στο δεύτερο ψηφίο της τιμής της αντίστασης.
- Η τρίτη λωρίδα (Γ) αντιστοιχεί σε έναν πολλαπλασιαστή.
- Ο πολλαπλασιαστής δείχνει πόσα μηδενικά να προσθέσουμε μετά τα δύο πρώτα ψηφία.
- Η τέταρτη λωρίδα (Δ) αντιστοιχεί στην ανοχή της αντίστασης.
- Η τιμή αυτή δίνεται σε Ohm (Ω).

Η τιμή της αντίστασης υπολογίζεται με την πράξη: $R = (AB \times 10^{\Gamma} \pm \Delta\%) \Omega$.

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι τιμές που αντιστοιχούν στο χρώμα της κάθε λωρίδας.

Χρώμα	Λωρίδα Α	Λωρίδα Β	Λωρίδα Γ (πολλαπλασιαστής)	Λωρίδα Δ (ανοχή)
Μαύρο	0	0	10^0	$\pm 0\%$
Καφέ	1	1	10^1	$\pm 1\%$
Κόκκινο	2	2	10^2	$\pm 2\%$
Πορτοκαλί	3	3	10^3	-
Κίτρινο	4	4	10^4	-
Πράσινο	5	5	10^5	$\pm 0,5\%$
Μπλε	6	6	10^6	$\pm 0,25\%$
Μοβ	7	7	10^7	$\pm 0,1\%$
Γκρι	8	8	10^8	$\pm 0,05\%$
Λευκό	9	9	10^9	-
Χρυσό	-	-	-	$\pm 5\%$
Ασημί	-	-	-	$\pm 10\%$
Κανένα	-	-	-	$\pm 20\%$

Πίνακας 3.1 – Αριθμητικές τιμές που αντιστοιχούν στα χρώματα των λωρίδων των αντιστάσεων.

Παράδειγμα υπολογισμού τιμής αντίστασης από τον αναγραφόμενο χρωματικό κωδικό της.

Έστω ότι τα χρώματα που αντιστοιχούν στις λωρίδες που βρίσκονται πάνω σε μία αντίσταση είναι: Α: καφέ, Β: μπλε, Γ: πορτοκαλί, Δ: χρυσό. Τότε εφόσον: Καφέ Α λωρίδας σημαίνει 1, μπλε Β λωρίδας σημαίνει 6, πορτοκαλί Γ λωρίδας σημαίνει 10^3 , χρυσό Δ λωρίδας σημαίνει $\pm 5\%$, η τιμή της αντίστασης είναι: $R = 16 \times 10^3 \pm 5\% \Omega = 16.000 \pm 5\% \Omega = 16 \pm 5\% k\Omega$.

Η ανοχή εκφράζει την πιστότητα της πραγματικής τιμής της αντίστασης απέναντι στην τιμή που γράφει. Αυτό εξαρτάται από την ποιότητα κατασκευής. Αν μία αντίσταση έχει ανοχή 5%, σημαίνει πως η πραγματική της τιμή μπορεί να αποκλίνει από την αναγραφόμενη το πολύ κατά $\pm 5\%$. Για παράδειγμα, αν έχουμε μία αντίσταση 100Ω με ανοχή $\pm 5\%$, σημαίνει πως, αν την μετρήσουμε με ένα ωμόμετρο η τιμή μπορεί να είναι μεταξύ 95Ω και 105Ω .

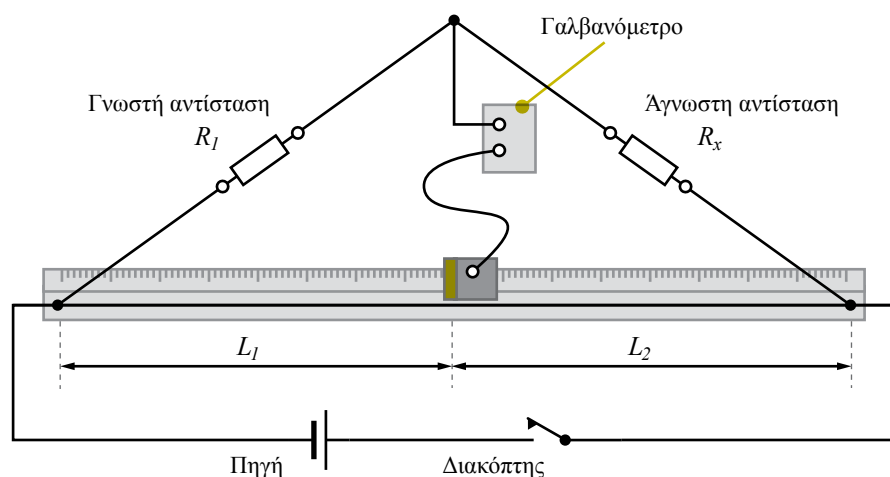
Χρωματικοί κώδικες χρησιμοποιούνται στις ωμικές αντιστάσεις, καθώς και σε άλλα ηλεκτρονικά στοιχεία, όπως πυκνωτές και πηνία. Υπάρχουν επίσης χρωματικοί κώδικες με πέντε λωρίδες (3 ψηφία, πολλαπλασιαστής, θερμικός συντελεστής) και έξι λωρίδες (3 ψηφία, πολλαπλασιαστής, ανοχή, θερμικός συντελεστής). Σε αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη αξιοπιστία, π.χ. στρατιωτικές εφαρμογές, υπάρχει μία επιπλέον λωρίδα που υποδηλώνει την αξιοπιστία του εξαρτήματος.

3.3.3 Εκτέλεση

1. Έχοντας την πηγή κλειστή (power OFF), κάντε τη συνδεσμολογία του σχήματος 3.3. Ο διακόπτης τύπου Morse να συνδεθεί με τρόπο, ώστε να είναι ανοικτός, όταν δεν τον πιέζετε.
2. Βεβαιωθείτε ότι ο διακόπτης power ON/OFF της τάσης της πηγής είναι κλειστός και ο διακόπτης Morse ανοικτός. Ανοίξτε (power ON) την πηγή. Από το κουμπί ρύθμισης της τάσης της πηγής ρυθμίστε, ώστε η τάση εξόδου της πηγής να μην ξεπερνά τα 1 έως 2V.

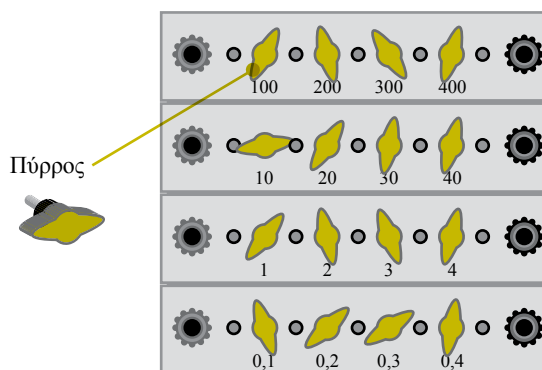
Για καθεμία από τις άγνωστες αντιστάσεις ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα:

3. Χρησιμοποιώντας τον πίνακα 3.1, διαβάστε με το χρωματικό κώδικα την αναγραφόμενη τιμή δύο άγνωστων ωμικών αντιστάσεων και την ανοχή τους.
4. Επιλέξτε μια γνωστή ωμική αντίσταση στη γέφυρα Wheatstone.
5. Συνδέστε την άγνωστη αντίσταση R_x στο κύκλωμα, (σχήμα 3.3), και στη συνέχεια προσπαθήστε να πετύχετε ισορροπία της γέφυρας Wheatstone (όπως περιγράφεται παραπάνω) ψάχνοντας να βρείτε γνωστή αντίσταση, τέτοια ώστε να ισχύει $L_1 \approx L_2$.



Σχήμα 3.3 – Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone της πειραματικής διάταξης.

6. Η λειτουργία του «κουτιού» της γνωστής μεταβλητής αντίστασης (όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4), είναι η εξής: Η αντίσταση που έχει το «κουτί» είναι το άθροισμα των τιμών των οπών που δεν έχουν πύρους, ανάμεσα στα σημεία σύνδεσης. Βάζοντας έναν πύρο απομονώνετε την αντίστοιχη αντίσταση, δηλαδή τη μηδενίζετε).



Σχήμα 3.4 – Μεταβλητή ωμική αντίσταση.

7. Συμπληρώστε τις μετρήσεις σας στον πίνακα 3.2. Όπου δL , δR_I , είναι οι τιμές της μικρότερης βαθμονόμησης του μήκους χορδής και της γνωστής αντίστασης (από τον κατασκευαστή).

Άγνωστες αντιστάσεις	L_I (mm)	$L_2=1000-L_I$ (mm)	δL (mm)	R_I (Ω)	δR_I (Ω)
$R_{X1}=\dots$	...	...	...	...	...
$R_{X2}=\dots$					

Πίνακας 3.2 – Καταχώριση μετρήσεων.

8. Επιλέξτε γνωστή ωμική αντίσταση μικρής τιμής από 1 έως 5Ω. Μετρήστε με τη γέφυρα Wheatstone καθεμία από τις άγνωστες αντιστάσεις, που η καθεμία τους έχει τη μορφή χορδής, διαφορετικής διαμέτρου και ίδιου υλικού και μήκους. Συμπληρώστε και υπολογίστε τις μετρήσεις σε πίνακα της μορφής όπως ο πίνακας 3.3.

Υλικό: Constantan, με ειδική αγωγιμότητα $\rho=48 \times 10^{-4} \Omega \text{m}$				
Διάμετρος d (mm)	L_I (mm)	$L_2=1.000-L_I$ (mm)	R_I (Ω)	R_X (Ω)
1,00	...	...	...	...
0,50				
0,70				
0,35				

Πίνακας 3.3 – Καταχώριση μετρήσεων.

9. Επιλέξτε γνωστή ωμική αντίσταση μικρής τιμής από 1 έως 5Ω. Μετρήστε με τη γέφυρα Wheatstone καθεμία από τις άγνωστες αντιστάσεις, που η καθεμία τους έχει τη μορφή χορδής, ίδιας διαμέτρου και μήκους αλλά διαφορετικού υλικού.

Συμπληρώστε και υπολογίστε τις μετρήσεις σε πίνακα της μορφής, όπως ο πίνακας 3.4.

Διάμετρος $d = \dots$ (mm)				
Υλικό	L_1 (mm)	$L_2 = 1.000 - L_1$ (mm)	R_1 (Ω)	R_x (Ω)
...	...	...	...	...

Πίνακας 3.4 – Καταχώριση μετρήσεων.

3.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Για καθεμία από τις άγνωστες αντιστάσεις που χρησιμοποιήσατε.

- Υπολογίστε την τιμή των άγνωστων ωμικών αντιστάσεων από τις μετρήσεις που πήρατε με το κύκλωμα της γέφυρας Wheatstone.
- Είναι γνωστό ότι η σχέση:

$$\delta x = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial x}{\partial q_i} \delta q_i \right]^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial q_1} \delta q_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial q_2} \delta q_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial x}{\partial q_n} \delta q_n \right)^2} \quad (3.9)$$

υπολογίζει το πιθανό σφάλμα έμεσης μέτρησης του μεγέθους $x = f(q_1, q_2, \dots, q_n)$ σε συνάρτηση των επί μέρους σφαλμάτων των μεγεθών $q_1, q_2, \dots, q_n$.

Να υπολογίσετε το πιθανό σφάλμα έμεσης μέτρησης για την αντίσταση R_x από τη σχέση:

$$\delta R_x = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial R_x}{\partial R_1} \delta R_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial L_1} \delta L_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial L_2} \delta L_2 \right)^2} \quad (3.10)$$

όπου το R_x αντικαθίσταται με τη σχέση (3.5). Υπολογίστε το πιθανό σφάλμα για την αντίσταση R_x , όπου τα δR_1 , δL_1 , δL_2 είναι τα σφάλματα οργάνων μέτρησης των μεγεθών της ωμικής αντίστασης και του μήκους. Συγκρίντε τις τιμές των άγνωστων αντιστάσεων που θα υπολογίσετε με χρήση του χρωματικού κώδικα, με εκείνες που υπολογίσατε από τις μετρήσεις σας με τη γέφυρα Wheatstone.

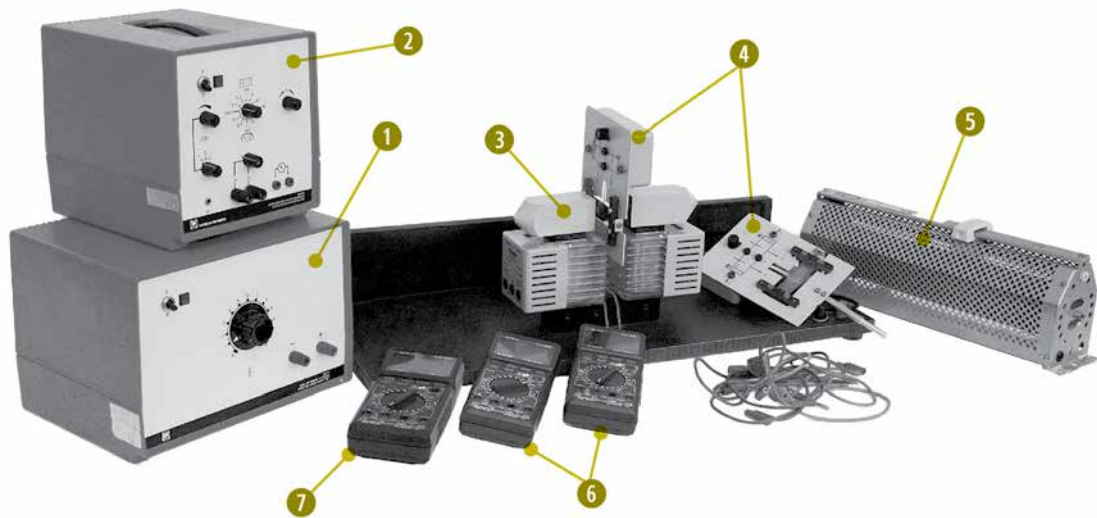
- Επαληθεύστε ότι για τις διαφορετικές τιμές της διαμέτρου d των άγνωστων ωμικών αντιστάσεων, μορφής χορδής, ισχύει η σχέση (3.1). Δίνεται η ειδική αγωγιμότητα του Constantan $\rho = 48 \times 10^{-4} \Omega \text{m}$ και το εμβαδόν διατομής αγωγού $s = \pi d^2/4$.
- Επαληθεύστε ότι για τις διαφορετικές τιμές μήκους, της διαμέτρου d των άγνωστων ωμικών αντιστάσεων, μορφής χορδής, ισχύει η σχέση (3.1). Δίνεται η ειδική αγωγιμότητα του Constantan $\rho = 48 \times 10^{-4} \Omega \text{m}$ και το εμβαδόν διατομής αγωγού $s = \pi d^2/4$.

3.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία

[1] M. Nelkon and P. Parker, "Chapter 9: Measuring by Potentiometer and Wheatstone Bridge," in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 291-295.

ΑΣΚΗΣΗ 4

Φαινόμενο Hall



4.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Τροφοδοτικό ρυθμιζόμενης DC τάσης 0 έως 20V, 10A.
2. Ενισχυτής ηλεκτρικής τάσης.
3. Ηλεκτρομαγνήτης ο οποίος αποτελείται από έναν πυρήνα σχήματος U, ένα ζεύγος πόλων, δύο πηνία π.χ. 250 σπειρών.
4. Δείγματα κατάλληλου ημιαγωγού π.χ. GaAs πάχους $d=0,8\mu\text{m}$.
5. Μεταβλητή ωμική αντίσταση R π.χ. 100Ω .
6. Ένα αμπερόμετρο DC περιοχής 20A και ένα αμπερόμετρο DC περιοχής 20mA.
7. Μιλιβολτόμετρο DC (αν δεν υπάρχει ενισχυτής τάσης το βολτόμετρο πρέπει να έχει ακρίβεια 10^{-5} έως 10^{-6}V).
8. Τροφοδοτικό DC 2V, 20A, ρυθμιζόμενο για το ρεύμα που διαρέει το δείγμα Hall, $V_H=f(I)$, (δε φαίνεται στη φωτογραφία).
9. Καλώδια για τη σύζευξη των συσκευών που να αντέχουν σε ένταση ρεύματος 10A.

4.2 Απαραίτητες γνώσεις

Κίνηση φορτισμένου σωματιδίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο, πυκνότητα ρεύματος, ηλεκτρική αγωγιμότητα, σπές, ελεύθερα ηλεκτρόνια, δύναμη Lorentz, δύναμη Laplace, ημιαγωγοί, ημιαγωγός τύπου n και p, διηλεκτρικό μέσο.

4.3 Πείραμα

4.3.1 Σκοπός

- Υπολογισμός της τιμής της σταθεράς Hall για το δείγμα του ημιαγωγού.
- Προσδιορισμός του είδους των φορέων και της πυκνότητας τους στον ημιαγωγό.

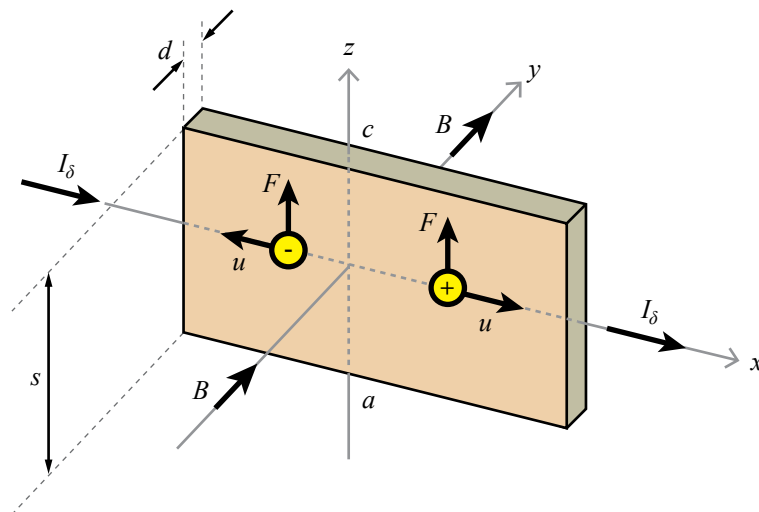
4.3.2 Θεωρία

Το φαινόμενο Hall είναι η εμφάνιση διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού (τάση Hall) στις αντιδιαμετρικές πλευρές ενός αγωγίμου ή ημιαγωγίμου υλικού, όταν διαμέσου του υλικού διέρχεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, και το υλικό βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

Το φαινόμενο Hall ανακαλύφθηκε από τον Αμερικανό επιστήμονα Edwin Hall το 1879. Όταν αυτός εφάρμοσε ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κομμάτι μετάλλου, το οποίο ήταν τοποθετημένο μεταξύ δύο μαγνητών, δημιουργήθηκε μια ηλεκτρική τάση στα πλευρικά τοιχώματα του μετάλλου.

Η εφαρμογή του φαινομένου Hall στην τεχνολογία είναι ευρύτατη. Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι ένα σύγχρονο αυτοκίνητο χρησιμοποιεί 20 τουλάχιστον αισθητήρες Hall, για να ανιχνεύσει λειτουργίες που αφορούν στο δέσιμο της ζώνης ασφάλειας ή στην ταχύτητα περιστροφής του τροχού, για την απεμπλοκή του συστήματος πέδησης, όταν οι τροχοί έχουν σταματήσει να κινούνται. Χρησιμοποιούνται επίσης με άλλους αισθητήρες για τη μέτρηση της ολίσθησης για ασφαλή οδήγηση. Οι αισθητήρες Hall μπορεί να μετρήσουν ρεύμα, μαγνητικό πεδίο, θέση, κίνηση. Όταν, για παράδειγμα, ένας αισθητήρας Hall βρίσκεται μέσα σε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο, αν κάποιος παράγοντας επηρεάσει το μαγνητικό πεδίο του, ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει αυτή την αλλαγή, επειδή αλλάζει με ανάλογο τρόπο η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει. Αν ένα μεταλλικό αντικείμενο περνά με περιοδικό τρόπο δίπλα από ένα αισθητήρα Hall, τότε ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει την περιοδικότητα αυτή, π.χ. μέτρηση στροφών άξονα (εφαρμογή στα ταχύμετρα).

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των αγωγών και των διηλεκτρικών είναι σχετικά εύκολες στην κατανόηση και στη μέτρηση τους με το νόμο του Ohm. Αντίθετα οι ιδιότητες ενός ημιαγωγού (semiconductor), για να εξηγηθούν, απαιτούνται γνώσεις φυσικής στερεάς κατάστασης καθώς και κβαντομηχανικής. Έστω δείγμα φύλλου ημιαγωγού πάχους d , πλάτους s , το οποίο είναι τοποθετημένο κάθετα μέσα σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο επαγωγής B (βλέπε σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 – Δύναμη επιδρά σε ηλεκτρικά φορτία που κινούνται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

Υποθέστε ότι το δείγμα διαρρέεται από ηλεκτρικά φορτία (ρεύμα I_δ) κατά τη διεύθυνση x , κάθετη στο μαγνητικό πεδίο. Τότε στους φορείς φορτίου (π.χ. ηλεκτρόνια, οπές ή και τα δύο) του δείγματος δρα μια δύναμη που δίνεται από την εξίσωση του Lorentz:

$$\vec{F} = |q|(\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow F_z = |q| v B_y \quad (4.1)$$

όπου $|q|$ είναι η απόλυτη τιμή του φορτίου (electric charge) των φορέων του δείγματος, v η ταχύτητά τους και B το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο προς την κατεύθυνση του άξονα z , κάθετη προς το επίπεδο των B , v . Τα πρόσημα του φορτίου και της ταχύτητας αλληλοαναιρούνται. Αν οι φορείς φορτίου είναι ηλεκτρόνια, αυτό δημιουργεί μια περίσσεια αρνητικού φορτίου στην $+z$ πλευρά του δείγματος του ημιαγωγού και, συνεπώς, μια περίσσεια θετικού φορτίου στην $-z$ πλευρά (δηλαδή το σημείο c έχει χαμηλότερο δυναμικό από το a). Αυτή η κατανομή φορτίου δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο έντασης E_H που ονομάζεται πεδίο Hall, το οποίο έχει φορά προς την $+z$ κατεύθυνση όπου: (i) αντισταθμίζει τη δύναμη Lorentz έτσι

ώστε να διατηρεί την ροή του ρεύματος κατά μήκος του x -άξονα και (ii) δίνει μια διαφορά δυναμικού:

$$V_H = sE_H \quad (4.2)$$

που ονομάζεται τάση Hall κατά μήκος του πλάτους s του δείγματος. Θεωρώντας ότι έχουμε ισορροπία δυνάμεων πάνω στους φορείς φορτίου, θα πρέπει να ισχύει:

$$\sum \vec{F}_z = \vec{F}_{el} + \vec{F}_L = 0 \quad (4.3)$$

$$\vec{F}_{el} = |q|\vec{E}_H \Rightarrow F_z = |q|E_H \quad (4.4)$$

$$|q|\vec{E} + |q|(\vec{v} \times \vec{B}) = 0 \Rightarrow |q|E_H = |q|vB_y \quad (4.5)$$

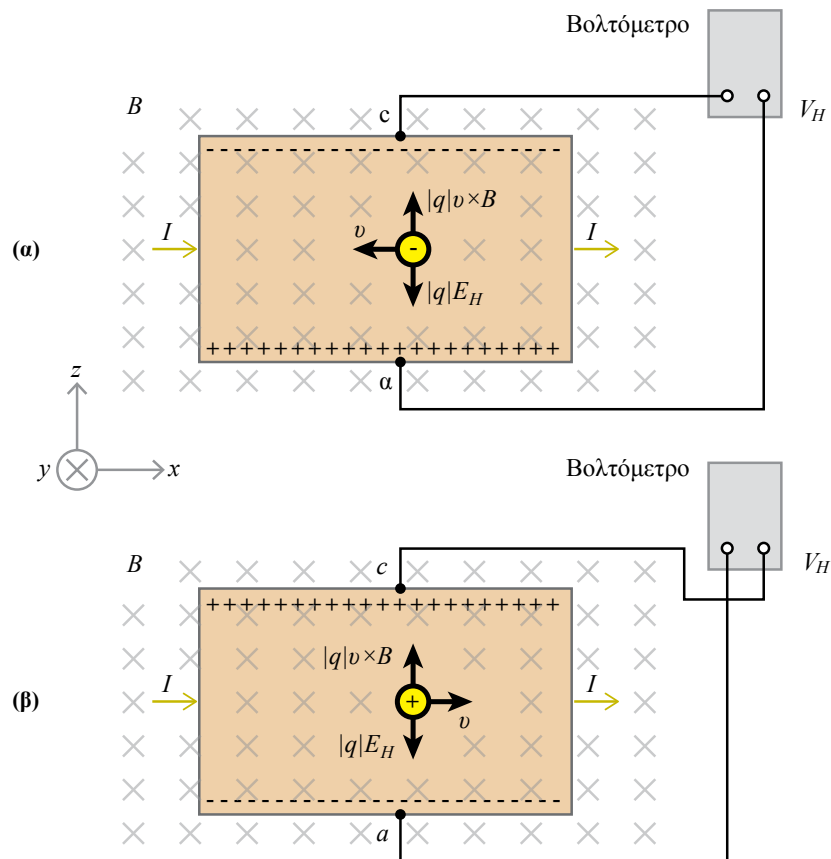
και επομένως μπορούμε να πούμε ότι:

$$E_H = vB_y \quad (4.6)$$

και:

$$V_H = svB_y \quad (4.7)$$

Επειδή το ρεύμα I_δ είναι η ροή των φορέων φορτίου μέσα στο δείγμα και η πυκνότητα του ρεύματος είναι το γινόμενο όλων των φορτίων q του δείγματος επί την ταχύτητα τους v , δηλαδή $I_\delta \sim |q|u$, παρατηρούμε ότι το πρόσημο της τάσης Hall V_H θα εξαρτηθεί από το είδος των φορέων φορτίου (majority carriers), δηλαδή, αν έχουμε φορείς φορτίου ηλεκτρονίων (περίσσεια ηλεκτρονίων), τότε η V_H έχει αρνητικό πρόσημο (βλέπε σχήμα 4.2.α), ενώ, αν έχουμε φορείς φορτίου οπές (περίσσεια οπών), τότε η V_H έχει θετικό πρόσημο (βλέπε σχήμα 4.2.β).



Σχήμα 4.2 – Εμφάνιση φαινομένου Hall σε υλικό ημιαγωγού μέσα σε μαγνητικό πεδίο, καθώς ο ημιαγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα (α) αφορά σε κίνηση αρνητικού φορτίου q και (β) αφορά σε κίνηση θετικού φορτίου q . Σημειώστε ότι η δύναμη $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (Laplace) είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

Επομένως, μετρώντας το μέτρο και το πρόσημο της τάσης Hall, μπορούμε να συμπεράνουμε τι είδους φορείς φορτίου φέρει ο ημιαγωγός, δηλαδή αν ο ημιαγωγός είναι τύπου n ή τύπου p (n για αρνητικό, negative και p για θετικό, positive). Ας δούμε τώρα πώς μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητα των φορέων φορτίου, η οποία αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό των ημιαγωγών, χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Hall.

Στην περίπτωση στην οποία ο ημιαγωγός είναι τύπου n, οι φορείς φορτίου στο δείγμα του ημιαγωγού είναι ηλεκτρόνια. Λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις του πάχους d και του πλάτους s του δείγματος, το συνολικό ρεύμα που σχετίζεται με την πυκνότητα n των φορέων φορτίου στη μονάδα του όγκου και την ταχύτητα τους (drift velocity) v , δίνεται από τη σχέση:

$$I_\delta = j_x s d = (-|q| n v)(s d) \Rightarrow v = -\frac{I_\delta}{|q| n s d} \quad (4.8)$$

όπου j η πυκνότητα ρεύματος με μονάδες A/m², (η πυκνότητα ρεύματος j είναι γνωστή και από τη σχέση ρεύμα/εμβαδόν εγκάρσιας διατομής) και $s d$ η επιφάνεια εγκάρσιας διατομής του δείγματος. Η τάση Hall συνδέεται με το ηλεκτρικό πεδίο Hall, σύμφωνα με τη σχέση (4.2). Αν συνδυάσουμε τις σχέσεις (4.7) και (4.8), προκύπτει ότι η τάση Hall δίνεται από τη σχέση:

$$V_H = -\frac{I_\delta B_y}{|q| n d} = -R_H \frac{1}{d} I_\delta B_y \quad (4.9)$$

Η σταθερά Hall (Hall coefficient) ορίζεται με βάση την παραπάνω σχέση, ως:

$$R_H = \frac{1}{|q| n} \quad (4.10)$$

και έχει μονάδες m³/Cb.

Στην περίπτωση που ο ημιαγωγός μας είναι τύπου p, τότε η έκφραση για τη σταθερά Hall, γίνεται:

$$R_H = -\frac{1}{|q| n} \quad (4.11)$$

Η πυκνότητα και το πρόσημο του φορτίου που έχουν οι φορείς του ημιαγωγού μπορεί να βρεθεί, αν υπολογιστεί το R_H . Στους ημιαγωγούς η τάξη μεγέθους του n είναι από 10²⁰ m⁻³ έως 10²⁴ m⁻³, ενώ στα μέταλλα η τάξη μεγέθους του είναι 10²⁸ m⁻³. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η σταθερά του Hall να είναι μεγαλύτερη στους ημιαγωγούς από ό,τι στα άλλα μέταλλα. Η σταθερά Hall αποδεικνύεται ότι ικανοποιεί και τη σχέση:

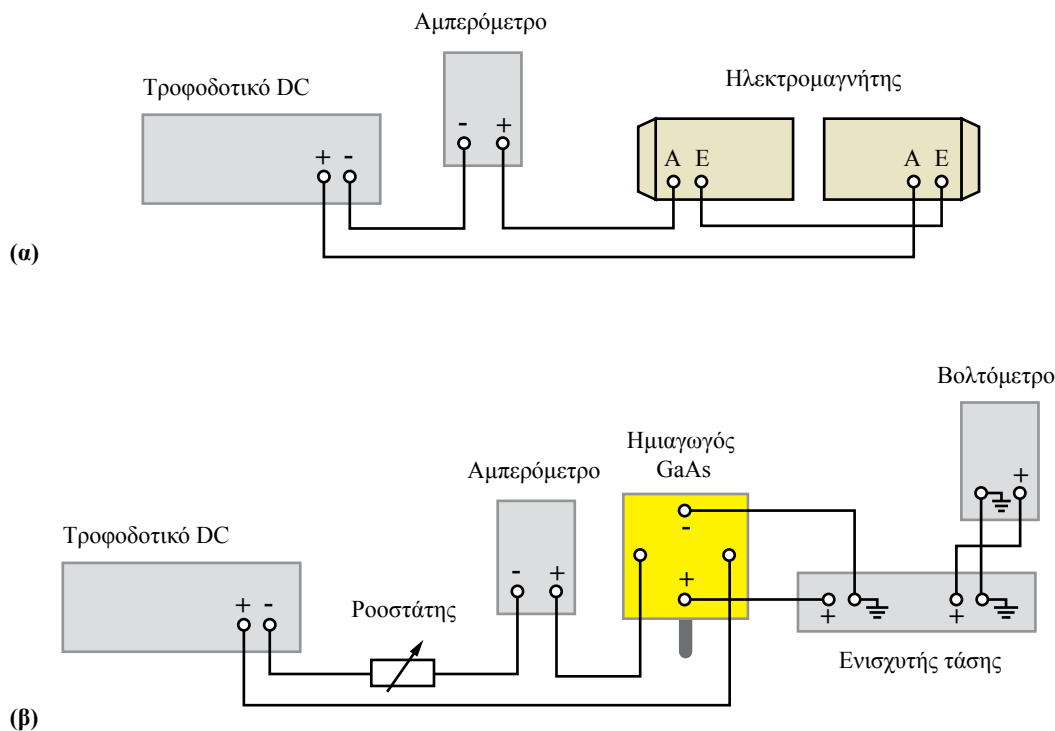
$$R_H = \frac{E_H}{j_x B_z} \quad (4.12)$$

Από τη σχέση (4.12) φαίνεται ότι μπορεί να υπολογισθεί ένα μαγνητικό πεδίο, αν είναι γνωστοί οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης (R_H , E_H , j_x).

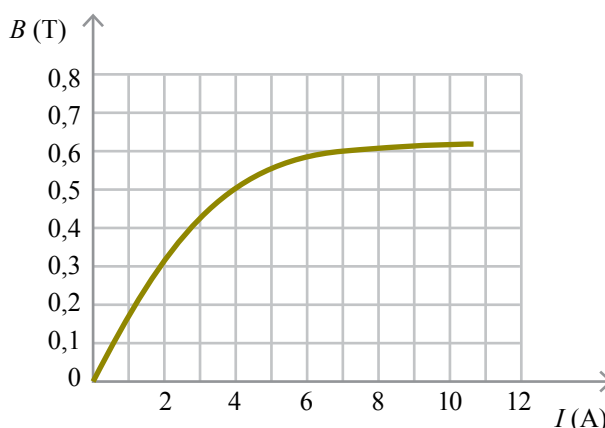
4.3.3 Εκτέλεση

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τρία ηλεκτρικά κυκλώματα: (i) το κύκλωμα που δημιουργεί το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, το οποίο περιέχει έναν ηλεκτρομαγνήτη συνδεδεμένο σε σειρά με DC τροφοδοτικό και ένα αμπερόμετρο, (ii) το κύκλωμα που περιέχει το δείγμα ημιαγωγού, συνδεδεμένο σε σειρά με την ωμική αντίσταση, το DC τροφοδοτικό και ένα αμπερόμετρο και (iii) το κύκλωμα που μετρά την τάση Hall στα άκρα του δείγματος Hall (ενισχυτή τάσης και βολτόμετρο).

1. Να κατασκευάσετε τα κυκλώματα (α) και (β) που δείχνει το σχήμα 4.3.
2. Να ρυθμίσετε κατάλληλα το τροφοδοτικό του κυκλώματος (α) έτσι, ώστε τα δύο πηνία του ηλεκτρομαγνήτη, που συνδέονται στη σειρά, να διαρρέονται από μια σταθερή τιμή DC ρεύματος, π.χ. 2A. Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου υπολογίζεται με τη βοήθεια του διαγράμματος που φαίνεται στο σχήμα 4.4. Για παράδειγμα, η τιμή της μαγνητικής επαγωγής που δημιουργείται από ρεύμα έντασης $I=6\text{A}$ είναι $B \approx 0,59\text{Tesla}$. Αφού ρυθμίσετε το ρεύμα στα 2A, να κλείσετε το τροφοδοτικό χωρίς να χαλάσετε τη ρύθμιση των 2A. Η απομαγνήτιση του υλικού του ηλεκτρομαγνήτη γίνεται διαρρέοντας τα πηνία των 250 σπειρών με ρεύμα $I=5\text{A}$ για λίγο χρόνο, π.χ. 20s και κατόπιν με μηδενισμό του ρεύματος.



Σχήμα 4.3 – Συνδεσμολογία πειράματος Hall.



Σχήμα 4.4 – Διάγραμμα μεταβολής του B των ηλεκτρομαγνητών ως συνάρτηση του DC ρεύματος που τους διαρρέει.

3. Κλείστε το DC τροφοδοτικό του κυκλώματος που δημιουργεί το μόνιμο μαγνητικό πεδίο, ώστε να μπορέσετε να τοποθετήσετε ανάμεσα στους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη το δείγμα του ημιαγωγού, π.χ. GaAs, Ag ή W (Tungsten).
4. Ανοίξτε το DC τροφοδοτικό του κυκλώματος που δημιουργεί το DC ρεύμα, το οποίο στη συνέχεια διαρρέει το δείγμα Hall. Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το δείγμα μπορεί να μεταβληθεί με τη βοήθεια του ροοστάτη. Ρυθμίστε, ώστε το δείγμα Hall να μη διαρρέεται από ρεύμα.

5. Ανοίξτε ξανά το DC τροφοδοτικό του κυκλώματος των πηνίων που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο και έχει ήδη ρυθμιστεί στα 2A. Διατηρώντας την ένταση του ρεύματος των πηνίων του ηλεκτρομαγνήτη I_π σταθερή, π.χ. στα 2A, αρχίστε να μεταβάλετε την ένταση του ρεύματος του δείγματος Hall I_δ με τη βοήθεια του ροοστάτη, από 0 έως 2mA ανά 0,25mA και μετρήστε τις αντίστοιχες τιμές της ενισχυμένης τάσης Hall V_H στο μιλιοβολτόμετρο.

Καταχωρήστε αυτές τις μετρήσεις σε πίνακα, όπως στον πίνακα 4.1.

$I_\pi=2A$, Συντελεστής ενίσχυσης τάσης =...	
I_δ (mA)	V_H (mV)
0,00	...
0,25	
0,50	
0,75	
1,00	
1,25	
1,40	
1,50	
1,75	
2,00	

Πίνακας 4.1 – Μετρήσεις τάσης Hall όταν το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από ρεύμα $I_\pi = 2A$.

6. Διατηρώντας την ένταση του ρεύματος του δείγματος I_δ σταθερή (π.χ. για το GaAs στο 1mA ή για το W στο 1A), αρχίστε να μεταβάλετε την ένταση του ρεύματος των πηνίων του ηλεκτρομαγνήτη I_π από 0 έως 3A ανά 0,5A και μετρήστε τις τιμές της τάσης Hall V_H στο μιλιοβολτόμετρο. Καταχωρήστε αυτές τις μετρήσεις σε πίνακα, όπως στον πίνακα 4.2.

$I_\delta=1mA$, Συντελεστής ενίσχυσης τάσης =...		
I_π (A)	V_H (mV)	B (mT)
0,00	...	...
0,50		
1,00		
1,50		
2,00		
2,50		
3,00		

Πίνακας 4.2 – Μετρήσεις της τάσης Hall όταν το ρεύμα που διαρρέει τον ημιαγωγό (δοκίμιο Hall) είναι σταθερό, $I_\delta = 1mA$.

Η στήλη των τιμών του μαγνητικού πεδίου $B=f(I)$ του παραπάνω πίνακα συμπληρώνεται λαμβάνοντας υπόψη το διάγραμμα μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής B των πηνίων σε σχέση με την ένταση του ρεύματος που τα διαρρέει (σχήμα 4.4).

4.3.4 Επεξεργασία των μετρήσεων

- Από το πρόσημο που είχε η τάση Hall (θετικό ή αρνητικό) συμπεράνετε τι είδους φορείς φορτίου έχει ο ημιαγωγός που μετρήσατε, δηλαδή ηλεκτρόνια ή οπές. Συμφωνεί το αποτέλεσμα που βρήκατε με τη θεωρία;
- Με βάση τις μετρήσεις του πίνακα 4.1, σχεδιάστε το διάγραμμα της αληθινής τιμής (μη ενισχυμένης) τάσης Hall ως συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής των πηνίων του ηλεκτρομαγνήτη $V_H=f(B)$. Με τη βοήθεια της θεωρίας των ελαχίστων τετραγώνων και της σχέσης (4.9), βρείτε την κλίση της γραφικής παράστασης και υπολογίστε τη σταθερά Hall R_H του δείγματος του ημιαγωγού. Από το πρόσημο της κλίσης να συμπεράνετε το είδος των φορέων του ημιαγωγού του πειράματος.

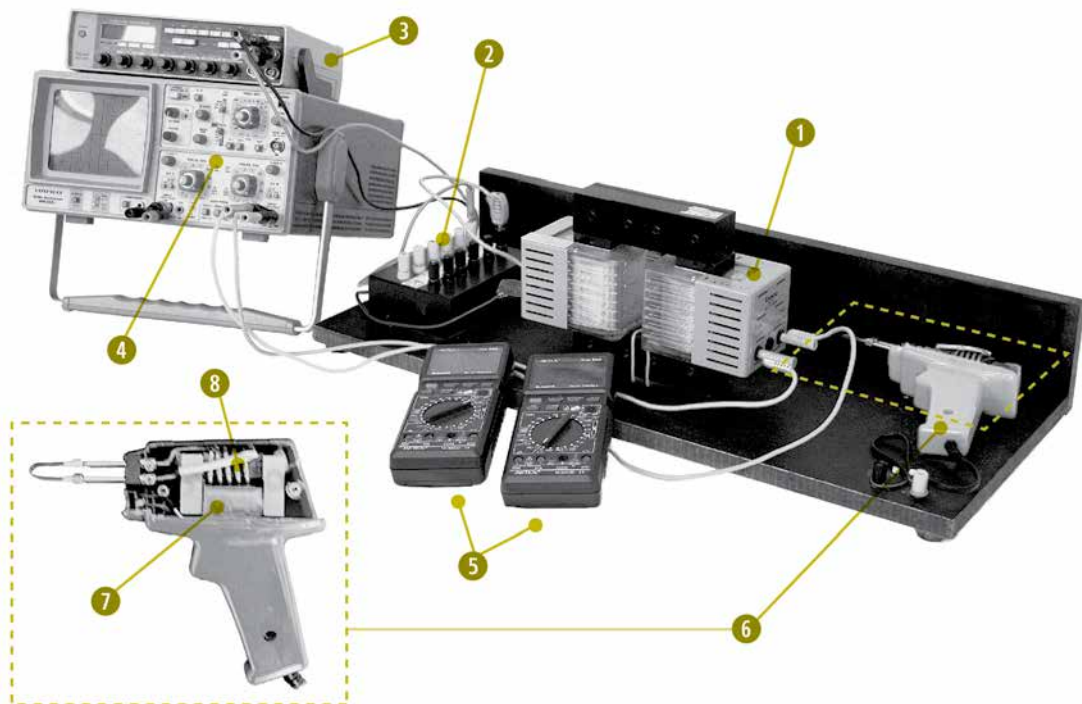
3. Με βάση τις μετρήσεις του πίνακα 4.2, σχεδιάστε το διάγραμμα της αληθινής τιμής (μη ενισχυμένης) τάσης Hall ως συνάρτηση της έντασης του ρεύματος του δείγματος I_δ , $V_H = f(I_\delta)$. Με τη βοήθεια της θεωρίας των ελαχίστων τετραγώνων και της σχέσης (4.9), βρείτε την κλίση της γραφικής παράστασης και υπολογίστε τη σταθερά Hall R_H του δείγματος του ημιαγωγού. Από το πρόσημο της κλίσης, να συμπεράνετε το είδος των φορέων του ημιαγωγού του πειράματος.
4. Υπολογίστε τη μέση τιμή της σταθεράς Hall από τις δύο τιμές που υπολογίσατε παραπάνω, βάζοντας και τις αντίστοιχες μονάδες που έχει η σταθερά Hall στο SI. Πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες μετατροπές μονάδων όλων των μεγεθών στο σύστημα SI.
5. Υπολογίστε την πυκνότητα των φορέων του ημιαγωγού GaAs σε μονάδες m^{-3} . Δίνεται ότι το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι: $|q|=1,6 \times 10^{-19} \text{Cb}$.

4.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία

[1] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 20: Magnetic field and Force on Conductor, Hall effect,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 316-319.

ΑΣΚΗΣΗ 5

Μελέτη μετασχηματιστών



5.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Μετασχηματιστή (Μ/Σ).
2. Γνωστές ωμικές αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία.
3. Γεννήτρια ηλεκτρικού ημιτονοειδούς σήματος.
4. Παλμογράφος.
5. Δύο ψηφιακά πολύμετρα ή δύο αναλογικά μιλιαμερόμετρα.
6. Ηλεκτρικό πιστόλι συγκόλλησης.
7. Πηνίο πρωτεύοντος μετασχηματιστή πιστολιού συγκόλλησης.
8. Πηνίο δευτερεύοντος μετασχηματιστή πιστολιού συγκόλλησης.
9. Βατόμετρο (μόνο για το πείραμα 4, δε φαίνεται στη φωτογραφία).

Σύμβολα:

- u, i, e : στιγμιαίες τιμές.
- U, I : ενεργές τιμές (rms).
- $\hat{E}, \hat{I}, \hat{U}$ παραστατικοί μιγαδικοί, π.χ. $\hat{E} = E e^{j\varphi} = E \angle \varphi$ ή $\hat{E} = E(\cos\varphi + j\sin\varphi)$.
- Z, S : μιγαδική σύνθετη αντίσταση, μιγαδική ισχύς.
- Οι δείκτες $1, 2$, δείχνουν μεγέθη του πρωτεύοντος ή δευτερεύοντος πηνίου.
- Ο δείκτης N συμβολίζει ονομαστική τιμή.
- Οι ' και '' (μονός και διπλός τόνος) συμβολίζουν την τιμή ως ανηγμένη στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον.

Σημειώσεις για την ασφάλεια: Αποφεύγετε την υπερθέρμανση του Μ/Σ (Max επιτρεπτή AC τάση ανά τύλιγμα: 15V AC, Max επιτρεπτή DC τάση ανά τύλιγμα: 10V DC, Max επιτρεπτό ρεύμα ανά τύλιγμα: 1,5A μόνιμο / 3A στιγμιαίο, Max επιτρεπτή κατανάλωση: 40W. Όταν το πρωτεύον τύλιγμα έχει λιγότερες σπείρες από το πρωτεύον, η Max επιτρεπτή AC τάση ανά τύλιγμα: 10V. Η αύξηση της AC τάσης στον Μ/Σ, πάνω από 12V θα πρέπει να γίνεται βαθμιαία. Μην εφαρμόζετε υψηλές τάσεις στιγμιαία και πολύ γρήγορα! Υπάρχει κίνδυνος να καταστραφούν τα μετρητικά όργανα.

5.2 Απαραίτητες γνώσεις

Νόμος Faraday στον ηλεκτρισμό, νόμος Ampère, κανόνας του Lenz, νόμος του Ohm, μαγνητική σύζευξη, άεργη αντίσταση, σύνθετη αντίσταση, πηνίο, επαγωγικό φορτίο, μαγνητική ροή, χωρητικότητα, χωρητικό φορτίο, στιγμιαία, μέση, ενεργή τιμή περιοδικών σημάτων.

5.3 Πείραμα 1

5.3.1 Σκοπός

- Μελέτη της λειτουργίας του Μ/Σ.
- Επαλήθευση σχέσης τάσεων, ρεύματος εισόδου – εξόδου Μ/Σ με το λόγο των τυλιγμάτων του.
- Μελέτη Μ/Σ εν κενώ χωρίς φορτίο, με ανοικτό το δευτερεύον πηνίο στην έξοδο.
- Μελέτη Μ/Σ σε βραχυκύκλωση, χωρίς φορτίο με κλειστό το δευτερεύον πηνίο στην έξοδο.
- Μελέτη της επίδρασης χωρητικών και επαγωγικών φορτίων στη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος μέσω του Μ/Σ.
- Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων Μ/Σ.

5.3.2 Στοιχεία Θεωρίας

5.3.2.1 Τι είναι ο Μ/Σ

Ο μετασχηματιστής ή Μ/Σ (transformer) ηλεκτρικής τάσης είναι μια εύχρηστη ηλεκτρική διάταξη. Το γεωμετρικό του μέγεθος και βάρος αλλάζει από πολύ μικρό σε πολύ μεγάλο (λίγα κιλά έως τόνους) ανάλογα με τις ανάγκες εφαρμογής του. Η λειτουργία του όμως είναι ανεξάρτητη του μεγέθους του.

Όλοι οι Μ/Σ περιέχουν ένα πρωτεύον πηνίο, ηλεκτρικά μονωμένο, από ένα ή περισσότερα δευτερεύοντα πηνία και το σιδηροπυρήνα. Ο σιδηροπυρήνας αποτελείται από λεπτά, ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους ελάσματα χάλυβα.

Οι Μ/Σ μετασχηματίζουν (υποβιβάζουν ή ανυψώνουν) AC τάσεις ή ρεύματα σε AC πάλι μεγέθη ίδιας συχνότητας. Άλλες χρήσεις τους είναι η ζεύξη ανάμεσα στις διάφορες βαθμίδες ενισχυτών και η γαλβανική μόνωση ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων στις οποίες λειτουργούν, οι μετασχηματιστές κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες: (i) στους μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων και (ii) στους μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων (μέχρι 100kHz). Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται οι μετασχηματιστές ραδιοσυχνοτήτων και στη δεύτερη οι μετασχηματιστές ραδιοσυχνοτήτων και οι μετασχηματιστές ισχύος.

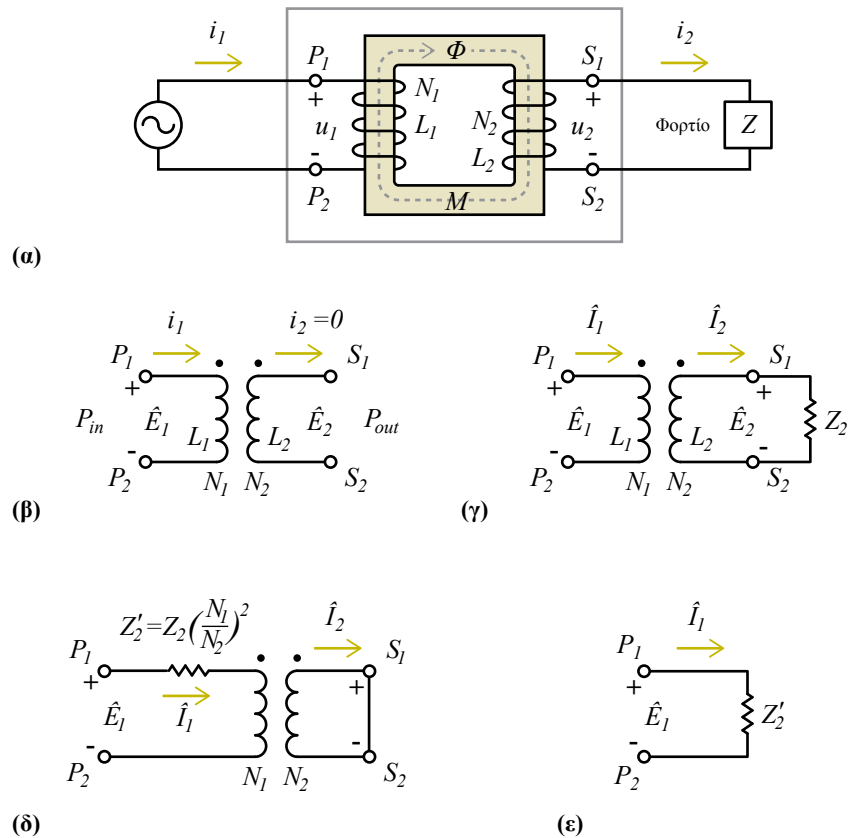
Το πρωτεύον πηνίο (primary coil) δέχεται ηλεκτρική ενέργεια (άεργο ισχύ, VAR) από μια πηγή εναλλασσόμενου τάσης και μέσω της μαγνητικής σύζευξης τη μεταφέρει μέσω ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου (μαγνητικής ροής) σε διαφορετικές τιμές τάσης ρεύματος, ίδιας συχνότητας με την πηγή στο δευτερεύον πηνίο (secondary coil). Η μαγνητική σύζευξη ενισχύεται σημαντικά από την παρουσία του σιδηροπυρήνα.

Οι νόμοι που εξηγούν τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δύο μονωμένων ηλεκτρικών κυκλωμάτων και την ανάπτυξη ηλεκτρικής τάσης δίνονται στη συνέχεια.

- Νόμος Ampère:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

όπου H η ένταση του μαγνητικού πεδίου και I η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει έναν ηλεκτρικό αγωγό δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτόν.

5.3.2.2 Αρχή λειτουργίας M/Σ 

Σχήμα 5.1 – (α) Σχηματική αναπαράσταση μονοφασικού M/Σ , (β) Κυκλωματική παράσταση ιδανικού M/Σ σε λειτουργία εν κενώ, (γ) Κυκλωματική παράσταση ιδανικού M/Σ σε λειτουργία με φορτίο, (δ) και (ε) Αναγωγή αντίστασης του δευτερεύοντος στο πρωτεύον ιδανικού M/Σ (πώς βλέπει η είσοδος το φορτίο Z_2 στην έξοδο). Όπου: 1 και 2 δείκτες πρωτεύοντος (P) και δευτερεύοντος (S) πηνίου, M ο συντελεστής αλληλεπαγωγής, L οι συντελεστές αυτεπαγωγής των πηνίων, N το πλήθος των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, Φ η κοινή μαγνητική ροή, u οι ηλεκτρικές τάσεις στην είσοδο και έξοδο του M/Σ (στιγμιαίες τιμές), i τα ρεύματα που διαρρέουν τα πηνία (στιγμιαίες τιμές), $\hat{E}$ τάσεις στην είσοδο και έξοδο του M/Σ (παραστατικοί μιγαδικοί).

■ Νόμος Faraday:

$$e_{\varepsilon\pi} = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

όπου Φ_B μαγνητική ροή (magnetic flux) και $e_{\varepsilon\pi}$ ηλεκτρεγερτική δύναμη ή ΗΕΔ (electromagnetic induction ή induced emf). Το ηλεκτρικό πηνίο, όταν διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, αναπτύσσει στα άκρα του ηλεκτρική τάση εξ' επαγωγής (induced voltage), η οποία δημιουργεί με τη σειρά της μαγνητικό πεδίο που προσπαθεί να εξουδετερώσει τη μεταβολή της μαγνητικής ροής (κανόνας του Lenz).

Ο νόμος του Ampère περιγράφει ότι σε ηλεκτρικό αγωγό, οποιουδήποτε σχήματος, όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα (ρεύμα διέγερσης), αναπτύσσεται γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Καθώς το μέτρο και η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος διέγερσης αλλάζει, αλλάζει ανάλογα και το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο.

Όταν ένα ηλεκτρικό πηνίο διαρρέεται από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα (ρεύμα διέγερσης), δημιουργείται γύρω του μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο με ίδια συχνότητα. Αν δεύτερο ηλεκτρικό πηνίο βρίσκεται μέσα σε αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, τότε η μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή $\Phi_B(t)$ θα δημιουργήσει στα άκρα του ηλεκτρική τάση εξ' επαγωγής $e_{\varepsilon\pi}$, που περιγράφεται από νόμο του Faraday.

Στην περίπτωση στην οποία το δεύτερο ηλεκτρικό πηνίο, εντός του οποίου αναπτύσσεται η εξ' επαγωγής $e_{\varepsilon\pi}$, είναι κλειστό κύκλωμα, επακόλουθο είναι η δημιουργία ηλεκτρικού

ρεύματος (επαγωγικό ρεύμα), του οποίου η ένταση εξαρτάται, κατά το νόμο του Ohm, από την ολική ωμική αντίσταση R του κυκλώματος. Η ΗΕΔ αποτελεί το κύριο φαινόμενο της επαγωγής, το οποίο συμβαίνει ανεξάρτητα του αν το κύκλωμα είναι κλειστό ή ανοικτό, ενώ το επαγωγικό ρεύμα είναι δευτερεύον φαινόμενο, που εμφανίζεται μόνο, όταν το δεύτερο ηλεκτρικό πηνίο είναι κλειστό.

Επιπλέον η μεταβαλλόμενη ηλεκτρική τάση e_{π} στο δεύτερο πηνίο θα δημιουργήσει με τη σειρά της λόγω των ίδιων φαινομένων αντieleκτρεργετική δύναμη στο πρώτο πηνίο. Θεωρητικά η αντieleκτρεργετική δύναμη στο πρώτο πηνίο είναι ίση με την εξωτερική τάση που δημιούργησε το αρχικό ρεύμα διέγερσης.

Αν σε έναν μονοφασικό Μ/Σ, που αποτελείται από δύο πηνία αριθμού σπειρών N_1 και N_2 (βλέπε σχήμα 5.1.α), εφαρμοστεί ηλεκτρική ισχύς P_{in} στους ακροδέκτες του πρωτεύοντος πηνίου, θα δώσει στην έξοδο του δευτερεύοντος ηλεκτρική ισχύς P_{out} .

5.3.2.3 Απώλειες Μ/Σ

Όταν ο Μ/Σ είναι σε λειτουργία, οι συνιστώσες του ρεύματος διέγερσης i_{ϕ} που κυκλοφορεί στα πηνία του δημιουργούν ωμικές απώλειες που το θερμαίνουν. Αυτές οι απώλειες που ονομάζονται **απώλειες χαλκού** και **σιδήρου**, είναι ενεργή ισχύς (Watt). Το ρεύμα διέγερσης i_{ϕ} αναλύεται σε δύο συνιστώσες.

Η μια ονομάζεται ρεύμα μαγνήτισης i_m , παράγει το μαγνητικό πεδίο (έχει διαφορά φάσης -90° με την αντieleκτρεργετική τάση του πρωτεύοντος e_1 και δημιουργεί τις απώλειες χαλκού), και η άλλη ονομάζεται ρεύμα απωλειών πυρήνα i_c , είναι συμφασική με την e_1 και δημιουργεί τις απώλειες σιδήρου. Αυτές οι συνιστώσες του ρεύματος θερμαίνουν τον Μ/Σ. Ο σιδηροπυρήνας του Μ/Σ, που συνήθως έχει κυκλικό ή τετραγωνικό σχήμα, δεν είναι συμπαγής αλλά αποτελείται από πολλά σιδερένια ελάσματα. Αυτό συμβαίνει, για να περιοριστούν τα ρεύματα μαγνήτισης και να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του συστήματος.

5.3.2.4 Ιδανικός Μ/Σ

Η κυκλωματική αναπαράσταση ενός ιδανικού Μ/Σ δείχνεται στο σχήμα 5.1.β. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες και η τιμή της ισχύος εξόδου (ισχύς που παρέχει ο Μ/Σ) είναι ίση με την τιμή της ισχύος εισόδου (την ισχύ που λαμβάνει), ή αλλιώς $P_{out} = P_{in}$. Η ισότητα ισχύων εισόδου-εξόδου ισχύει για πραγματικές τιμές ισχύος (W), φαινόμενες τιμές ισχύος (VA) και άεργες τιμές ισχύος (VAR). Ισχύει η σχέση:

$$P_{in} = P_{out} \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5.1)$$

5.3.2.5 Ιδανικός Μ/Σ χωρίς φορτίο στην έξοδό του (εν κενώ)

Στο σχήμα 5.1.β δείχνεται η εν κενώ λειτουργία Μ/Σ. Το δευτερεύον δεν διαρρέεται από ρεύμα. Ο ιδανικός Μ/Σ λειτουργεί με το πρωτεύον πηνίο συνδεδεμένο σε εξωτερική AC πηγή, π.χ. ημιτονοειδούς τάσης, και με το δευτερεύον πηνίο να μη συνδέεται με φορτίο (unloaded transformer), δηλαδή τα άκρα του είναι ανοικτά.

Κατά τη λειτουργία του Μ/Σ χωρίς φορτίο, δεδομένου ότι το δευτερεύον δε διαρρέεται από ρεύμα, το πρωτεύον συμπεριφέρεται σαν πηνίο, με μικρή ωμική αντίσταση αλλά με μεγάλη επαγωγική αντίσταση, λόγω του πυρήνα σιδήρου. Επομένως η σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος είναι πάντοτε μεγάλη και η ένταση του ρεύματος διέγερσης i_{ϕ} μικρή. Η φάση της έντασης ρεύματος υστερεί της φάσης της εφαρμοζόμενης τάσης, περίπου κατά 90° .

Η τάση u_1 , που εφαρμόζεται στο πρωτεύον πηνίο από εξωτερική πηγή, θα είναι ίση με την επαγόμενη αντieleκτρεργετική τάση ή ΑΗΕΔ (back-electromotive force) e_1 που αναπτύσσεται στο πρωτεύον λόγω του ρεύματος διέγερσης i_{ϕ} . Στην εν κενώ λειτουργία το ρεύμα διέγερσης είναι πολύ μικρό και, επειδή και η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος είναι πολύ μικρή, μπορεί να παραληφθεί η πτώση τάσης στα άκρα της ωμικής αντίστασης και να θεω-

ρηθεί ότι η τάση της εξωτερικής πηγής ισούται προσεγγιστικά με την αντιηλεκτρεγερτική τάση:

$$u_1 = e_1 = -N_1 \frac{d\phi_B}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\phi_B}{dt} \quad \Rightarrow \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5.2)$$

όπου N_1 και N_2 ο αριθμός των σπειρών στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο αντίστοιχα. Το πρωτεύον και το δευτερεύον το διαρρέει η ίδια μαγνητική ροή Φ_B (flux linkage). Επομένως, η επαγόμενη ΗΕΔ ανά σπείρα είναι ίδια στο κάθε πηνίο.

5.3.2.6 Ιδανικός Μ/Σ με φορτίο στην έξοδό του

Στο σχήμα 5.1.γ δείχνεται η λειτουργία Μ/Σ με φορτίο (loaded transformer). Στα άκρα του δευτερεύοντος είναι συνδεδεμένο φορτίο σύνθετης αντίστασης Z_2 (impedance), π.χ. κινητήρες, λάμπες, θέρμανση κ.λπ. Το δευτερεύον διαρρέεται από ρεύμα:

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_2}{Z_2} \quad (5.3)$$

Το ρεύμα I_2 είναι αιτία να δημιουργηθεί μαγνητική ροή Φ_2 , που αντιτίθεται στην αρχική ροή Φ (τη ροή που δημιουργήθηκε λόγω του ρεύματος διέγερσης στο πρωτεύον) του Μ/Σ. Για να διατηρηθεί η αρχική ροή Φ σταθερή, αναπτύσσεται πρόσθετη μαγνητική ροή Φ_1 στο πρωτεύον, η οποία εξουδετερώνει τη Φ_2 . Έτσι εξισώνεται η επαγόμενη τάση στο πρωτεύον με την τάση της πηγής. Η ισχύς που παρέχει το πρωτεύον είναι ίση με αυτήν που καταναλώνεται στο φορτίο Z_2 . Από τις σχέσεις (5.1) έως (5.3) προκύπτει:

$$\frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \frac{Z_2}{\left(N_2/N_1\right)^2} \quad (5.4)$$

Όταν στο δευτερεύον του Μ/Σ συνδεθεί φορτίο Z_2 , την αντίσταση αυτή, όταν τη βλέπουμε ως προς τα άκρα του πρωτεύοντος, ονομάζεται ανηγμένη του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον και συμβολίζεται Z_2' . Στο σχήμα 5.1.δ δείχνεται η κυκλωματική αναπαράσταση της ανηγμένης του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον. Η Z_2' υπολογίζεται από το νόμο του Ohm και τη σχέση (5.4) ως εξής:

$$Z_2' = \frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} \hat{V}_2}{\frac{N_2}{N_1} \hat{I}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} = \frac{Z_2}{\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2} \Rightarrow Z_2' = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \Rightarrow Z_2' = Z_2 a^2 \quad (5.5)$$

Προέκυψε ότι η Z_2' είναι ίση με την αντίσταση Z_2 του φορτίου επί το τετράγωνο του πηλίκου του αριθμού των τυλιγμάτων.

Αντίστοιχα μια αντίσταση Z_1 συνδεδεμένη στο πρωτεύον τη βλέπουμε στο δευτερεύον ως:

$$Z_1'' = Z_1 / a^2 \quad (5.6)$$

Κατά τη λειτουργία του Μ/Σ με φορτίο, η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον παίρνει σημαντική τιμή που υπολογίζεται από το Νόμο του Ohm, βλέπε σχέση (5.3).

Κατά τη λειτουργία του Μ/Σ χωρίς φορτίο, το ρεύμα του πρωτεύοντος είναι μικρό. Αυτό εξηγείται, επειδή οι ΗΕΔ στο κύκλωμα του πρωτεύοντος είναι δύο.

- ΗΕΔ εξωτερικής πηγής στο πρωτεύον $u_1 = E_1 \sqrt{2} \sin(\omega t)$.
- ΗΕΔ λόγω επαγωγής στο πηνίο $N_1 \frac{d\phi_B}{dt}$.

Επειδή η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος είναι αμελητέα, ο δεύτερος κανόνας του Kirchhoff δίνει:

$$E_1 \sqrt{2} \sin(\omega t) - N_1 \frac{d\phi_B}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\phi_B}{dt} = \frac{E_1 \sqrt{2}}{N_1} \sin(\omega t) \Rightarrow \phi_B = \frac{E_1 \sqrt{2}}{N_1 \omega} \cos(\omega t) \quad (5.7)$$

που ισχύει για κάθε τιμή του φορτίου.

Αποδεικνύεται ότι η μέγιστη τιμή Φ_{max} της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του Μ/Σ δίνεται από τον τύπο:

$$\phi_{max} = \frac{E_1}{4,44 f N_1} \quad (5.8)$$

Αριθμητικό παράδειγμα: Όταν εξωτερική πηγή τάσης 220V rms, 50Hz εισάγει ισχύ σε Μ/Σ με $N_1=200$ σπείρες, τότε:

$$\phi_{max} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 200} \approx 5 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

Συμπέρασμα: Κατά τη λειτουργία του Μ/Σ χωρίς φορτίο, η μαγνητική ροή Φ_{max} οφείλεται αποκλειστικά στο ρεύμα του πρωτεύοντος. Κατά τη λειτουργία με φορτίο το ρεύμα του δευτερεύοντος δημιουργεί μια νέα μαγνητική ροή Φ_2 που, σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, έχει αντίθετο πρόσημο με την μαγνητική ροή Φ_1 που δημιουργεί το ρεύμα του πρωτεύοντος. Η ολική ροή Φ θα είναι ίση με $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$. Με βάση όμως τη σχέση (5.7) ή (5.8), το πλάτος της ολικής ροής Φ πρέπει να διατηρείται σταθερό και ανεξάρτητο του φορτίου. Άρα, όταν αυξάνεται το Φ_1 , θα αυξάνεται αντίστοιχα και το Φ_2 , ώστε η διαφορά τους να παραμένει σταθερή. Επομένως κάθε αύξηση της έντασης του ρεύματος στο δευτερεύον πρέπει να συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της έντασης του ρεύματος στο πρωτεύον.

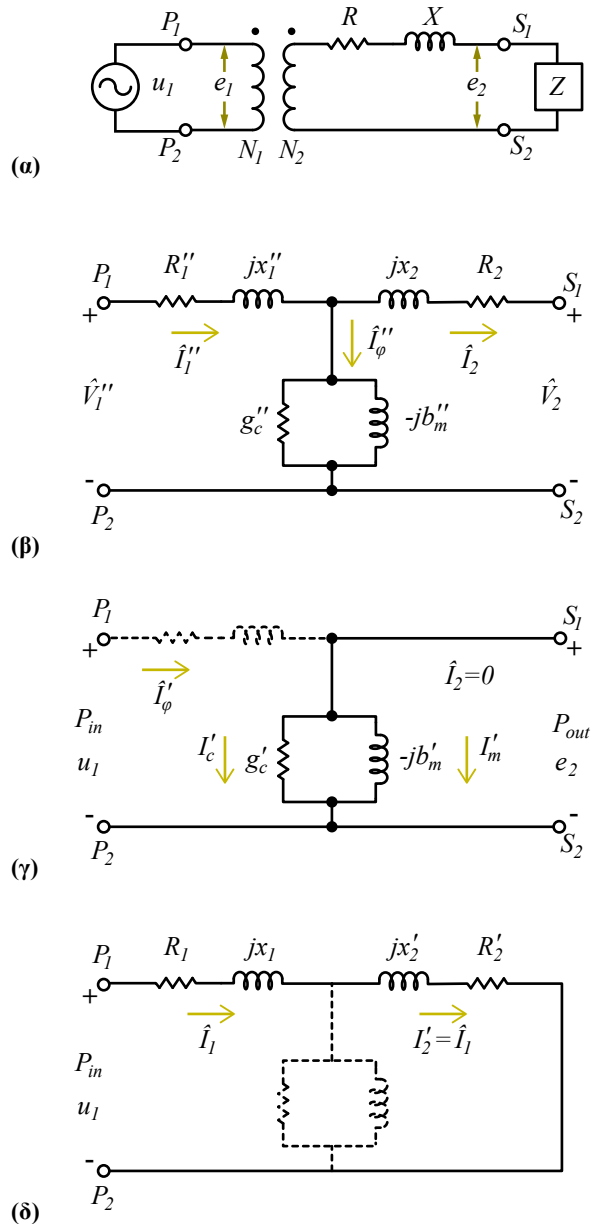
Συμπέρασμα: Η τάση u_2 του δευτερεύοντος είναι μέγιστη, εφόσον ο Μ/Σ λειτουργεί χωρίς φορτίο, μειώνεται, όταν το ρεύμα i_2 του δευτερεύοντος αυξάνεται και μηδενίζεται, όταν βραχυκυκλώνουμε το δευτερεύον.

5.3.2.7 Πραγματικός Μ/Σ

Οι πραγματικοί Μ/Σ έχουν αντίσταση τυλιγμάτων και απαιτούν άεργο ισχύ για τη δημιουργία των μαγνητικών τους πεδίων. Οι σπείρες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος έχουν συνολική ωμική αντίσταση R και μια συνολική επαγωγική αντίσταση X .

Στο σχήμα 5.2.α δείχνεται ένας πραγματικός Μ/Σ σε λειτουργία. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός Μ/Σ 1:1 μπορεί να προσεγγιστεί από το κύκλωμα του σχήματος 5.2.β. Στους πραγματικούς Μ/Σ δίνονται από τον κατασκευαστή οι ονομαστικές τιμές των τάσεων πρωτεύοντος, δευτερεύοντος, τα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος και η ονομαστική τιμή της φαινόμενης ισχύος S_N .

Αν η εξωτερική τάση u_1 στο πρωτεύον διατηρείται σταθερή, είναι φανερό ότι η τάση του δευτερεύοντος e_2 θα μεταβάλλεται με τη μεταβολή του φορτίου R και X . Όταν το φορτίο είναι χωρητικό, αναπτύσσεται μερικός συντονισμός μεταξύ της χωρητικότητας (capacitance) και της επαγωγής (reactance of inductor) X , με αποτέλεσμα η τάση e_2 του δευτερεύοντος να αυξάνεται ανάλογα με το χωρητικό φορτίο.



Σχήμα 5.2 – (α) Πραγματικός Μ/Σ σε λειτουργία, (β) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ, ανηγμένο στο δευτερεύον, (γ) απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ, με αναγωγή στο δευτερεύον, όταν λειτουργεί σε δοκιμή ανοικτοκύκλωσης (το ρεύμα διέγερσης είναι πολύ μικρό και η πτώση στα άκρα της $Z_1 = R_1'' + jX_1''$ είναι αμελητέα), (δ) Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ με αναγωγή στο δευτερεύον, όταν λειτουργεί σε δοκιμή βραχυκύκλωσης (το ρεύμα διέγερσης είναι πολύ μικρό σε σχέση με το ρεύμα του δευτερεύοντος και ο κλάδος διέγερσης παραλείπεται).

Στους πραγματικούς Μ/Σ, ο μετασχηματισμός τάσεων ρευμάτων υπολογίζεται από την ίδια σχέση (5.1) με τους ιδανικούς Μ/Σ. Ο λόγος του πλήθους των σπειρών των τυλιγμάτων αφορά μόνο στην αναλογία των ονομαστικών τιμών τάσεων και ρευμάτων του Μ/Σ (βλέπε σχέσεις (5.9) και (5.10)):

$$\frac{V_N'}{V_N''} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5.9)$$

Ο δείκτης N συμβολίζει ονομαστική τιμή.

Από τη σχέση αναλογίας τάσεων – πλήθους σπειρών (5.9) και από την εφαρμογή του νόμου του Ohm για την ονομαστική τιμή της φαινόμενης ισχύος S_N , υπολογίζεται το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος:

$$I'_N = \frac{S_N}{V'_N}, I''_N = \frac{S_N}{V''_N} \Rightarrow \frac{I''_N}{I'_N} = \frac{V''_N}{V'_N} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5.10)$$

5.3.2.8 Απόδοση πραγματικού Μ/Σ

Η απόδοση οποιασδήποτε ηλεκτρικής συσκευής ή μηχανής δίνεται από το λόγο της ενεργούς τιμής ισχύος εξόδου προς την ενεργό τιμή ισχύος εισόδου της (active power). Η εξίσωση της εκατοστιαίας απόδοσης είναι: $\% \text{Απόδοση} = \text{Ενεργός τιμή ισχύος εξόδου} / \text{Ενεργός τιμή ισχύος εισόδου} \times 100\%$, ή:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_1 I_1 \cos \theta_1} \times 100\% \quad (5.11)$$

Η εκατοστιαία πτώση τάσης Μ/Σ (transformer regulation) δείχνει πόσο μεταβάλλεται η τάση του δευτερεύοντος ενός Μ/Σ, όταν η τάση του πρωτεύοντος είναι σταθερή και η φόρτιση του Μ/Σ μεταβάλλεται από την εν κενώ λειτουργία ($I_2=0, Z=\infty$) μέχρι το πλήρες φορτίο.

$$r = \frac{V_1 / a - V_2}{V_1 / a} \times 100\% \quad (5.12)$$

5.3.2.9 Χαρακτηριστική φορτίου Μ/Σ

Χαρακτηριστική φορτίου Μ/Σ ή καμπύλη φορτίου, ονομάζεται η γραφική παράσταση της τάσης του δευτερεύοντος ως προς την έντασή του, όταν η τάση του πρωτεύοντος και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου παραμένουν σταθερά.

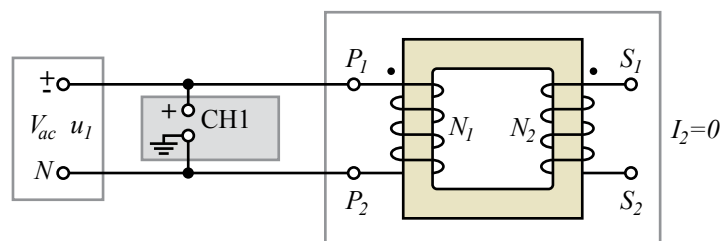
Όταν το φορτίο που υπερισχύει είναι ωμικό ή επαγωγικό, η τάση με φορτίο είναι χαμηλότερη της τάσης χωρίς φορτίο. Όταν το φορτίο που υπερισχύει είναι χωρητικό, η τάση με φορτίο είναι ανυψώνεται ελαφρά της τάσης χωρίς φορτίο.

5.3.3 Εκτέλεση

1. **Δοκιμή ανοικτού κυκλώματος.** Να κατασκευάσετε το κύκλωμα λειτουργίας του Μ/Σ εν κενώ, όπως στο σχήμα 5.3. Επιλέξτε οι σπείρες του πρωτεύοντος να είναι λιγότερες από εκείνες του δευτερεύοντος ($2N_1=N_2$). Ενώ δεν υπάρχει φορτίο στην έξοδο ($Z_2=\infty, I_2=0$), εφαρμόζουμε τάση u_1 στο πηνίο με τις λιγότερες σπείρες.

Ο λόγος που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ως πρωτεύον εκείνο με τις λιγότερες σπείρες είναι ότι, κατά τη δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, αν χρησιμοποιηθεί ως πρωτεύον το πηνίο με τις περισσότερες σπείρες, το ρεύμα θα είναι πολύ μικρό και το σφάλμα μέτρησης μεγαλύτερο.

Για λόγους ασφάλειας η εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον δεν πρέπει να ξεπεράσει το 1/10 της ονομαστικής τιμής τάσης του πηνίου. Τη συχνότητα της ημιτονοειδούς τάσης εισόδου την επιλέγετε από τη γεννήτρια (εξωτερική πηγή) στα 50Hz. Ρυθμίζετε την τιμή της τάσης από τη γεννήτρια και τη διαβάζετε στον παλμογράφο, π.χ. στο κανάλι 1.



Σχήμα 5.3 – Δοκιμή ανοικτού κυκλώματος.

- Ανάλογα με τις δυνατότητες της γεννήτριας, επιλέγετε δύο διαφορετικές τάσεις, π.χ. από 3V έως 10V AC. **Προσοχή:** ρυθμίζετε τις τιμές έχοντας κάνει σύζευξη της γεννήτριας με τον παλμογράφο. Μετρήστε στο δεύτερο κανάλι εισόδου του παλμογράφου την τάση και την περίοδο του δευτερεύοντος πηνίου του Μ/Σ, καθώς και τη διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων εισόδου-εξόδου. Καταγράψτε τις τιμές σε πίνακα της μορφής του πίνακα 5.1.
- Δοκιμή βραχυκύκλωσης.** Βραχυκυκλώστε τα άκρα του δευτερεύοντος πηνίου και μετρήστε με τον παλμογράφο το πλάτος τάσης πρωτεύοντος.

a/a	V_1 (V) (άκρα πρωτ/ντος πηνίου N_1 σπειρών)	Περίοδος (ms)	V_2 (V) (άκρα δευτ/ντος πηνίου N_2 σπειρών)	Περίοδος (ms)	Διαφορά φάσης
...	...	...	...	...	...

Πίνακας 5.1 – Καταχώριση μετρήσεων.

5.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

- Από τις μετρήσεις σας του πίνακα 5.1 επιβεβαιώστε τη σχέση αναλογίας ρευμάτων, τάσεων, πλήθους τυλιγμάτων.
- Αλλάζει η συχνότητα στα άκρα του δευτερεύοντος πηνίου στις παραπάνω περιπτώσεις;
- Σχολιάστε την τιμή τάσης στο πρωτεύον, όταν το δευτερεύον έχει βραχυκυκλωθεί.

5.4 Πείραμα 2

5.4.1 Σκοπός

Μελέτη της επίδρασης χωρητικών και επαγωγικών φορτίων στη μεταφορά ισχύος μέσω του Μ/Σ.

5.4.2 Θεωρία

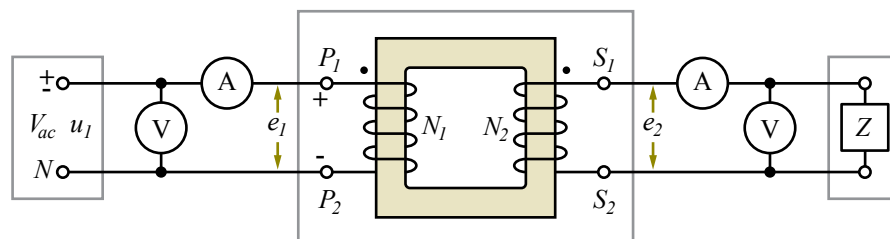
Βλέπε πείραμα 1.

5.4.3 Εκτέλεση

- Μ/Σ με φορτίο στην έξοδό του.** Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του σχήματος 5.4. Επιλέξτε οι σπείρες του πρωτεύοντος να είναι λιγότερες από εκείνες του δευτερεύοντος ($2N_1=N_2$). Τα όργανα μέτρησης είναι δύο βολτόμετρα και δύο μιλιαμπερόμετρα για τις μετρήσεις των τάσεων και των ρευμάτων στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο.

Το κύκλωμα αφορά στη σύνδεση διαφορετικών ειδών φορτίου (ωμικών, επαγωγικών, χωρητικών), διαφορετικών τιμών, στην έξοδο του Μ/Σ. Συνδέστε διαδοχικά τα διαφορετικά φορτία ωμικής αντίστασης $Z=R$, π.χ. 2Ω, 10Ω, 100Ω, 470Ω, 1kΩ, πυκνωτών $Z=X_C$, π.χ. 1μF, 8,2μF και πηνίων $Z=X_L$, π.χ. 1mH, 3mH που έχετε στη διάθεσή σας.

Προσοχή: τα ηλεκτρονικά πολύμετρα να ρυθμιστούν για μετρήσεις AC.



Σχήμα 5.4 – Δοκιμή ανοικτού κυκλώματος.

- Επιλέξτε από τη γεννήτρια συχνότητα $f=50\text{Hz}$ και τάση ανάλογα με τις δυνατότητες της γεννήτριας (μια τιμή από 3V έως 10V AC). Για κάθε διαφορετικό φορτίο μετρήστε και κα-

ταγράψτε σε πίνακα της μορφής του πίνακα 5.2 την τάση στο δευτερεύον και τα ρεύματα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο.

	$N_1 = \dots, N_2 = \dots$	$N_1/N_2 = \dots$			
Είδος φορτίου	Τιμή φορτίου (Ω)	V_1 (V)	I_1 (mA)	I_2 (mA)	V_2 (V)
...	...	...	...	...	...

Πίνακας 5.2 – Καταχώριση μετρήσεων.

5.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Από τις μετρήσεις του πίνακα 5.2 να υπολογίσετε για κάθε είδος φορτίου, π.χ. ωμικό (resistance), χωρητικό (capacitance), επαγωγικό (inductance), την εκατοστιαία πτώση της τάσης του Μ/Σ, χρησιμοποιώντας τιμές για το μεγαλύτερο και μικρότερο φορτίο.
2. Είναι η φαινόμενη ισχύς (VA) του πρωτεύοντος πηνίου ίση με την αντίστοιχη του δευτερεύοντος, για κάθε τιμή της αντίστασης φορτίου του πίνακα 5.2; Εξηγήστε.
3. Από τις μετρήσεις του πίνακα 5.2, για κάθε είδος φορτίου, σχεδιάστε τις τρεις καμπύλες φορτίου σε τρία διαφορετικά διαγράμματα. Η καμπύλη να σχεδιαστεί από την ένωση των σημείων, με προσέγγιση καμπύλης δευτέρου βαθμού (είτε στο χέρι είτε με χρήση H/Y).
4. Από τις πειραματικές μετρήσεις τάσης και ρεύματος στο πρωτεύον, υπολογίστε την πειραματική τιμή της σύνθετης αντίστασης Z'_2 του πρωτεύοντος πηνίου και συγκρίνετέ την με τη θεωρητική τιμή του πρωτεύοντος που βλέπουμε στα άκρα του (ανηγμένη αντίσταση του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον).
5. Οι ονομαστικές τιμές λειτουργίας του Μ/Σ αναγράφονται πάνω του (ωμική αντίσταση και αυτεπαγωγή).

5.5 Πείραμα 3

5.5.1 Σκοπός

Επίδραση της συχνότητας στα ρεύματα του Μ/Σ.

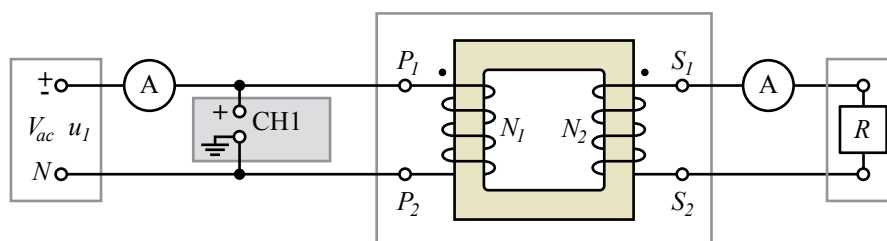
5.5.2 Θεωρία

Βλέπε πείραμα 1.

5.5.3 Εκτέλεση

Να κατασκευασθεί το κύκλωμα του σχήματος 5.5.

Προσοχή: τα αμπερόμετρα να είναι ρυθμισμένα σε μέτρηση AC ρεύματος.



Σχήμα 5.5 –

Επιλέξτε στη γεννήτρια συχνότητα $f=50\text{Hz}$ και τάση ανάλογα με τις δυνατότητές της (μια τιμή από 3V έως 10V AC). Το φορτίο είναι ωμική αντίσταση $R=10\Omega$.

Διατηρώντας σταθερή την τάση V_1 στα άκρα του πρωτεύοντος, ρυθμίζοντάς την σε κάθε μέτρηση από τη γεννήτρια, για διαφορετικές συχνότητες (50Hz, 400Hz, 1000Hz, 1500Hz,

2kHz, 5kHz), μετρήσετε τα ρεύματα I_1 και I_2 πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου και καταγράψτε τις μετρήσεις σας σε πίνακα της μορφής του πίνακα 5.3.

5.5.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Από τις μετρήσεις του πίνακα 5.3 επιβεβαιώστε τη σχέση ρευμάτων με την αναλογία του πλήθους των πηνίων.
2. Να σχεδιάσετε τη γραφική παράσταση των ρευμάτων I_1 και I_2 των πηνίων του Μ/Σ σε συνάρτηση με τη συχνότητα f , πάνω στο ίδιο γράφημα, $I_1=f(f)$, $I_2=f(f)$.
3. Δικαιολογήστε τη μορφή των καμπυλών.

$N_1=\dots, N_2=\dots$			
V_1 (V)	f (Hz)	I_1 (A)	I_2 (A)
...	...	...	...

Πίνακας 5.3 – Καταχώριση μετρήσεων.

5.6 Πείραμα 4

5.6.1 Σκοπός

Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων Μ/Σ.

5.6.2 Θεωρία

Το ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ ανηγμένο ως προς το δευτερεύον πηνίο δείχνεται στο σχήμα 5.2.β. Τα μεγέθη R_p , X_p , R_s , X_s , g_c και b_m του ισοδύναμου κυκλώματος μπορούν να προσδιοριστούν με πειραματικό τρόπο. Οι απαιτούμενες μετρήσεις γίνονται με δύο βασικές δοκιμές: (i) τη δοκιμή ανοικτού κυκλώματος (ii) τη δοκιμή βραχυκύκλωσης.

5.6.2.1 Δοκιμή ανοικτού κυκλώματος

Γνωρίζουμε ότι κατά τη λειτουργία του Μ/Σ με σταθερή εισαγωγή τάσης, η μαγνητική ροή Φ δεν αλλάζει σημαντικά με τις αλλαγές του φορτίου στο δευτερεύον πηνίο. Επομένως οι απώλειες σιδήρου θεωρούνται πρακτικά σταθερές για διαφορετικά φορτία και μπορούν να μετρηθούν σε δοκιμή ανοικτού κυκλώματος. Η τιμή του ρεύματος διέγερσης θα είναι πολύ μικρή, της τάξης του 2% έως 6% του ρεύματος κανονικής λειτουργίας. Επειδή η πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος θα είναι πολύ μικρή, θεωρείται αμελητέα και πρακτικά η τάση εισόδου ισούται με την ΗΕΔ e_1 . Επίσης οι απώλειες χαλκού $R_1 i_f^2$ είναι αμελητέες. Έτσι οι απώλειες σιδήρου υπολογίζονται με πολύ καλή προσέγγιση από τη μέτρηση της ισχύος εισόδου. Από το κύκλωμα του πρωτεύοντος μπορεί να υπολογιστεί ο κλάδος διέγερσης, δηλαδή η σύνθετη αγωγιμότητα διέγερσης $Y'_\varphi = g'_c - jb'_m$ (βλέπε σχήμα 5.2.β και 5.2.γ) καθώς και τις σχέσεις (5.13):

$$\begin{aligned}
 P_{in} &\simeq g'_c U_1^2 \Rightarrow g'_c \simeq \frac{P_{in}}{U_1^2} \\
 Y'_\varphi &\simeq \frac{I'_\varphi}{U_1}, \\
 Y'_\varphi = g'_c - jb'_m &\Rightarrow b'_m = \sqrt{Y'^2_\varphi - g'^2_c},
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

5.6.2.2 Δοκιμή βραχυκύκλωσης

Σε αυτή τη δοκιμή το δευτερεύον βραχυκυκλώνεται, οπότε το ρεύμα του δευτερεύοντος γίνεται πολύ μεγάλο. Το ισοδύναμο κύκλωμα δοκιμής βραχυκύκλωσης δείχνεται στο σχήμα 5.2.δ. Η συμβολή του ρεύματος διέγερσης του πρωτεύοντος είναι αμελητέα σε σχέση με το ρεύμα του δευτερεύοντος. Αν εισαχθεί στην είσοδο του Μ/Σ τάση μικρότερη της ονομα-

στικής, π.χ. το 1/10 της ονομαστικής τιμής, τότε το κλάδος διέγερσης μπορεί να μη ληφθεί υπόψη. Τα μεγέθη του κυκλώματος υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.14) και (5.15):

$$R_1 \simeq R_2' \simeq \frac{R_{in}'}{2} \quad X_1 \simeq X_2' \simeq \frac{X_{in}'}{2} \quad (5.14)$$

$$P_{in} \simeq R_{in}' I_1^2 \Rightarrow R_{in}' \simeq \frac{P_{in}}{I_1^2}$$

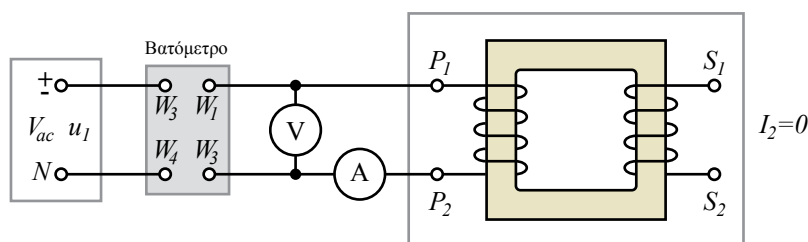
$$Z_{in}' \simeq \frac{U_1}{I_1}, \quad (5.15)$$

$$Z_{in}' = R_{in}' - jX_{in}' \Rightarrow X_{in}' = \sqrt{Z_{in}'^2 - R_{in}'^2},$$

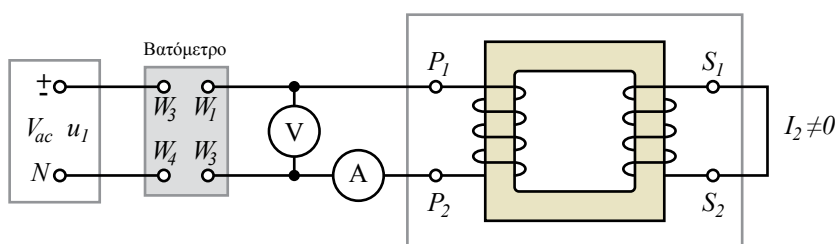
5.6.3 Εκτέλεση

Δοκιμή ανοικτού κυκλώματος

1. Να κατασκευασθεί το κύκλωμα δοκιμής ανοικτού κυκλώματος του σχήματος 5.6. Επιλέξτε τις σπείρες του πρωτεύοντος ώστε να είναι λιγότερες από εκείνες του δευτερεύοντος, $2N_1=N_2$ (Μ/Σ ανύψωσης τάσης). Δεν υπάρχει φορτίο στην έξοδο ($Z_2=\infty$, $I_2=0$) και εφαρμόζουμε στο πηνίο με τις λιγότερες σπείρες του Μ/Σ τάση u_1 . Για λόγους ασφάλειας η εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον δεν πρέπει να ξεπεράσει το 1/10 της ονομαστικής τιμής τάσης του πηνίου. Τη συχνότητα της ημιτονοειδούς τάσης εισόδου την επιλέγετε από τη γεννήτρια (εξωτερική πηγή) στα 50Hz. Την τιμή της τάσης τη ρυθμίζετε από τη γεννήτρια και τη διαβάζετε στον παλμογράφο, π.χ. στο κανάλι 1.



Σχήμα 5.6 – Δοκιμή ανοικτού κυκλώματος για τον προσδιορισμό των παραμέτρων Μ/Σ.



Σχήμα 5.7 – Δοκιμή βραχυκύκλωσης για τον προσδιορισμό των παραμέτρων Μ/Σ.

2. Ανάλογα με τις δυνατότητες της γεννήτριας επιλέγετε δύο διαφορετικές τάσεις, π.χ. από 3V έως 10V AC. Με τα όργανα μέτρησης της συνδεσμολογίας μετρήσετε τα μεγέθη ισχύος εισόδου P_{in} , ρεύματος πρωτεύοντος (ρεύμα διέγερσης) I_1' , τάσης εισόδου U_1 .

Δοκιμή βραχυκύκλωσης

3. Στο προηγούμενο κύκλωμα της δοκιμής ανοικτού κυκλώματος, βραχυκυκλώστε την έξοδο του δευτερεύοντος (βλέπε σχήμα 5.7).
4. Για τις ίδιες τιμές ισχύος εισόδου μετρήσετε τα μεγέθη ισχύος εισόδου P_{in} , ρεύματος πρωτεύοντος I_1 , τάσης εισόδου U_1 .

5.6.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Από τις μετρήσεις σας υπολογίστε τα στοιχεία του Μ/Σ από τις σχέσεις (5.13) έως (5.15). Επειδή από τις σχέσεις (5.14) και (5.15) τα στοιχεία του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος υπολογίζονται σαν άθροισμα, χρησιμοποιήστε την προσέγγιση (5.13).

5.7 Πείραμα 5

5.7.1 Σκοπός

Μελέτη του Μ/Σ σε πιστόλι συγκόλλησης.

5.7.2 Θεωρία

Μια εφαρμογή του Μ/Σ είναι το ηλεκτρικό πιστόλι συγκόλλησης, που χρησιμοποιείται για θερμικές συγκολλήσεις. Αποτελείται από ένα ζευγάρι πηνίων, και λειτουργεί με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον. Οι σπείρες του δευτερεύοντος πηνίου, πλήθους N_2 , είναι συνήθως λιγότερες από πέντε, και σε κάθε περίπτωση πολύ λιγότερες από τις σπείρες του πρωτεύοντος, με αποτέλεσμα η τάση στα άκρα του δευτερεύοντος να είναι πολύ μικρή και το ρεύμα πολύ μεγάλο ($N_1 \gg N_2$).

Το μεγάλο ρεύμα χρειάζεται, για να δημιουργεί έντονο θερμικό φαινόμενο (φαινόμενο Joule). Το σύρμα του δευτερεύοντος πηνίου είναι ιδιαίτερα μεγάλης διατομής, για να δύναται να διαρρέεται από υψηλές τιμές ρεύματος. Το σημείο συγκόλλησης, που υπερθερμαίνεται, συνδέεται με το δευτερεύον πηνίο.

5.7.2.1 Υπολογισμός ωμικής αντίστασης ενός αγωγού από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του

Η ωμική αντίσταση R ενός κυλινδρικού αγωγού μήκους L και εμβαδού διατομής A με ειδική αντίσταση του υλικού ρ δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (5.16)$$

5.7.2.2 Μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα

Ένα στοιχείο κυκλώματος συνδεδεμένο σε ηλεκτρικό κύκλωμα παρουσιάζει στα άκρα του διαφορά δυναμικού V και διαρρέεται από ρεύμα I . Το στοιχείο αυτό προσφέρει ενέργεια στο κύκλωμα, αν η φορά του ρεύματος είναι από το χαμηλότερο δυναμικό προς το υψηλότερο. Ένα τέτοιο στοιχείο παίρνει ενέργεια από το κύκλωμα, αν το ρεύμα είναι αντίθετης φοράς. Η ισχύς P (ρυθμός μεταφοράς ενέργειας) από ή προς το στοιχείο είναι:

$$P = VI \quad (5.17)$$

Ένας ωμικός αντιστάτης R πάντοτε καταναλώνει ενέργεια από το κύκλωμα, μετατρέποντάς την τελικά σε θερμότητα, με ρυθμό που δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{W}{t} = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (5.18)$$

Σύμφωνα με τη θερμιδομετρία, ένα σώμα μάζας m (kg) και ειδικής θερμότητας c ($\text{cal kg}^{-1} \text{grad}^{-1}$), για να μεταβάλει τη θερμοκρασία του κατά $\Delta\theta$ (grad), χρειάζεται να προσλάβει ποσό θερμότητας ίσο με:

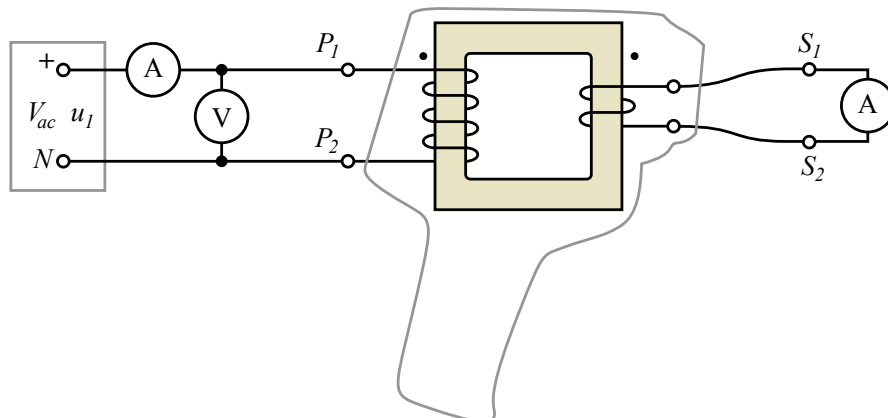
$$Q = mc\Delta\theta \quad (5.19)$$

Η ισχύς ροής θερμότητας υπολογίζεται ως:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{mc\Delta\theta}{\Delta t} \quad (5.20)$$

5.7.3 Εκτέλεση

1. Αναγνωρίστε τον Μ/Σ στο πιστόλι συγκόλλησης.
2. Συνδέστε τη γεννήτρια και τον παλμογράφο στο πρωτεύον πηνίο του Μ/Σ του ηλεκτρικού πιστολιού συγκόλλησης (βλέπε σχήμα 5.8). Μετρήστε τον αριθμό σπειρών του δευτερεύοντος.
3. Ανάλογα με τις δυνατότητες της γεννήτριας επιλέγετε δύο διαφορετικές τάσεις, π.χ. από 3V έως 10V AC, και με τα όργανα μέτρησης της συνδεσμολογίας μετρήστε για κάθε μια διαφορετική τιμή τάσης εισόδου τα μεγέθη ρεύματος πρωτεύοντος (ρεύμα διέγερσης) I_1 , την τάση εισόδου V_1 , το ρεύμα I_2 στην έξοδο του Μ/Σ. Καταγράψτε τις μετρήσεις σας σε πίνακα της μορφής του πίνακα 5.4.



Σχήμα 5.8 – Μ/Σ στο ηλεκτρικό πιστόλι. Οι σπείρες δευτερεύοντος πηνίου είναι λιγότερες από πέντε (μια έως πέντε), ενώ οι σπείρες του πρωτεύοντος είναι πολύ περισσότερες.

V_1 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)
...	...	...

Πίνακας 5.4 – Καταχώριση μετρήσεων.

5.7.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Δεδομένα:

Για τον Μ/Σ του πιστολιού του πειράματός σας, για το πηνίο των λίγων σπειρών δίνονται:

- Μήκος αγωγού $L=20\text{cm}$.
- Διάμετρος διατομής αγωγού $d=1,3\text{mm}$.
- Μάζα του χάλκινου αγωγού είναι $m=4,1\text{gr}$.
- Ειδική αντίσταση του χαλκού: $\rho=1,72 \times 10^{-8}\Omega\text{m}$ και ειδική θερμότητα του χαλκού: $c=400\text{Jkg}^{-1}\text{grad}^{-1}$ στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1. Από τις μετρήσεις σας να υπολογίσετε τον αριθμό των σπειρών N_1 στο πρωτεύον πηνίο του Μ/Σ.
2. Υπολογίστε την ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος πηνίου του Μ/Σ από τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά.
3. Να υπολογίσετε τη θεωρητική ποσοστιαία μεταβολή θερμοκρασίας που παρουσιάζει ο Μ/Σ στις εξόδους του, μετά από κάποιο χρόνο συνεχούς λειτουργίας.
4. Υποθέτοντας ότι τροφοδοτούμε το πηνίο πολλών σπειρών του Μ/Σ με τάση $V_1=220\text{V rms}$, να υπολογίσετε θεωρητικά ποια θα ήταν η τάση V_2 στο δευτερεύον πηνίο καθώς και το ρεύμα I_2 που θα το διέρρεε.
5. Σε συνέχεια του προηγούμενου ερωτήματος, υπολογίστε την ισχύ P (ρυθμός μεταφοράς ενέργειας) που μετατρέπεται σε θερμότητα στην ωμική αντίσταση R στο πηνίο με τις λιγότερες σπείρες του πιστολιού, όταν το διαρρέει ρεύμα I_2 για $\Delta t=30\text{s}$ και, στη συνέχεια, υπολογίστε την τελική θερμοκρασία θ_2 του χάλκινου σύρματος. Θεωρήστε ως αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος $\theta_1=25^\circ\text{C}$.

5.8 Πείραμα 6

5.8.1 Σκοπός

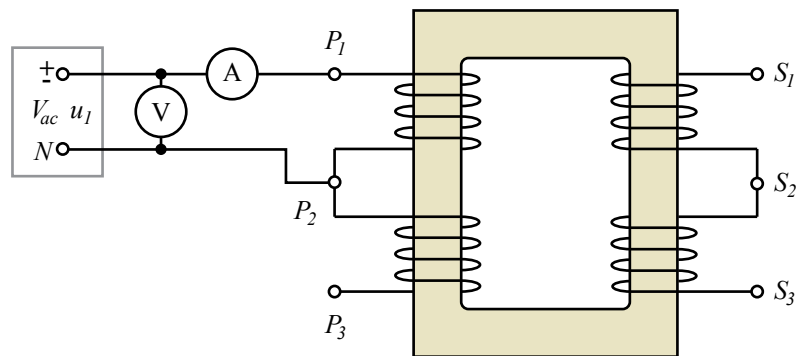
Παρατήρηση του φαινομένου της μαγνητικής υστέρησης.

5.8.2 Θεωρία

Λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα του Μ/Σ, το ρεύμα μαγνήτισης το οποίο παράγει την ημιτονοειδή μαγνητική ροή δεν είναι ακριβώς ημιτονοειδούς μορφής. Λόγω του φαινομένου της μαγνητικής υστέρησης του σιδηρομαγνητικού υλικού, όταν η μαγνητική ροή αυξάνεται, π.χ. όταν $0 < \omega t < \pi/2$, απαιτείται μεγαλύτερη ένταση ρεύματος για να εγκατασταθεί η ίδια μαγνητική ροή από ότι όταν αυτή ελαττώνεται (π.χ. όταν $\pi/2 < \omega t < \pi$).

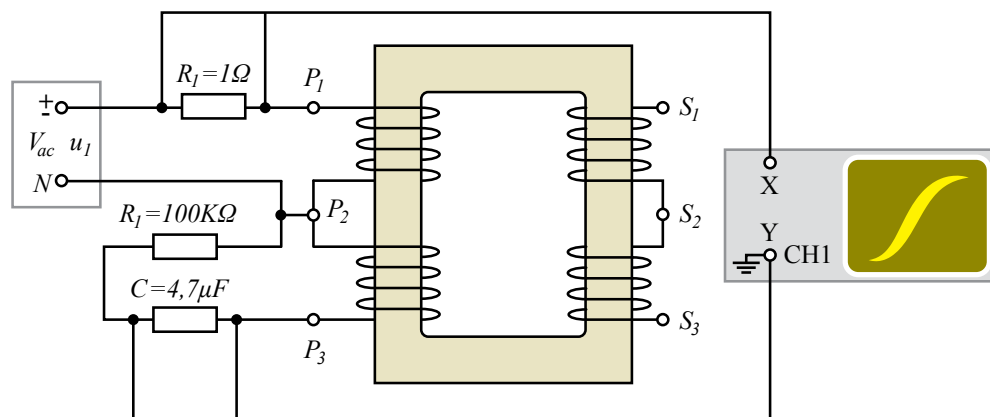
5.8.3 Εκτέλεση

1. Να αναγνωρίσετε τις ενδιάμεσες λήψεις του Μ/Σ και να κατασκευασθεί το κύκλωμα του σχήματος 5.9.



Σχήμα 5.9 – Διάταξη για τη μέτρηση επαγωγικής αντίστασης.

2. Επιλέξτε στη γεννήτρια συχνότητα $f=50\text{Hz}$ και πέντε τουλάχιστον διαφορετικές τάσεις, ανάλογα με τις δυνατότητες της γεννήτριας, τιμές από 3V έως το 1/10 της ονομαστικής τιμής της τάσης εισόδου του Μ/Σ). Μετρήστε τα αντίστοιχα ζεύγη ρεύματος-τάσης. Καταγράψτε τις μετρήσεις σας σε πίνακα της μορφής του πίνακα 5.5.
3. Να κατασκευασθεί το κύκλωμα του σχήματος 5.10.
4. Επιλέξτε στη γεννήτρια συχνότητα $f=50\text{Hz}$ και μια τάση ανάλογα με τις δυνατότητές της (μια τιμή έως το 1/10 της ονομαστικής τιμής της τάσης εισόδου του Μ/Σ).
5. Θέστε τον παλμογράφο σε X-Y λειτουργία και παρατηρήστε την οθόνη.



Σχήμα 5.10 – Διάταξη για την παρατήρηση του φαινομένου της υστέρησης του πυρήνα του Μ/Σ.

V_l (V)	I_l (A)	$X_L = V_l / I_l$ (Ω)	$L = X_L / \omega$ (H)
...	...		...

Πίνακας 5.5 – Καταχώριση μετρήσεων.

5.8.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Από τις τιμές ρευμάτων και τάσεων (ζεύγη τιμών) να υπολογίσετε την επαγωγική αντίσταση του πηνίου.
2. Να σχεδιάσετε την καμπύλη των τιμών των επαγωγικών αντιστάσεων σε συνάρτηση με το ρεύμα.

5.9 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 30: Electromagnetic Induction,” in *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.
- [2] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 12: Electromagnetic Induction,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 342-382.

ΑΣΚΗΣΗ 6

Μέτρηση πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος



6.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Βολτόμετρο.
2. Αμπερόμετρο.
3. Τροφοδοτικό συνεχόμενου και εναλλασσόμενου ηλεκτρικού σήματος.
4. Πλακέτα γρήγορης συνδεσμολογίας.
5. Ωμικές καταναλώσεις (π.χ. λάμπες πυράκτωσης), πηνία (π.χ. $L=5\text{H}$, 3mH).
6. Βατόμετρο (προαιρετικό, δε φαίνεται στη φωτογραφία).

6.2 Απαραίτητες γνώσεις

Εναλλασσόμενο ηλεκτρικό σήμα, ενεργή τιμή, στιγμιαία τιμή, διαφορά φάσης, σύνθετη αντίσταση κυκλώματος, φανταστική ή άεργη αντίσταση, ωμική αντίσταση, πηνίο, αυτεπαγωγή, πυκνωτής, πραγματική και άεργη ισχύς, συντελεστής ισχύος.

6.3 Πείραμα

6.3.1 Σκοπός

- Μέτρηση πραγματικής ισχύος P σε κύκλωμα AC και DC.
- Υπολογισμός ισχύος: άεργης Q και σύνθετης S , σε κύκλωμα AC.

6.3.2 Θεωρία

Η στιγμιαία τιμή ενός σήματος ημιτονοειδούς μορφής περιγράφεται από την εξίσωση:

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t) \quad (6.1)$$

Η έννοια της ενεργούς τιμής περιγράφει τη μέση τιμή ενός περιοδικού μεγέθους, είτε αυτό είναι θετικό είτε είναι αρνητικό, και ορίζεται σαν η μέση τιμή της ρίζας του μέσου τετραγώνου, rms (root mean square). Η ενεργή τιμή ενός ημιτονοειδούς μορφής σήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

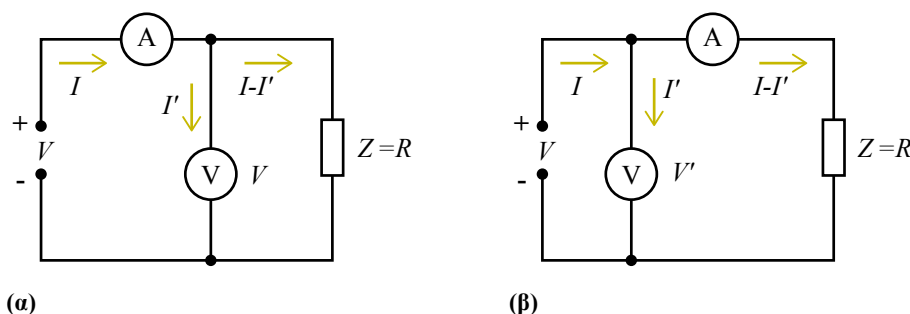
$$I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (6.2)$$

6.3.2.1 Μέτρηση ισχύος σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος

Σ' ένα κύκλωμα συνεχούς ρεύματος DC, το ρεύμα και η τάση δεν παρουσιάζουν διαφορά φάσης. Η ισχύς P της κατανάλωσης Z (βλέπε σχήμα 6.1) για τα DC κυκλώματα δίνεται από τη σχέση:

$$P = VI \quad (6.3)$$

Για να μετρήσουμε αυτή την ισχύ P , δε χρειαζόμαστε ειδικό όργανο. Μπορούμε να την υπολογίσουμε από τις ενδείξεις ενός βολτομέτρου και ενός αμπερομέτρου. Προκειμένου να μετρήσουμε την ισχύ, το βολτόμετρο και το αμπερόμετρο μπορεί να συνδεθούν με την ωμική αντίσταση (κατανάλωση) R με δύο τρόπους, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1



Σχήμα 6.1 – Μέτρηση της ισχύος σε κύκλωμα.

Στο κύκλωμα σχήματος 6.1.α η μετρούμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P = V(I - I') \quad (6.4)$$

Στο κύκλωμα σχήματος 6.1.β η μετρούμενη ισχύς είναι:

$$P = V'(I - I') \quad (6.5)$$

Θεωρητικά το βολτόμετρο έχει άπειρη αντίσταση, ώστε να μην διέρχεται ρεύμα από αυτό, και το αμπερόμετρο παρουσιάζει μηδενική αντίσταση, ώστε να μη δημιουργείται πτώση τάσης στα άκρα του. Στην πράξη όμως και στα δύο κυκλώματα (α) και (β) τα σφάλματα των μετρήσεων οφείλονται στην πεπερασμένη αντίσταση του βολτομέτρου, η οποία επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος από αυτό, και στη μη μηδενική αντίσταση του αμπερομέτρου, η οποία προκαλεί μια μικρή πτώση της τάσης στα άκρα του.

6.3.2.2 Μέτρηση πραγματικής ισχύος σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος

Το σύνολο της ισχύος που απορροφά ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό κύκλωμα στα άκρα της κατανάλωσης ονομάζεται φαινόμενη ισχύς (apparent power) S και συνίσταται από την πραγματική ισχύ (active power) P και τη φανταστική ισχύ (reactive power) Q . Τα μεγέθη των ισχύων είναι διανυσματικά (όχι αριθμητικά).

Η φαινόμενη ισχύς S (VA) στα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος AC εκφράζεται μαθηματικά σαν ένα μιγαδικό μέγεθος:

$$S = V_{rms} I_{rms} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6.6)$$

όπου V_{rms} και I_{rms} είναι ενεργές τιμές τάσης και ρεύματος στα άκρα της κατανάλωσης (βλέπε σχήμα 6.1).

Η S μετριέται σε Volt-Amps (VA) και έχει δύο συνιστώσες:

- Την πραγματική (ωμική) ή, αλλιώς, ενεργή συνιστώσα ισχύος P που μετριέται σε Watt (W):

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \phi \quad (6.7)$$

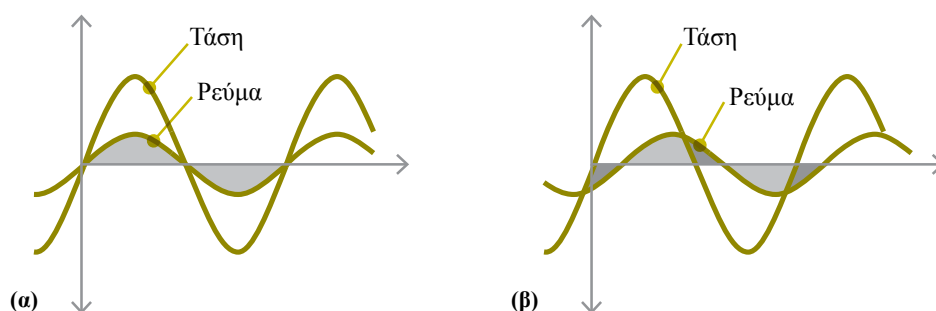
όπου V_{rms} , I_{rms} είναι οι ενεργές τιμές της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα και ϕ η διαφορά φάσης ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα και

- Τη φανταστική συνιστώσα της ισχύος που ονομάζεται άεργη ή επαγωγική ισχύς Q , που μετριέται σε Volt-Amps Reactance (VAR):

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin \phi \quad (6.8)$$

Οι συνδεσμολογίες του σχήματος 6.1, στην περίπτωση κυκλωμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος, μετρούν τη φαινόμενη ισχύ. Για τη μέτρηση της πραγματικής ισχύος απαιτείται ένα ειδικό όργανο που να μετράει το $\cos \phi$. Το όργανο αυτό λέγεται **συνημιτόμετρο** ή **βατόμετρο**.

Στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 6.2, η ανοιχτόχρωμη σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει τη χρονική περίοδο κατά την οποία το ρεύμα κάνει τη χρήσιμη εργασία και η σκουρόχρωμη σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει το χρόνο όταν αποθηκεύεται το ρεύμα στα άεργα (επαγωγικά) ηλεκτρικά στοιχεία και επιστρέφεται στην πηγή ηλεκτρικής ισχύος.



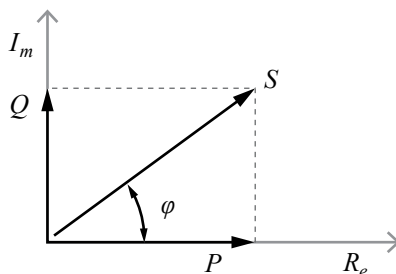
Σχήμα 6.2 – (α) Το ρεύμα και η τάση είναι συμφασικά σε AC κύκλωμα με ωμικές αντιστάσεις R , (β): το ρεύμα και η τάση έχουν διαφορά φάσης σε AC κύκλωμα με σύνθετη αντίσταση (R, L, C).

Η πραγματική (ωμική) ή, αλλιώς ονομαζόμενη, ενεργή συνιστώσα της ισχύος P (W), μπορεί να θεωρηθεί ως η ανοιχτόχρωμη σκιασμένη περιοχή στο σχήμα 6.2.α και 6.2.β. Η πραγματική ισχύς είναι η ικανότητα του κυκλώματος για την παραγωγή έργου σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η φανταστική συνιστώσα της ισχύος που ονομάζεται άεργη ή επαγωγική ισχύς Q (VAR), μπορεί να θεωρηθεί ως η σκουρόχρωμη σκιασμένη περιοχή στο σχήμα 6.2.β. Η άεργη ισχύς

είναι μέτρο της αποθηκευμένης ενέργειας που επιστρέφει στην ηλεκτρική πηγή κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η φαινόμενη ισχύς S (VA), είναι το γεωμετρικό (διανυσματικό) άθροισμα της πραγματικής και άεργης ισχύος, δηλαδή το άθροισμα των ανοιχτόχρωμων και των σκουρόχρωμων περιοχών στο σχήμα 6.2.α και 6.2.β. Στο σχήμα 6.3 δείχνεται η αναπαράσταση της φαινόμενης ισχύος S πάνω στο μιγαδικό επίπεδο. Λόγω των άεργων (επαγωγικών) ηλεκτρικών στοιχείων του φορτίου, η φαινόμενη ισχύς, που είναι το γινόμενο της ενεργούς τάσης και του ενεργού ρεύματος στο κύκλωμα, είναι ίση ή μεγαλύτερη από την πραγματική ισχύ.



Σχήμα 6.3 – Απεικόνιση της φαινόμενης ή σύνθετης ισχύος S πάνω στο μιγαδικό επίπεδο.

Η φανταστική ισχύς που είναι ο ρυθμός ροής της φανταστικής ενέργειας, όπως ήδη αναφέρθηκε, αποθηκεύεται στα φανταστικά στοιχεία του κυκλώματος. Για παράδειγμα, σε ένα επαγωγικό στοιχείο (πηνίο), όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργείται στο εσωτερικό του ένα μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό προκειμένου να συντηρηθεί δεσμεύει ένα ποσό ηλεκτρικής ενέργειας από το διερχόμενο ρεύμα. Η φανταστική ενέργεια που αποθηκεύεται σε αυτό δε χάνεται, αλλά παραμένει στο επαγωγικό στοιχείο υπό μορφή μαγνητικού πεδίου. Όταν συμβεί κάποια αλλαγή στο διερχόμενο ρεύμα, τότε το επαγωγικό στοιχείο, στην προσπάθειά του να εμποδίσει την αλλαγή αυτή, επιστρέφει την ενέργεια που έχει δεσμεύσει στο κύκλωμα. Αυτό ερμηνεύεται από το νόμο του Lenz. Κατά όμοιο τρόπο, ένα χωρητικό στοιχείο (πυκνωτής), όταν είναι αφόρτιστο και εφαρμοστεί τάση στα άκρα του, θα απορροφήσει ηλεκτρική ενέργεια, την οποία και θα αποθηκεύσει μεταξύ των οπλισμών του υπό μορφή ηλεκτρικού πεδίου. Όταν συμβεί κάποια αλλαγή στην τάση στα άκρα του, τότε το χωρητικό στοιχείο, στην προσπάθειά του να εμποδίσει την αλλαγή αυτή, επιστρέφει την ενέργεια που έχει δεσμεύσει πίσω στο κύκλωμα.

Η φυσική σημασία και ερμηνεία αυτών των συνιστωσών μπορούν να συνοψισθούν ως εξής: Το εναλλασσόμενο ρεύμα και η τάση μιας πηγής, που τροφοδοτούν ένα εναλλασσόμενο κύκλωμα, έχουν περιοδική μορφή, είναι σε φάση και αλλάζουν την πολικότητα την ίδια στιγμή, σε κάθε κύκλο. Επειδή, λόγω κατασκευής των κυκλωμάτων, υπάρχουν άεργα (επαγωγικά) ηλεκτρικά στοιχεία, όπως οι πυκνωτές και τα πηνία για τη δημιουργία μαγνητικών πεδίων, η αποθήκευση ενέργειας σε αυτά τα στοιχεία οδηγεί σε μια χρονική διαφορά (διαφορά φάσης) μεταξύ της κυματομορφής του ρεύματος και τάσης. Όταν υπάρχει ένα επαγωγικό φορτίο, το ρεύμα υστερεί χρονικά σε σχέση με την τάση.

Η αποθηκευμένη ενέργεια αφορά στη φανταστική συνιστώσα ισχύος. Η ισχύς αυτή στα πραγματικά κυκλώματα καταναλωτών είναι ένα μέρος της απορροφημένης από την πηγή ισχύος, του οποίου επιθυμούμε την ελαχιστοποίηση για πολλούς λόγους:

- Δεν είναι ισχύς που μπορεί να ληφθεί και να χρησιμοποιηθεί. Άρα είναι μη ωφέλιμη.
- Επιβαρύνει το δίκτυο διανομής ενέργειας με ηλεκτρικά ρεύματα μεγαλύτερης έντασης και δημιουργεί ανάγκες για μεγαλύτερες διατομές αγωγών.
- Αν και δεν αποδίδεται στο περιβάλλον ούτε αποδίδει άλλο έργο, δεν επιστρέφεται στους παροχούς ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα τη συνολική αύξηση του κόστους παραγωγής.

6.3.2.3 Συντελεστής ισχύος $\cos\phi$

Ο βαθμός κατανάλωσης άεργου ισχύος από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα εκφράζεται με το μέγεθος του συντελεστή ισχύος (power factor) $|\cos\phi|$, ως αναλογία μεταξύ της πραγματικής

προς τη φαινόμενη ισχύ του κύκλωματος. Εξ' ορισμού είναι ένας αδιάστατος αριθμός, παίρνει τιμές από 0 έως 1, και το φ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης.

6.3.2.4 Λειτουργία Βατομέτρου

Για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιούνται βατόμετρα, μονοφασικά ή τριφασικά. Τα μονοφασικά (ηλεκτροδυναμικά) βατόμετρα έχουν δύο πηνία. Το σταθερό πηνίο αποτελείται από λίγες σπείρες με μεγάλη διατομή και μπαίνει σε σειρά με το κύκλωμα μετρήσεως (πηνίο αμπερομέτρου). Το κινητό πηνίο αποτελείται από πολλές σπείρες μικρής διατομής και συνδέεται παράλληλα στο κύκλωμα (πηνίου βολτομέτρου). Όταν συνδεθεί μόνο το πηνίο αμπερομέτρου, το κύκλωμα κλείνει, αλλά δεν έχουμε ένδειξη στο όργανο. Όταν συνδεθεί μόνο το πηνίο βολτομέτρου, το κύκλωμα δεν κλείνει οπότε δεν έχουμε ένδειξη στο όργανο. Για να έχουμε ένδειξη, θα πρέπει να συνδεθούν και τα δύο πηνία, το πηνίο αμπερομέτρου σε σειρά με το κύκλωμα και το πηνίο βολτομέτρου παράλληλα. Στο δεξιό μέρος του οργάνου υπάρχει ο μεταγωγικός διακόπτης, με τον οποίο αλλάζουμε τη μέγιστη τάση/ρεύμα που μπορεί να δεχθεί το όργανο. Ανάμεσα στους ακροδέκτες του πηνίου αμπερομέτρου, που είναι οι δύο κάθετοι ακροδέκτες ανάμεσα στους οποίους βρίσκεται το γράμμα I ή A, και ανάμεσα από τους ακροδέκτες του πηνίου βολτομέτρου που είναι οι δύο οριζόντιοι ακροδέκτες ανάμεσα στους οποίους βρίσκεται το γράμμα V, υπάρχει άλλος ένας διακόπτης με τις ενδείξεις + και -, ο οποίος αλλάζει την πολικότητα σε περίπτωση μέτρησης σε κύκλωμα DC. Επειδή το όργανο έχει μια μόνο πλήρως ανεπτυγμένη κλίμακα, κάτω από το γράμμα W υπάρχει αναγραφμένος πίνακας με τους συντελεστές με τους οποίους θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την ένδειξη του οργάνου, ανάλογα με τη θέση του μεταγωγικού διακόπτη αλλαγής της μέγιστης εισερχόμενης τάσης/ρεύματος.

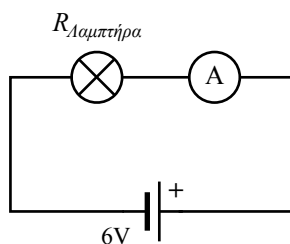
6.3.3 Εκτέλεση

1. Μετρήστε με πολύμετρο, σε λειτουργία ωμομέτρου, τις ωμικές αντιστάσεις των πηνίων και του λαμπτήρα:

$$R_{\text{λαμπτήρα}}, R_{\text{πηνίου (1)}} \text{ και } R_{\text{πηνίου (2)}}$$

Όπου πηνίο(1) είναι το πρωτεύον πηνίο ενός μετασχηματιστή 220V/19V, $L_1=5\text{H}$ και πηνίο(2) είναι το δευτερεύον πηνίο ενός μετασχηματιστή 220V/19V, $L_2=3\text{mH}$.

2. Συναρμολογήστε το κύκλωμα του σχήματος 6.4.

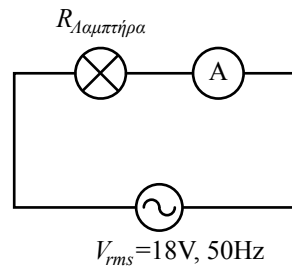


Σχήμα 6.4 –

3. Αρχικά ρυθμίστε την DC τάση στα 0V. Αυξήστε σιγά σιγά την τάση μέχρι τα 6V, παρατηρώντας το λαμπτήρα, ο οποίος κάποια στιγμή θα φωτίσει. Όταν η τάση είναι 6V μετρήστε με πολύμετρο (σε λειτουργία βολτομέτρου και αμπερομέτρου) τις τιμές των:

$$V_{\text{πηγής}}, V_{R \text{ λαμπτήρα}} \text{ και } I.$$

4. Συναρμολογήστε ίδιο κύκλωμα με AC τάση, όπως στο σχήμα 6.5.



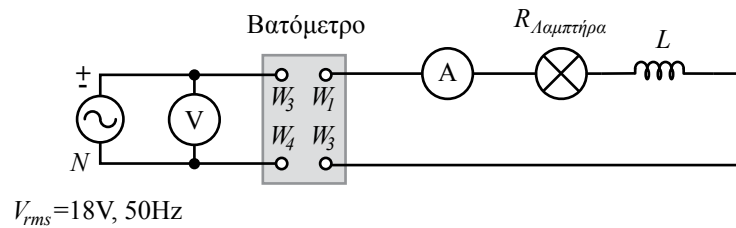
Σχήμα 6.5 –

Τροφοδοτήστε το κύκλωμα με AC τάση $V_{rms}=18V$ και $f=50Hz$.

5. Επαναλάβετε τις μετρήσεις του βήματος 3. Προσοχή στα πολύμετρα τα οποία θα πρέπει να ρυθμιστούν, ώστε να μετρούν rms τιμές. Μετρήστε τις τιμές των:

$$V_{rms} \text{ (πηγής)}, V_{rms} \text{ (R λαμπτήρα)}, I_{rms}$$

6. Προσθέστε σε σειρά στο κύκλωμα το πηνίο $L_1=5H$ και, προαιρετικά, το βατόμετρο όπως στο σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6 – Το βατόμετρο συνδέεται από την πλευρά της τροφοδοσίας. Αυτή η συνδεσμολογία ενδείκνυται για υψηλή τάση και για χαμηλά ρεύματα. Όταν N ο ουδέτερος και $\pm$ η φάση της πηγής.

7. Μετρήστε τις τιμές: V_{1rms} (πηγής), V_{1rms} (R λαμπτήρα), V_{1rms} (L) και I_{1rms} και $\cos\phi$ (προαιρετικά).
 8. Αντικαταστήστε το πηνίο του προηγούμενου κυκλώματος με το $L_2=3mH$.
 9. Μετρήστε τις τιμές: V_{2rms} (πηγής), V_{2rms} (R λαμπτήρα), V_{2rms} (L) και I_{2rms} .
 10. Για το προηγούμενο κύκλωμα με το πηνίο $L_2=3mH$, επαναλάβετε τις μετρήσεις σας για τάση $V_{rms}=6V$ και $f=1000Hz$. Μετρήστε τις τιμές:

$$V'_{2rms} \text{ (πηγής)}, V'_{2rms} \text{ (R λαμπτήρα)}, V'_{2rms} \text{ (L)} \text{ και } I'_{2rms}$$

11. Αν διαθέτετε βατόμετρο, να το συνδέσετε, όπως στο σχήμα 6.6, για να μετρήσετε πειραματικά το $\cos\phi$. Στο τέλος, αποσυνδέστε το αμπερόμετρο και με ένα πολύμετρο σε λειτουργία ωμόμετρου μετρήστε την εσωτερική αντίσταση του αμπερομέτρου.

6.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Να σχεδιάσετε το DC κύκλωμα, που συναρμολογήσατε στα βήματα 2 και 3 της εκτέλεσης, και να σημειώσετε πάνω σε αυτό τις τιμές των ηλεκτρικών στοιχείων που χρησιμοποιήσατε.

2. Επαληθεύστε ότι: $I_{\text{πειραματικό}} = I_{\text{θεωρητικό}}$,

όπου:

$$I_{\text{θεωρητικό}} = \frac{V_{\text{λαμπτήρα}}}{R_{\text{λαμπτήρα}}} \quad (6.9)$$

3. Υπολογίστε την ισχύ του λαμπτήρα (W): $P_{\text{λαμπτήρα}} = P R_{\text{λαμπτήρα}}$.

4. Υπολογίστε την ισχύ της πηγής (W): $P_{\text{πηγής}} = I V_{\text{πηγής}}$.

5. Συγκρίνετε τις τιμές $P_{\text{λαμπτήρα}}$ και $P_{\text{πηγής}}$.

6. Να σχεδιάσετε τα AC κυκλώματα που συναρμολογήσατε στα βήματα 4 έως 10 της εκτέλεσης και να σημειώσετε πάνω σε αυτά τις τιμές των ηλεκτρικών στοιχείων που χρησιμοποιήσατε.

7. Από τις μετρήσεις σας για κάθε ένα από τα βήματα 4 έως 10 της εκτέλεσης να υπολογίσετε:

- Τη σύνθετη αντίσταση του πηνίου (Ω):

$$Z_L = \sqrt{r_L^2 + x_L^2} \quad (6.10)$$

όπου $x_L = 2\pi fL$.

- Το ρεύμα (A):

$$I_{rms} = \frac{V_{rms(L)}}{Z_L} \quad (6.11)$$

όπου $V_{rms(L)}$ είναι η πειραματική τιμή και Z_L είναι η θεωρητική τιμή.

- Τη φαινόμενη ισχύ της πηγής (VA): $S = V_{rms(πηγής)} I_{rms}$.
- Την πραγματική ισχύ της πηγής (W): $P = V_{rms} I_{rms} \cos\varphi$.

όπου το φ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tan \varphi = \frac{2\pi fL}{(R_L + r_L)} \quad (6.12)$$

Σε όλες τις περιπτώσεις να συγκρίνετε τις τιμές των S και P .

8. Από την πειραματική τιμή του $\cos\varphi$, να υπολογίσετε την πραγματική τιμή της ισχύος κατανάλωσης P_z και το συστηματικό σφάλμα, από τις σχέσεις (6.13) και (6.14).

Η πραγματική ισχύς της κατανάλωσης (βλέπε σχήμα 6.1) δίνεται από την:

$$P_z = P_w - I^2 r_A \quad (6.13)$$

ενώ το σφάλμα προσδιορίζεται στη συνδεσμολογία για υψηλή τάση και μικρό ρεύμα ως:

$$\sigma = \frac{r_A I}{V \cos \phi} \quad (6.14)$$

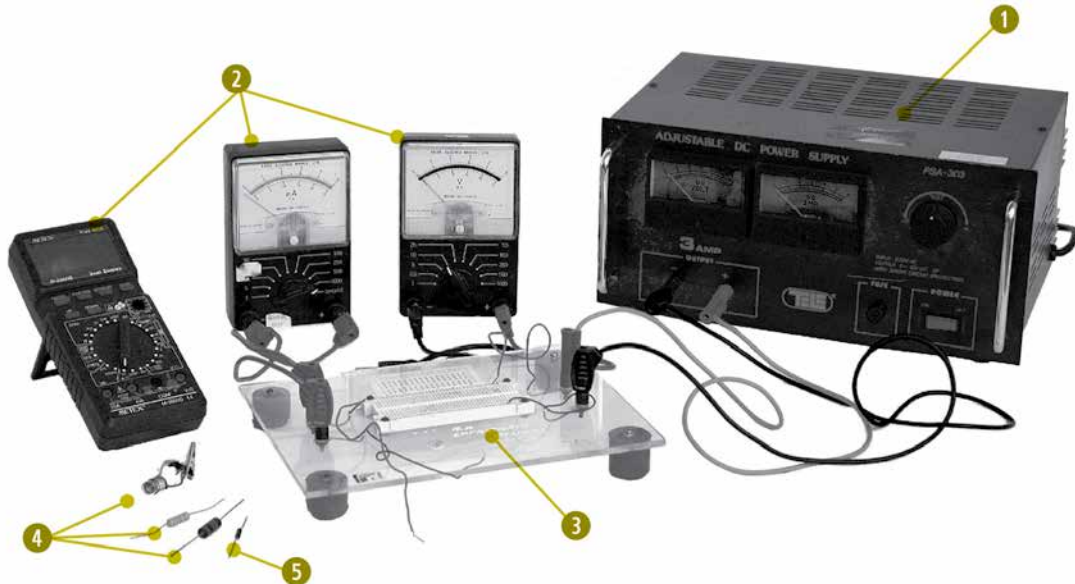
όπου r_A είναι η εσωτερική αντίσταση του αμπερομέτρου.

6.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] Ν. Μάργαρης, *Ανάλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2009.
- [2] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Σύμμετρα, 2010.
- [3] M. Nelkon and P. Parker, "Chapter 13: A.C. Circuits," in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 382-383.
- [4] M. Nelkon and P. Parker, "Chapter 20: Magnetic field and Force on Conductor, The Wattmeter," in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 314.

ΑΣΚΗΣΗ 7

Μέτρηση ωμικής αντίστασης και χαρακτηριστικής καμπύλης διόδου



7.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Τροφοδοτικό DC.
2. Πολύμετρα (αμπερόμετρο, βολτόμετρο).
3. Πλακέτα για την κατασκευή κυκλωμάτων.
4. Αντιστάσεις (ηλεκτρικός λαμπτήρας 2V, αντιστάτες 1kΩ, 50kΩ).
5. Δίοδος.

7.2 Απαραίτητες γνώσεις

Ηλεκτρικό ρεύμα, ηλεκτρική αγωγιμότητα, νόμος του Ohm, νόμοι του Kirchhoff, αντίσταση αγωγών, ημιαγωγοί, ημιαγωγοί με προσμίξεις, δίοδος, ορθή και ανάστροφη πόλωση διόδου.

7.3 Πείραμα 1

7.3.1 Σκοπός

Μέτρηση της τιμής μιας άγνωστης ωμικής αντίστασης με τη βοήθεια βολτομέτρου και αμπερομέτρου και η εφαρμογή του πρώτου και του δεύτερου νόμου του Kirchhoff.

7.3.2 Θεωρία

7.3.2.1 Μέτρηση ωμικής αντίστασης

Αν εφαρμοστεί νόμος του Ohm σε κλειστό κύκλωμα, οδηγεί στον 2^ο κανόνα του Kirchhoff:

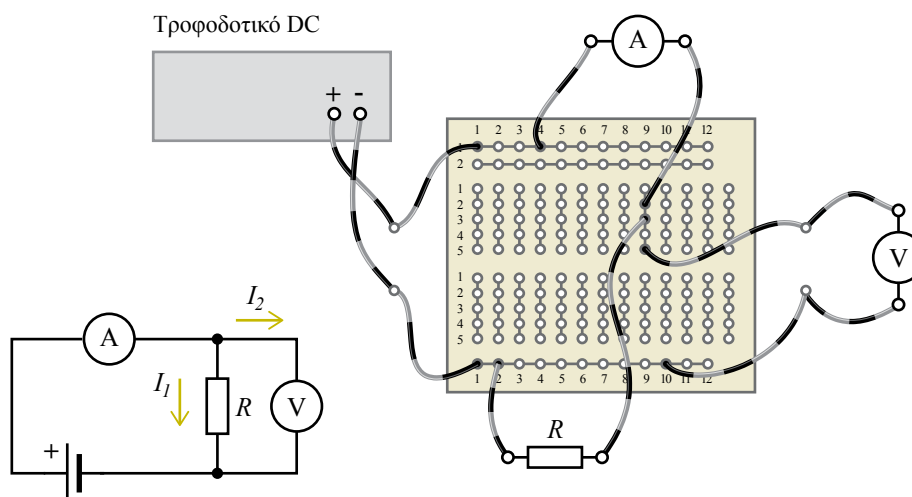
$$\Sigma E = \Sigma IR \quad (7.1)$$

όπου ΣE είναι το άθροισμα των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων του κυκλώματος και ΣIR είναι το άθροισμα των πτώσεων τάσεων σε κλειστό κύκλωμα.

Υπάρχουν δύο τρόποι συνδεσμολογίας βολτομέτρου και αμπερομέτρου, για να μετρηθεί η τάση V στα άκρα μιας αντίστασης (resistance) και το ρεύμα I που τη διαρρέει, όπως φαίνεται στα σχήματα 7.1 και 7.2.

7.3.2.2 Μέτρηση ωμικής αντίστασης μεγάλης τιμής, συγκρίσιμη με την εσωτερική αντίσταση του βολτομέτρου

Στο κύκλωμα του σχήματος 7.1 η πραγματική τιμή της τάσης στα άκρα της αντίστασης είναι αυτή που μετράει το βολτόμετρο. Η τιμή της έντασης του ρεύματος που μετράει το αμπερόμετρο είναι το άθροισμα των εντάσεων I_1 και I_2 , τα οποία διαρρέουν την αντίσταση και το βολτόμετρο αντίστοιχα.



Σχήμα 7.1 – Κύκλωμα μέτρησης ωμικής αντίστασης με βολτόμετρο – αμπερόμετρο (πρώτος τρόπος). Το όργανο που επιφέρει συστηματικό σφάλμα είναι το αμπερόμετρο. Ενδείκνυται για σχετικά μικρές άγνωστες αντιστάσεις.

Αν η τιμή της αντίστασης R είναι μεγάλη, συγκρίσιμη με την τιμή της εσωτερικής αντίστασης του βολτομέτρου r_V , το ρεύμα I_2 , το οποίο διαρρέει το βολτόμετρο, δεν είναι αμελητέο σε σχέση με το ρεύμα I_1 το οποίο διαρρέει την αντίσταση. Επομένως ο λόγος τάση (μετρούμενη στο βολτόμετρο)/ρεύμα (μετρούμενο στο αμπερόμετρο) ή:

$$R = \frac{V}{I_1} \approx \frac{V}{(I_1 + I_2)} + \sigma_R \quad (7.2)$$

δεν υπολογίζει ολόκληρη την τιμή της R . Το συστηματικό σφάλμα υπολογίζεται ως συνάρτηση της εσωτερικής αντίστασης του βολτομέτρου και της τιμής άγνωστης αντίστασης και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_R = \frac{1}{1 + \frac{r_V}{R}} \quad (7.3)$$

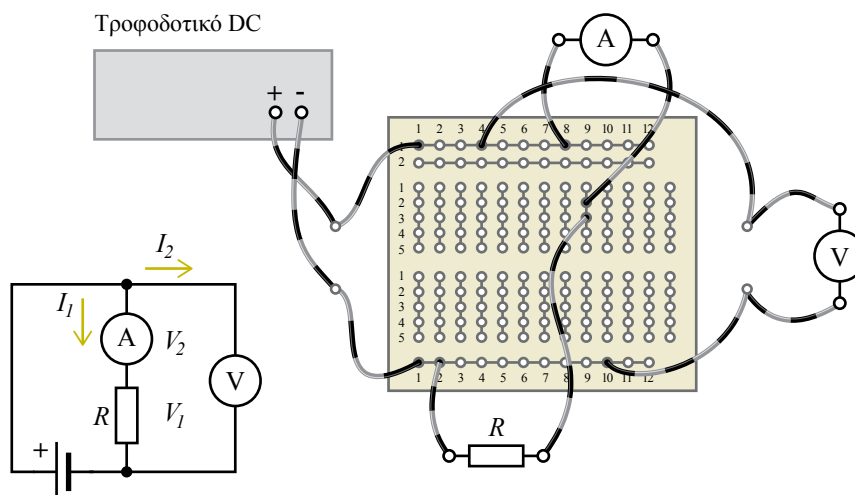
Άρα ο υπολογισμός μιας μεγάλης αντίστασης δεν ενδείκνυται να γίνει με το κύκλωμα του σχήματος 7.1.

Αν για τη μέτρηση της ίδιας μεγάλης άγνωστης αντίστασης χρησιμοποιηθεί το κύκλωμα του σχήματος 7.2, η πραγματική τιμή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση είναι αυτή που μετράει το αμπερόμετρο. Η τιμή της τάσης που μετράει το βολτόμετρο είναι το άθροισμα των τάσεων V_1 και V_2 στα άκρα της αντίστασης και του αμπερομέτρου αντίστοιχα.

Επειδή η εσωτερική αντίσταση του αμπερομέτρου r_A είναι πολύ μικρή, συγκριτικά με τη μετρούμενη αντίσταση R , η τάση που μετράει το βολτόμετρο είναι πρακτικά ίση με την πραγματική τιμή της τάσης στα άκρα της αντίστασης R . Επομένως ο λόγος τάση (μετρούμενη στο βολτόμετρο)/ρεύμα (μετρούμενο στο αμπερόμετρο) ή:

$$R = \frac{V_1 + V_2}{I} \approx \frac{V_1}{I} \quad (7.4)$$

υπολογίζει σωστά την τιμή της R . Άρα ο υπολογισμός μιας μεγάλης αντίστασης γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια με το κύκλωμα του σχήματος 7.2.



Σχήμα 7.2 – Κύκλωμα μέτρησης ωμικής αντίστασης με βολτόμετρο – αμπερόμετρο (δεύτερος τρόπος). Το όργανο που επιφέρει συστηματικό σφάλμα είναι το βολτόμετρο. Ενδείκνυται για σχετικά μεγάλες άγνωστες αντιστάσεις.

7.3.2.3 Μέτρηση ωμικής αντίστασης μικρής τιμής, συγκρίσιμη με την εσωτερική αντίσταση του αμπερομέτρου

Αν χρησιμοποιηθεί το κύκλωμα του σχήματος 7.1 για τη μέτρηση της ίδιας μικρής άγνωστης αντίστασης, η πραγματική τιμή της τάσης στα άκρα της αντίστασης είναι αυτή που μετράει το βολτόμετρο. Η τιμή της έντασης του ρεύματος, που μετράει το αμπερόμετρο είναι το άθροισμα των εντάσεων I_1 και I_2 , τα οποία διαρρέουν την αντίσταση και το βολτόμετρο αντίστοιχα.

Επειδή η τιμή της αντίστασης R είναι μικρής τιμής, συγκρίσιμη με την τιμή της εσωτερικής αντίστασης του αμπερομέτρου r_A και επομένως πολύ μικρότερη από την εσωτερική αντίσταση του βολτομέτρου r_V , το ρεύμα I_2 το οποίο διαρρέει το βολτόμετρο θεωρείται ότι είναι αμελητέο σε σχέση με το ρεύμα I_1 το οποίο διαρρέει την αντίσταση. Επομένως ο λόγος τάση (μετρούμενη στο βολτόμετρο)/ρεύμα (μετρούμενο στο αμπερόμετρο) ή:

$$R = \frac{V}{(I_1 + I_2)} \approx \frac{V}{I_1} \quad (7.5)$$

υπολογίζει σωστά την τιμή της R . Άρα ο υπολογισμός μιας μικρής αντίστασης ενδείκνυται να γίνει με το κύκλωμα του σχήματος 7.1.

Αν χρησιμοποιηθεί το κύκλωμα του σχήματος 7.2 για τη μέτρηση της ίδιας μικρής άγνωστης αντίστασης, η πραγματική τιμή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση είναι αυτή που μετράει το αμπερόμετρο. Η τιμή της τάσης που μετράει το βολτόμετρο είναι το άθροισμα των τάσεων V_1 και V_2 στα άκρα της αντίστασης και του αμπερομέτρου αντίστοιχα.

Επειδή, όμως, η αντίσταση του αμπερομέτρου δεν είναι αμελητέα συγκριτικά με την άγνωστη αντίσταση R , που είναι μικρής τιμής, το βολτόμετρο δε μετράει την πραγματική πτώση τάσης στα άκρα της R . Επομένως ο λόγος τάση (μετρούμενη στο βολτόμετρο) προς ρεύμα (μετρούμενο στο αμπερόμετρο) ή:

$$R = \frac{V_1 + V_2}{I_1} \approx \frac{V_1}{I_1} - \sigma_R \quad (7.6)$$

δεν υπολογίζει σωστά την τιμή της R . Το συστηματικό σφάλμα υπολογίζεται ως συνάρτηση της εσωτερικής αντίστασης του αμπερομέτρου και της άγνωστης αντίστασης:

$$\sigma_R = \frac{r_A}{R} \quad (7.7)$$

Άρα ο υπολογισμός μιας μικρής αντίστασης δεν ενδείκνυται να γίνει με το κύκλωμα του σχήματος 7.2.

7.3.3 Εκτέλεση

- Χρησιμοποιήστε το πολύμετρο ως ωμόμετρο και μετρήστε τις τιμές των δύο αντιστάσεων του πειράματος σας. Να μετρήσετε την εσωτερική αντίσταση με το δεύτερο πολύμετρο (i), όταν αυτό τεθεί σε λειτουργία μιλιαμπερομέτρου και (ii) όταν αυτό τεθεί σε λειτουργία βολτομέτρου.
- Κατασκευάστε στην πλακέτα (breadboard) το κύκλωμα του σχήματος 7.1, χρησιμοποιώντας την αντίσταση μεγάλης τιμής.
- Μεταβάλλοντας την τάση μετρήστε πέντε διαφορετικές τιμές του ρεύματος.
 - Να χρησιμοποιήσετε ένα πολύμετρο ως αμπερόμετρο, σε κλίμακα των mA για τη μεγάλη αντίσταση και ένα πολύμετρο ως βολτόμετρο στην κλίμακα των V.
 - Οι τιμές της τάσης που θα πάρετε να είναι: 1V, 1,5V, 2V, 2,5V και 3V.
- Επαναλάβετε τα βήματα 1, 2 και 3 χρησιμοποιώντας την αντίσταση μικρής τιμής.
 - Να χρησιμοποιήσετε ένα πολύμετρο ως αμπερόμετρο, σε κλίμακα των A για τη μικρή αντίσταση και ένα πολύμετρο ως βολτόμετρο στην κλίμακα των V.
 - Οι τιμές της τάσης που θα πάρετε να είναι: 1V, 1,5V, 2V, 2,5V και 3V.
- Καταχωρήστε τις μετρήσεις σας σε πίνακα, όπως ο πίνακας 7.1.

Μεγάλη αντίσταση			Μικρή αντίσταση	
a/a	I (mA)	V (V)	I (mA)	V (V)
1	...	...	...	...
2				
3				
4				
5				

Πίνακας 7.1 – Μετρήσεις για το κύκλωμα του σχήματος 7.1.

- Κατασκευάστε το κύκλωμα του σχήματος 7.2, χρησιμοποιώντας την αντίσταση μεγάλης τιμής.
- Μεταβάλλοντας την τάση, μετρήστε 5 διαφορετικές τιμές του ρεύματος.
- Επαναλάβετε τα βήματα 1 και 2, χρησιμοποιώντας την αντίσταση μικρής τιμής.
- Καταχωρήστε τις μετρήσεις σας σε πίνακα, όπως ο πίνακας 7.2.

Μεγάλη αντίσταση			Μικρή αντίσταση	
a/a	I (mA)	V (V)	I (mA)	V (V)
1	...	...	...	...
2				
3				
4				
5				

Πίνακας 7.2 – Μετρήσεις για το κύκλωμα του σχήματος 7.2.

7.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

- Για κάθε ζεύγος τιμών του πίνακα 7.1, υπολογίστε τις τιμές για κάθε αντίσταση και, στη συνέχεια τη μέση τιμή κάθε μίας. Επίσης υπολογίστε το συστηματικό σφάλμα.

2. Από τις τιμές του πίνακα 7.2, υπολογίστε τις τιμές για κάθε αντίσταση και, στη συνέχεια, τη μέση τιμή κάθε μίας. Επίσης υπολογίστε το συστηματικό σφάλμα.
3. Βρείτε την εκατοστιαία διαφορά της κάθε μετρούμενης αντίστασης από την πραγματική της τιμή, σε όλες τις περιπτώσεις.
4. Σχολιάστε ποιο κύκλωμα μετράει καλύτερα την κάθε αντίσταση.

7.4 Πείραμα 2

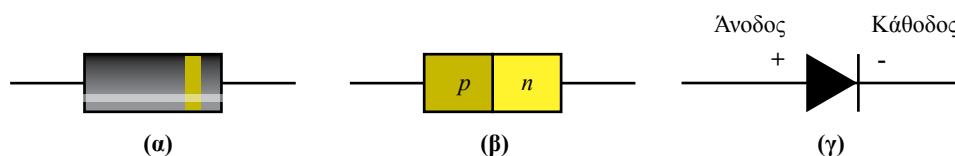
7.4.1 Σκοπός

Εύρεση της χαρακτηριστικής διόδου κατά την ορθή και την ανάστροφη πόλωση.

7.4.2 Θεωρία

7.4.2.1 Χαρακτηριστική διόδου

Η διόδος (diode) κατασκευάζεται από κρύσταλλο πυριτίου (Si) ή γερμανίου (Ge). Η διόδος δημιουργείται από τη συνένωση δύο ημιαγωγών (επαφή p-n), όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3, ενός τύπου n (negative) και ενός τύπου p (positive). Και οι δύο αυτές περιοχές περιέχουν προσμίξεις άλλων στοιχείων στο υλικό τους, που είναι στοιχεία με ηλεκτρόνια σθένους περισσότερα ή λιγότερα από τα ηλεκτρόνια του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένη η διόδος. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται περίσσεια ή έλλειμμα ηλεκτρονίων στο υλικό κάθε περιοχής της διόδου.



Σχήμα 7.3 – (α) Εξωτερική μορφή μιας διόδου όπου η λεπτή λωρίδα δείχνει την κάθοδο, (β) σχηματική αναπαράσταση μιας διόδου ως επαφή p-n, (γ) σύμβολο της διόδου, όπως σχεδιάζεται σε ένα κύκλωμα.

Κατά την υλοποίηση της επαφής (junction) p-n, σημειώνεται μετακίνηση ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό n προς τον ημιαγωγό p, προς επανασύνδεση με τις παραπλήσιες οπές, οπότε λαμβάνει χώρα η αντίδραση: ηλεκτρόνιο+οπή→ενέργεια. Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι να δημιουργείται στην περιοχή της επαφής μια περιοχή ουδέτερη, χωρίς ηλεκτρόνια ή οπές, που ονομάζεται **ζώνη απογύμνωσης** (depletion region).

Στην ζώνη απογύμνωσης ο ημιαγωγός χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητά του. Εκεί παρουσιάζονται δύο περιοχές: μια με μόνο θετικά ιόντα (χωρίς την παρουσία ηλεκτρονίων) και μια μόνο με αρνητικά ιόντα (χωρίς οπές), ενώ η υπόλοιπη περιοχή εκατέρωθεν της ζώνης απογύμνωσης παραμένει ουδέτερη. Τα αρνητικά και τα θετικά ιόντα παραμένουν ακίνητα. Η ζώνη απογύμνωσης δημιουργεί φραγμό στη μετακίνηση ηλεκτρονίων διαμέσου αυτής (εμφανίζει συνήθως μια τάση 0,6 έως 0,8V). Το ελάχιστο δυναμικό που πρέπει να επιβληθεί, για να υπερπηδηθεί η ζώνη απογύμνωσης από τα ηλεκτρόνια, ονομάζεται δυναμικό φραγμού (barrier potential). Η ζώνη απογύμνωσης λειτουργεί ως πυκνωτής χωρητικότητας C και λαμβάνει τιμές από 1 έως 100pF.

Η πολικότητα μιας DC τάσης που εφαρμόζεται εξωτερικά σε σχέση με το δυναμικό επαφής, παίζει καθοριστικό ρόλο στη ροή του ρεύματος μέσα από τη διόδου. Για το λόγο αυτό διατάξεις αυτού του είδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν διακόπτες ρεύματος σε ηλεκτρονικά κυκλώματα.

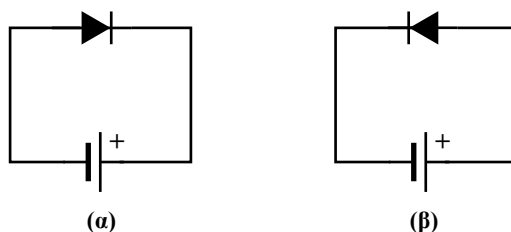
Υπάρχουν δύο τρόποι σύνδεσης της διόδου σε σχέση με την πολικότητα της, η ανάστροφη πόλωση (reverse bias) και η ορθή πόλωση (forward bias).

7.4.2.2 Ανάστροφη πόλωση διόδου

Στο σχήμα 7.4.α φαίνεται η ανάστροφη πόλωση μιας διόδου. Όταν ο θετικός ακροδέκτης της διόδου p συνδεθεί με τον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής, έχουμε συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης (reverse bias) με αποτέλεσμα να προκαλείται αύξηση του φραγμού δυναμικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι φορείς μειονότητας κάθε περιοχής να περνάνε εύκολα το φραγμό δυναμικού, ενώ οι φορείς πλειονότητας να συναντούν ακόμα μεγαλύτερη δυσκολία. Έτσι το ολικό ρεύμα έχει πολύ μικρή τιμή (πρακτικά μηδέν). Το ρεύμα αυτό είναι ανεξάρτητο της τάσης και αυξάνεται με τη θερμοκρασία.

7.4.2.3 Ορθή πόλωση διόδου

Στο σχήμα 7.4.β φαίνεται η ορθή πόλωση μιας διόδου. Όταν ο θετικός ακροδέκτης της διόδου p συνδεθεί με το θετικό ακροδέκτη της πηγής + έχουμε συνδεσμολογία ορθής πόλωσης (forward bias), με αποτέλεσμα να προκαλείται μείωση του φραγμού δυναμικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την έντονη διάχυση των φορέων πλειονότητας της περιοχής p στην περιοχή n και αντίστροφα. Ταυτόχρονα υπάρχει και το ανάστροφο ρεύμα. Το ολικό ρεύμα αυξάνεται εκθετικά με την τάση V της πηγής.



Σχήμα 7.4 – (α) Ανάστροφη και (β) ορθή πόλωση διόδου.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η διάταξη άγει πολύ πιο εύκολα στην κατεύθυνση από το p προς το n από ότι στην αντίθετη κατεύθυνση, σε αντίθεση με τη συμμετρική συμπεριφορά υλικών που ακολουθούν το νόμο του Ohm. Το ρεύμα του εξωτερικού κυκλώματος συμβολίζεται με I_D ($I_D = I_F - I_S$). Για την επαφή p-n ισχύει η παρακάτω σχέση τάσης-ρεύματος:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{|q|V}{NkT}} - 1 \right) \quad (7.8)$$

όπου I_S το ρεύμα κορεσμού (saturation current) της ανάστροφης πόλωσης και I_F το ρεύμα ορθής φοράς ή ρεύμα διάχυσης (forward current), $|q|$ το ηλεκτρονικό φορτίο, k η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία, $N=1$ για το Ge και $N=2$ για το Si.

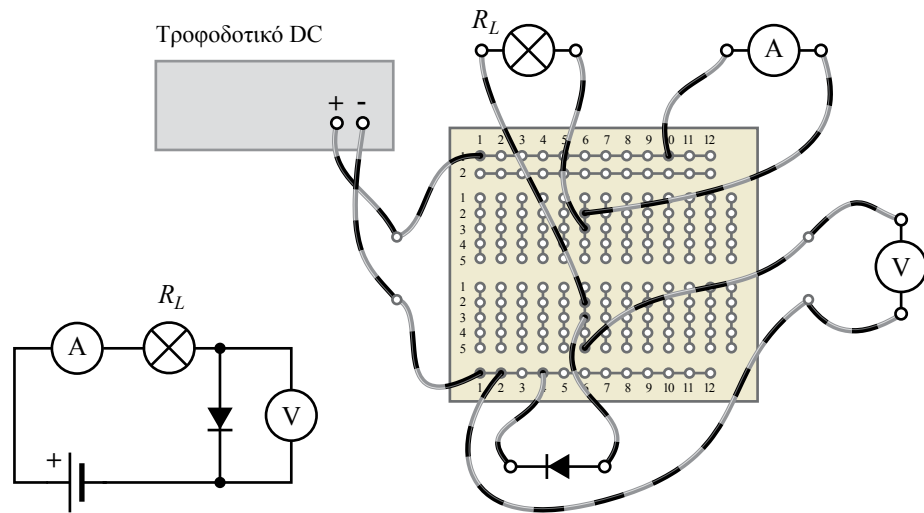
Τάση γόνατος είναι η τιμή της εξωτερικής τάσης (της πηγής) μετά την οποία η τάση του ρεύματος αυξάνεται εκθετικά. Για το Ge λαμβάνει τιμή 0,3V και για το Si τιμή 0,7V.

Η σχέση (7.8) ισχύει τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές τιμές της V (τα V και I είναι πάντοτε ομόσημα). Για πολύ μεγάλες και αρνητικές τιμές της τάσης V , το ρεύμα I προσεγγίζει την τιμή $-I_S$.

Κατά την ανάστροφη πόλωση, για μικρές τιμές τάσης πηγής, το ρεύμα που διαρρέει τη διόδο έχει την τιμή του ρεύματος κορεσμού, της τάξης των μA . Για τιμές της τάσης πηγής μεγαλύτερες από μια τιμή που ονομάζεται κορυφή ανάστροφης τάσης (PIV) συμβαίνει μια διαδικασία που ονομάζεται αντίστροφη κατάρρευση, η οποία προκαλεί βλάβες στη συσκευή με ταυτόχρονη μεγάλη αύξηση στο ηλεκτρικό ρεύμα.

7.4.3 Εκτέλεση

1. Κατασκευάστε στην πλακέτα (breadboard) το κύκλωμα ορθής πόλωσης της διόδου, όπως στο σχήμα 7.5 (όπου R_L χρησιμοποιήστε το λαμπτήρα).



Σχήμα 7.5 – Κύκλωμα ορθής πόλωσης διόδου

2. Να γίνουν οι κατάλληλες μετρήσεις για το σχεδιασμό της καμπύλης $I_D=f(V)$ της διόδου.
 - Να χρησιμοποιήσετε το πολύμετρο ως βολτόμετρο στην κλίμακα των V και ένα πολύμετρο ως αμπερόμετρο στην κλίμακα των mA.
 - Μεταβάλετε πολύ αργά τη τάση, μέχρι να βρείτε τη τάση αγωγής, δηλαδή την τάση όπου αρχίζει να διαρρέει ρεύμα τη δίοδο (ένδειξη ρεύματος στο μιλιαμπερόμετρο).

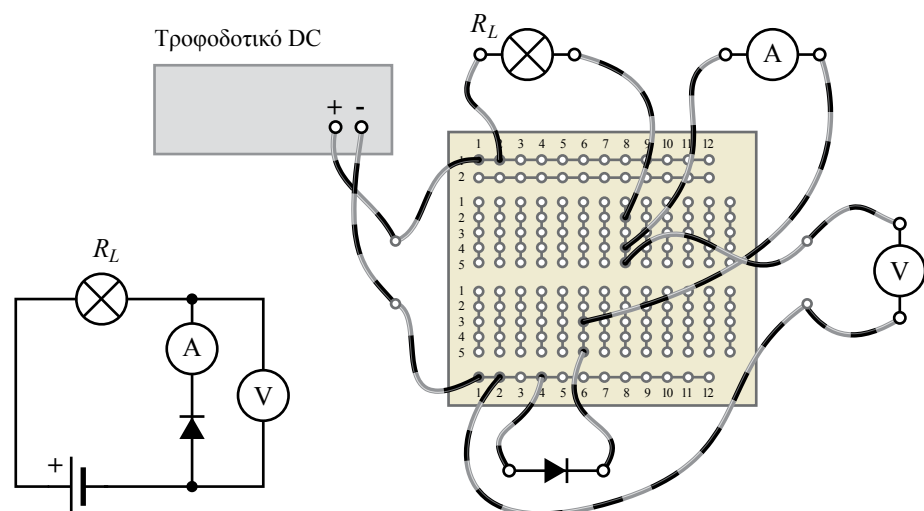
Συνεχίστε να μεταβάλετε την τάση με βήμα (0,05V), μετρώντας την τιμή της τάσης και του ρεύματος. Όταν η τάση αρχίζει να σταθεροποιείται, συνεχίστε για τρία ακόμη διαφορετικά ρεύματα, όχι πολύ μεγάλων τιμών.

3. Καταχωρήστε τις μετρήσεις σας σε πίνακα, όπως ο πίνακας 7.3.

α/α	I_D (mA)	V (V)
1	...	...
2		
3		
...		

Πίνακας 7.3 – Μετρήσεις για το κύκλωμα ορθής πόλωσης.

4. Κατασκευάστε το κύκλωμα ανάστροφης πόλωσης διόδου, όπως στο σχήμα 7.6 (όπου R_L χρησιμοποιήστε το λαμπτήρα).



Σχήμα 7.6 – Κύκλωμα ανάστροφης πόλωσης διόδου.

Για τη μέτρηση του ρεύματος συνδέετε ένα πολύμετρο ως αμπερόμετρο στην κλίμακα των mA. Προσέξτε ότι η αλλαγή στο κύκλωμα ανάστροφης πόλωσης της διόδου σε σχέση με το κύκλωμα στην ορθή πόλωση δεν είναι μόνο η πόλωση της διόδου.

5. Αυξήστε σιγά–σιγά την τάση μέχρι τα 15V. Προσοχή: η τάση ανάστροφης πόλωσης να μην υπερβεί τα 15V.
6. Παρατηρήστε και σημειώστε αν διέρχεται ρεύμα από το κύκλωμα, δηλαδή αν βλέπετε ένδειξη στο αμπερόμετρο και αν ανάβει ο λαμπτήρας.

7.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Σχεδιάστε την χαρακτηριστική της διόδου $I_D=f(V)$ για ορθή και ανάστροφη πόλωση.
2. Υπολογίστε την αντίσταση της διόδου για το μέγιστο ρεύμα που παρατηρείτε. Θεωρητικά, τι τιμή περιμένετε να έχει η αντίσταση που παρουσιάζει η διάδος κατά την ανάστροφη πόλωση;
3. Σχολιάστε τι παρατηρείτε, και γιατί, κατά την εκτέλεση των βημάτων 5 και 6.

7.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία

[1] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 32: Junction Diode, Transistor and Applications,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 786-795.

ΑΣΚΗΣΗ 8

Μελέτη φακών



8.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Οπτική τράπεζα.
2. Πέτασμα.
3. Συγκεντρωτικός φακός.
4. Φωτεινή πηγή.
5. Διάφραγμα με δακτύλιο και οπή.
6. Φίλτρο κόκκινο και φίλτρο μπλε.

8.2 Απαραίτητες γνώσεις

Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός, γεωμετρική οπτική, λεπτοί φακοί.

8.3 Πείραμα 1

8.3.1 Σκοπός

Μέτρηση της εστιακής απόστασης ενός συγκεντρωτικού φακού.

8.3.2 Θεωρία

8.3.2.1 Δείκτης διάθλασης (*index of refraction*)

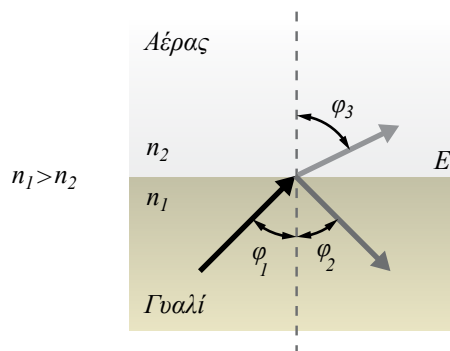
Για να μελετήσουμε τη διάδοση της οπτικής ακτινοβολίας σε διηλεκτρικό μέσο, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε πρώτα στο δείκτη διάθλασης n του διηλεκτρικού μέσου, ο οποίος

ορίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας c_0 της ακτινοβολίας στο κενό, ή και στον αέρα, δια την ταχύτητα c με την οποία αυτή διαδίδεται μέσα στο διηλεκτρικό, δηλαδή:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (8.1)$$

Ο δείκτης αυτός αποτελεί ένα μέτρο της οπτικής πυκνότητας των διηλεκτρικών. Συγκεκριμένα, αν n_1 και n_2 είναι οι δείκτες διάθλασης δύο διηλεκτρικών μέσων και $n_1 > n_2$, τότε το πρώτο υλικό είναι οπτικά πυκνότερο από το δεύτερο και, σύμφωνα με τη σχέση (8.1), η ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας στο πρώτο μέσο θα είναι μικρότερη από ό,τι στο δεύτερο.

Από τη σχέση (8.1) προκύπτει, επίσης, ότι μια ακτινοβολία αλλάζει διεύθυνση, όταν αυτή μεταβαίνει από ένα διηλεκτρικό σε άλλο, π.χ. από αέρα σε γυαλί ή από νερό σε γυαλί κ.λπ. Για τη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου αυτού θεωρούμε δύο διηλεκτρικά με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2 , με $n_1 > n_2$, τα οποία βρίσκονται σε επαφή (σχήμα 8.1).



Σχήμα 8.1 – Δύο διηλεκτρικά με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης, τα οποία βρίσκονται σε επαφή.

Όταν μία ακτινοβολία διαδίδεται στο πρώτο μέσο (n_1) και προσπίπτει στη διαχωριστική τους επιφάνεια E με γωνία ϕ_1 ως προς τη κάθετη στο σημείο πρόσπτωσης, θα παρατηρήσουμε ότι ένα μέρος της ακτίνας αυτής θα ανακλαστεί, όπου $\phi_1 = \phi_2$, και θα επιστρέψει στο ίδιο μέσο, ενώ το υπόλοιπο μέρος θα διέλθει στο άλλο μέσο (n_2) με διαφορετική διεύθυνση που σχηματίζει γωνία ϕ_3 με τη κάθετη στο σημείο πρόσπτωσης. Τότε σύμφωνα με το νόμο του Snell θα έχουμε:

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_3 \quad (8.2)$$

ή

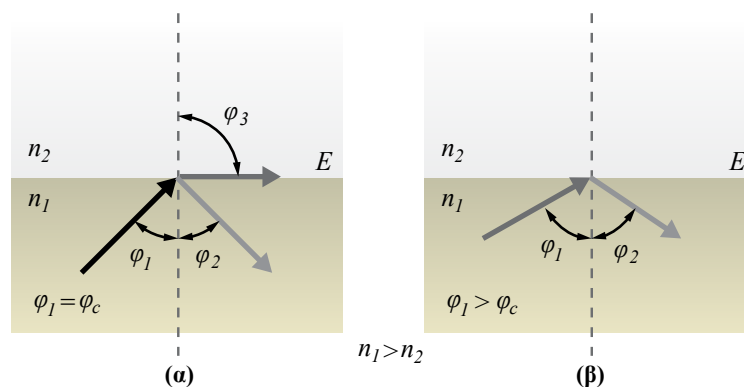
$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_3} = \frac{n_2}{n_1} \quad (8.3)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι στη περίπτωση που $n_1 > n_2$ τότε η γωνία ϕ_3 , που αναφέρεται και σαν γωνία διάθλασης, θα είναι πάντοτε μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης ϕ_1 .

Πάνω στην παρατήρηση αυτή στηρίζεται και το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης, το οποίο αποτελεί τη βασική αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών.

8.3.2.2 Ολική εσωτερική ανάκλαση (total internal reflection)

Διερευνώντας τη σχέση (8.3), συμπεραίνουμε ότι υπάρχει μία κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης ϕ_c , για την οποία η γωνία διάθλασης ϕ_3 γίνεται 90° και η οπτική ακτίνα διαδίδεται πλέον παράλληλα με τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο διηλεκτρικών μέσων (σχήμα 8.2.α).



Σχήμα 8.2 – (α) Μερική και (β) ολική εσωτερική ανάκλαση.

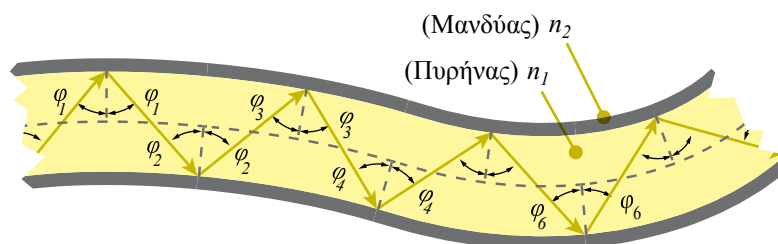
Η κρίσιμη αυτή γωνία ονομάζεται οριακή γωνία ολικής ανάκλασης και υπολογίζεται από τη σχέση (8.3), αν θέσουμε $\varphi_1 = \varphi_c$ και $\varphi_3 = 90^\circ$. Έτσι έχουμε:

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (8.4)$$

Για γωνίες πρόσπτωσης φ_1 μεγαλύτερες από την οριακή γωνία φ_c η οπτική ακτινοβολία ανακλάται πίσω στο αρχικό διηλεκτρικό μέσο, (ολική εσωτερική ανάκλαση), με πολύ μεγάλη απόδοση (περίπου 99.9%, σχήμα 8.2.β).

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι ολική εσωτερική ανάκλαση συμβαίνει στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο διηλεκτρικών μέσων με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης, όταν οπτική ακτινοβολία που διαδίδεται στο οπτικά πυκνότερο μέσο προσπέσει στην επιφάνεια αυτή με γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη από την οριακή γωνία φ_c . Αυτός είναι και ο μηχανισμός με τον οποίο η οπτική ακτινοβολία διαδίδεται μέσα στις οπτικές ίνες με χαμηλές απώλειες.

Το σχήμα 8.3. απεικονίζει τη διέλευση μιας μεσημβρινής οπτικής ακτίνας (optical fiber) μέσα σε ένα οπτικό κυματοδηγό με συνεχείς ολικές εσωτερικές ανακλάσεις στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ πυρήνα και μανδύα. Η ακτίνα αυτή λέγεται μεσημβρινή, γιατί η τροχιά που διαγράφει βρίσκεται πάντα πάνω σε επίπεδο που περιέχει τον άξονα του οπτικού κυματοδηγού. Αυτός ο τύπος ακτίνων είναι ο απλούστερος που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, για να περιγράψουμε και να μελετήσουμε τις βασικές ιδιότητες μεταφοράς στις οπτικές ίνες.



Σχήμα 8.3 – Φωτεινή ακτίνα διαδίδεται μέσω συνεχών ανακλάσεων μέσα σε οπτική ίνα.

8.3.2.3 Φακοί

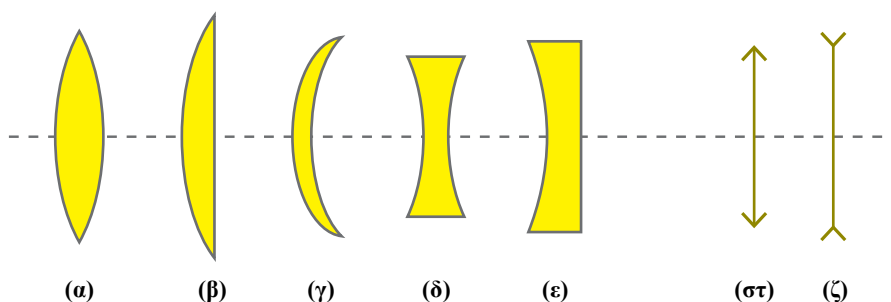
Ο φακός είναι ένα διαφανές αντικείμενο το οποίο περικλείεται μεταξύ δύο επιφανειών και του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι συνήθως μεγαλύτερος από το δείκτη διάθλασης του μέσου εντός του οποίου τοποθετείται. Ανάλογα με τη μορφή που έχουν οι επιφάνειες αυτές, διακρίνουμε τους φακούς σε:

1. **Αμφίκυρτους**, όταν και οι δύο επιφάνειες είναι κυρτές και σφαιρικές, με ίσες ή διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας (βλέπε σχήμα 8.4.α).
2. **Επιεδόκυρτους**, όταν η μία επιφάνεια είναι επίπεδη και η άλλη κυρτή σφαιρική με ακτίνα καμπυλότητας R (βλέπε σχήμα 8.4.β).

3. **Θετικούς μηνίσκους**, όταν η μία επιφάνεια είναι κυρτή σφαιρική με ακτίνα καμπυλότητας R_1 και η άλλη κοίλη σφαιρική με ακτίνα καμπυλότητας R_2 (βλέπε σχήμα 8.4.γ). Μπορεί να ισχύει $R_1 = R_2$ ή $R_1 > R_2$ ή $R_1 < R_2$.
4. **Αμφίκυλινους**, όταν και οι δύο επιφάνειες είναι κοίλες και σφαιρικές, με ίσες ή διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας (βλέπε σχήμα 8.4.δ).
5. **Επιπεδόκυλινους**, όταν η μία επιφάνεια είναι επίπεδη και η άλλη κοίλη σφαιρική με ακτίνα καμπυλότητας R (βλέπε σχήμα 8.4.ε).

Από τους παραπάνω φακούς οι τρεις πρώτοι, επειδή έχουν την ιδιότητα να συγκεντρώνουν και να εστιάζουν σε σημείο κάθε δέσμη παραλλήλων ακτίνων που περνά μέσα από αυτούς, ονομάζονται **συγκλίνοντες** (converging lenses) και συμβολίζονται όπως δείχνει το σχήμα 8.4.στ.

Οι υπόλοιποι που έχουν τουλάχιστον μία κοίλη επιφάνεια, έχουν την ιδιότητα να αποκλίνουν κάθε δέσμη παραλλήλων ακτίνων και ονομάζονται **αποκλίνοντες** (diverging lenses) και συμβολίζονται όπως δείχνει το σχήμα 8.4.ζ.



Σχήμα 8.4 – Είδη φακών ανάλογα με τη μορφή που έχουν οι επιφάνειές τους.

8.3.2.4 Μεγέθη που αφορούν στους φακούς

Ακτίνες καμπυλότητας. Οι ακτίνες αυτές αντιστοιχούν στις ακτίνες των σφαιρικών επιφανειών του φακού και συμβολίζονται συνήθως με R_1 και R_2 .

Κύριος άξονας του φακού. Είναι ο άξονας συμμετρίας του φακού και αντιστοιχεί στην ευθεία που συνδέει τα κέντρα καμπυλότητας.

Οπτικό κέντρο του φακού. Είναι το σημείο εκείνο του φακού από το οποίο, αν περάσει μια φωτεινή ακτίνα, αυτή δεν παθαίνει καμία εκτροπή.

Δευτερεύον άξονας του φακού. Κάθε ευθεία που διέρχεται από το οπτικό κέντρο του φακού ονομάζεται δευτερεύον άξονας του φακού.

Κυρία εστία φακού. Είναι το σημείο, πάνω στον κύριο άξονα, στο οποίο συγκλίνει μια δέσμη φωτεινών ακτίνων, παράλληλων προς τον κύριο άξονα, αφού περάσει μέσα από το φακό. Κάθε φακός έχει δύο κύριες εστίες.

Δευτερεύουσα εστία φακού. Κάθε φωτεινή ακτίνα που είναι παράλληλη με κάποιο δευτερεύοντα άξονα του φακού και διέρχεται μέσα απ' αυτόν συγκλίνει σε συγκεκριμένο σημείο πάνω στο δευτερεύοντα αυτό άξονα. Το σημείο αυτό ονομάζεται δευτερεύουσα εστία φακού.

Εστιακό επίπεδο. Σε κάθε δευτερεύοντα άξονα του φακού, ο οποίος σχηματίζει μικρή γωνία με τον κύριο άξονα, αντιστοιχεί και μία δευτερεύουσα κυρία εστία. Ο γεωμετρικός τόπος όλων των δευτερευουσών εστιών ορίζει το εστιακό επίπεδο του φακού. Κάθε φακός έχει δύο εστιακά επίπεδα.

Εστιακή απόσταση. Είναι η απόσταση της κυρίας εστίας από το οπτικό κέντρο του φακού. Συμβολίζεται συνήθως με το γράμμα f .

Λεπτός φακός. Έτσι χαρακτηρίζεται ένας φακός που η απόσταση ανάμεσα στις επιφάνειές του είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις ακτίνες καμπυλότητάς του.

Τύπος κατασκευής φακών. Σε κάθε λεπτό φακό η εστιακή απόσταση εξαρτάται μόνο από το δείκτη διάθλασης n του υλικού του φακού και από τις ακτίνες καμπυλότητας R_1 και R_2 αυτού. Ισχύει:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (8.5)$$

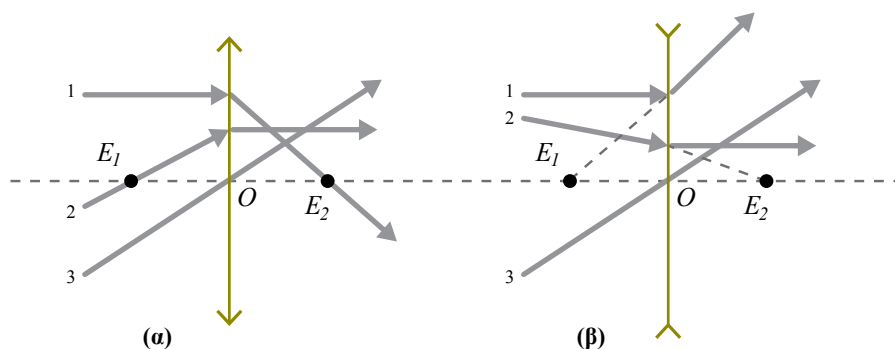
Η σχέση (8.5) ισχύει μόνο για κεντρικές ακτίνες (παρά τον άξονα) και μόνο όταν ο φακός είναι τόσο λεπτός, ώστε να μην έχει σημασία από ποιο σημείο του μετράμε τις αποστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου από αυτόν. Στη σχέση (8.5) το R_1 αναφέρεται στην πρώτη επιφάνεια του φακού που συναντά το φως και το R_2 στη δεύτερη. Οι ακτίνες καμπυλότητας R είναι θετικές αν τα αντίστοιχα κέντρα καμπυλότητας βρίσκονται από την πλευρά του φακού που προσπίπτει το φως, ενώ είναι αρνητικές αν τα κέντρα τους βρίσκονται προς την πλευρά στην οποία το φως διαθλάται και εξέρχεται από το φακό.

8.3.2.5 Πορεία φωτεινών ακτίνων που διέρχονται από φακό

Κάθε φωτεινή ακτίνα που προσπίπτει σε συγκλίνοντα φακό και είναι παράλληλη με τον κύριο άξονα αυτού, εκτρέπεται κατά την έξοδο της από το φακό και περνά από την κυρία εστία του (ακτίνα 1 στο σχήμα 8.5.α). Αν ο φακός είναι αποκλίνων, από την κυρία εστία περνά η προέκταση της εξερχόμενης ακτίνας (ακτίνα 1 στο σχήμα 8.5.β).

Κάθε φωτεινή ακτίνα που διέρχεται η ίδια, ή η προέκτασή της, από μια κυρία εστία του φακού, π.χ. την E_1 , κατά την έξοδο της από το φακό είναι παράλληλη με τον κύριο άξονα (ακτίνα 2 στα σχήματα 8.5.α και 8.5.β).

Κάθε φωτεινή ακτίνα που διέρχεται από το οπτικό κέντρο του φακού δεν υφίσταται καμία εκτροπή (ακτίνα 3 στα σχήματα 8.5.α και 8.5.β).



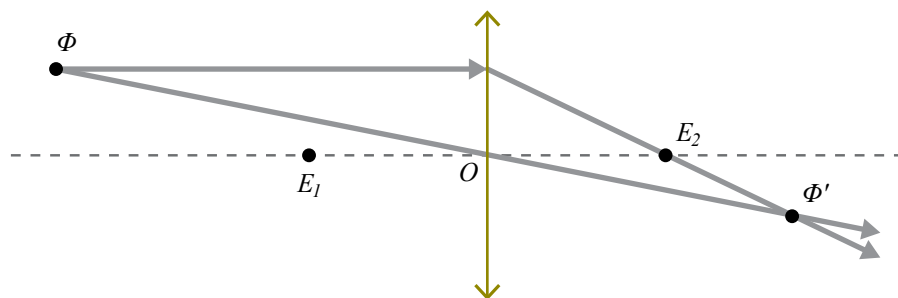
Σχήμα 8.5 – Πορεία φωτεινών ακτίνων που διέρχονται από φακό.

8.3.2.6 Προσδιορισμός ειδώλου σε συγκλίνοντα φακό

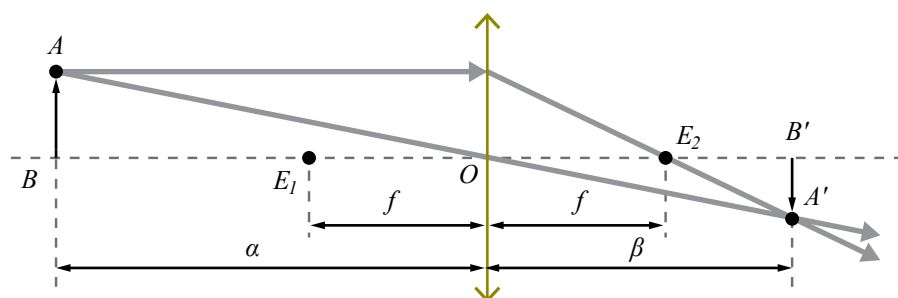
Έστω φωτεινό σημείο Φ το οποίο βρίσκεται πάνω από τον κύριο άξονα ενός λεπτού συγκλίνοντα φακού και πέρα από την κυρία εστία E_1 (βλέπε σχήμα 8.6). Για να βρούμε τη θέση του ειδώλου Φ' του σημείου αυτού, χρησιμοποιούμε δύο χαρακτηριστικές ακτίνες που προέρχονται από την πηγή Φ . Η μία είναι παράλληλη προς τον κύριο άξονα και, επομένως, μετά την έξοδο της από το φακό εκτρέπεται και περνά από την κυρία εστία του και η άλλη περνά από το οπτικό κέντρο του φακού και, επομένως, δεν υφίσταται καμία εκτροπή. Το είδωλο ταυτίζεται με το σημείο τομής των δύο αυτών φωτεινών ακτίνων.

Για να βρούμε τη θέση του ειδώλου ενός οποιοδήποτε φωτεινού αντικειμένου, διαιρούμε αυτό σε στοιχειώδη φωτεινές πηγές και με τη διαδικασία που αναφέραμε παραπάνω βρίσκουμε το είδωλο κάθε μιας από τις πηγές αυτές. Όπως είναι εύκολα κατανοητό, ο γεωμετρικός προσδιορισμός του ειδώλου ενός τυχαίου αντικειμένου είναι πάρα πολύ δύσκολος, αν όχι αδύνατος. Σε απλές, όμως, περιπτώσεις όπου το αντικείμενο είναι γραμμικό, π.χ. το νήμα ενός λαμπτήρα πυράκτωσης, η θέση του ειδώλου προσδιορίζεται με τη γεωμετρική εύρεση του ειδώλου δύο ακραίων σημείων του αντικειμένου. Η διαδικασία αυτή φαίνεται

στο σχήμα 8.7, όπου το αντικείμενο AB είναι κάθετο στο κύριο άξονα λεπτού συγκλίνοντα φακού.



Σχήμα 8.6 – Η φωτεινή ακτίνα που προσπίπτει κάθετα στο φακό διαθλάται έτσι ώστε να περνά από την εστία του φακού. Η φωτεινή ακτίνα που περνά από το κέντρο O του φακού δεν εκτρέπεται (δεν υφίσταται διάθλαση) από το φακό.



Σχήμα 8.7 – Σχηματισμός του ειδώλου $A'B'$ ενός αντικειμένου AB με συγκλίνοντα φακό.

Για να βρούμε το είδωλο $A'B'$, του AB , βρίσκουμε με τη διαδικασία που ήδη έχουμε αναφέρει το είδωλο A' του σημείου A και από το A' φέρουμε την κάθετη στο κύριο άξονα, οπότε και ορίζουμε το είδωλο B' του σημείου B . Αν το φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα του φακού και η απόστασή του από το οπτικό κέντρο του φακού είναι α , ενώ β είναι η απόσταση του ειδώλου από το οπτικό κέντρο του φακού, τότε ισχύει,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \quad (8.6)$$

όπου f είναι η εστιακή απόσταση του φακού. Η απόσταση α είναι θετική, όταν το αντικείμενο βρίσκεται προς την πλευρά που φακού πάνω στην οποία προσπίπτει το φως. Διαφορετικά είναι αρνητική. Η απόσταση β είναι θετική, όταν το είδωλο βρίσκεται προς την πλευρά του φακού από την οποία εξέρχεται το φως. Διαφορετικά είναι αρνητική.

Από το σχήμα 8.7, για τα δύο όμοια ορθογώνια τρίγωνα του σχήματος μπορούμε να γράψουμε $A'B'/AB = \beta/\alpha$. Η ποσότητα $A'B'/AB$ είναι (αν αδιαφορήσουμε για το πρόσημο) η πλευρική μεγέθυνση (magnification) M του AB . Επειδή θέλουμε να παριστάνουμε ένα ανάστροφο είδωλο με αρνητική μεγέθυνση, ορίζουμε αυθαίρετα το M για την περίπτωση αυτή ως $A'B'/AB$. Επομένως, η μεγέθυνση M του ειδώλου θα δίνεται από τη σχέση:

$$M = \frac{A'B'}{AB} = -\frac{\beta}{\alpha} \quad (8.7)$$

Η μεγέθυνση M είναι θετική, όταν το είδωλο είναι ορθό, και αρνητική, όταν αυτό είναι αντεστραμμένο. Επίσης, μια χρήσιμη παράμετρος είναι η ισχύς P του φακού, η οποία είναι ίση με το αντίστροφο της εστιακής απόστασης f :

$$P = \frac{1}{f} \quad (8.8)$$

Μονάδα μέτρησης της ισχύος του φακού είναι η διόπτρα, (dpt), όπου $1\text{dpt}=1\text{m}^{-1}$

Διερευνώντας τώρα τη σχέση (8.6) προκύπτουν οι παρακάτω περιπτώσεις, όσον αφορά τη θέση του αντικειμένου σε σχέση με τη κυρία εστία του συγκλίνοντα φακού.

■ Περίπτωση $a > f$.

Από τη σχέση (8.6) προκύπτει ότι:

$$\beta = \frac{af}{a-f} \quad (8.9)$$

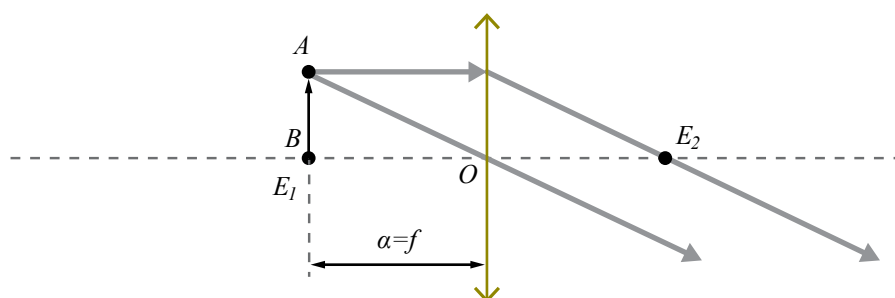
ή:

$$\beta = \frac{f}{1 - \frac{f}{a}} \quad (8.10)$$

Στη περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι ο παρονομαστής στη σχέση (8.10) είναι θετικός και, συνεπώς, $\beta > 0$. Το είδωλο θα είναι πραγματικό, προκύπτει από τομές πραγματικών ακτίνων, και αντεστραμμένο ($M < 0$, βλέπε σχήμα 8.7).

■ Περίπτωση $a = f$.

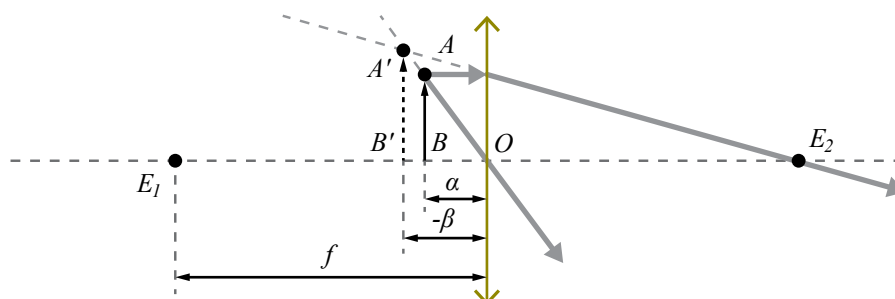
Από τη σχέση (8.10) προκύπτει ότι η απόσταση β θα είναι ίση με το άπειρο, που σημαίνει ότι το είδωλο θα σχηματισθεί στο άπειρο, το δε μέγεθος αυτού θα είναι απροσδιόριστο (βλέπε σχήμα 8.8).



Σχήμα 8.8 – Όταν το αντικείμενο AB βρίσκεται πάνω στην εστία του φακού, το είδωλό του σχηματίζεται στο άπειρο.

■ Περίπτωση $0 < a < f$.

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι ο παρονομαστής στη σχέση (8.10) είναι αρνητικός και, συνεπώς, το β είναι αρνητικό. Το είδωλο θα είναι φανταστικό, προκύπτει από προεκτάσεις των φωτεινών ακτίνων, και ορθό ($M > 0$, βλέπε σχήμα 8.9).

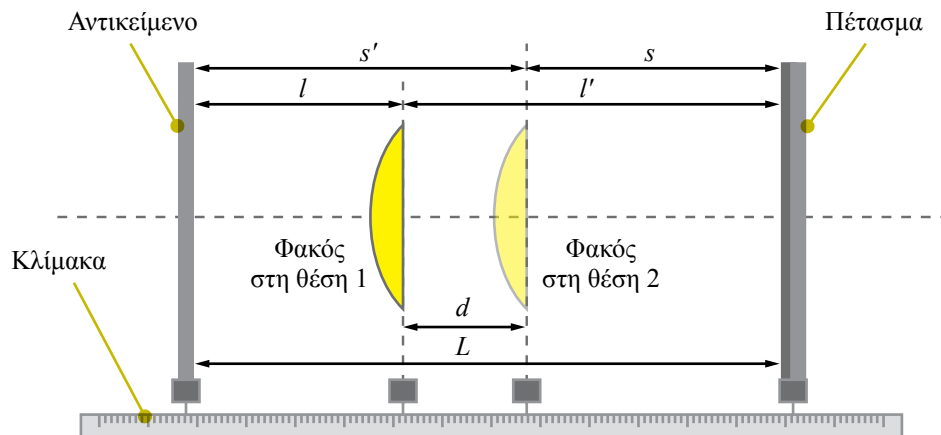


Σχήμα 8.9 – Όταν το αντικείμενο βρίσκεται μεταξύ εστίας και φακού το είδωλό του είναι φανταστικό.

8.3.2.7 Μέθοδος Bessel

Η μέθοδος αυτή δίνει πιο ακριβή υπολογισμό της εστιακής απόστασης f . Στη μέθοδο Bessel τοποθετούμε αντικείμενο και πέτασμα ειδώλου σε μία σταθερή απόσταση L . Το πείραμα

διεξάγεται για μια απόσταση $5f > L > 4f$. Υπάρχουν δύο θέσεις του φακού για τις οποίες το είδωλο εστιάζεται στο πέτασμα.



Σχήμα 8.10 – Υπάρχουν δύο θέσεις του φακού για τις οποίες σχηματίζεται ευκρινές είδωλο του αντικειμένου πάνω στο πέτασμα.

Έστω d η απόσταση των δύο διαφορετικών θέσεων του φακού. Σύμφωνα με το σχήμα 8.10. ισχύουν οι σχέσεις:

$$L = s + s' \quad (8.11)$$

$$s' - l = d \quad (8.12)$$

Για λόγους συμμετρίας και αντιστροφής ισχύει:

$$l = s \quad (8.13)$$

κατά συνέπεια:

$$d = s' - s \quad (8.14)$$

και προκύπτει ότι:

$$s' = \frac{L + d}{2} \quad (8.15)$$

$$s = \frac{L - d}{2} \quad (8.16)$$

Στη σχέση (8.6), τα a και β είναι αντίστοιχα οι αποστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου από το φακό. Αντικαθιστώντας τις τιμές των s και s' από τις σχέσεις (8.15) και (8.16) στα a και β της σχέσης (8.6), προκύπτει ότι:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{(L - d)/2} + \frac{1}{(L + d)/2} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{4L}{(L^2 - d^2)} \quad (8.17)$$

8.3.3 Εκτέλεση

8.3.3.1 Υπολογισμός της εστιακής απόστασης f ενός συγκεντρωτικού φακού

1. Τοποθετήστε το πέτασμα στην άκρη της κλίμακας, πλησιάστε το φακό στη φωτεινή πηγή και αρχίστε να τον απομακρύνετε από αυτήν έως ότου λάβετε πάνω στο πέτασμα όσο το δυνατόν πιο καθαρά το είδωλο των σπειρών του νήματος της λυχνίας.

- Μετρήστε τις αποστάσεις α και β σε cm (ακρίβεια μέτρησης $\pm 0,1\text{cm}$), όπου α η απόσταση φακού αντικειμένου, δηλαδή σπειρών, και β η απόσταση φακού ειδώλου, δηλαδή του πετάσματος.
- Χωρίς να αλλάξετε τη θέση της φωτεινής πηγής, μετακινήστε το πέτασμα σε οκτώ διαφορετικές θέσεις, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, και συμπληρώστε ένα πίνακα τιμών, όπως ο πίνακας 8.1.

α/α	α (cm)	β (cm)	$M=-\beta/\alpha$
1	...	...	...
...	...	...	...

Πίνακας 8.1 – Πίνακας τιμών για διαφορετικές θέσεις του πετάσματος.

8.3.3.2 Υπολογισμός με τη μέθοδο Bessel

- Τοποθετήστε το πέτασμα σε απόσταση L ($4f < L < 5f$).
- Βρείτε τις δύο θέσεις του φακού για τις οποίες το είδωλο του αντικειμένου (σπείρες λαμπτήρα) εστιάζεται πάνω στο πέτασμα, όπως στο σχήμα 8.10.
- Μετρήστε τις αποστάσεις L και d , όπως στο σχήμα 8.10.
- Επαναλάβετε τη διαδικασία για δύο ακόμη διαφορετικές τιμές του L .

8.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

8.3.4.1 Υπολογισμός της εστιακής απόστασης f ενός συγκεντρωτικού φακού

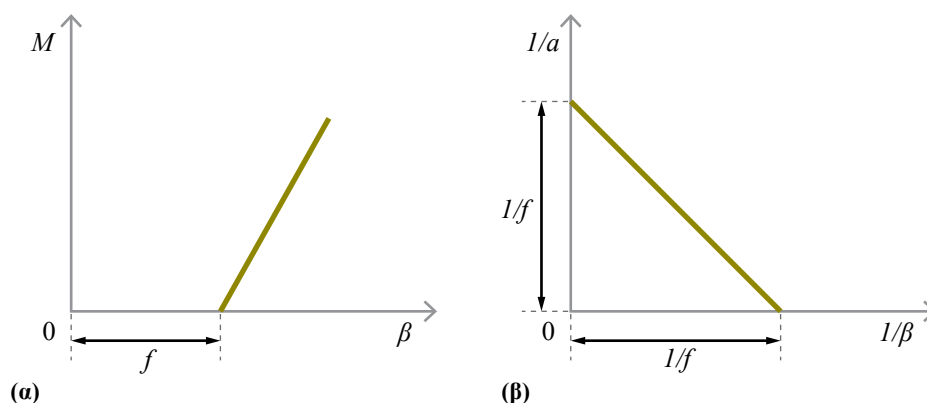
- Υπολογίστε τη μεγέθυνση M , για κάθε ζευγάρι τιμών α και β , και συμπληρώστε τον πίνακα 8.1.
- Από τις σχέσεις (8.6) και (8.7), πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη με το b , παίρνουμε:

$$\frac{\beta}{\alpha} + 1 = \frac{\beta}{f} \quad (8.18)$$

ή

$$M = \left(\frac{1}{f}\right)\beta - 1 \quad (8.19)$$

- Η σχέση (8.19) είναι της μορφής $y=kx+a$ και σε άξονες $M \rightarrow \beta$ δίνει γραφική παράσταση ευθεία γραμμή με τετμημένη επί την αρχή ίση με f (σχήμα 8.11.α).
- Η σχέση (8.6) είναι της μορφής $y+x=c$ και η γραφική της παράσταση σε άξονες $1/\alpha \rightarrow 1/\beta$ δίνει ευθεία γραμμή με τετμημένη και τεταγμένη επί την αρχή το $1/f$ (σχήμα 8.11.β).



Σχήμα 8.11 – (α) Διάγραμμα της μεγέθυνσης M φακού σε συνάρτηση με την απόσταση του ειδώλου από το φακό, (β) διάγραμμα των μεγεθών του αντίστροφου της απόστασης αντικειμένου από φακό σε σχέση με το αντίστροφο της απόστασης του ειδώλου από το φακό.

- Σε άξονες M και β από τις τιμές του πίνακα 8.1, και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, αποδώστε τη γραφική παράσταση της σχέσης (8.19) και από την τετμημένη επί την αρχή υπολογίστε την εστιακή απόσταση f .
- Από τις τιμές των α και β του πίνακα 8.1 υπολογίστε τα $1/\alpha$ και $1/\beta$ και καταχωρίστε τα σε πίνακα, όπως ο πίνακας 8.2.

α/α	$1/\alpha$ (cm ⁻¹)	$1/\beta$ (cm ⁻¹)
1	...	...
...		

Πίνακας 8.2 – Πίνακας τιμών για διαφορετικές θέσεις του πετάσματος.

5. Σε άξονες $1/\alpha$ και $1/\beta$, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, αποδώστε τη γραφική παράσταση της σχέσης:

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\beta} \quad (8.20)$$

και από τις συντεταγμένες επί την αρχή υπολογίστε τις δύο τιμές για το $1/f$ και αντίστοιχα τις δύο τιμές του f . Θεωρητικά είναι ίσες. Αν δεν είναι, βρείτε τη μέση τιμή.

8.3.4.2 Υπολογισμός με τη μέθοδο Bessel

Από τη σχέση (8.17) γνωστών των L και d υπολογίστε την εστιακή απόσταση f για κάθε μέτρηση και βρείτε τη μέση τιμή της f καθώς και το σφάλμα μέσης τιμής.

8.4 Πείραμα 2

8.4.1 Σκοπός

Μέτρηση της χρωματικής εκτροπής, μέτρηση του σφάλματος της σφαιρικής εκτροπής.

8.4.2 Θεωρία

8.4.2.1 Σφάλματα των φακών

Όπως ήδη αναφέραμε και στις προηγούμενες παραγράφους, οι βασικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται στους φακούς, σχέσεις (8.5) και (8.6), ισχύουν με την προϋπόθεση ότι οι φακοί είναι λεπτοί. Συμπληρώνουμε εδώ ότι οι παραπάνω σχέσεις δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα, όταν ο φακός εκτείνεται σε πολύ μικρή έκταση γύρω από το οπτικό του κέντρο. Στην πραγματικότητα, όμως, οι προϋποθέσεις αυτές δεν ισχύουν και, ως εκ τούτου, κατά τον υπολογισμό της θέσης του ειδώλου ενός αντικειμένου, θα υπεισέρχονται διάφορα σφάλματα. Τα σπουδαιότερα από τα σφάλματα αυτά είναι τα παρακάτω:

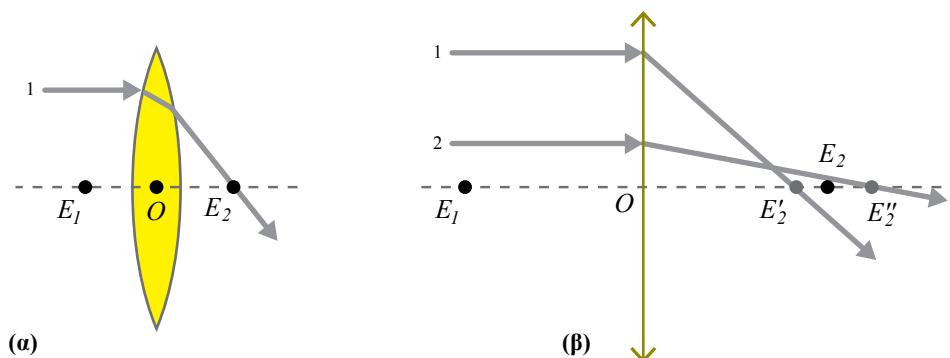
8.4.2.2 Σφάλμα σφαιρικής διπλής εκτροπής

Κατά τη διέλευση μιας οπτικής ακτίνας από έναν συνήθη λεπτό φακό δεχόμαστε ότι αυτή υφίσταται μία μόνο εκτροπή. Στην πραγματικότητα αυτή υφίσταται δύο εκτροπές, μία κατά την είσοδο της και μία κατά την έξοδο της από το φακό. Η διπλή αυτή εκτροπή έχει σαν αποτέλεσμα την παρέκκλιση της πορείας της φωτεινής ακτίνας από την πορεία την οποία προβλέπει η σχέση (8.6), όπως η ακτίνα 1 στο σχήμα 8.12.α.

8.4.2.3 Σφάλμα σφαιρικής εκτροπής (spherical aberration)

Από το γεγονός ότι το πάχος του φακού είναι μικρότερο στην περιφέρεια του απ' ό,τι στην περιοχή γύρω από το οπτικό κέντρο προκύπτει ότι οι παράλληλες φωτεινές ακτίνες που διέρχονται από περιοχή που βρίσκεται πλησίον του οπτικού κέντρου θα εστιάζουν σε σημείο διαφορετικό από το σημείο στο οποίο εστιάζουν οι φωτεινές ακτίνες που διέρχονται από

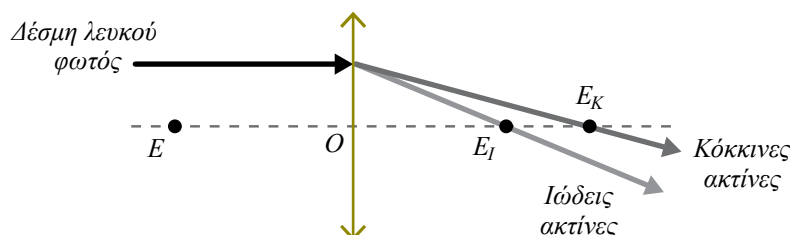
περιοχή που βρίσκεται πλησίον της περιφέρειας του φακού, όπως οι φωτεινές ακτίνες 1 και 2 στο σχήμα 8.12.β.



Σχήμα 8.12 – (α) Παρέκκλιση της πορείας φωτεινής ακτίνας όταν διέρχεται μέσα από λεπτό φακό. (β) Στα σφάλματα σφαιρικής εκτροπής οι περιφερειακές παράλληλες ως προς τον κύριο άξονα φωτεινές ακτίνες (1) εστιάζονται πιο κοντά στο κέντρο του φακού απ' ό,τι οι κεντρικές ακτίνες (2).

8.4.2.4 Σφάλμα χρωματικής εκτροπής (chromatic aberration)

Το σφάλμα αυτό εμφανίζεται στις περιπτώσεις εκείνες όπου η φωτεινή δέσμη αποτελείται από φωτεινές ακτίνες με διαφορετικά μήκη κύματος. Στην περίπτωση αυτή το υλικό του φακού θα έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης για κάθε μήκος κύματος, με τελικό αποτέλεσμα οι ακτίνες με διαφορετικό μήκος κύματος να εστιάζουν σε διαφορετικά σημεία, π.χ. οι ιώδεις ακτίνες θα έχουν σα κύρια εστία την E_I ενώ οι κόκκινες την E_K , (βλέπε σχήμα 8.13).



Σχήμα 8.13 – Το λευκό φως είναι το αποτέλεσμα της σύνθεσης χρωμάτων διαφορετικών μηκών κύματος. Ο φακός παρουσιάζει διαφορετικές εστίες για κάθε χρώμα λόγω της διαφορετικής διάθλασης που υφίσταται το κάθε χρώμα. Στον αέρα το κόκκινο φως έχει μήκος κύματος 700nm και το ιώδες έχει μήκος κύματος 450nm.

8.4.3 Εκτέλεση

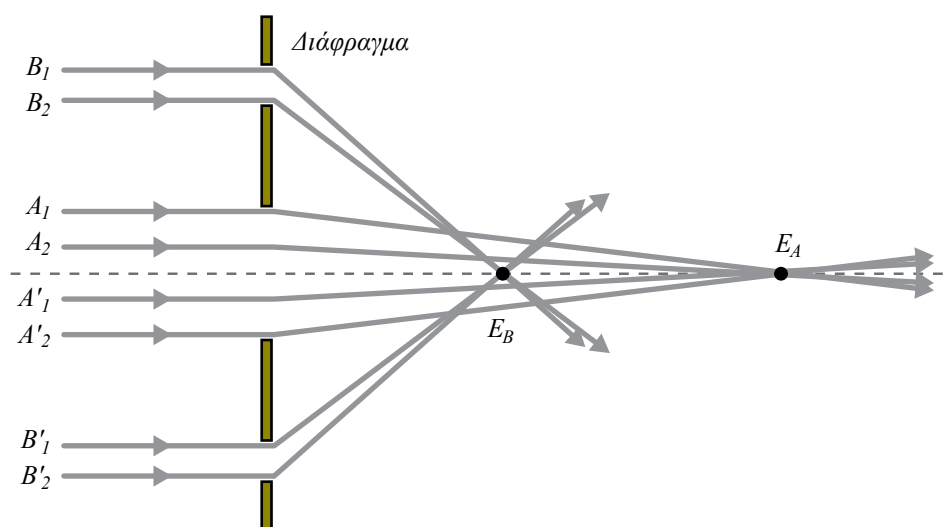
8.4.3.1 Χρωματικό σφάλμα φακών

1. Τοποθετήστε, μπροστά από τη λυχνία, σε μικρή απόσταση, το κόκκινο φίλτρο.
2. Πλησιάστε το φακό κοντά στο πέτασμα και εστιάστε προσεκτικά, έως ότου λάβετε πάνω στο πέτασμα όσο το δυνατόν πιο καθαρά το είδωλο των σπειρών του νήματος της λυχνίας.
3. Μετρήστε την απόσταση φακού – αντικειμένου, δηλαδή φακού – σπειρών, α_K και την απόσταση φακού – ειδώλου, δηλαδή φακού – πετάσματος, β_K .
4. Επαναλάβετε τη διαδικασία, αντικαθιστώντας το κόκκινο με το μπλε φίλτρο, και μετρήστε τις αντίστοιχες αποστάσεις α_μ και β_μ .

8.4.3.2 Σφάλμα σφαιρικής εκτροπής

1. Πάνω στο φακό τοποθετούνται κατάλληλα διαφράγματα, έτσι ώστε να επιτρέπεται η διέλευση μόνο των περιφερειακών ακτίνων (B_p, B_2, B_1', B_2') ή μόνο των κεντρικών ακτίνων (A_p, A_2, A_1', A_2') του φωτός (βλέπε σχήμα 8.14).

- Έχοντας μόνο τη λυχνία, το φακό και το πέτασμα πάνω στην οπτική τράπεζα, κλείστε την κεντρική περιοχή του φακού, τοποθετώντας στο κέντρο του το κατάλληλο διάφραγμα, έτσι ώστε από το φακό να διέρχονται μόνο οι περιφερειακές ακτίνες.
- Αρχίστε να πλησιάζετε (ή να απομακρύνετε) σιγά-σιγά το φακό προς το πέτασμα και εστιάζετε προσεκτικά έως ότου λάβετε πάνω στο πέτασμα όσο το δυνατόν πιο καθαρά το είδωλο των σπειρών του νήματος της λυχνίας.
- Μετρήστε την απόσταση φακού – αντικειμένου, δηλαδή φακού – σπειρών, α_B , και την απόσταση φακού – ειδώλου, δηλαδή φακού – πετάσματος, β_B .
- Ελευθερώστε την κεντρική περιοχή του φακού, αφαιρώντας το διάφραγμα. Κλείστε την περιφερειακή περιοχή του φακού, τοποθετώντας το αντίστοιχο κατάλληλο διάφραγμα, έτσι ώστε από το φακό να διέρχονται μόνο οι κεντρικές ακτίνες.
- Εστιάζετε και πάλι προσεκτικά έως ότου λάβετε πάνω στο πέτασμα όσο το δυνατόν πιο καθαρά το είδωλο των σπειρών του νήματος της λυχνίας.
- Μετρήστε και στην περίπτωση αυτή την απόσταση φακού – αντικειμένου, δηλαδή φακού – σπειρών, α_A , και την απόσταση φακού – ειδώλου, δηλαδή φακού – πετάσματος, β_A .



Σχήμα 8.14 – Διαφράγματα τοποθετούνται πάνω στο φακό επιτρέποντας τη διέλευση μόνο των περιφερειακών ακτίνων.

8.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων

8.4.4.1 Χρωματικό σφάλμα φακών

Από τις μετρήσεις σας και από τη σχέση (8.6), υπολογίστε τις εστιακές αποστάσεις f_K και f_μ για κάθε περίπτωση (κόκκινο και μπλε φίλτρο). Υπάρχει διαφορά ανάμεσα στις δύο τιμές; Σχολιάστε.

8.4.4.2 Σφάλμα σφαιρικής εκτροπής

Από τις μετρήσεις σας και από τη σχέση (8.6), υπολογίστε τις εστιακές αποστάσεις f_A και f_B για κάθε περίπτωση (περιφερειακές και κεντρικές ακτίνες). Υπολογίστε την διαφορά $|f_A - f_B|$ που είναι η σφαιρική εκτροπή.

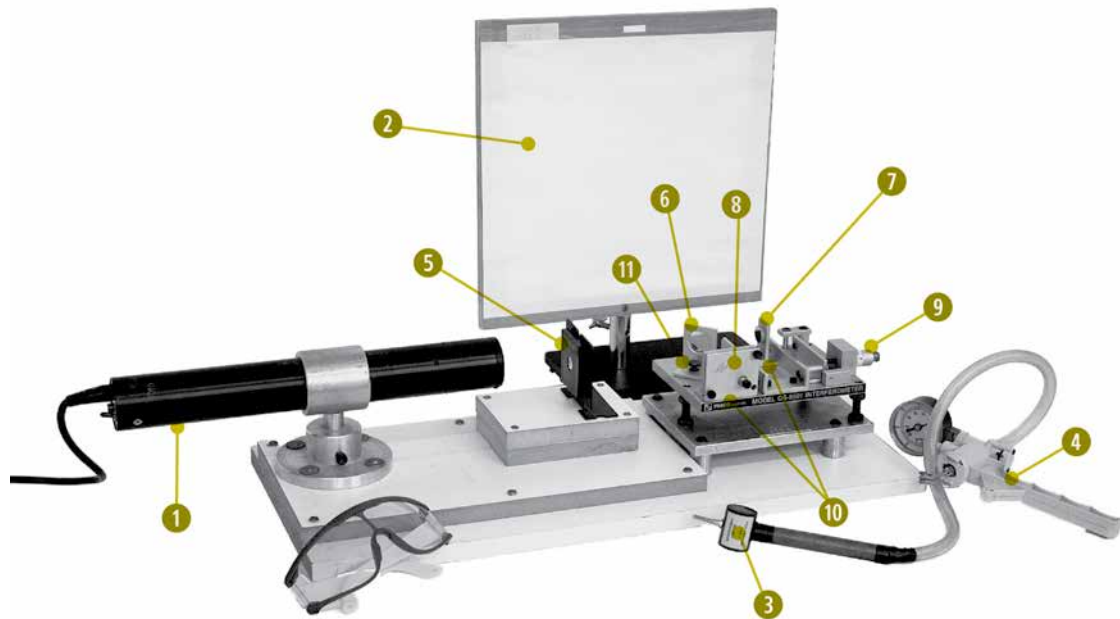
8.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 34: Refraction,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.
- [2] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 35: Lenses,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.

- [3] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 14: Geometrical Optics,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 411-434.
- [4] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 15: Lenses,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 435-455.
- [5] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 16: Further topics in Optics, Spherical and chromatic aberrations,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 461-462.
- [6] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 465-487.
- [7] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves, Measurement of speed of sound,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 488-489, pp.493-497.

ΑΣΚΗΣΗ 9

Συμβολόμετρο Michelson



9.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Πηγή φωτός λέιζερ.
2. Πέτασμα.
3. Θάλαμος (κυψελίδα) κενού αέρα.
4. Μετρητής πίεσης.
5. Συγκλίνων φακός ($f=+18\text{mm}$).
6. Ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο (διαχωριστής φωτεινής δέσμης).
7. Κινητό κάτοπτρο.
8. Σταθερό κάτοπτρο.
9. Μικρομετρικός κοχλίας ρύθμισης της θέσης του κινητού κατόπτρου.
10. Μικρομετρικός κοχλίας ρύθμισης της θέσης του σταθερού κατόπτρου.
11. Μικρομετρικός κοχλίας ρύθμισης της θέσης του ημιεπαργυρωμένου κατόπτρου.

9.2 Απαραίτητες γνώσεις

Συμβολή κυμάτων, κροσσοί συμβολής, δείκτης διάθλασης, φως λέιζερ, συσκευές λέιζερ.

9.3 Πείραμα 1

9.3.1 Σκοπός

Μέτρηση του μήκους κύματος φωτός λέιζερ.

9.3.2 Θεωρία

9.3.2.1 Τι είναι φως και συσκευές λέιζερ

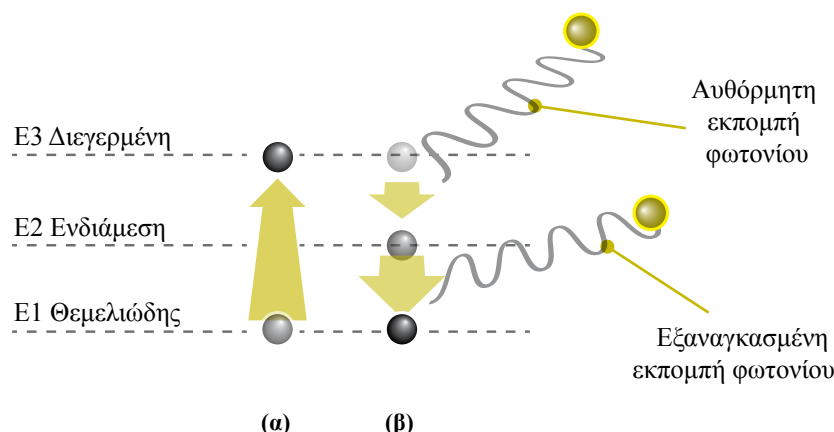
Το φως λέιζερ (laser), όπως κάθε μορφή φωτός, είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μεταφέρει ενέργεια και αποτελείται από φωτόνια. Τα φωτόνια χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος ή τη συχνότητα τους. Το φως λέιζερ είναι ορατό ανάλογα με το μήκος κύματος

που έχει, ενώ ξεχωρίζει από το φως των άλλων γνωστών μέχρι σήμερα φωτεινών πηγών στο ότι αποτελείται από εντελώς ταυτόσημα φωτόνια. Αυτή η ιδιότητα του προσδίδει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του: (i) κατευθυντικότητα, (ii) μονοχρωματικότητα, (iii) λαμπρότητα, (iv) χρονική συμφωνία, δηλαδή ότι το ένα κύμα ακολουθεί το άλλο σε τακτικά διαστήματα, και (v) χωρική συμφωνία, δηλαδή ότι όλα τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε ίση απόσταση από τη φωτεινή πηγή έχουν ίδια φάση. Οι ιδιότητες της μονοχρωματικότητας και της μη απόκλισης δίνουν στο φως λέιζερ τη δυνατότητα να παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση ενέργειας από άλλες πηγές φωτός.

Η ένταση του φωτός λέιζερ μετρείται σε W/cm^2 ή σε φωτόνια/s/cm² (αριθμός φωτονίων ανά μονάδα χρόνου και μονάδα επιφάνειας). Το φως λέιζερ είναι τεχνητό φως που παράγεται από τις συσκευές λέιζερ. Οι συσκευές λέιζερ διακρίνονται ως προς τη χρονική διάρκεια της φωτεινής δέσμης τους σε συνεχείς και παλμικές. Τις συσκευές λέιζερ τις διακρίνουμε και ως προς το υλικό που διεγείρουμε σε: (i) λέιζερ αερίου, (ii) διοδικά λέιζερ, (iii) λέιζερ στερεάς κατάστασης, (iv) excimer λέιζερ.

Η λέξη *λέιζερ* παράγεται από τα αρχικά της πλήρους αναλυτικής επιστημονικής ονομασίας, που περιγράφει και το ακριβές φυσικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα, **light amplification by stimulated radiation – laser** ή σε μετάφραση: **ενίσχυση φωτός με παρακινούμενη εκπομπή ακτινοβολίας**.

Για να κατανοηθεί η λειτουργία των συσκευών λέιζερ, χρειάζονται γνώσεις που αφορούν στη διέγερση των ατόμων. Τα άτομα στις συνήθεις θερμοκρασίες βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση (σχήμα 9.1). Αν απορροφήσουν κάποια ενέργεια, π.χ. υπό μορφή ακτινοβολίας, διεγείρονται και βρίσκονται σε κατάσταση μεγαλύτερης ενέργειας από τη θεμελιώδη (valence band). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συχνότητες που απορροφούνται είναι μόνο αυτές που αντιστοιχούν στις διαφορές των ενεργειακών σταθμών (energy gap).



Σχήμα 9.1 – (α) Διέγερση ηλεκτρονίου και (β) αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίου.

Η διεργασία κατά την οποία το άτομο επανέρχεται σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, εκπέμποντας φωτόνιο, ονομάζεται **αυθόρμητη αποδιέγερση** (spontaneous emission). Η πιθανότητα να συμβεί αυτό συνήθως είναι μέσα σε ένα χρονικό ορίζοντα $10^{-8}s$ από τη στιγμή στην οποία διεγείρεται το άτομο.

Παρακινούμενη εκπομπή (stimulated emission) είναι η διεργασία που εφαρμόζεται στα λέιζερ όπου προκαλείται αποδιέγερση του ατόμου, ρίχνοντας ένα φωτόνιο πάνω στο διεγερμένο άτομο (το τελευταίο επανέρχεται σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση εκπέμποντας φωτόνιο ίδιας συχνότητας). Στο τέλος της διεργασίας υπάρχουν δύο ίδια φωτόνια, το προσπίπτον και το εκπεμπόμενο, που είναι στην ίδια φάση, δηλαδή είναι σύμφωνα.

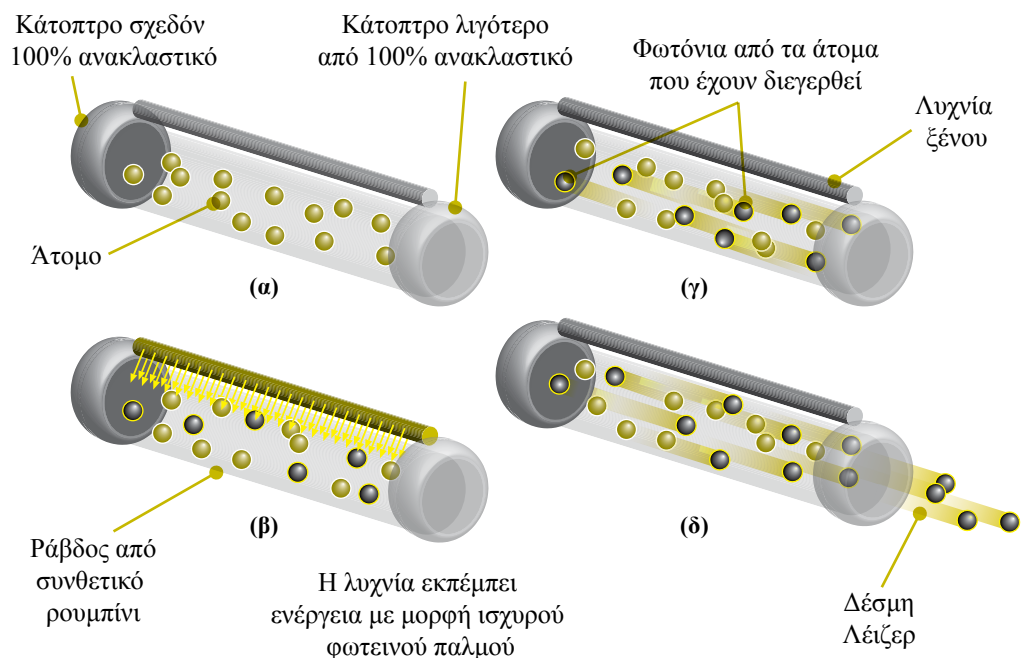
Συνήθως τα άτομα βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση λόγω της θερμικής ισορροπίας. Άρα έχουν περισσότερο τη δυνατότητα να απορροφήσουν παρά να εκπέμψουν φωτόνια. Η αντιστροφή αυτής της κατάστασης, δηλαδή να υπάρχουν περισσότερα άτομα στη διεγερμένη κατάσταση παρά στη θεμελιώδη, ονομάζεται **αντιστροφή πληθυσμού** (population inversion).

Μετασταθής είναι μια κατάσταση ενός ατόμου, όταν ο χρόνος ζωής της κατάστασης είναι μεγάλος σε σύγκριση με τους συνήθως μικρούς χρόνους ζωής των διεγερμένων καταστάσεων. Σε αυτή την περίπτωση η εκπομπή είναι παρακινούμενη και όχι αυθόρμητη.

Για να έχουμε μια πηγή λέιζερ πρέπει να πληρωθούν οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Το σύστημα να βρίσκεται σε κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών.
- Η διεγερμένη κατάσταση του συστήματος πρέπει να είναι μετασταθής.
- Πρέπει τα εκπεμπόμενα φωτόνια να περιοριστούν σε μικρό σχετικά χώρο, ώστε να παρακινήσουν και πολλά άλλα άτομα σε εκπομπή φωτονίων. Δηλαδή το ενεργό υλικό να τοποθετηθεί μέσα σε οπτικό αντηχείο (optical resonator), όπως δείχνεται στο σχήμα 9.2.

Το οπτικό αντηχείο είναι ένας σωλήνας με παράλληλους καθρέφτες στα άκρα του (σχήμα 9.2). Τα εκπεμπόμενα φωτόνια μετακινούνται κατά μήκος του σωλήνα, μεταξύ των καθρεπτών, και προκαλούν την παραγωγή και άλλων φωτονίων. Αυτή η διάταξη είναι ένας ενισχυτής με θετική ανάδραση και δημιουργεί έναν ταλαντωτή. Αν ο ένας από τους δύο καθρέπτες είναι ημιδιαφανής, κάποια από την ταλαντούμενη ενέργεια του σωλήνα θα εξέλθει. Αυτή η ενέργεια έχει τη μορφή φωτός συχνότητας $\Delta E/h$, όπου h η παγκόσμια σταθερά του Planck, και η έντασή της εξαρτάται από τον όγκο του σωλήνα, από την ισχύ της άντλησης (optical pumping) και από το κατά πόσο μικρή είναι η διατομή του σωλήνα.



Σχήμα 9.2 – Σχηματικό διάγραμμα μιας συσκευής παραγωγής λέιζερ (He-Ne). Φαίνεται το οπτικό αντηχείο, ο σωλήνας που περιέχει το ενεργό υλικό και στα άκρα του έχει κάτοπτρα.

Η θέση των κατόπτρων στο οπτικό αντηχείο ρυθμίζεται έτσι, ώστε η απόστασή τους να είναι αυστηρά ακέραιο πολλαπλάσιο του $\lambda/2$, όπου λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του λέιζερ. Επίσης, για να αποφευχθούν τα ανεπιθύμητα φαινόμενα της περίθλασης που προκύπτουν κατά την πρόσπτωση των φωτονίων στα κάτοπτρα, πρέπει οι ανωμαλίες της επιφάνειας των κατόπτρων να είναι μικρότερες του $\lambda/4$. Ο ρόλος του οπτικού αντηχείου είναι διπλός. Από τη μια, είναι σε συντονισμό με την ακτινοβολία λέιζερ που παράγεται και, από την άλλη, εξαλείφει τα φωτόνια που προέρχονται από την αυθόρμητη εκπομπή τα οποία τελικά απορροφούνται από τα τοιχώματά του. Αντίθετα τα φωτόνια που προέρχονται από την εξαναγκασμένη εκπομπή είναι συμφασικά, και διατηρούν συνεχώς την αξονική διεύθυνση, ούτως ώστε να μην απορροφούνται, αφού ανακλώνται συνεχώς από τα κάτοπτρα, και να υφίστανται πολλαπλή ενίσχυση.

9.3.2.2 Συμβολή κυμάτων (interference)

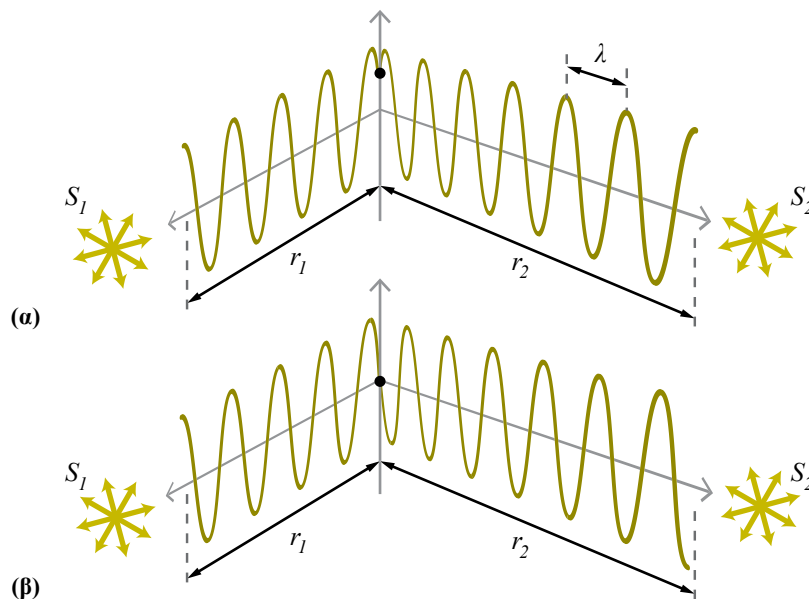
Ο όρος **συμβολή** αναφέρεται σε κάθε περίπτωση κατά την οποία δύο ή περισσότερα κύματα αλληλεπικαλύπτονται στο χώρο. Τότε η προκύπτουσα μετατόπιση σε οποιαδήποτε σημείο και οποιαδήποτε χρονική στιγμή μπορεί να βρεθεί, αν προστεθούν διανυσματικά οι στιγμιαίες μετατοπίσεις που θα παράγονταν στο σημείο αυτό από τα κύματα, αν το καθένα από αυτά υφίστατο αφ' εαυτού. Συγκεκριμένα πρόκειται για την αρχή της επαλληλίας ή υπέρθεσης, η οποία ισχύει μόνο για τα γραμμικά συστήματα.

Στο εξής μιλώντας για το φως, θα αναφερόμαστε στο άνυσμα E του ηλεκτρικού του πεδίου (η συχνότητα ταλάντωσής του είναι της τάξης 10^{14}Hz), που θα προβάλλεται σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης, για την απλοποίηση των αναπαραστάσεων.

Έστω S_1 και S_2 δύο χωρικά και χρονικά σύμφωνες (πανομοιότυπες) πηγές μονοχρωματικών κυμάτων μήκους κύματος λ , που απέχουν απόσταση μεταξύ τους και εκπέμπουν φως σφαιρικά γύρω τους. Έστω ένα σημείο στο χώρο όπου βρίσκονται, στο οποίο συναντώνται δύο μέτωπα κύματος, ένα από την κάθε πηγή, και που έχουν ακολουθήσει διαφορετικό μήκος δρόμου το καθένα.

Στην περίπτωση στην οποία το ηλεκτρικό πεδίο και των δύο κυμάτων στο σημείο συνάντησης έχει ίδια φάση, το αποτέλεσμα της επαλληλίας των δύο κυμάτων θα δώσει ένα νέο κύμα μεγαλύτερου πλάτους, και λέμε ότι έχουμε ενισχυτική συμβολή. Τότε ότι η διαφορά δρόμων $r_2 - r_1$ των δύο κυμάτων είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ της φωτεινής ακτινοβολίας (βλέπε σχήμα 9.3.α.)

Σε ένα άλλο σημείο όπου το φως από τα δύο κύματα είναι εκτός χωρικής φάσης, θα έχουμε ανααιρετική συμβολή, αν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου του ενός είναι σε αντίθετη φάση από εκείνη του άλλου. Τότε η διαφορά δρόμων των δύο κυμάτων ($r_2 - r_1$) είναι ημιακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος (βλέπε σχήμα 9.3.β.)



Σχήμα 9.3 – (α) Ενισχυτική συμβολή έχουμε σε ένα σημείο, όταν τα κύματα που συναντώνται είναι σε χωρική φάση (το αποτέλεσμα της συμβολής δίνει πλάτος νέου κύματος μέγιστο μόνο όταν τα συμβαλλόμενα κύματα έχουν μέγιστο πλάτος). Για την διαφορά των δρόμων ισχύει $r_2 - r_1 = m\lambda$, όπου $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ (β) Ανααιρετική συμβολή έχουμε, όταν τα κύματα που συναντώνται βρίσκονται εκτός φάσης κατά μισό μήκος κύματος (το αποτέλεσμα της συμβολής δίνει πλάτος νέου κύματος μηδέν). Για τη διαφορά των δρόμων ισχύει $r_2 - r_1 = (m + 1/2)\lambda$, όπου $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

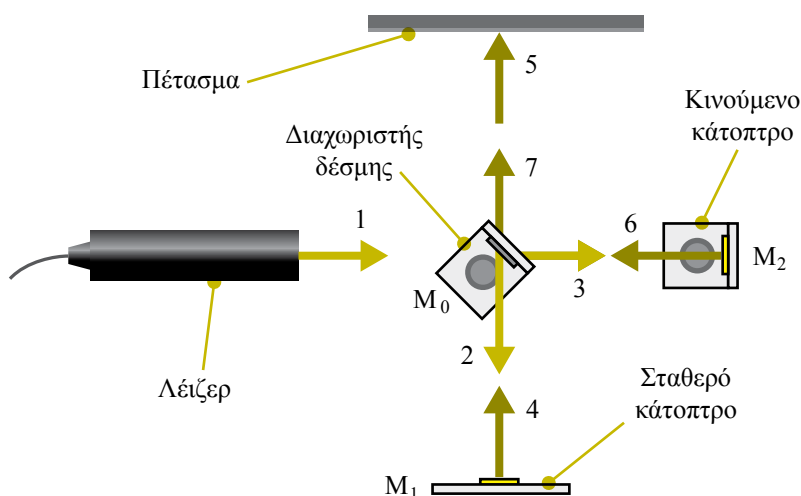
9.3.2.3 Συμβολόμετρο Michelson

Τα συμβολόμετρα είναι όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μεγεθών όπως: μήκος, όγκος, τραχύτητα, επιπεδότητα, κ.α. Βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην κατασκευή και

επιθεώρηση αντικειμένων που η ακρίβεια κατασκευής τους είναι κλάσμα του μήκους κύματος του ορατού φωτός, π.χ. σφαίρες, ημιαγωγοί, φάρμακα, τρόφιμα, πτερύγια στροβίλων, ξεκαστίρες καυσίμων, μονάδες αποθήκευσης σκληρών δίσκων, κ.α.

Το συμβολόμετρο Michelson έγινε ένα ευρέως διαδεδομένο όργανο για μετρήσεις μηκών κύματος ή αντίστροφα, γνωρίζοντας το μήκος κύματος μιας γνωστής φωτεινής πηγής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις εξαιρετικά μικρών αποστάσεων, π.χ. τάξης 10^{-6} m. Στο σχήμα 9.4 φαίνεται το διάγραμμα ενός συμβολόμετρου Michelson. Το συμβολόμετρο Michelson αποτελείται από μια πηγή φωτός λείζερ, έναν διαχωριστή δέσμης M_0 , δυο ανακλαστήρες (κάτοπτρα), το M_1 , το οποίο είναι σταθερό και το M_2 , το οποίο μπορεί να μετακινηθεί κατά τη διεύθυνση της πορείας της φωτεινής δέσμης, και ένα πέτασμα παρατήρησης Π, στο οποίο γίνεται παρατήρηση των φαινομένων της συμβολής. Στο σημείο πρόσπτωσης στο πέτασμα οι ακτίνες συμβάλλουν. Το αποτέλεσμα της συμβολής τους εξαρτάται από τη μεταξύ τους διαφορά φάσης. Η φάση της δεύτερης ακτίνας μπορεί να μεταβληθεί αλλάζοντας τον οπτικό δρόμο που έχει να διανύσει είτε μετατοπίζοντας το κινητό κάτοπτρο κατά μήκος της ακτίνας, είτε παρεμβάλλοντας ένα διαφανές υλικό (οπτικό μέσο) στην πορεία της, ώστε να προκληθεί χρονική καθυστέρηση, λόγω του φαινομένου της διάθλασης. Για να είναι δυνατή η παρατήρηση των μεταβολών της έντασης των αποτελεσμάτων της συμβολής των ακτίνων στο πέτασμα, τοποθετείται ανάμεσα στην πηγή λείζερ και στο διαχωριστή δέσμης M_0 συγκλίνων φακός, ώστε η δέσμη να μετατραπεί σε αποκλίνουσα (κωνική). Έτσι στο πέτασμα συμβάλλουν δύο σύμφωνες κωνικές δέσμες με αποτέλεσμα οι κροσσοί συμβολής (interference fringes) να έχουν κυλινδρική συμμετρία γύρω από τον αρχικό άξονα. Στο πέτασμα η συμβολή εμφανίζεται ως ομόκεντροι φωτεινοί και σκοτεινοί δακτύλιοι.

Ο διαχωριστής δέσμης M_0 είναι ένα ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο, που σχηματίζει γωνία 45° σε σχέση με την προσπίπτουσα δέσμη και ανακλά το 50% της δέσμης, αφήνοντας το υπόλοιπο 50% να διέρχεται μέσα από αυτό.



Σχήμα 9.4 – Αρχή λειτουργίας του συμβολόμετρου Michelson. Ο διαχωριστής δέσμης χωρίζει το κύμα (1) στα (2) και (3). Το κύμα (4) είναι η ανάκλαση του κύματος (2) από το σταθερό κάτοπτρο. Το κύμα (6) είναι η ανάκλαση του κύματος (3) από το κινητό κάτοπτρο. Τα κύματα (5) και (7) είναι μέρος των κυμάτων (4) και (6), αφού διέρχονται από το διαχωριστή δέσμης, μετά την ανάκλασή τους στα κάτοπτρα και συμβάλλουν.

Οι δύο σύμφωνες δέσμες φωτός δημιουργούνται από ένα διαχωριστή δέσμης, το ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο M_0 . Ο δρόμος, που ακολουθεί το κάθε ένα από τα δύο μέτωπα κύματος, των αρχικά σύμφωνων πηγών, είναι διαφορετικός. Το ένα ακολουθεί την πορεία στην οποία βρίσκεται το σταθερό κάτοπτρο, και το άλλο συναντά το κινητό κάτοπτρο. Η διαφορά οπτικού δρόμου που ακολουθούν μπορεί να ρυθμιστεί, μετακινώντας το κινητό κάτοπτρο. Στο πέτασμα παρατηρείται η συμβολή δύο μετώπων κύματος, που βρίσκονται σε διαφορετική χωρική φάση (phase angle), βλέπε σχήμα 9.4.

Στο πέτασμα εμφανίζονται κυκλικοί κροσσοί συμβολής (δακτύλιοι), όπως στο σχήμα 9.5, στους οποίους οι φωτεινές περιοχές (μέγιστα φωτεινής έντασης) παρατηρούνται σε ορισμέ-

νες θέσεις. Η διαφορά χωρικής φάσης τους, όταν αυτά συναντηθούν σε οποιαδήποτε σημείο του πετάσματος, εξαρτάται από τη διαφορά των οπτικών δρόμων που ακολουθούν τα δύο κύματα, μέχρι να φτάσουν σε αυτό το σημείο. Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο οπτικός δρόμος αλλάζει είτε μετατοπίζοντας το κινητό κάτοπτρο κατά μήκος της ευθείας διάδοσης της φωτεινής ακτίνας είτε παρεμβάλλοντας ένα διαφανές υλικό (οπτικό μέσο) στην πορεία της, ώστε να προκληθεί χρονική καθυστέρηση εξαιτίας του φαινομένου της διάθλασης.



Σχήμα 9.5 – Σχηματική αναπαράσταση κροσσών συμβολής.

Στην περίπτωση που τα συμβαλλόμενα μέτωπα κύματος έχουν διαφορά φάσης 0° ή ακέραιο πολλαπλάσιο των 360° , τότε στο σημείο παρατήρησης του πετάσματος θα παρατηρηθεί έντονο φως (μέγιστο συμβολής).

Αν, στην συνέχεια, το κινητό κάτοπτρο M_2 μετακινηθεί κατά απόσταση μήκους $\lambda/4$, τότε, επειδή το κύμα διανύει δυο φορές αυτή την απόσταση (απόσταση μεταξύ των M_0 και M_2), η συνολική μεταβολή του δρόμου του είναι $2(\lambda/4) = \lambda/2$. Επομένως η χωρική φάση του ενός κύματος ως προς το άλλο θα μεταβληθεί κατά 180° , οπότε στο ίδιο σημείο του πετάσματος θα παρατηρηθεί σκοτάδι (ελάχιστο συμβολής).

Αν το κάτοπτρο M_2 μετακινηθεί εκ νέου κατά μήκος $\lambda/4$, τότε στο ίδιο σημείο θα παρατηρηθεί εκ νέου φως (μέγιστο συμβολής).

Αν μετακινούμε με συνεχή τρόπο το κινητό κάτοπτρο M_2 , στο σημείο συμβολής πάνω στο πέτασμα εμφανίζονται διαδοχικά φωτεινές και σκοτεινές περιοχές (μέγιστα και ελάχιστα συμβολής) και μας δημιουργείται η ψευδαίσθηση ότι ολισθαίνουν κατά μήκος της ακτίνας ενός κύκλου.

9.3.2.4 Υπολογισμός του μήκους κύματος του λέιζερ

Μετακινώντας το κάτοπτρο M_2 αργά κατά διάστημα d_m και μετρώντας τον αριθμό m των φωτεινών δακτυλίων που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο της εικόνας συμβολής πάνω στο πέτασμα, μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος λ της οπτικής ακτινοβολίας με τη βοήθεια της σχέσης:

$$\lambda = \frac{2d_m}{m} \quad (9.1)$$

Αντίστροφα, αν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι γνωστό με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης είναι δυνατόν να μετρήσουμε πάρα πολύ μικρές αποστάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στις μετατοπίσεις του κινητού κατόπτρου M_2 .

9.3.2.5 Λειτουργία μικρομετρικού μηχανισμού μέτρησης μετακίνησης κινητού κατόπτρου στο συμβολόμετρο Michelson

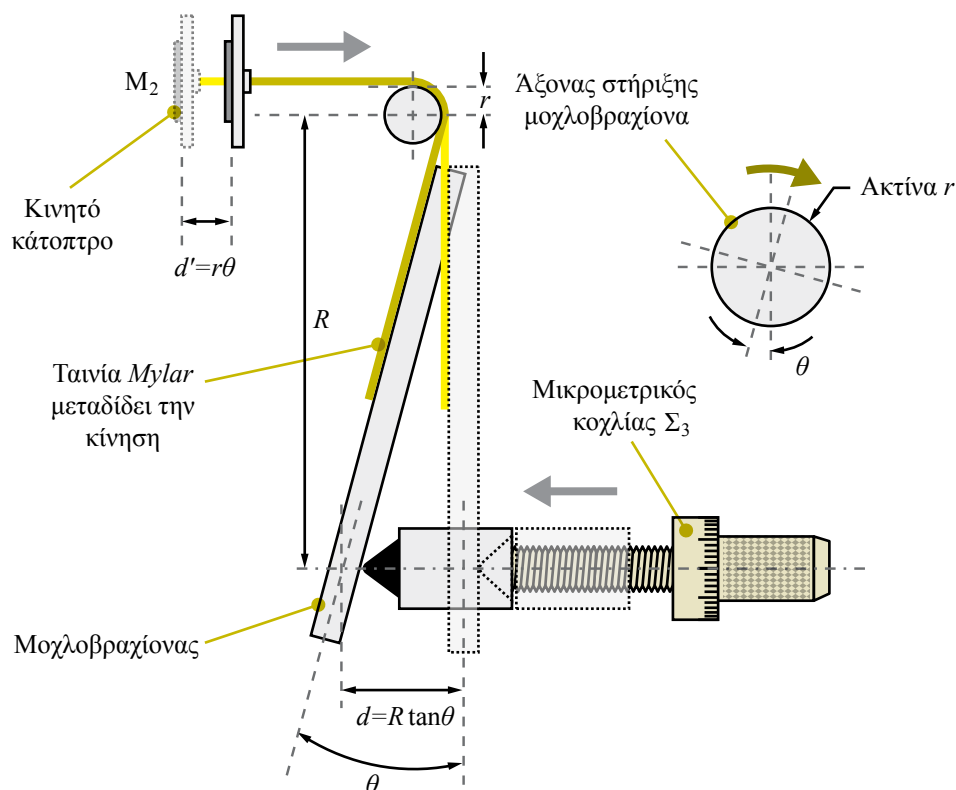
Η βάση στήριξης του κινητού κατόπτρου M_2 είναι κατασκευασμένη, έτσι ώστε να επιτρέπεται μόνο η μετατόπιση του κατά ένα άξονα. Τη συσκευή λέιζερ την ευθυγραμμίζουμε, έτσι ώστε φως λέιζερ να προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του κινητού κατόπτρου M_2 .

Πάνω στη διάταξη Michelson υπάρχει ένας μικρομετρικός μηχανισμός (σχήμα 9.6) που ελέγχει και μετρά τη μετακίνηση του κατόπτρου M_2 . Μια λεπτή και σκληρή ταινία (Mylar strip) συνδέει τη βάση στήριξης του M_2 με έναν μοχλοβραχίονα, όπου η ακτίνα του άξονα στήριξης είναι r και έχει μήκος R .

Η μετακίνηση του μοχλοβραχίονα ελέγχεται μέσω σειράς συνδέσμων με έναν μικρομετρικό κοχλία. Όταν ο μικρομετρικός κοχλίας περιστρέφεται, μετατοπίζει το μοχλοβραχίονα κατά

d και αλλάζει τη γωνία του κατά θ . Η σχέση που συνδέει το d με την αντίστοιχη γωνία θ είναι: $d=R\tan\theta$. Επειδή η αλλαγή της γωνίας θ είναι μικρή, ισχύει: $R\tan\theta=R\theta$ και η σχέση που προκύπτει είναι $d'=R\theta$. Η αλλαγή της γωνίας του μοχλοβραχίονα μεταφέρεται μέσω της ταινίας (Mylar strip) γύρω από τον άξονα στήριξης ακτίνας r του μοχλοβραχίονα κατά την ποσότητα $r\theta$. Με αυτό τον τρόπο μια μεγάλη μετατόπιση $d=R\theta$ μετασχηματίζεται σε μια πολύ μικρότερη μετατόπιση του κατόπτρου M_2 , ίση με $d'=r\theta$.

Ο συντελεστής κλιμάκωσης της σμίκρυνσης της απόστασης εξαρτάται από την επιλογή (εκ κατασκευής) των τιμών των r και R . Στην πειραματική διάταξη η κατάλληλη επιλογή τους κάνει, ώστε να ελέγχεται η κίνηση του κατόπτρου M_2 μέσω του μικρομετρικού κοχλίας με ακρίβεια μm ($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$).



Σχήμα 9.6 – Μηχανισμός μετακίνησης κινητού κατόπτρου M_2 στο συμβολόμετρο Michelson.

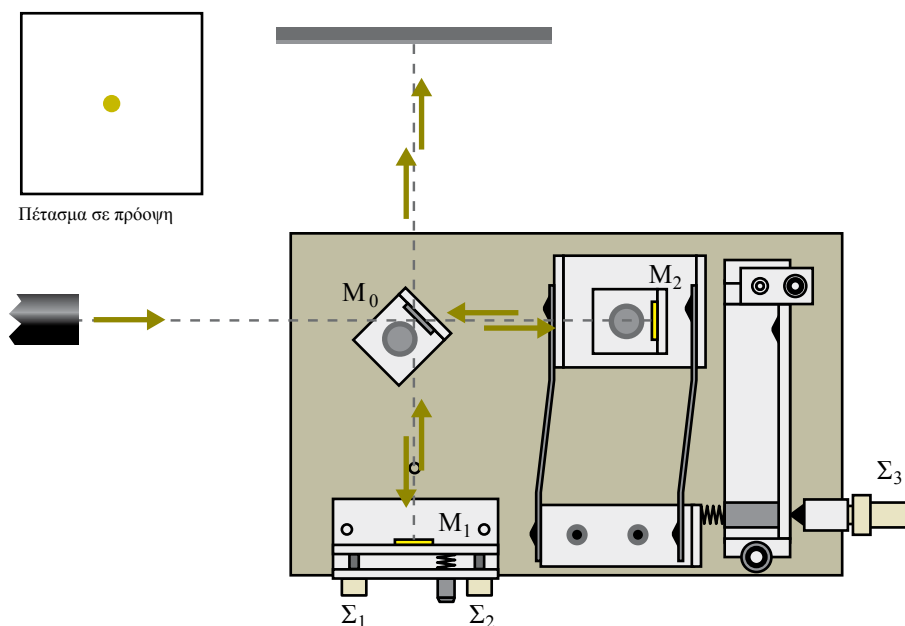
9.3.2.6 Ευθυγράμμιση (ρύθμιση) του συμβολόμετρου του πειράματος

1. Ελευθερώστε τη βίδα η οποία στηρίζει το ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο (διαχωριστή δέσμης) M_0 και περιστρέψτε το, έτσι ώστε να είναι έξω από την πορεία της δέσμης λέιζερ, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.7.

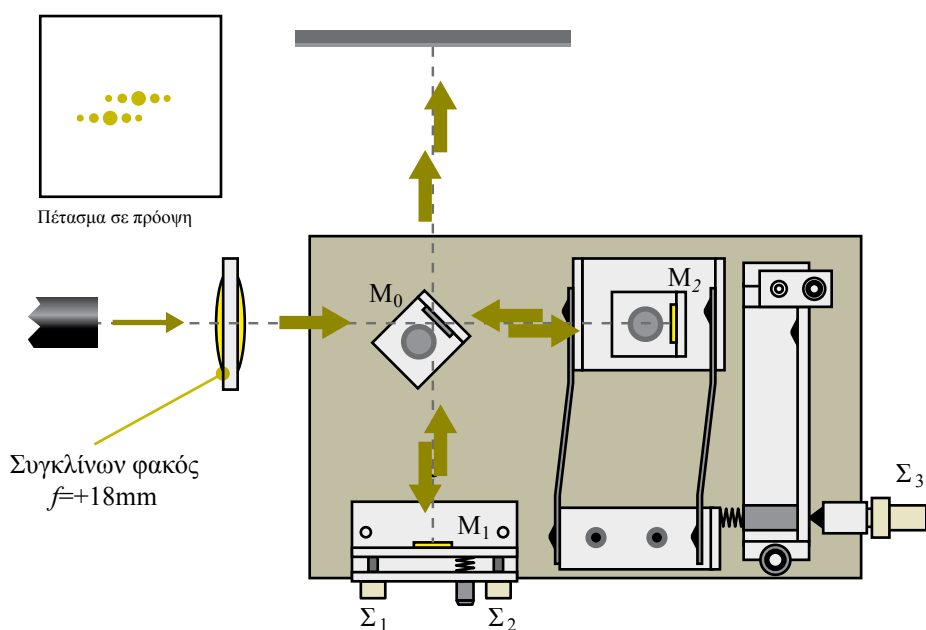
Κατόπιν, ελευθερώστε τη βίδα που στηρίζει το κινούμενο κάτοπτρο M_2 . Ρυθμίστε, στρέφοντας το M_2 , έτσι ώστε η δέσμη λέιζερ, αφού ανακλαστεί, να επιστρέφει ακριβώς από τον ίδιο δρόμο πίσω στο διάφραγμα του λέιζερ. Η ανακλώμενη δέσμη δεν χρειάζεται να είναι στο ίδιο ύψος με την προσπίπτουσα δέσμη, αλλά θα πρέπει να προσπίπτει εκ νέου στο διάφραγμα του λέιζερ (έξοδος δέσμης). Κρατήστε το M_2 στη θέση αυτή και σφίξτε τη βίδα.

2. Περιστρέψτε το ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο M_0 , έτσι ώστε η επιφάνεια του να σχηματίζει γωνία 45° με την προσπίπτουσα από το λέιζερ δέσμη (βλέπε σχήμα 9.8). Θα δείτε δύο ομάδες από φωτεινές κηλίδες πάνω στο πέτασμα, οι οποίες αντιστοιχούν στους δύο διαφορετικούς δρόμους που ακολουθεί η ακτίνα, μέχρι να φτάσει στο πέτασμα.

Κάθε πορεία της δέσμης λέιζερ έχει σαν αποτέλεσμα περισσότερες από μία φωτεινές κηλίδες, λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων της δέσμης, όταν αυτή διέρχεται δια μέσου του ημιεπαργυρωμένου κατόπτρου. Ρυθμίστε το κάτοπτρο M_0 , στρέφοντας το, έτσι ώστε οι δύο ομάδες των φωτεινών κηλίδων του λέιζερ να πλησιάσουν, όσο γίνεται περισσότερο, και σφίξτε τη βίδα, έτσι ώστε να ασφαλίσει το ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο M_0 .



Σχήμα 9.7 – Πρώτο στάδιο ρύθμισης ευθυγράμμισης της διάταξης του συμβολόμετρου με τη δέσμη του λέιζερ.

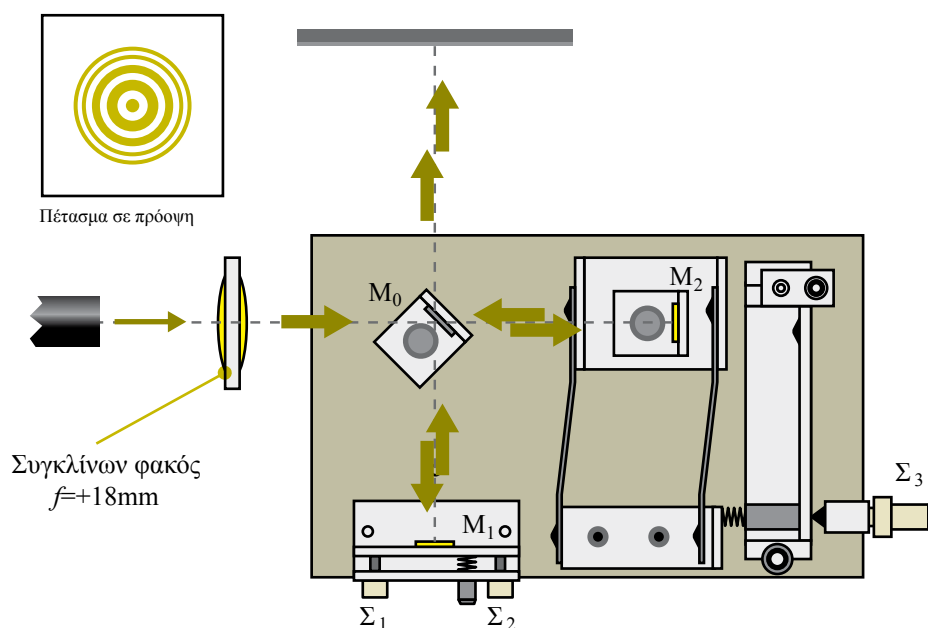


Σχήμα 9.8 – Δεύτερο στάδιο ρύθμισης ευθυγράμμισης της διάταξης του συμβολόμετρου με τη δέσμη του λέιζερ.

3. Χρησιμοποιώντας τους κοχλίες Σ_1 και Σ_2 , ρυθμίστε τη γωνία του κατόπτρου M_1 , έτσι ώστε οι δύο ομάδες των φωτεινών κηλίδων να επικαλυφθούν πάνω στο πέτασμα (βλέπε σχήμα 9.8).
4. Τοποθετήστε το συγκλίνοντα φακό με εστιακή απόσταση 18mm στη πορεία της δέσμης, ανάμεσα στο λέιζερ και το κάτοπτρο M_0 , όπως φαίνεται στο σχήμα 9.9.

Ρυθμίστε τη θέση του φακού έτσι ώστε η δέσμη του φωτός από το λέιζερ να προσπίπτει στο κέντρο του ημιεπαγυρωμένου κατόπτρου M_0 . Αν έχει γίνει σωστά η ρύθμιση, θα δείτε ομόκεντρους κυκλικούς κροσσούς συμβολής πάνω στο πέτασμα. Διαφορετικά το κέντρο των κυκλικών κροσσών δε θα είναι ορατό πάνω στο πέτασμα.

Ρυθμίστε με προσεκτικό τρόπο και αργό ρυθμό τους κοχλίες Σ_1 και Σ_2 , ώστε να δείτε το κέντρο των κυκλικών κροσσών.



Σχήμα 9.9 – Τέταρτο στάδιο ρύθμισης θέσης του διαχωριστή δέσμης της διάταξης του συμβολόμετρου.

9.3.3 Εκτέλεση

Το συμβολόμετρο Michelson μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για τη μέτρηση πολύ μικρών μετατοπίσεων και, έμμεσα, να οδηγήσει στη μέτρηση του μήκους κύματος μιας φωτεινής πηγής.

Στην παρούσα πειραματική άσκηση θα υπολογισθεί το μήκος κύματος μιας πηγής λέιζερ. Πριν ξεκινήσετε το πείραμά σας, κάντε αναγνώριση της πειραματικής σας διάταξης, ακολουθώντας προσεκτικά τα παρακάτω βήματα:

- Βήμα 1: Εντοπίστε ένα προς ένα πάνω στην πειραματική σας διάταξη του Συμβολόμετρου Michelson τα εξαρτήματα που δείχνει το σχήμα 9.9.
- Βήμα 2: Ελέγξτε τη σωστή ευθυγράμμιση της διάταξης του συμβολόμετρου Michelson (θέση του διαχωριστή δέσμης, και των κατόπτρων M_1 και M_2 , όπου M_1 σταθερό και M_2 κινητό) πριν τοποθετήσετε το φακό μεταξύ λέιζερ και διάταξης. Ο φακός που ανοίγει τη δέσμη, δηλαδή της δίνει κωνική μορφή, τοποθετείται τελευταίος, μετά τα στάδια ρύθμισης της διάταξης).
- Βήμα 3: Τοποθετήστε το φακό που ανοίγει τη δέσμη λέιζερ μεταξύ της συσκευής λέιζερ και του διαχωριστή της φωτεινής δέσμης στη διάταξη του συμβολόμετρου Michelson.

Κατόπιν προχωρήστε στην εκτέλεση του πειράματος.

1. Ελέγξτε αν οι κυκλικοί κροσσοί συμβολής εμφανίζονται ευκρινώς πάνω στο πέτασμα. Αν δεν εμφανίζονται, σημαίνει ότι χρειάζεται ρύθμιση της διάταξης.
2. Ρυθμίστε την ένδειξη του μικρομετρικού κοχλίου, ώστε να βρίσκεται σε ένα ακέραιο νούμερο, βολικό για τις μετρήσεις σας. Αρχίστε να στρέφετε το μικρομετρικό κοχλίο αργά δεξιόστροφα, μετρώντας τον αριθμό των κροσσών που περνάνε από το σημείο αναφοράς σας. Σταματήστε την καταμέτρηση, όταν έχουν μετρηθεί τουλάχιστον 20 κροσσοί.
3. Διαβάστε τη νέα ένδειξη στον μικρομετρικό κοχλίο και καταγράψτε την απόσταση d_m στην οποία μετακινήθηκε το κινητό κάτοπτρο προς το μέρος του ημιεπαγυρωμένου κατόπτρου M_0 , καθώς περιστρέφατε το μικρομετρικό κοχλίο.
4. Επαναλάβετε τη διαδικασία (βήματα 2, 3) δύο ακόμη φορές.
5. Επαναλάβετε την ίδια διαδικασία (βήματα 2, 3, 4), για δύο ακόμη διαφορετικούς αριθμούς κροσσών, π.χ. $m=30$ και $m=40$ κροσσούς. Καταγράψτε τα αποτελέσματά σας σε ένα πίνακα, όπως ο πίνακας 9.1.

Αριθμός κροσσών που πέρασαν από το σημείο αναφοράς	Μήκος μετακίνησης κινητού κατόπτρου (μm)		
	1 ^η μέτρηση	2 ^η μέτρηση	3 ^η μέτρηση
...	...	...	...

Πίνακας 9.1 – Καταγραφή μετρήσεων κροσσών.

9.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Υπολογίστε τη μέση τιμή της μετακίνησης d_m για κάθε μια περίπτωση αριθμού κροσσών.
2. Από τη σχέση (9.1), για κάθε ζευγάρι τιμών, υπολογίστε το μήκος κύματος λ_m του φωτός λέιζερ της πηγής που χρησιμοποιήσατε.
3. Βρείτε τη μέση τιμή του μήκους κύματος του λέιζερ.
4. Υπολογίστε την επί της εκατό απόκλιση της τιμής που βρήκατε από την πραγματική τιμή του μήκους κύματος της πηγής του λέιζερ της άσκησης, το οποίο σας δίνεται: $\lambda=632,8\text{nm}$.

9.4 Πείραμα 2

9.4.1 Σκοπός

Υπολογισμός του δείκτη διάθλασης του αέρα.

9.4.2 Θεωρία

9.4.2.1 Υπολογισμός του δείκτη διάθλασης του αέρα με χρήση του συμβολόμετρου Michelson

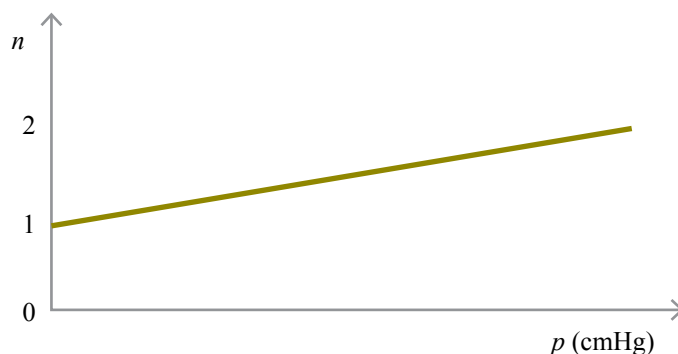
Γνωρίζουμε από την οπτική ότι, όταν το φως διαδίδεται από ένα μέσο σε ένα άλλο, τότε αλλάζει το μήκος κύματος του και η ταχύτητά του, ενώ η συχνότητά του παραμένει ίδια. Για διάδοση από το κενό σε ένα άλλο υλικό, ισχύει η σχέση:

$$n = \frac{c_o}{c} = \frac{\lambda_o}{\lambda} \quad (9.2)$$

όπου λ_o είναι το μήκος κύματος του φωτός στο κενό, και n ο δείκτης διάθλασης του υλικού μέσα στο οποίο το φως διαδίδεται.

Στο πείραμα αυτό θα χρησιμοποιηθεί το συμβολόμετρο Michelson για τη μέτρηση του δείκτη διάθλασης του αέρα. Για μικρές πιέσεις, ο δείκτης διάθλασης ενός αερίου μεταβάλλεται γραμμικά με τη πίεση. Για το κενό, όπου η πίεση είναι μηδέν, ο δείκτης διάθλασης είναι 1.

Η γραφική παράσταση του δείκτη διάθλασης σε συνάρτηση με την πίεση του αέρα φαίνεται στο σχήμα 9.10.



Σχήμα 9.10 – Παράδειγμα γραφικής παράστασης του δείκτη διάθλασης n ως συνάρτηση της πίεσης του αέρα.

Οι μετρήσεις, που θα κάνετε σε αυτήν την άσκηση, σας επιτρέπουν να υπολογίσετε την κλίση της ευθείας ενός τέτοιου διαγράμματος για τον αέρα. Από το διάγραμμα αυτό είναι δυνατόν να εξαχθούν οι τιμές του δείκτη διάθλασης του αέρα σε διάφορες πιέσεις.

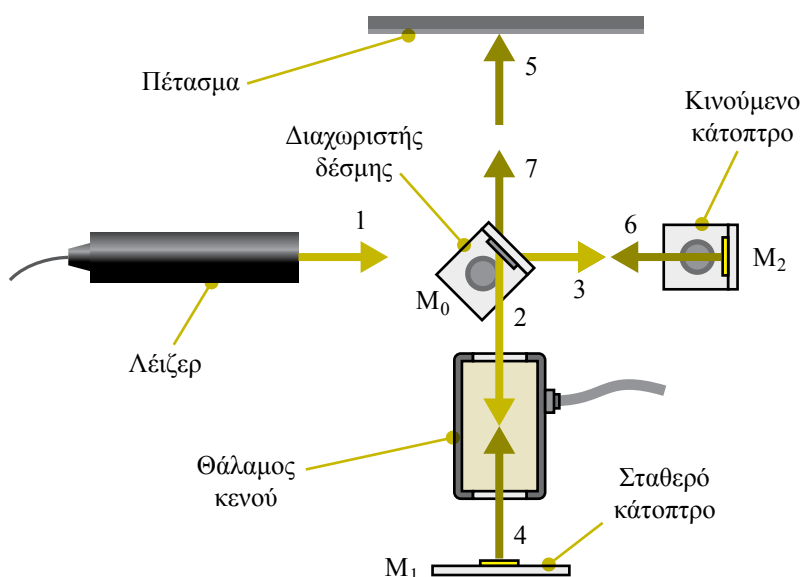
Όπως ήδη αναφέρθηκε στην περιγραφή της διάταξης του Michelson, ο διαχωριστής δέσμης παράγει δύο χωρικά και χρονικά σύμφωνες δέσμες φωτός. Ένας τρόπος, για να μεταβληθεί ο οπτικός δρόμος στη μια από τις δύο δέσμες, είναι να παρεμβάλλουμε στο δρόμο της ένα οπτικό μέσο με διαφορετικό δείκτη διάθλασης, διατηρώντας σταθερές τις θέσεις των δύο κατόπτρων.

Τοποθετώντας στην κατάλληλη θέση της διάταξης θάλαμο (κυψελίδα) αέρα με διαφορετική πίεση από την ατμοσφαιρική (με μια αντλία αντλούμε το περιεχόμενο στο δοχείο αέρα), όπως φαίνεται στο σχήμα 9.11, αναγκάζουμε τη δέσμη λέιζερ να διέρχεται δύο φορές μέσα από αυτόν το θάλαμο κενού.

Έξω από το θάλαμο κενού τα μήκη των οπτικών δρόμων των δύο συμβαλλομένων ακτίνων δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια του πειράματος αυτού. Μέσα στο θάλαμο το μήκος κύματος του φωτός αυξάνει καθώς, αντλώντας προς τα έξω αέρα, η πίεση ελαττώνεται (λιγότερος αέρας). Το μήκος του θαλάμου κενού αέρα είναι πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ της φωτεινής δέσμης, έστω $1000,3\lambda$.

Αφαιρώντας αέρα, ο δείκτης διάθλασης μειώνεται (τείνει προς το 1), οπότε αυξάνεται η ταχύτητα και το μήκος κύματος του φωτός, ενώ η συχνότητά του παραμένει σταθερή. Αν η πίεση αλλάξει τόσο, ώστε ο θάλαμος περιέχει λιγότερα μήκη κύματος, π.χ. $999,8\lambda$ (δηλαδή διαφορά $0,5\lambda$), τότε το φως, περνώντας δύο φορές από την κυψελίδα, θα κάνει μία λιγότερη ταλάντωση συνολικά.

Το αποτέλεσμα της αλλαγής του οπτικού δρόμου θα είναι ισοδύναμο με μετατόπιση του γεωμετρικού δρόμου του κινητού κατόπτρου του συμβολόμετρου κατά $\lambda/2$, δηλαδή, σύμφωνα με το Πείραμα 1, ισοδυναμεί με τη διαδοχή ενός κροσσού συμβολής πάνω στο πέτασμα. Ένας φωτεινός (ή σκοτεινός) δακτύλιος θα έχει περάσει από το σημείο αναφοράς πάνω στο πέτασμα.



Σχήμα 9.11 – Ο οπτικός δρόμος αλλάζει με την τοποθέτηση θαλάμου κενού αέρα.

Όταν ο θάλαμος έχει μια αρχική πίεση P_i και το αντίστοιχο μήκος κύματος έχει τιμή λ_i , τότε χωράνε $m_i = 2L/\lambda_i$ μήκη κύματος μέσα στον θάλαμο (για τις δύο διαδρομές του φωτός μέσα από το θάλαμο). Σε διαφορετική πίεση P_f που αντιστοιχεί μήκος κύματος λ_f θα χωράνε $m_f = 2L/\lambda_f$ μήκη κύματος στο γεωμετρικό μήκος του θαλάμου. Η διαφορά $\Delta m = m_f - m_i$ είναι η μεταβολή του αριθμού των μηκών κύματος, δηλαδή ο αριθμός των κροσσών που μετακινούνται κατά τη μεταβολή της πίεσης από P_i σε P_f . Λαμβάνοντας υπόψη για τις τιμές

του δείκτη διάθλασης n_i και n_f ότι ισχύει η σχέση (9.2) όπου λ_0 το μήκος κύματος στο κενό μπορεί ναδειχθεί ότι:

$$n_i - n_f = \frac{\Delta m \lambda_0}{2L} \quad (9.3)$$

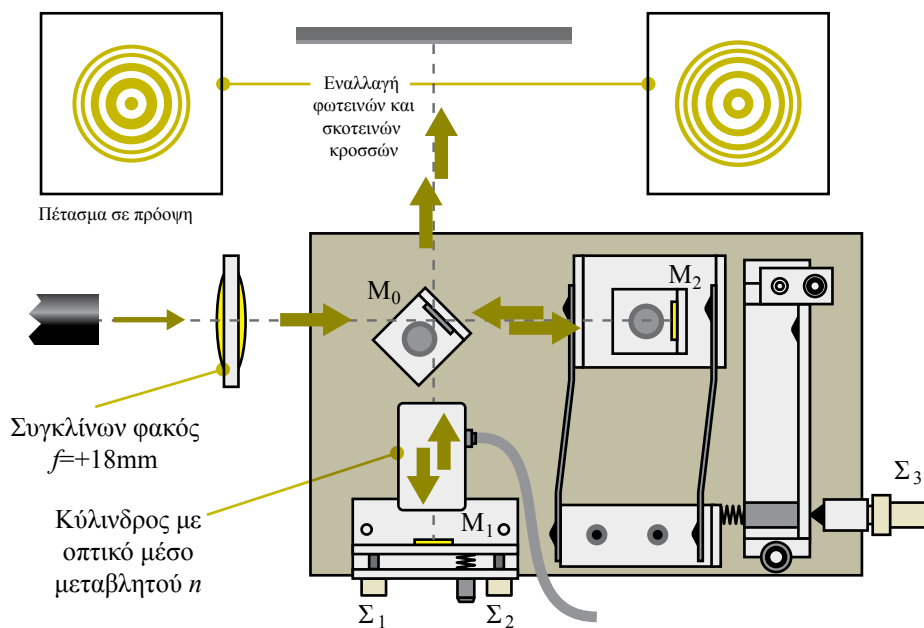
Η κλίση του διαγράμματος του n ως συνάρτηση της πίεσης p υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k = \frac{n_i - n_f}{p_i - p_f} = \frac{\Delta m \lambda_0}{p_i - p_f} \quad (9.4)$$

όπου p_i =αρχική πίεση, p_f =τελική πίεση, n_i =δείκτης διάθλασης του αέρα σε πίεση p_i , n_f =δείκτης διάθλασης του αέρα σε πίεση p_f , Δm =το πλήθος των κυκλικών κροσσών που διέρχονται από το σημείο αναφοράς κατά τη διάρκεια της άντλησης, λ_0 = το μήκος κύματος του λέιζερ στο κενό (για το πείραμα δίνεται ίσο με 632,8nm), L = μήκος του θαλάμου κενού (για τη διάταξη του εργαστηρίου είναι 3,0cm).

9.4.2.2 Το συμβολόμετρο του πειράματος

Το συμβολόμετρο Michelson περιγράφεται στην αρχή της άσκησης. Στο σχήμα 9.12 δείχνεται η τοποθέτηση του κυλίνδρου κενού αέρα πάνω στη διάταξη για να αλλάξει ο οπτικός δρόμος της μιας από τις δύο συμβαλλόμενες δέσμες φωτός.



Σχήμα 9.12 – Σχηματικό διάγραμμα συμβολόμετρου Michelson με κύλινδρο κενού για την αλλαγή του οπτικού δρόμου.

9.4.3 Εκτέλεση

1. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 9.12. Για την τοποθέτηση του θαλάμου κενού αέρα στο συμβολόμετρο ζητήστε τη βοήθεια του εργαστηριακού διδάσκοντα του πειράματος. Τοποθετήστε το σύστημα που αποτελείται από το θάλαμο κενού, το σωλήνα του αέρα και την αντλία κενού, η οποία φέρει πάνω της πιεσόμετρο.
2. Ρυθμίστε τους κοχλίες Σ_1 και Σ_2 του κατόπτρου M_1 , έτσι ώστε η εικόνα των κυκλικών κροσσών να είναι ευκρινώς ορατή πάνω στο πέτασμα. Η εικόνα των κροσσών συμβολής θα είναι κάπως παραμορφωμένη λόγω των ανωμαλιών πάνω στις γυάλινες επιφάνειες του θαλάμου κενού. Για ακριβείς μετρήσεις, σημειώστε ότι οι διαφανείς βάσεις του θαλάμου κενού θα

πρέπει να είναι κάθετες στη δέσμη του λέιζερ. Περιστρέψτε το θάλαμο αργά και παρατηρήστε τα αποτελέσματά που προξενεί στην εικόνα των κυκλικών κροσσών πάνω στο πέτασμα.

3. Ρυθμίστε, ώστε ο αέρας μέσα στο θάλαμο κενού να βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Προσέξτε ότι ο διακόπτης που βρίσκεται πάνω στην αντλία κενού, κάτω από το πιεσόμετρο, πρέπει να είναι ανοικτός.

Μέτρηση της πίεσης με το πιεσόμετρο του Εργαστηρίου: Το πιεσόμετρο της άσκησης που θα χρησιμοποιήσετε μετράει πιέσεις σε συνάρτηση με την ατμοσφαιρική πίεση σε μονάδες cmHg. Όταν το πιεσόμετρο δείχνει π.χ. 34cmHg, αυτό σημαίνει ότι η πίεση είναι 34cmHg λιγότερη από την ατμοσφαιρική πίεση. Η απόλυτη πίεση πρέπει να υπολογίζεται με τη σχέση:

$$p_{\text{απολ}} = 76\text{cmHg} - p_{\text{πιεσ}} \quad (9.5)$$

όπου $p_{\text{πιεσ}}$ είναι η αναγραφόμενη τιμή στο πιεσόμετρο.

4. Η αρχική πίεση p_i που δείχνει το πιεσόμετρο είναι:

$$p_i = 76\text{cmHg} - p_{\text{πιεσ}} = 76\text{cmHg} - 0 = 76\text{cmHg} \quad (9.6)$$

5. Σημειώστε ένα σημείο, ανάμεσα σε δύο κροσσούς πάνω στο πέτασμα, το οποίο θα θεωρείται σαν σημείο αναφοράς. Αργά, αρχίστε να αντλείτε αέρα έξω από το θάλαμο και, κατά τη διάρκεια της άντλησης, μετρήστε, μέχρι να περάσουν τουλάχιστον 10 κροσσοί από το σημείο αναφοράς. Καταγράψτε σε πίνακα, όπως ο πίνακας 9.2, τον αριθμό των κροσσών Δm και την τελική πίεση p_f .

Αριθμός σκοτεινών κροσσών που πέρασαν από σημείο αναφοράς (Δm)	Τελική πίεση θαλάμου p_f (cmHg)
...	...

Πίνακας 9.2 – Καταγραφή αριθμού των κροσσών και τελικής πίεσης, με αρχική πίεση $p_i=76\text{cmHg}$.

Επαναλάβετε τη μέτρηση για τέσσερις ακόμα φορές, για διαφορετικό αριθμό κροσσών, π.χ. για $\Delta m=20$ και 25, ξεκινώντας κάθε μέτρηση από αρχική πίεση ίση με την ατμοσφαιρική πίεση $p_i=76\text{cmHg}$. Πριν από κάθε νέα μέτρηση, να γεμίζετε το θάλαμο με αέρα, πατώντας το διακόπτη.

9.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Από τη σχέση (9.4) υπολογίστε την κλίση του διαγράμματος του δείκτη διάθλασης ως συνάρτηση της πίεσης, για καθεμία από τις μετρήσεις του πίνακα 9.2.
2. Βρείτε τη μέση τιμή της κλίσης από τις διαφορετικές τιμές που υπολογίσατε καθώς και την τυπική απόκλιση της μέσης τιμής.
3. Γνωρίζοντας την κλίση και ότι σε μηδενική πίεση ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι 1, η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση δείκτη διάθλασης ως συνάρτηση της πίεσης είναι:

$$n = kp + 1 \quad (9.7)$$

Να σχηματίσετε τη γραφική παράσταση του n σε συνάρτηση με την πίεση p .

Από τη γραφική παράσταση ή από τη σχέση (9.7) βρείτε το δείκτη διάθλασης n_{atm} του αέρα σε πίεση $p_{\text{atm}}=1\text{atm}$ (ή 76cmHg).

Επειδή η κλίση της ευθείας είναι πολύ μικρή (για μεγάλες αλλαγές στην πίεση παρατηρούνται μικρές αλλαγές στο δείκτη διάθλασης), επιλέξτε κατάλληλη βαθμονόμηση του άξονα τιμών του n . Η κλίμακα του άξονα τιμών του δείκτη διάθλασης να είναι μεγαλύτερη από του άξονα τιμών της πίεσης, τουλάχιστον δεκαπλάσια. Με τον τρόπο αυτό θα γίνει εμφανής η μικρή αλλαγή του n μεταξύ μηδενικής και ατμοσφαιρικής πίεσης.

9.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία

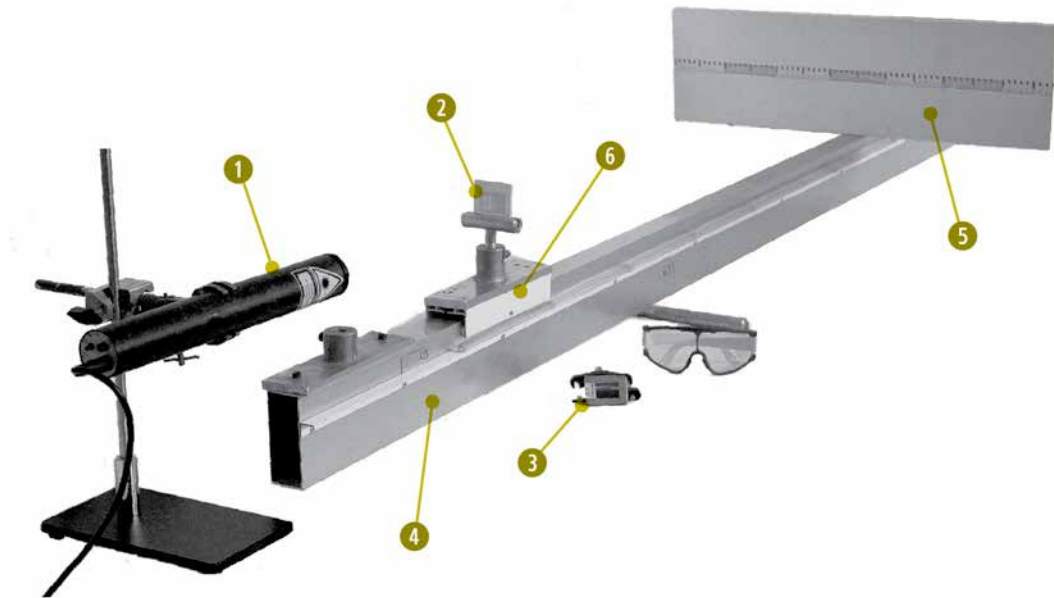
[1] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 37: Inference of Light Waves,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.

[2] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 465-487.

[3] Ν. Αφεντάκης, Σ. Μουσταϊζής, Ε. Σεργάκη, *ΛΕΙΖΕΡ – Αρχές Λειτουργίας και Εφαρμογές*, Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 2008.

ΑΣΚΗΣΗ 10

Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός



10.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Φωτεινή πηγή λέιζερ μήκους κύματος $632,8\text{nm}$.
2. Φράγμα πολλαπλών σχισμών (300 σχισμές/ mm).
3. Φράγμα με μονή σχισμή.
4. Οπτική τράπεζα.
5. Πέτασμα.
6. Κινητή βάση.

10.2 Απαραίτητες γνώσεις

Γεωμετρική και κυματική φύση του φωτός, φως λέιζερ, περίθλαση, περίθλαση Fresnel, περίθλαση Fraunhofer, φράγμα περίθλασης, φαινόμενο συμβολής, αρχή επαλληλίας (υπέρθεσης), αρχή Huygens.

10.3 Πείραμα

10.3.1 Σκοπός

- Παρατήρηση και κατανόηση των φαινομένων της συμβολής και της περίθλασης.
- Υπολογισμός του μήκους κύματος του φωτός λέιζερ, χρησιμοποιώντας γνωστό οπτικό φράγμα.
- Υπολογισμός του εύρους της σχισμής ενός οπτικού φράγματος, αν είναι γνωστό το μήκος κύματος του φωτός.
- Υπολογισμός του μέτρου της αβεβαιότητας της ορμής με τη βοήθεια του διαμορφώματος περίθλασης από μονή σχισμή.
- Επιβεβαίωση της αρχής απροσδιοριστίας του Heisenberg.

10.3.2 Θεωρία

10.3.2.1 *Το φως, εκτός από ιδιότητες κύματος παρουσιάζει και ιδιότητες σωματιδίου*

Ενώ αρχικά οι επιστήμονες απέδειξαν ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα, τα πειράματα της Φυσικής επέβαλαν αργότερα να δεχθούμε ότι το φως συμπεριφέρεται και ως «σωματίδιο». Η κυματική φύση του φωτός αποδείχτηκε πειραματικά από τον Thomas Young το 1802 και περιγράφηκε μαθηματικά από τον James Maxwell το 1864. Η σωματιδιακή φύση του φωτός προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Max Planck το 1900.

Σύμφωνα με την κυματική συμπεριφορά του φωτός, θεωρούμε ότι το φως αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο. Η ενέργεια του φωτός εξαρτάται από τη συχνότητα αυτών των πεδίων και υπολογίζεται από τη σχέση $E=h\nu$, όπου h είναι μια παγκόσμια σταθερά (σταθερά του Planck) και ν η συχνότητα των πεδίων. Δηλαδή, το φως έχει τόσο μεγαλύτερη ενέργεια όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητά του. Για παράδειγμα, παρατηρώντας την εικόνα του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, καταλαβαίνουμε γιατί το μπλε χρώμα έχει περισσότερη ενέργεια από το κόκκινο.

Σύμφωνα με τη σωματιδιακή φύση του φωτός δεχόμαστε ότι το φως έχει ορμή και μηδενική μάζα ηρεμίας, και ότι εκπέμπεται από τις φωτεινές πηγές, κατά αδιαίρετες μικρές ποσότητες ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα.

Το φως αποτελείται από φωτόνια και είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Τα φωτόνια χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος και τη συχνότητά τους. Το φως λέιζερ διαφέρει από το φως των άλλων γνωστών μέχρι σήμερα φωτεινών πηγών ως προς το ότι αποτελείται από εντελώς ταυτόσημα φωτόνια. Αυτή η ιδιότητα του προσδίδει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, όπως η κατευθυντικότητα του, η μονοχρωματικότητά του, η μεγαλύτερη ενέργειά του.

Φαινόμενα, όπως η συμβολή και η περίθλαση, μας υποχρεώνουν να δεχτούμε ότι το φως έχει και κυματικό χαρακτήρα.

Συμβολή (interference) είναι το φαινόμενο, κατά το οποίο, όταν διαφορετικές φωτεινές δέσμες που ταξιδεύουν (κύματα) συναντούνται, τότε δημιουργούν μια νέα φωτεινή κατανομή ως αποτέλεσμα της υπέρθεσής τους. Αν τοποθετήσουμε ένα πέτασμα στη θέση συνάντησης των δύο αυτών φωτεινών δεσμών, παρατηρούμε μια αλληλουχία από φωτεινές και σκοτεινές περιοχές.

Περίθλαση (diffraction) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν ένα σώμα φωτιστεί από τη μια πλευρά του, το φως διαδίδεται και στην πίσω από το σώμα σκοτεινή πλευρά του

Η διάκριση μεταξύ των φαινομένων συμβολής και περίθλασης είναι μερικές φορές ασαφής. Η περίθλαση είναι εύκολα παρατηρήσιμη για σώματα (ανοίγματα ή εμπόδια) με διαστάσεις περίπου της τάξης του μήκους κύματος του προσπίπτοντας φωτός. Παρόλα αυτά είναι πολλές φορές αντιληπτή ακόμα και για διαστάσεις ανοιγμάτων πολύ μεγαλύτερων του μήκους κύματος. Το φαινόμενο της περίθλασης μπορεί να χαρακτηριστεί ως **Περίθλαση Fresnel** ή ως **Περίθλαση Fraunhofer** ανάλογα με το αν το επίπεδο πάνω στο οποίο παρατηρείται το φαινόμενο είναι κοντά ή μακριά από το εμπόδιο που προκαλεί την περίθλαση.

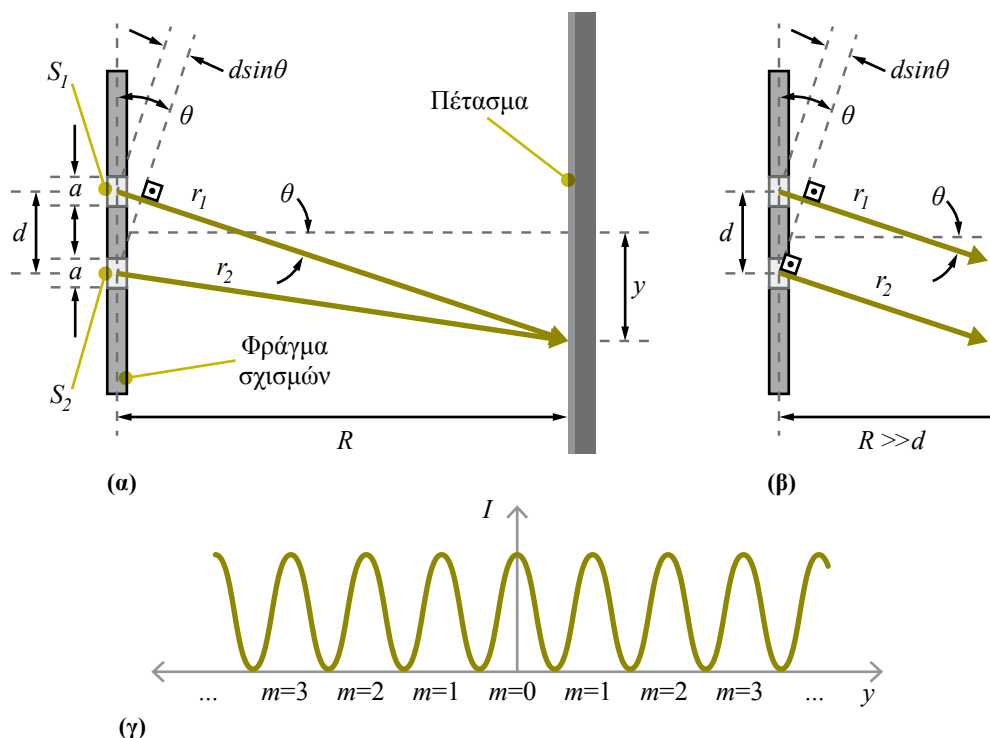
Περίθλαση Fresnel (περίθλαση κοντινού πεδίου) συμβαίνει, όταν το επίπεδο παρατήρησης (πέτασμα) ή η φωτεινή πηγή ή και τα δύο είναι πολύ κοντά στο άνοιγμα περίθλασης.

Περίθλαση Fraunhofer (περίθλαση μακρινού πεδίου) συμβαίνει, όταν το επίπεδο παρατήρησης (πέτασμα) και η φωτεινή πηγή που εκπέμπει με μήκος κύματος λ , είναι πολύ απομακρυσμένα από το άνοιγμα περίθλασης. Θεωρούμε τότε ότι όλα τα σημεία του πετάσματος ισαπέχουν από το σημείο παρατήρησης με ακρίβεια μεγαλύτερη της τιμής του ενός τετάρτου του μήκους κύματος $\lambda/4$.

Ο διαχωρισμός των δυο περιπτώσεων περίθλασης (Fresnel και Fraunhofer) δεν είναι πάντα εύκολος και, συνήθως, χρειάζεται λεπτομερειακή μελέτη και αιτιολόγηση.

10.3.2.2 Φαινόμενο συμβολής από δύο πηγές

Για τη συμβολή δύο φωτεινών δεσμών, προκειμένου αυτές να είναι ταυτόσημες, δηλαδή να είναι ίδιες σε όλα τους τα χαρακτηριστικά, θεωρούμε ότι προέρχονται από την ίδια φωτεινή πηγή και ότι δημιουργούνται με την παρεμβολή ενός φράγματος δύο σχισμών. Οι σχισμές αυτές απέχουν μεταξύ τους απόσταση d (σχήμα 10.1.α) Επίσης οι σχισμές θεωρούνται μικρού εύρους a όταν η τάξη μεγέθους του a είναι συγκρίσιμη με εκείνη του μήκους κύματος της φωτεινής πηγής.



Σχήμα 10.1 – Συμβολή κυμάτων φωτός της ίδιας φωτεινής πηγής που διέρχονται μέσω δύο σχισμών (ισοδύναμο με συμβολή δύο σύμφωνων σημειακών φωτεινών πηγών). (α) Γεωμετρική ανάλυση, (β) γεωμετρική ανάλυση αν $R \gg d$, (γ) κατανομή της έντασης των φωτεινών κροσσών κατά το φαινόμενο συμβολής των δύο σημειακών φωτεινών πηγών. Στην περίπτωση των δύο σχισμών, μεταξύ δύο γειτονικών κύριων μεγίστων, εμφανίζεται ένα ελάχιστο και όλα τα μέγιστα έχουν ίδια φωτεινή ένταση.

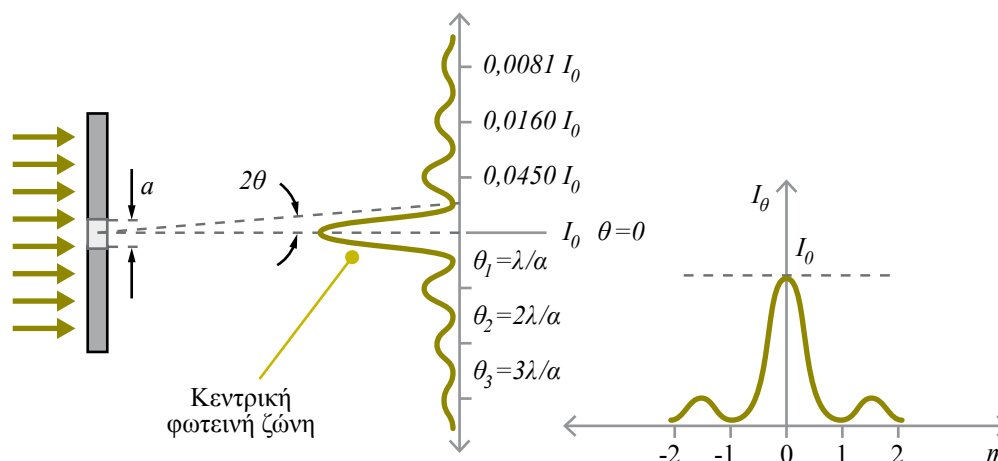
Για να παρατηρηθεί ενισχυτική συμβολή δύο σημειακών φωτεινών πηγών σε κάποιο σημείο πάνω στο πέτασμα, πρέπει η διαφορά του οπτικού δρόμου μεταξύ των δύο φωτεινών δεσμών στο σημείο που συμβάλλουν να είναι $d \sin \theta$ και ίση με ακέραιο αριθμό μηκών κύματος (βλέπε σχήμα 10.1.γ):

$$d \sin \theta_m = m \lambda \quad (10.1)$$

όπου d η απόσταση μεταξύ των σχισμών, λ το μήκος κύματος της φωτεινής πηγής, $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ η τάξη του κροσσού που αντιστοιχεί στην γωνία θ_m (το μηδέν αντιστοιχεί στον κεντρικό κροσσό) και θ η γωνία που σχηματίζει η ακτίνα που περνά από τη σχισμή με την κάθετο στη σχισμή.

10.3.2.3 Φαινόμενο περίθλασης από μονή σχισμή (diffraction at slit split)

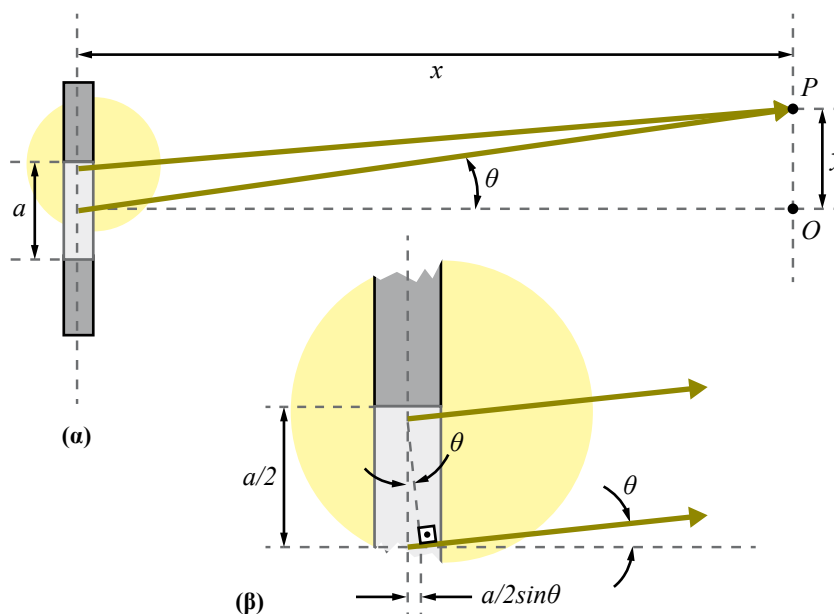
Αν φως μήκους κύματος λ προσπίπτει σε σχισμή εύρους a , όπου το a είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος λ , τότε κάθε στοιχειώδες σημείο της σχισμής είναι αφετηρία ενός νέου δευτερογενούς σφαιρικού φωτεινού μετώπου (κύματος) και το παρατηρούμενο φως πάνω σε πέτασμα, πίσω από τη σχισμή, θα προέρχεται από τα δευτερογενή αυτά κύματα. Για παράδειγμα, στα παράθυρα που έχουν εύρος της τάξης 1 έως 2m, συμβαίνει περίθλαση μόνο στα ηχητικά κύματα (το ορατό φως έχει μήκος κύματος της τάξης $6 \times 10^{-7} \text{m}$, ενώ τα ηχητικά κύματα συχνότητας 256Hz έχουν μήκος κύματος 1,3m). Το διαμόρφωμα της περίθλασης εμφανίζεται με τη μορφή που εξηγεί το σχήμα 10.2.



Σχήμα 10.2 – Διαμόρφωση περίθλασης (περίθλασόγραμμα). Κατανομή φωτεινής έντασης για φράγμα μονής σχισμής με τη φωτεινή ένταση να σχεδιάζεται ως συνάρτηση της γωνίας θ και της τάξης του κροσσού. Η γωνία θ θεωρείται περίπου ίση με τη γωνία θ του σχήματος 10.1.

Δύο φωτεινές ακτίνες που διέρχονται μέσω μονής σχισμής εύρους a και που απέχουν μεταξύ τους $a/2$, όπως στο σχήμα 10.3, παρουσιάζουν διαφορά φάσης (phase difference) φ που μπορεί να υπολογισθεί ως συνάρτηση γεωμετρικών ποσοτήτων. Ισχύει ότι:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta \quad (10.2)$$



Σχήμα 10.3 – Εγκάρσια τομή φράγματος μιας σχισμής (α) όταν η απόσταση $x \gg a$, οι ακτίνες που ξεκινούν από σημεία που απέχουν απόσταση $a/2$ μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες, (β) μεγέθυνση του μισού της σχισμής εύρους a .

Η φωτεινή ένταση I_θ των κροσσών της περίθλασης είναι:

$$I_\theta = I_0 \left\{ \frac{\sin \left[\pi a (\sin \theta) / \lambda \right]}{\pi a (\sin \theta) / \lambda} \right\}^2 \Rightarrow I_\theta = I_0 \left\{ \frac{\sin \left[\frac{\varphi}{2} \right]}{\frac{\varphi}{2}} \right\}^2 \quad (10.3)$$

όπου I_0 η φωτεινή ένταση στο σημείο θ (όταν $\theta=0$), που εξαρτάται από το μήκος κύματος και τη γεωμετρία.

Οι κορυφές της έντασης I_{max} (βλέπε σχήμα 10.2) παρατηρούνται κατά προσέγγιση στις κατευθύνσεις όπου ο αριθμητής της σχέσης (10.3) είναι μέγιστος, δηλαδή $a \sin \theta / \lambda = \pi(2m + 1/4)$, όπου $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Η συνθήκη αυτή δίνεται από την:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a} \left(2m + \frac{1}{2} \right) \quad (10.4)$$

Τα ελάχιστα της έντασης, $I_{min}=0$, βλέπε σχήμα 10.2 (σκοτεινοί κροσσοί), παρατηρούνται στις κατευθύνσεις όπου ο αριθμητής της σχέσης (10.3) είναι ίσος με μηδέν, δηλαδή:

$$\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta = m\pi \quad (10.5)$$

Επίσης είναι φανερό ότι από τις σχέσεις (10.3) και (10.6) τα ελάχιστα της έντασης παρατηρούνται στις κατευθύνσεις, όπου ο αριθμητής της σχέσης (10.6) μηδενίζεται. :

$$\frac{\sin \left[\frac{\varphi}{2} \right]}{\frac{\varphi}{2}} \quad (10.6)$$

όταν $\varphi = 2m\pi$. Από τη σχέση (10.5) προκύπτει ότι:

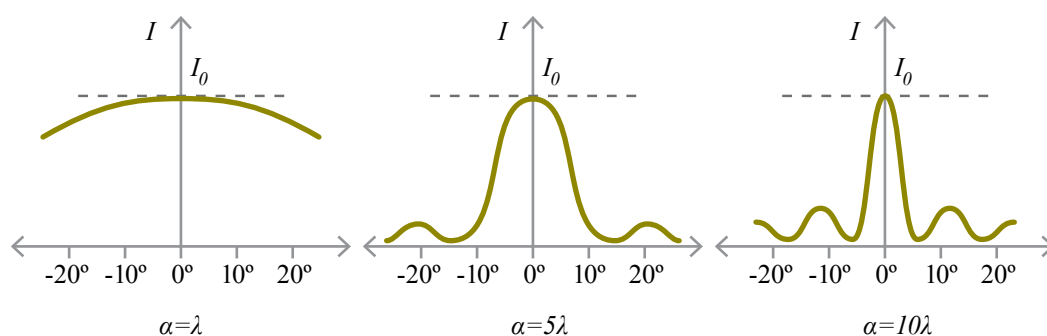
$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{a} \quad (10.7)$$

που είναι η συνθήκη μηδενισμού της φωτεινής έντασης, για $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Άρα, όταν $m=1$ υπολογίζουμε την γωνία θ_1 στην οποία αντιστοιχεί σκοτεινός κροσσός πρώτης τάξης στο πέτασμα, όπου η φωτεινή ένταση είναι μηδέν, όπως στο σχήμα 10.2.

Σύμφωνα με τη σχέση (10.7), όσο μικραίνει το εύρος a της σχισμής του φράγματος τόσο μεγαλώνει η γωνία θ_1 του πρώτου μηδενισμού της έντασης του φωτός, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει και το εύρος της κεντρικής φωτεινής περιοχής στο πέτασμα (δείτε το σχήμα 10.4, π.χ. για $a=5\lambda$ σε σύγκριση με $a=10\lambda$).

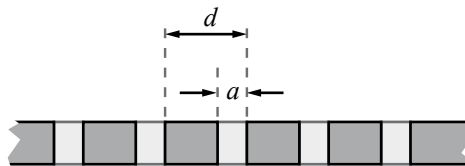
Όταν $a=\lambda$, τότε από τη σχέση (10.7) προκύπτει ότι $\sin \theta_1 = 1$, δηλαδή $\theta_1 = 90^\circ$ που σημαίνει ότι ο πρώτος μηδενισμός της έντασης του φωτός I θα συμβαίνει στο άπειρο, (σχήμα 10.4 για $a=\lambda$).



Σχήμα 10.4 – Αποτέλεσμα περίθλασης (κατανομή φωτεινής έντασης) από φράγμα μονής σχισμής για διάφορες τιμές του εύρους a της σχισμής. Για παράδειγμα, όταν το εύρος $a=2\lambda$, τότε $\sin \theta = \lambda/a = 1/2$ ή $\theta = 30^\circ$.

10.3.2.4 Φαινόμενο περίθλασης από φράγμα

Στην οπτική, με τον όρο **φράγμα** εννοούμε γυάλινο πλακίδιο το οποίο φέρει μεγάλο αριθμό παραλλήλων και διαφανών σχισμών εύρους a , οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση d (σχήμα 10.5). Το d ονομάζεται σταθερά του φράγματος.

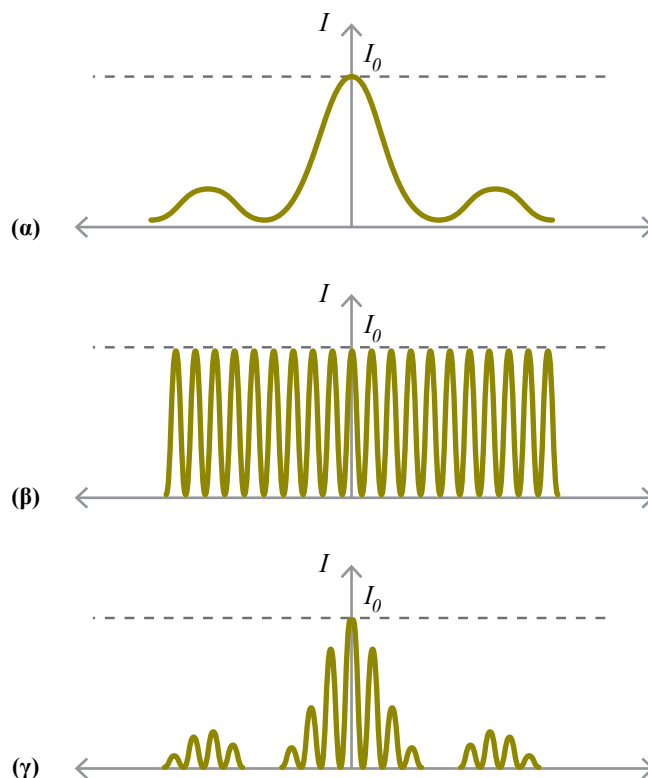


Σχήμα 10.5 – Σχηματική αναπαράσταση τμήματος ενός φράγματος (τομή).

Παραπάνω έγινε αναφορά της συμβολής του φωτός από δύο σχισμές και της περίθλασης από μονή σχισμή. Το διαμόρφωμα περίθλασης πίσω από φράγμα πολλών σχισμών παρουσιάζει νέα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά.

Έστω ότι φως πέφτει πάνω σε φράγμα δύο σχισμών εύρους a , οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση d και ισχύει ότι $a > d$ (π.χ. $a = 5d$). Το διαμόρφωμα περίθλασης πάνω σε πέτασμα, λόγω της μία σχισμής εύρους a , θα ήταν όπως αυτό του σχήματος 10.6.α, ενώ η εικόνα συμβολής, λόγω των δύο σχισμών που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d , θα ήταν όπως αυτή του σχήματος 10.6.β.

Η εικόνα, που εμείς θα παρατηρήσουμε πάνω στο πέτασμα, θα είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 10.6.γ, ως συνδυασμός των δύο φαινομένων που προκύπτει από την υπέρθεση κυμάτων προερχομένων από διάφορα μέρη των δύο ανοιγμάτων. Το φαινόμενο μπορούμε να το ονομάσουμε είτε συμβολή είτε περίθλαση.



Σχήμα 10.6 – Διαμόρφωμα περίθλασης (κατανομή φωτεινής έντασης) πίσω από φράγμα πολλών σχισμών: (α) αποτέλεσμα φαινομένου περίθλασης, (β) αποτέλεσμα φαινομένου συμβολής, (γ) παρατηρούμενος συνδυασμός των (α) και (β).

Η διαφορά δρόμου για τις φωτεινές ακτίνες που διέρχονται από τις άκρες της κάθε σχισμής είναι:

$$a \sin \theta \quad (10.8)$$

και η διαφορά φάσης τους είναι:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta \quad (10.9)$$

Η διαφορά δρόμου για τις ακτίνες από δύο γειτονικές σχισμές που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d είναι:

$$d \sin \theta \quad (10.10)$$

και η διαφορά φάσης τους είναι:

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (10.11)$$

Έτσι, οι κύριες κορυφές (principal maxima) χάνονται σε ένα φράγμα περίθλασης όταν $\sin \theta = m\lambda/d = \lambda/a$, δηλαδή $m=d/a$. Για παράδειγμα, όταν $d/a=5$, τότε η κύρια κορυφή πέμπτης τάξης χάνεται.

Η συνθήκη για μέγιστη ένταση στην εικόνα περίθλασης δίνεται από τη σχέση (10.1). Σε φράγμα N σχισμών, οι N ακτίνες παρατηρούνται σε ένα σημείο υπό γωνία περίθλασης θ , η ένταση της περίθλασης θα έχει πλάτος E_θ και υπολογίζεται από τη σχέση

$$I_\theta = E_\theta^2 \left[\frac{\sin \left[\frac{N\phi_2}{2} \right]}{\phi_2/2} \right]^2 \quad (10.12)$$

Όπου E_θ^2 είναι η ένταση της ακτίνας που περιθλάται από απλή σχισμή.

$$E_\theta^2 \approx \frac{\sin^2 \left[\frac{\phi_1}{2} \right]}{\left(\frac{\phi_1}{2} \right)^2} \quad (10.13)$$

Η ένταση της περίθλασης του συνολικού φράγματος N σχισμών προκύπτει από το συνδυασμό των σχέσεων (10.12) και (10.13) ως:

$$I_\theta = \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right) \sin^2 \left(\frac{N\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)} = I_s I_d \quad (10.14)$$

Το πρώτο μέρος του γινομένου της σχέσης (10.14) είναι η κατανομή της έντασης σε μια απλή σχισμή I_s , το δεύτερο μέρος είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της περίθλασης των N σχισμών I_d .

Αυτό δείχνει ότι τα ελάχιστα στην απλή σχισμή διατηρούνται και στην περίπτωση του φράγματος, γιατί, αν ο πρώτος όρος γίνει μηδέν, το γινόμενο επίσης μηδενίζεται.

Στην περίπτωση που $N=2$, η σχέση (10.14) γίνεται:

$$I_{\theta} = \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right) \sin^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)} \quad (10.15)$$

Τα ελάχιστα των κύριων κορυφών, για τη μονή σχισμή, λόγω μηδενισμού του αριθμητή του πρώτου όρου της σχέσης (10.15) παρατηρούνται όταν:

$$a \sin \theta_m = m\lambda \quad (10.16)$$

για $m=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, ενώ για $m=0$ παρατηρείται κεντρικός (μέγιστος) κροσσός.

Τα ελάχιστα των δευτερευουσών κορυφών (subsidiary maxima), για πολλές σχισμές, λόγω μηδενισμού του αριθμητή του δεύτερου όρου (χωρίς σύγχρονο μηδενισμό του παρανομαστή) της σχέσης (10.15) παρατηρούνται όταν:

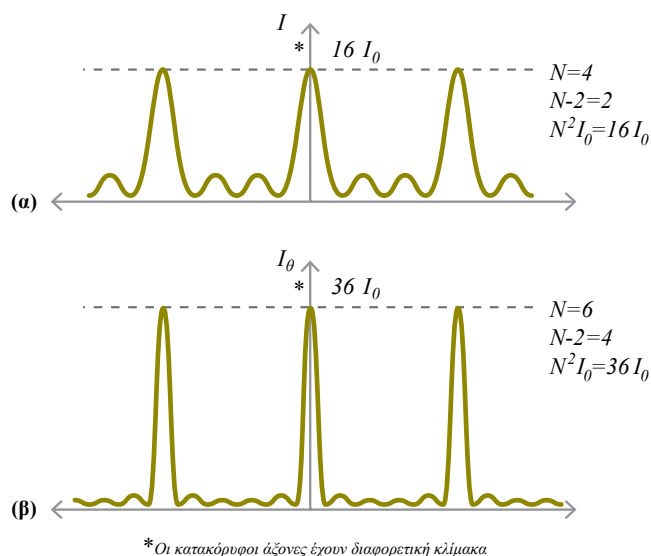
$$2d \sin \theta_m = (2m + 1)\lambda \quad (10.17)$$

για $m=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Ο σύγχρονος μηδενισμός αριθμητή και παρανομαστή του δεύτερου όρου της (10.15) είναι οι κύριες κορυφές δεύτερης τάξης:

$$d \sin \theta_m = m\lambda \quad (10.18)$$

Στα φράγματα πολλών σχισμών οι κύριες κορυφές (δεύτερης τάξης) είναι πολύ μεγαλύτερης έντασης (ανάλογης του N^2) και πολύ μικρότερου εύρους, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.7. Το περίγραμμα του σχήματος του διαμορφώματος περίθλασης πολλών σχισμών είναι ισοδύναμο με εκείνο μιας μονής σχισμής εύρους a . Μεταξύ των κύριων κορυφών υπάρχουν πάντα $(N-2)$ δευτερεύουσες μέγιστες κορυφές (βλέπε σχήμα 10.7).



Σχήμα 10.7 – Διαμορφώματα περίθλασης (κατανομή φωτεινής έντασης) π.χ. για φράγμα (α) 4 σχισμών και (β) 6 σχισμών. Όπου I_0 η ένταση για μονή σχισμή στη θέση $\theta=0$ ($m=0$).

10.3.2.5 *Αβεβαιότητα της ορμής, αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg (uncertainty of location and momentum)*

Η Θεωρία της Κβαντικής Φυσικής (ή Κβαντομηχανικής) υποστηρίζει ότι η φύση στη μικροσκοπική της μορφή (ατομική κλίμακα) είναι ασυνεχής και απρόβλεπτη. Έτσι, είναι πρακτικά και αντικειμενικά αδύνατο να γνωρίζουμε με ακρίβεια το «πού» και το «πόσο». Η Κβαντική Φυσική ενδιαφέρεται για την πιθανότητα ένα φυσικό μέγεθος να έχει κάποια συγκεκριμένη τιμή εισάγοντας την αβεβαιότητα στις μετρήσεις. Επίσης την ενδιαφέρει το πόσο συχνά αυτό το φυσικό μέγεθος παίρνει αυτήν την τιμή.

Στην Κβαντομηχανική εισάγεται η έννοια της ασυνέχειας, δηλαδή ότι ένα φυσικό μέγεθος δεν μπορεί να παίρνει κατ' ανάγκη μια σειρά από συνεχείς τιμές αλλά μόνο συγκεκριμένες, οι οποίες πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο μιας σταθεράς, όπως οι ενέργειες και οι τροχιές των ηλεκτρονίων γύρω από το άτομο. Οι αβέβαιες αλλά συγκεκριμένες τιμές έχουν σημασία μόνο σε ατομική κλίμακα, όπως στα φαινόμενα κίνησης μικροσκοπικών σωματιδίων (υποατομικών), σε μικροσκοπικές περιοχές χώρου (10^{-8}cm).

Επίσης η Κβαντομηχανική δέχεται ότι η φωτεινή ακτινοβολία εκπέμπεται με ασυνεχή τρόπο, με τη μορφή μικρών ενεργειακών ποσοτήτων, των φωτονίων (κβάντων) και ότι η ενέργεια κάθε φωτονίου (κβάντου) καθορίζεται από τη συχνότητα της φωτεινής ακτινοβολίας.

Μια σημαντική αρχή της Κβαντικής Φυσικής είναι η αρχή της απροσδιοριστίας, η οποία εκφράζεται με μια μαθηματική σχέση που δηλώνει ότι δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη ακριβής γνώση της θέσης και της ταχύτητας ενός σωματιδίου, στη μικροσκοπική κλίμακα, π.χ. ηλεκτρόνια, φωτόνια.

10.3.2.6 *Φυσική σημασία της παγκόσμιας σταθεράς h του Planck και της αρχής της απροσδιοριστίας*

Η σταθερά του Planck είναι το όριο στη δυνατότητα να γνωρίζουμε ταυτόχρονα τη θέση και την ορμή ενός σωματιδίου ή ισοδύναμα το όριο στην ακρίβεια της πρόβλεψης της μελλοντικής θέσης (τροχιάς του). Η απροσδιοριστία είναι αντίστροφα ανάλογη της μάζας. Έτσι, ο βαθμός, στον οποίο η αρχή της απροσδιοριστίας περιορίζει τη δυνατότητα της πρόβλεψης μιας μελλοντικής θέσης ενός αντικειμένου, εξαρτάται από το μέγεθος της μάζας του, γιατί η πρόβλεψη βασίζεται στη γνώση της ταχύτητας.

Πρώτος ο Max Bohr το 1926 υποστήριξε την πιθανότητα, και όχι τη βεβαιότητα, ένα σωματίδιο να βρεθεί σε κάποια θέση. Ο Verner Heisenberg εξέφρασε αυτό το γεγονός ποσοτικά μέσω μίας μαθηματικής σχέσης. Η αρχή της απροσδιοριστίας έχει και φιλοσοφικές προεκτάσεις δεδομένου ότι προκάλεσε ένα μεγάλο πλήγμα στο κίνημα της αιτιοκρατικής αντίληψης του κόσμου (ντετερμινισμού).

Αποδεικνύεται εύκολα ότι η απροσδιοριστία είναι αντίστροφα ανάλογη της μάζας, δηλαδή όσο μεγαλύτερη μάζα έχει ένα αντικείμενο, τόσο λιγότερο σημαντική είναι η αρχή της απροσδιοριστίας. Στον κόσμο της καθημερινής μας εμπειρίας (μακρόκοσμος), επειδή οι μάζες των αντικειμένων είναι πολύ μεγάλες σε σχέση με εκείνες της ατομικής κλίμακας (μικρόκοσμος) που δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι, το σφάλμα στη θέση ενός αντικειμένου, υπολογιζόμενο από την αρχή της απροσδιοριστίας, είναι της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος του φωτός, δηλαδή αμελητέα.

Αντίθετα, σε ατομική κλίμακα, το σφάλμα είναι πολύ μεγάλο, ώστε να είναι αδύνατη η πρόβλεψη της θέσης του σωματιδίου. Μπορείτε να σκεφθείτε ότι όλα οφείλονται στο γεγονός ότι προσπαθούμε να παρατηρήσουμε και να μετρήσουμε το μικρόκοσμο με μακροσκοπικές μεθόδους και συνεπώς, διαταράσσουμε το μικροσκοπικό σύστημα εισάγοντας επιπλέον νέα σφάλματα στον προσδιορισμό των παραμέτρων του.

Το πείραμα της περίθλασης φωτονίων από μονή σχισμή επιβεβαιώνει την αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg. Επίσης το πείραμα της περίθλασης ηλεκτρονίων από διπλή σχισμή αποδεικνύει ότι είναι αδύνατο να μετρήσουμε ταυτόχρονα τις σωματιδιακές και τις κυματικές ιδιότητες των ηλεκτρονίων.

Σύμφωνα με την κβαντομηχανική, η αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$\Delta y \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} \quad (10.19)$$

όπου $h=6,6262 \times 10^{-34} \text{Js}$ η σταθερή του Planck και Δy , Δp τα σφάλματα μέτρησης της θέσης και της ορμής. Αν το ένα είναι πολύ μικρό, το άλλο απαραίτητα θα είναι πολύ μεγάλο.

Ο Heisenberg εξήγησε ότι τα σφάλματα Δy και Δp δεν οφείλονται σε ατέλειες της πειραματικής συσκευής αλλά στην κβαντική δομή της ύλης. Έτσι έχουμε αδυναμία του απόλυτου προσδιορισμού της κατεύθυνσης κατά την οποία περιθλάται ένα φωτόνιο ή ηλεκτρόνιο που διέρχεται από μια σχισμή.

Για ένα ρεύμα φωτονίων που διέρχεται από μονή σχισμή εύρους a (όπως στο σχήμα 10.2) μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει:

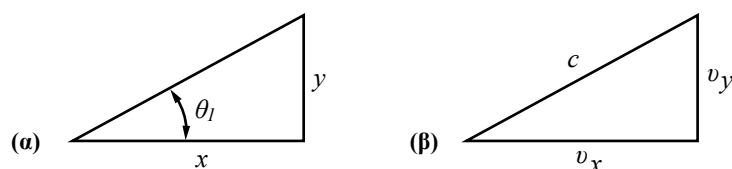
$$\Delta y = a \quad (10.20)$$

Τα φωτόνια πριν τη σχισμή ταξιδεύουν στη διεύθυνση την κάθετη στο επίπεδο της σχισμής (x-διεύθυνση). Μετά τη σχισμή έχουν δυνατότητα κίνησης και στην y-διεύθυνση.

Η πιθανότητα της έντασης της συνιστώσας ταχύτητας v_y δίνεται από την κατανομή της έντασης του διαμορφώματος της περίθλασης. Το πρώτο ελάχιστο χρησιμοποιείται για τον ορισμό της αβεβαιότητας (diffraction uncertainty) όπως εξηγεί το σχήμα 10.8:

$$\Delta v_y = c \sin \theta_1 \Rightarrow \Delta p_y = m_p c \sin \theta_1 \quad (10.21)$$

όπου θ_1 είναι η γωνία του πρώτου ελαχίστου, m_p η μάζα του φωτονίου και c η ταχύτητα του φωτός.



Σχήμα 10.8 – Γεωμετρία για την περίθλαση μέσω μονής σχισμής: (α) ο δρόμος που έχει διανυθεί, (β) οι συνιστώσες της ταχύτητας του φωτονίου.

Η σχέση του de Broglie συνδέει την ορμή με το μήκος κύματος ενός σωματίου, και από αυτή μπορεί να υπολογισθεί η μάζα και να αντικατασταθεί στη σχέση (10.21), όπως και το $\sin \theta_1$ που υπολογίζεται για $m=1$, από τη σχέση (10.7):

$$p = \frac{h}{\lambda} = mc \Rightarrow m = \frac{h}{\lambda c} \quad (10.22)$$

$$\Delta p_y = \frac{h}{\lambda} \sin \theta_1 \quad (10.23)$$

Από τις σχέσεις (10.7) και (10.23), για τον πρώτο μηδενισμό της φωτεινής έντασης, προκύπτει ότι:

$$\Delta p_y = \frac{h}{\lambda} \frac{\lambda}{a} = \frac{h}{a} \quad (10.24)$$

Το μέτρο της αβεβαιότητας της ορμής υπολογίζεται πειραματικά από τη σχέση (10.23), αν υπολογίσουμε τη γωνία θ_1 από τη γεωμετρία της πειραματικής διάταξης (βλέπε σχήμα 10.8.α), από όπου φαίνεται ότι:

$$\tan \theta_1 = \frac{y_1}{x} \quad (10.25)$$

άρα η (10.23) γίνεται:

$$\Delta p_y = \frac{h}{\lambda} \sin \theta_1 \left(\arctan \frac{y_1}{x} \right) \quad (10.26)$$

Από τις σχέσεις (10.20) και (10.24) υπολογίζεται το γινόμενο $\Delta y \Delta p$:

$$\Delta y \Delta p = a \frac{h}{a} = h \quad (10.27)$$

Η σχέση (10.27) δηλώνει ότι, αν το εύρος της σχισμής Δy αυξάνει, το πρώτο ελάχιστο του διαμορφώματος της περίθλασης βρίσκεται σε μεγαλύτερη γωνία θ_1 .

Αν στη σχέση (10.27) αντικατασταθεί η (10.20) και η (10.26), προκύπτει:

$$\Delta y \Delta p_y = a \frac{h}{\lambda} \sin \left(\arctan \frac{y_1}{x} \right) = h \Rightarrow \frac{a}{\lambda} \sin \left(\arctan \frac{y_1}{x} \right) = 1 \quad (10.28)$$

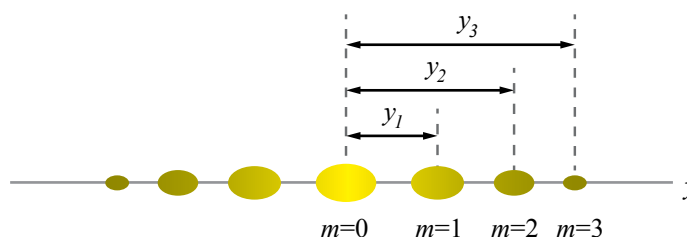
Από τις μετρήσεις του πειράματος (y_1 και x), με γνωστά το εύρος της σχισμής a και το μήκος κύματος του λέιζερ λ , μπορεί να επιβεβαιωθεί η σχέση (10.28), η οποία αποτελεί την έκφραση της αρχής της απροσδιοριστίας του Heisenberg.

10.3.3 Εκτέλεση

Να αναγνωρίσετε τις συσκευές του πειράματος.

Προσοχή! Η ακτίνα φωτός λέιζερ πρέπει να παρατηρείται υπό γωνία και ποτέ να μην προσπέσει στην επιφάνεια του ματιού σας.

1. Να θέσετε σε λειτουργία τη συσκευή λέιζερ.
2. Η οπτική τράπεζα είναι ένας αλουμινένιος σωλήνας μήκους 3,5m. Τοποθετήστε το πέτασμα στο άλλο άκρο της οπτικής τράπεζας, απέναντι από τη συσκευή λέιζερ.
3. Να τοποθετήσετε το οπτικό φράγμα (με τις 300 σχισμές/mm) στη πορεία της δέσμης του λέιζερ, πάνω σε βάση κοντά στη συσκευή λέιζερ.
4. Παρατηρήστε τους κροσσούς συμβολής πάνω στο πέτασμα. Η εικόνα που θα δείτε πάνω στο πέτασμα θα μοιάζει με εκείνη του σχήματος 10.9. Μετρήστε με ακρίβεια την απόσταση y_1 του πρώτου κροσσού συμβολής (πρώτης τάξης, $m=1$) από τον κεντρικό κροσσό συμβολής (μηδενικής τάξης, $m=0$). Μπορείτε να μετρήσετε είτε αριστερά είτε δεξιά του κεντρικού κροσσού.



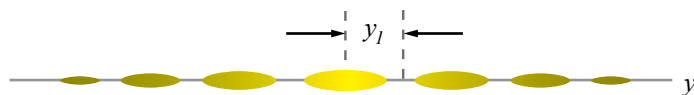
Σχήμα 10.9 – Εικόνα κροσσών συμβολής.

5. Μετρήστε την απόσταση x του πετάσματος από το φράγμα.
6. Επαναλάβετε το βήμα 4 μετρώντας τις αποστάσεις y_2 και y_3 του δεύτερου ($m=2$) και τρίτου ($m=3$) κροσσού συμβολής, αντίστοιχα από τον κεντρικό για την ίδια απόσταση x , όπως εξηγεί το σχήμα 10.9.
7. Οι μετρήσεις σας από τα βήματα 4, 5 και 6 να καταχωρηθούν σε πίνακα της μορφής του πίνακα 10.1.

Απόσταση πετάσματος – φράγματος x (mm) = ...	
Τάξη κροσσού m	Απόσταση κροσσού από τον κεντρικό y_m (mm)
1	...
2	...
...	...

Πίνακας 10.1 – Καταχώριση μετρήσεων.

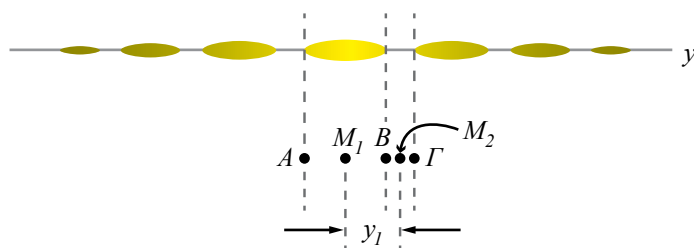
8. Να τοποθετήσετε το οπτικό φράγμα με μονή σχισμή στη πορεία της δέσμης του λέιζερ, πάνω σε βάση κοντά στη συσκευή του λέιζερ. Προσέξτε η σχισμή να είναι τοποθετημένη κάθετα, και η δέσμη του φωτός να κτυπάει ακριβώς πάνω στη σχισμή.
9. Παρατηρήστε την εικόνα της περίθλασης πάνω στο πέτασμα. Η εικόνα που θα δείτε πάνω στο πέτασμα θα μοιάζει με αυτή του σχήματος 10.10.
10. Μετρήστε με ακρίβεια την απόσταση y_1 του πρώτου μηδενισμού του φωτός από το κέντρο (σχήμα 10.10).



Σχήμα 10.10 – Εικόνα περίθλασης από φράγμα μονής σχισμής.

Τρόπος μέτρησης της απόστασης y_1 με ακρίβεια:

Τοποθετήστε ένα κομμάτι λευκό χαρτί πάνω στο πέτασμα, έτσι ώστε η εικόνα της περίθλασης να φαίνεται πάνω σε αυτό. Σημειώστε πάνω στο χαρτί τα δύο άκρα Α και Β της κεντρικής φωτεινής περιοχής καθώς και την αρχή της δεύτερης φωτεινής περιοχής Γ, (σχήμα 10.11.α). Αφαιρέστε το χαρτί. Βρείτε το μέσον M_1 της απόστασης ΑΒ καθώς και το μέσον M_2 της απόστασης ΒΓ, (σχήμα 10.11.β). Η απόσταση M_1M_2 ισούται με την απόσταση y_1 , που θέλετε να υπολογίσετε.



Σχήμα 10.11 – Τρόπος μέτρησης της απόστασης y_1 με ακρίβεια.

11. Μετρήστε την απόσταση x του πετάσματος από το φράγμα.
12. Επαναλάβετε το βήμα 10 για τρεις ακόμα διαφορετικές τιμές του x .
13. Οι μετρήσεις σας από τα βήματα 10, 11 και 12 να καταχωρηθούν σε πίνακα της μορφής του πίνακα 10.2.

Απόσταση πετάσματος – φράγματος x (mm)	Απόσταση του πρώτου μηδενισμού του φωτός y_1 (mm)
...	...
...	...

Πίνακας 10.2 – Καταχώριση μετρήσεων.

10.3.4 Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Από τη σχέση (10.1) υπολογίστε το μήκος κύματος του λέιζερ της άσκησης για $m=1, 2, 3$.

Το $\sin\theta_m$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sin\theta_m = \frac{y_m}{\sqrt{y_m^2 + x^2}} \quad (10.29)$$

όπου: d η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σχισμών του φράγματος (εδώ $d=1/300\text{mm}$), x η απόσταση μεταξύ φράγματος και πετάσματος, y_m η απόσταση του m -στου μεγίστου από το κεντρικό μέγιστο.

2. Υπολογίστε τη μέση τιμή του λ από τις τρεις τιμές που θα υπολογίσετε (για $m=1, m=2$ και $m=3$).
3. Βρείτε την επί της εκατό διαφορά της τιμής αυτής από την πραγματική τιμή του λ ($\lambda=633\text{nm}$).
4. Για καθεμία από τις μετρήσεις του πίνακα 10.2 υπολογίστε το εύρος a της σχισμής.

Από τη σχέση (10.7) για $m=1$ προκύπτει ότι:

$$a = \frac{\lambda}{\sin\theta_1} \quad (10.30)$$

με:

$$\sin\theta_1 = \frac{y_1}{\sqrt{y_1^2 + x^2}} \quad (10.31)$$

όπου: a το εύρος της σχισμής, x η απόσταση μεταξύ φράγματος και πετάσματος, y_1 η απόσταση του πρώτου μηδενισμού του φωτός, λ το μήκος κύματος του λέιζερ (633 nm).

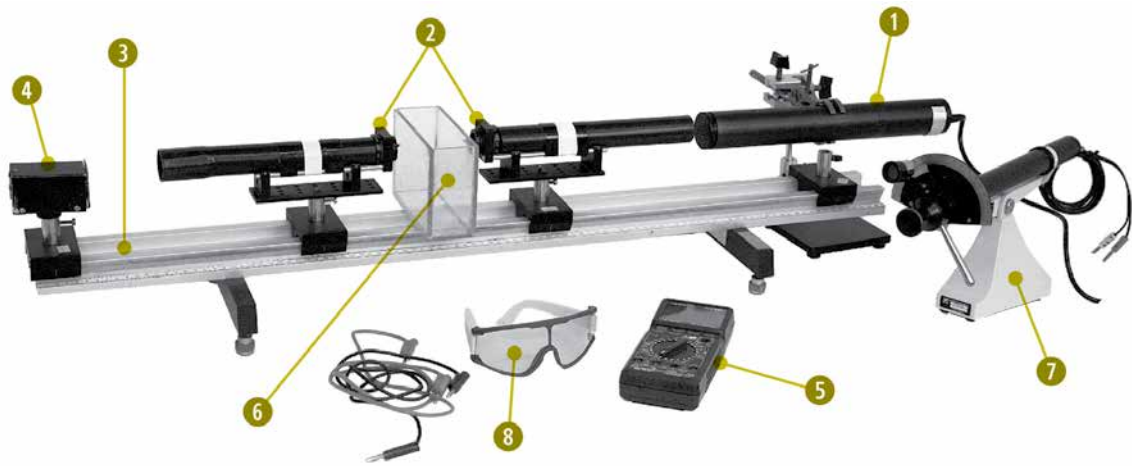
5. Βρείτε τη μέση τιμή του a από τις πέντε τιμές που θα υπολογίσετε.
6. Να υπολογίσετε το μέτρο της αβεβαιότητας της ορμής από τη σχέση (10.26).
7. Να επιβεβαιωθεί η αρχή αβεβαιότητας του Heisenberg με την επαλήθευση της σχέσης (10.28).

10.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 38: Diffraction of light Waves,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.
- [2] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 37: Inference of Light Waves,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.
- [3] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 465-487.
- [4] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 20: Diffraction of Light waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 539, pp. 542.
- [5] Ν. Αφεντάκης, Σ. Μουσταϊζής, Ε. Σεργάκη, *ΛΕΙΖΕΡ – Αρχές Λειτουργίας και Εφαρμογές*, Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 2008.

ΑΣΚΗΣΗ 11

Μελέτη πόλωσης του φωτός και των οπτικά ενεργών ουσιών



11.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Φωτεινή πηγή λέιζερ μήκους κύματος 632,8nm.
2. Δύο πολωτικά φίλτρα (πολωτής και αναλυτής).
3. Οπτική τράπεζα.
4. Κύκλωμα φωτοαντίστασης για τη μέτρηση έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας.
5. Πολύμετρο.
6. Δοχείο με οπτικά ενεργή ουσία.
7. Πολωσίμετρο μισής σκιάς.
8. Προστατευτικά γυαλιά.

Σε συνεργασία με τον υπεύθυνο του πειράματος, αναγνωρίστε τις συσκευές του πειράματος. Η συσκευή λέιζερ πρέπει να έχει τεθεί σε λειτουργία τουλάχιστον μίση ώρα πριν το πείραμα, για να έχει σταθεροποιηθεί η ένταση του φωτός.

Προσοχή: Η ακτίνα φωτός λέιζερ πρέπει να παρατηρείται υπό γωνία και ποτέ να μην προσπέσει στην επιφάνεια του ματιού σας.

11.2 Απαραίτητες γνώσεις

Γραμμικά και κυκλικά πολωμένο φως, πολωτικά φίλτρα, νόμος του Malus, οπτική ενεργότητα ουσιών, ειδική στροφική ικανότητα, φως λέιζερ.

11.3 Πείραμα 1

11.3.1 Σκοπός

- Η επαλήθευση του νόμου του Malus για γραμμικά πολωμένα φως που διέρχεται μέσα από δύο πολωτικά φίλτρα (πολωτή και αναλυτή).
- Η μέτρηση της ειδικής στροφικής ικανότητας διαλύματος οπτικά ενεργής ουσίας.

11.3.2 Θεωρία

11.3.2.1 Φως

Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητες στην ορατή από το ανθρώπινο μάτι περιοχή (10^{14} έως 10^{15} Hz ή 400nm έως 700nm). Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια κύματα και μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελούνται από επαλληλία κυμάτων πολωμένων σε δύο κάθετες διευθύνσεις. Το φως αποτελείται από φωτόνια που χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος λ και τη συχνότητά τους f . Η ενέργεια του κύματος υπολογίζεται από τη σχέση $E=hf$, όπου h η σταθερή του Plank.

Το φως λέιζερ ξεχωρίζει από το φως των άλλων γνωστών μέχρι σήμερα φωτεινών πηγών στο ότι αποτελείται από εντελώς ταυτόσημα φωτόνια. Αυτή η ιδιότητα του προσδίδει και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, όπως η κατευθυντικότητα, η μονοχρωματικότητα, η μεγάλυτερη ενέργειά του.

Φυσικό, ή μη πολωμένο, φως είναι εκείνο το φως που το διάνυσμα E του ηλεκτρικού πεδίου κινείται τυχαία και δεν έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση κατά την κίνησή του στο χώρο.

Πολωμένο φως είναι εκείνο το φως, που το πέρασ του διανύσματος E του ηλεκτρικού πεδίου του διαγράφει ορισμένη τροχιά στο χώρο.

Κυκλικά πολωμένο φως (circularly polarized light) έχουμε, όταν η ένταση του ηλεκτρικού του πεδίου είναι επαλληλία δύο συνιστωσών ίσου πλάτους με διαφορά φάσης πολλαπλάσια του $\pi/2$.

Γραμμικά πολωμένο φως είναι το φως που το διάνυσμα E του ηλεκτρικού του πεδίου βρίσκεται πάντα στο ίδιο επίπεδο κατά τη διάρκεια διάδοσης του.

Πολωτής (πολωτικό φίλτρο) λέγεται μια οπτική διάταξη, που, όταν προσπέσει σε αυτήν φυσικό φως, αυτό εξέρχεται πολωμένο. Υπάρχουν διάφορες μορφές πολωτών, όπως οι γραμμικοί, οι κυκλικοί κ.α.

Το 1938 ο E.H. Land ανακάλυψε ένα υλικό το οποίο ονόμασε **polaroid** και το οποίο πολώνει το φως, διότι τα μόρια του είναι προσανατολισμένα σε μια μόνο διεύθυνση και, έτσι, αφήνουν να περάσει το φως σε επιλεγμένη διεύθυνση. Το υλικό αυτό παράγεται σε λεπτά στρώματα υδατανθράκων, όπως είναι η πολυβινυλική αλκοόλη.

Τα μόρια, κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας τους, *τεντώνονται* έτσι ώστε να απορροφούν το φως, του οποίου το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου είναι παράλληλο προς το μήκος τους (τη μακρύτερη διάστασή τους), και αφήνουν να τα διαπεράσει το φως, του οποίου το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετο στο μήκος τους. Για το λόγο αυτό, ο άξονας που είναι κάθετος στη μακριά μοριακή αλυσίδα ονομάζεται άξονας διάδοσης (optical axis).

Διεύθυνση πόλωσης ενός γραμμικά πολωμένου ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι η διεύθυνση του ηλεκτρικού του πεδίου E .

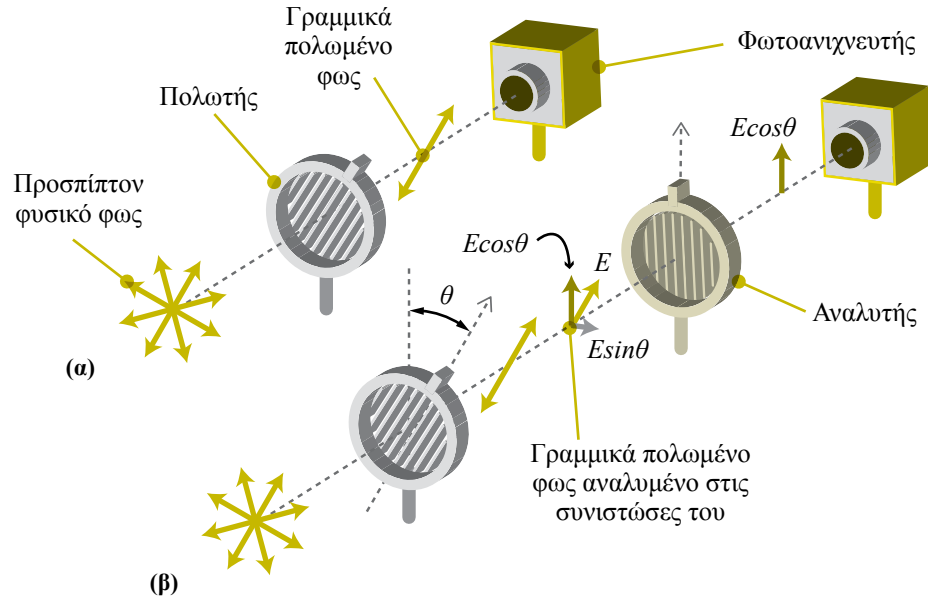
11.3.2.2 Πόλωση μέσω επιλεκτικής απορρόφησης (νόμος του Malus)

Η πιο διαδεδομένη τεχνική για την παραγωγή πολωμένου φωτός είναι εκείνη κατά την οποία το φως πολώνεται, όταν διέλθει μέσα από συγκεκριμένο διαφανές υλικό, το οποίο ονομάζεται πολωτής (πολωτικό φίλτρο).

Ο πολωτής αφήνει να διέλθουν μέσα του κύματα των οποίων το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση και απορροφά όλα τα άλλα κύματα των οποίων το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται σε άλλες διευθύνσεις. Τα υλικά που έχουν την ιδιότητα αυτήν ονομάζονται **διχροϊκά** (polaroid).

Η συγκεκριμένη διεύθυνση στην οποία πολώνεται το φως συμπίπτει με τη διεύθυνση που έχει ο άξονας (άξονας πόλωσης) του πολωτή. Καθώς περιστρέφουμε τον πολωτή, περιστρέφεται και ο άξονας του και, επομένως, μπορούμε να διαλέξουμε τη διεύθυνση πόλωσης του φωτός που εξέρχεται από τον πολωτή.

Στο σχήμα 11.1.α φαίνεται μια μη πολωμένη δέσμη φωτός, η οποία προσπίπτει σε ένα πολωτικό φίλτρο, που ονομάζεται πολωτής, και αφήνει να περάσει φως μόνο στη διεύθυνση του άξονα διάδοσης, ενώ απορροφά το υπόλοιπο. Στο σχήμα 11.1.β βλέπουμε ότι, αν μετά τον πολωτή, το γραμμικά πια πολωμένο φως προσπίπτει και σε ένα δεύτερο πολωτικό φίλτρο, το οποίο ονομάζεται αναλυτής, αυτό θα επιτρέψει να περνάει μόνο η συνιστώσα του ηλεκτρικού του πεδίου E , που έχει διεύθυνση ίδια με τη διεύθυνση του άξονά του.



Σχήμα 11.1 – (α) Φυσικό φως διέρχεται από πολωτή. Η ένταση του γραμμικά πολωμένου φωτός μετριέται από φωτοανιχνευτή και παραμένει σταθερή για οποιαδήποτε γωνία του άξονα πόλωσης του πολωτή. Στα ιδανικά φίλτρα η ένταση του διερχόμενου φωτός είναι το μισό της έντασης του προσπίπτοντος. (β) Ο ιδανικός αναλυτής επιτρέπει τη διέλευση μόνο της συνιστώσας που είναι παράλληλη προς τον άξονα πόλωσης του αναλυτή. Η ένταση της συνιστώσας που περνά από τον αναλυτή είναι $I = I_0 \cos^2 \theta$.

Συνάγουμε ότι η τελική ένταση του φωτός μετά τα δύο πολωτικά φίλτρα θα εξαρτάται από τη γωνία θ που σχηματίζουν οι άξονες του πολωτή και του αναλυτή. Η σχέση μεταξύ της τελικής έντασης του φωτός I , μετά από τον πολωτή και τον αναλυτή, και της αρχικής έντασης του φωτός I_0 , μετά από τον πολωτή, δίνεται από το νόμο του Malus:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (11.1)$$

Όπως μπορεί να φανεί και από τη σχέση (11.1), όταν οι άξονες διάδοσης των δύο πολωτικών φίλτρων, πολωτή και αναλυτή, είναι παράλληλοι (δηλαδή $\theta=0^\circ$ ή $\theta=\pm 180^\circ$) τότε περνάει όλο το φως και ισχύει: $I=I_0$, ενώ, όταν οι άξονες διάδοσης είναι κάθετοι μεταξύ τους ($\theta=90^\circ$), τότε δεν περνάει φως μετά τον αναλυτή, δηλαδή $I=0$. Η ένταση του φωτός I είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός, δηλαδή ισχύει ότι $I \approx E_0^2$, όπου E_0 το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου.

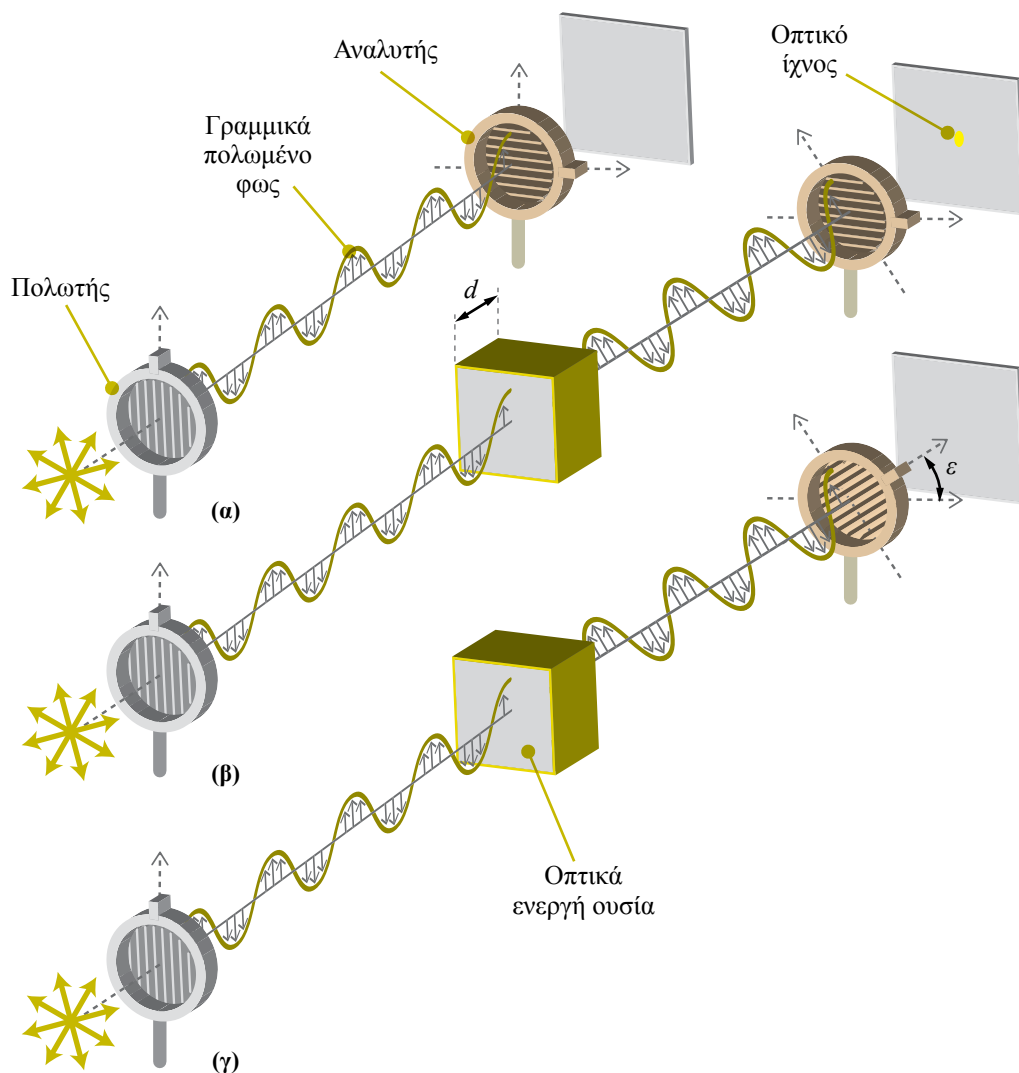
11.3.2.3 Οπτικά ενεργές ουσίες

Οπτική ενεργότητα (optical activity) είναι η ιδιότητα κάποιων ουσιών να στρέφουν το επίπεδο πόλωσης του φωτός, όταν διέρχεται μέσα από αυτές (σχήμα 11.2.β). Η οπτική ενεργότητα οφείλεται στην ασυμμετρία του σχήματος των μορίων που συγκροτούν μια ουσία, π.χ. η οπτική ενεργότητα των πρωτεϊνών οφείλεται στο ελικοειδές σχήμα τους, ενώ άλλα υλικά όπως, π.χ. το γυαλί ή τα πλαστικά, γίνονται οπτικά ενεργά, όταν παραμορφώνονται υπό τάση (εφελκυσμός).

Μια πολύ γνωστή ενεργά οπτική ουσία είναι η ζάχαρη (δεξτρόζη). Η γωνία στροφής (rotary power) ε του επιπέδου πόλωσης σε μια οπτικά ενεργή ουσία εξαρτάται από: (i) το δρόμο d

διέλευσης του πολωμένου φωτός μέσα στο οπτικά ενεργό υλικό, (ii) το μήκος κύματος λ του προσπίπτοντος φωτός και (iii) τη θερμοκρασία, αν πρόκειται για υγρό διάλυμα.

Το φυσικό μέγεθος που εκφράζει την οπτική ενεργότητα ονομάζεται **ειδική στροφική ικανότητα** (specific rotation) $[\alpha]$, η οποία ορίζεται ως η γωνία στροφής του επίπεδου πόλωσης ανά χιλιοστό πάχους του οπτικά ενεργού υλικού.



Σχήμα 11.2 – (α) Οι άξονες του πολωτή και του αναλυτή είναι κάθετοι και στο πέτασμα δε βλέπουμε φως. (β) Η οπτικά ενεργή ουσία μετά τον πολωτή αλλάζει τη διεύθυνση πόλωσης του φωτός και στο πέτασμα βλέπουμε φως. (γ) Στρέφοντας τον αναλυτή κατά γωνία ε ίση με τη γωνία στροφής του φωτός λόγω της οπτικά ενεργής ουσίας και στο πέτασμα δε βλέπουμε φως.

Στην περίπτωση οπτικά ενεργών διαλυμάτων, αν οι μετρήσεις γίνονται στις ίδιες θερμοκρασίες, μπορεί να παρατηρηθεί η γραμμική σχέση μεταξύ της γωνίας στροφής ε (στροφική ικανότητα) και της συγκέντρωσης c του διαλύματος. Η γωνία στροφής ε του επιπέδου πόλωσης μονοχρωματικού φωτός είναι ανάλογη της διαδρομής d του φωτός μέσα στην οπτικά ενεργή ουσία, της ειδικής στροφικής ικανότητας $[\alpha]$ της οπτικά ενεργής ουσίας και της συγκέντρωσης c του διαλύματος:

$$\varepsilon = [\alpha]dc \quad (11.2)$$

Η ειδική στροφική ικανότητα $[\alpha]$ εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος του φωτός λ , η συγκέντρωση c του διαλύματος εκφράζεται σε gr/cm^3 και το μήκος d σε cm . Αν η γωνία δίνεται σε μοίρες, τότε η $[\alpha]$ δίνεται σε $\text{μοίρες} \times \text{cm}^2/\text{gr}$, π.χ. για την περίπτωση υδατικού διαλύματος φυσικού σακχάρου, $[\alpha]=6,645^\circ \text{cm}^2/\text{gr}$.

11.3.3 Εκτέλεση

Μονοχρωματικό φως προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια πολωτή και πολώνεται γραμμικά. Στην συνέχεια διέρχεται από αναλυτή που προσανατολίζεται διαδοχικά σε διαφορετικές γωνίες πόλωσης σε σχέση με τον πολωτή. Η ένταση του φωτός μετά τον αναλυτή μετρείται με πολύμετρο μέσω μιας διάταξης φωτοαντίστασης.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από πηγή λέιζερ, δύο πολωτικά φίλτρα (πολωτή και αναλυτή) και σύστημα μέτρησης της έντασης φωτεινής ακτινοβολίας, τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω σε οπτική τράπεζα.

Για να μετρηθεί η ένταση του πολωμένου φωτός που εξέρχεται από τον αναλυτή, υπάρχει ένα κύκλωμα φωτοαντίστασης. Η φωτοαντίσταση έχει τοποθετηθεί μέσα σε ένα κουτί που φέρει στην πρόσοψή του ένα άνοιγμα και είναι συνδεδεμένη με ένα πολύμετρο, για να μετρούνται οι τιμές της τάσης στα άκρα της. Καθώς η φωτοαντίσταση είναι γραμμικός ανιχνευτής, οι τιμές της τάσης στα άκρα της θα είναι σε αναλογία με την ένταση του φωτός.

1. Στρέψτε τον αναλυτή μέχρι η τιμή της τάσης, και κατά συνέπεια και της έντασης του φωτός στο πολύμετρο, να είναι μέγιστη. Στη θέση αυτή οι άξονες του πολωτή και του αναλυτή είναι παράλληλοι. Καταγράψτε την τιμή αυτή V_{max} της μέγιστης τάσης.
2. Στην συνέχεια στρέψτε τον αναλυτή μέχρι η τιμή της τάσης και, κατά συνέπεια, και της έντασης του φωτός στο πολύμετρο, να είναι ελάχιστη. Στη θέση αυτή οι άξονες του πολωτή και του αναλυτή είναι κάθετοι. Καταγράψτε την τιμή αυτή V_{min} της ελάχιστης τάσης.
3. Επιστρέψτε τον αναλυτή στη θέση όπου η τιμή της τάσης στη φωτοαντίσταση ήταν μέγιστη V_{max} και από τη θέση αυτή μετρήστε τις τιμές της τάσης (έντασης του φωτός), περιστρέφοντας τον αναλυτή ανά 20° , από -180° έως $+180^\circ$. Επαναλάβετε τη διαδικασία για άλλες δύο φορές. Καταγράψτε τα αποτελέσματά σας σε ένα πίνακα μετρήσεων της μορφής του πίνακα 11.1.

θ°	V_1 (V)*	V_2 (V)*	V_3 (V)*	V_{mean} (V)**
-180°	...	...	...	...
-160°				
-140°				
-120°				
-100°				
-80°				
-60°				
-40°				
-20°				
0°				
20°				
40°				
60°				
80°				
100°				
120°				
140°				
160°				
180°				

Πίνακας 11.1 – Καταχώριση μετρήσεων, όπου *τάση πολυμέτρου, **μέση τιμή.

Τα επόμενα βήματα αφορούν στη μέτρηση της ειδικής στροφικής ικανότητας ενός διαλύματος οπτικά ενεργούς ουσίας

Όπως έχουμε δει στο θεωρητικό μέρος, οι οπτικά ενεργές ουσίες προκαλούν μικρή στροφή του επίπεδου πόλωσης του φωτός που διέρχεται από αυτές. Υπάρχουν δύο μέθοδοι μέτρησης της στροφικής ικανότητας των οπτικά ενεργών ουσιών: (i) η μέθοδος των διασταυρωμένων πολωτών και (ii) με χρήση του πολωσίμετρου μισής σκιάς (half-shade principle).

4. Στρέψτε τον αναλυτή μέχρι η ένταση του φωτός στο πολύμετρο να είναι ελάχιστη. Στη θέση αυτή οι άξονες του πολωτή και του αναλυτή είναι κάθετοι (βλέπε σχήμα 11.2.α). Σημειώστε τη γωνία αυτή θ_1 του αναλυτή.
5. Τοποθετήστε το δοχείο με το διάλυμα γλυκόζης γνωστής συγκέντρωσης c , π.χ. $c=0,20\text{g/cm}^3$ φτιάχνονται από 20g γλυκόζης που ζυγίζονται μέσα σε ένα γυάλινο ογκομετρικό δοχείο όπου προστίθεται νερό μέχρι ο συνολικός όγκος να γίνει 100cm^3 . Το δοχείο τοποθετείται κατά μήκος, δηλαδή κατά τη μεγάλη του διάσταση, ανάμεσα στον πολωτή και στον αναλυτή. Προσέξτε η ακτίνα του φωτός να εισέρχεται και να εξέρχεται κάθετα στα τοιχώματα του δοχείου. Η οπτικά ενεργή ουσία θα στρέψει το επίπεδο πόλωσης του φωτός, όταν αυτό διέλθει μέσα από αυτή, με αποτέλεσμα να υπάρχει φως μετά τον πολωτή, όπως μπορείτε να δείτε και στο σχήμα 11.2.β. Η μεταβολή της έντασης του φωτός ανιχνεύεται ως μεταβολή τάσης, με τη χρήση του πολυμέτρου που συνδέεται στο φωτοανιχνευτή.
6. Στρέψτε τον αναλυτή, μέχρι η ένταση του φωτός στο πολύμετρο να είναι και πάλι ελάχιστη (σχήμα 11.2.γ). Σημειώστε τη νέα γωνία θ_2 του αναλυτή. Η διαφορά των γωνιών του αναλυτή, πριν και μετά την παρεμβολή του διαλύματος, μας δίνει τη γωνία στροφής ε του επιπέδου πόλωσης του φωτός, δηλαδή $\varepsilon=|\theta_2-\theta_1|$. Καταγράψτε την γωνία αυτή ως ε_1 .
7. Μετρήστε το μήκος d_1 της διαδρομής του φωτός μέσα στην οπτικά ενεργή ουσία, (μήκος του δοχείου, αν αφαιρεθεί το πάχος των τοιχωμάτων).
8. Επαναλάβετε τα βήματα 4 έως 7, τοποθετώντας το δοχείο με το διάλυμα κατά πλάτος, δηλαδή κατά τη μικρή του διάσταση, ανάμεσα στον πολωτή και στον αναλυτή, και καταγράψτε την νέα γωνία ε_2 καθώς και το νέο μήκος d_2 , αφαιρώντας από τον υπολογισμό το πάχος των τοιχωμάτων του δοχείου.

11.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Υπολογίστε το βαθμό γραμμικής πόλωσης V_{linear} του λέιζερ που χρησιμοποιήσατε, από τη σχέση:

$$V_{linear} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}} \quad (11.3)$$

όπου V_{max} και V_{min} είναι αντίστοιχα η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της τάσης που βρήκατε στο πείραμά σας. Για ένα καλά γραμμικά πολωμένο λέιζερ η τιμή V_{linear} θα πρέπει να είναι: $V_{linear} > 0,98$. Συμφωνεί το αποτέλεσμα που βρήκατε με την παραπάνω σχέση; Σχολιάστε.

2. Σχεδιάστε σε χαρτί μιλιμετρέ τη θεωρητική κατανομή της ανηγμένης έντασης του φωτός I/I_0 ως συνάρτηση της γωνίας θ του άξονα του αναλυτή ως προς τον άξονα του πολωτή, δηλαδή $I/I_0=f(\theta)$, λαμβάνοντας υπόψη ότι $I=I_0\cos^2\theta$ και ότι για $\theta=0^\circ$ και $\theta=180^\circ$ η ένταση του φωτός, σύμφωνα με το νόμο του Malus, πρέπει να είναι η μέγιστη, δηλαδή $I/I_0=1$, ενώ για $\theta=90^\circ$ πρέπει να είναι η ελάχιστη, δηλαδή $I/I_0=0$.
3. Στην συνέχεια κατασκευάστε έναν πίνακα αποτελεσμάτων από το πείραμα του νόμου του Malus, υπολογίζοντας την ανοιγμένη τιμή της έντασης του φωτός I/I_0 ως συνάρτηση της γωνίας θ που μετρήσατε, λαμβάνοντας υπόψη ότι, λόγω της γραμμικότητας της φωτοαντίστασης, θα ισχύει ότι:

$$\frac{V}{V_{max}} = \frac{I}{I_0} \quad (11.4)$$

όπου το πρώτο κλάσμα είναι η ανηγμένη τιμή της τάσης της φωτοαντίστασης που μετρήσατε κατά την εκτέλεση του πειράματός σας. Σχεδιάστε στο ίδιο χαρτί μιλιμετρέ με εκείνο του παραπάνω ερωτήματος την πειραματική κατανομή της ανηγμένης έντασης του φωτός I/I_0

ως συνάρτηση της γωνίας θ . Συγκρίνετε τις δύο γραφικές παραστάσεις. Συμφωνούν ή όχι μεταξύ τους; Σχολιάστε τις τυχόν διαφορές που παρατηρείτε.

4. Από τη σχέση (11.2) του πειράματος, υπολογίστε την ειδική στροφική ικανότητα $[\alpha]$ της οπτικά ενεργής ουσίας που χρησιμοποιήσατε για κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις μετρήσεων (ε_1, d_1) και (ε_2, d_2).
5. Υπολογίστε τη μέση τιμή της ειδικής στροφικής ικανότητας $[\alpha]_{\text{mean}}$ από την επεξεργασία του προηγούμενου βήματος.

11.4 Πείραμα 2

11.4.1 Σκοπός

Η μέτρηση της ειδικής στροφικής ικανότητας διαλύματος οπτικά ενεργής ουσίας με πολωσίμετρο μισής σκιάς.

11.4.2 Θεωρία

11.4.2.1 Πολωσίμετρο μισής σκιάς

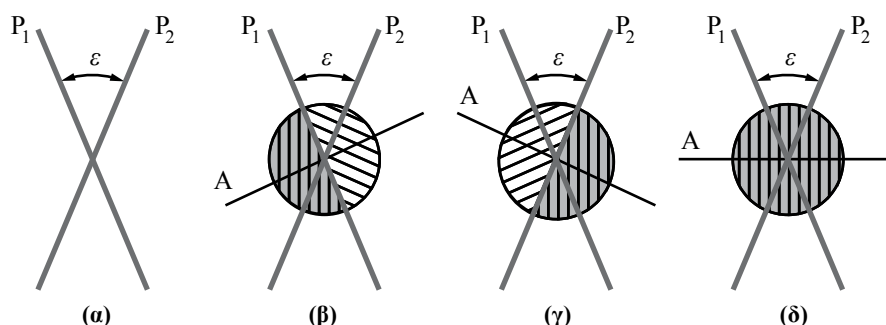
Το πολωσίμετρο (polarimeter) είναι μια διάταξη που αποτελείται από έναν πολωτή P και έναν αναλυτή A διασταυρωμένους μεταξύ τους, ενώ ανάμεσά τους παρεμβάλλεται ένας διαφανής σωλήνας που περιέχει οπτικά ενεργό διάλυμα.

Στην περίπτωση που η γωνία μεταξύ των αξόνων πόλωσης πολωτή και αναλυτή είναι $\theta=0^\circ$, η ένταση του φωτός μετά τον αναλυτή είναι ίση με αυτή, πριν διέλθει από αυτόν, δηλαδή $I=I_0$ και όταν $\theta=90^\circ$ το I είναι ελάχιστο, βλέπε σχέση (11.1).

Στην περίπτωση του πολωσιμέτρου μισής σκιάς, υπάρχουν δύο πολωτές, P_1 και P_2 , και ένας αναλυτής A , όπως στο σχήμα 11.3.β. Το μισό στο πεδίο παρατήρησης καλύπτεται από το δεύτερο πολωτή P_2 , που μπορεί να περιστρέφεται κατά πολύ μικρές γωνίες. Σύμφωνα με τη σχέση (11.1) οι μεταβολές της γωνίας ε μεταξύ των δύο πολωτών θα μεταβάλουν την ένταση I στο μισό του οπτικού πεδίου παρατήρησης.

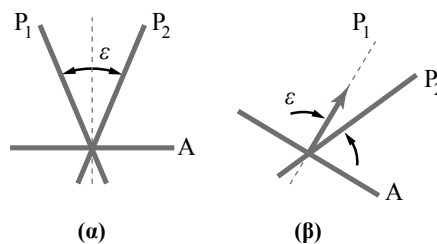
Για να είναι αισθητές οι μικρές αλλαγές φωτεινότητας από το ανθρώπινο μάτι, ο τρίτος πολωτής, που χρησιμοποιείται σαν αναλυτής, τίθεται σε γωνία περίπου 80° . Σύμφωνα με τη σχέση (11.1) η ένταση της φωτεινότητας μετά τον αναλυτή είναι εξασθενημένη και, γενικά, διαφορετική στα δύο μισά του οπτικού πεδίου.

Η φωτεινότητα στα δύο μισά γίνεται ίδιας έντασης, όταν η διεύθυνση πόλωσης του αναλυτή αντιστοιχεί στο μισό της γωνίας σύμφωνα με την οποία οι δύο προηγούμενοι πολωτές έχουν περιστραφεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 11.3.



Σχήμα 11.3 – Αρχή λειτουργίας του πολωσιμέτρου μισής σκιάς.

Αν το επίπεδο πόλωσης περιστρέφεται ακόμα κατά μια γωνία μεταξύ πολωτή και αναλυτή λόγω του οπτικά ενεργού μέσου που παρεμβάλλεται μεταξύ του πολωτή P_2 και του αναλυτή A , ο αναλυτής πρέπει να περιστραφεί κατά την ίδια γωνία, για να αποκτήσουν την ίδια φωτεινότητα τα δύο μισά του οπτικού πεδίου του πολωσιμέτρου (βλέπε σχήμα 11.4).



Σχήμα 11.4 – Διευθύνσεις πόλωσης των πολωτών: (α) χωρίς την παρεμβολή οπτικά ενεργού μέσου, η ένταση της φωτεινότητας των δύο μισών οπτικών πεδίων είναι ίση, (β) αλλαγή της διεύθυνσης πόλωσης μέσω ενός οπτικά ενεργού μέσου, η γωνία περιστροφής του αναλυτή, για να πετύχουμε την ίδια φωτεινότητα στα δύο μισά, αντιστοιχεί στην αλλαγή της γωνίας πόλωσης του φωτός λόγω του οπτικά ενεργού μέσου.

11.4.3 Εκτέλεση

1. Για την εκτέλεση αυτού του μέρους θα χρησιμοποιηθεί το πολωσίμετρο μισής σκιάς. Η διάταξη αυτή έχει σταθερά τοποθετημένους τους δύο πολωτές στο μπροστινό μέρος του σωλήνα και τον αναλυτή στο πίσω μέρος (βλέπε θεωρία του πειράματος 2).
2. Για τον υπολογισμό της γωνίας περιστροφής του επιπέδου πόλωσης μέσω μιας οπτικά ενεργού ένωσης, χρησιμοποιείται το διάλυμα της συγκέντρωσης που δημιουργήσατε στο πρώτο μέρος του πειράματος αυτού. Χωρίς το σωλήνα μέσα στο πολωσίμετρο, περιστρέψτε τον αναλυτή, μέχρι να παρατηρήσετε την ίδια φωτεινότητα στα δύο ημισφαίρια. Σημειώστε τη γωνία φ_1 στη θέση αυτή.
3. Γεμίστε το σωλήνα του πολωσιμέτρου με το διάλυμα και τοποθετήστε το μεταξύ των πολωτών και του αναλυτή. Θα παρατηρήσετε ότι τώρα η φωτεινότητα στα δύο ημισφαίρια έχει μεταβληθεί και δεν είναι πλέον η ίδια. Περιστρέψτε τον αναλυτή μέχρι να παρατηρήσετε και πάλι την ίδια φωτεινότητα στα δύο ημισφαίρια. Σημειώστε τη γωνία φ_2 στη νέα αυτή θέση. Η γωνία στροφής ε του φωτός, λόγω της οπτικά ενεργής ουσίας, ισούται με τη διαφορά των δύο γωνιών που σημειώσατε, δηλαδή $\varepsilon_3 = |\varphi_2 - \varphi_1|$.
4. Μετρήστε το μήκος d_s του σωλήνα του πολωσιμέτρου.

11.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων

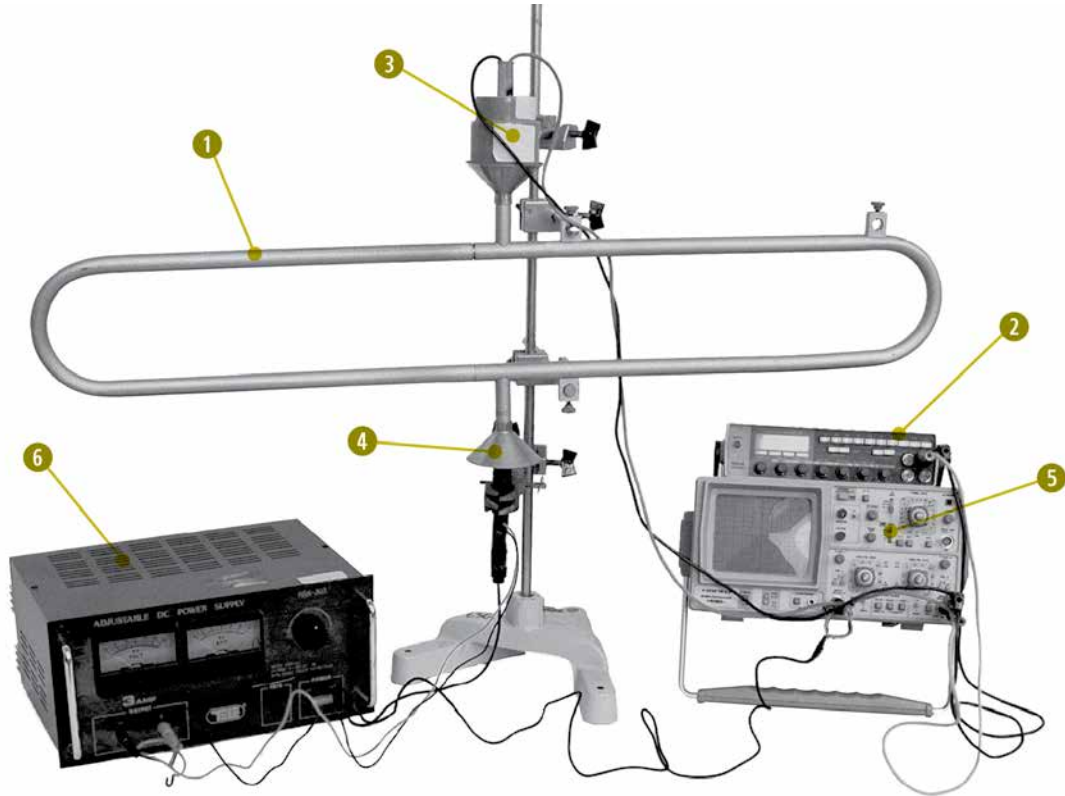
1. Από τη σχέση (11.2) του πειράματος, υπολογίστε την ειδική στροφική ικανότητα $[\alpha]$ διαλυμάτων ζάχαρης διαφορετικής συγκέντρωσης. Η συγκέντρωση του διαλύματος c εκφράζεται σε g/cm^3 ενώ το μήκος d σε cm .
2. Υπολογίστε την στροφική ικανότητα $[\alpha]$ των διαλυμάτων που μετρήσατε.

11.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] *Handbook Laser Physics I, Experiments with Coherent Light*, No. 01179.02, PHYWE series of publications, Göttingen: German, 1990.
- [2] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves, polarization waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 491, pp. 465-487.
- [3] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 21: Polarization of Light Waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 561-569.

ΑΣΚΗΣΗ 12

Ταχύτητα του ήχου στον αέρα με το συμβολόμετρο Quinke



12.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Συμβολόμετρο Quinke.
2. Γεννήτρια ηλεκτρικής ημιτονοειδούς τάσης, ρυθμιζόμενης συχνότητας (για το μεγάφωνο).
3. Μεγάφωνο.
4. Πιεζομικρόφωνο.
5. Παλμογράφος.
6. Τροφοδοτικό DC τάσης (για το μικρόφωνο).
7. Βερνιέρος.

12.2 Απαραίτητες γνώσεις

Τι είναι ήχος, αέρια, μεταβολές αερίων, κύματα, συμβολή κυμάτων.

12.3 Πείραμα

12.3.1 Σκοπός

- Μελέτη του φαινομένου της συμβολής δυο ηχητικών κυμάτων με ίδιες συχνότητες, πλάτος και φάση.
- Υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στον αέρα.

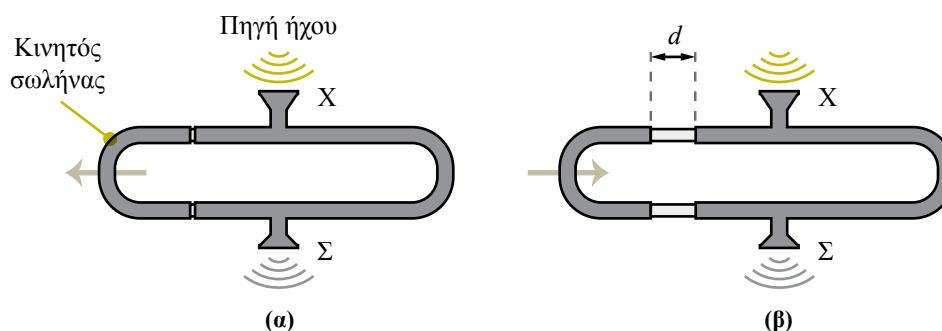
12.3.2 Θεωρία

Εκτός από όσα αναφέρονται εδώ, μελετήστε και τη θεωρία της άσκησης 9

12.3.2.1 Συμβολόμετρο του Quinke

Το συμβολόμετρο του Quinke, που φαίνεται στο σχήμα 12.1, αποτελείται από δυο μεταλλικούς σωλήνες, από τους οποίους ο ένας μπορεί να ολισθαίνει μέσα στον άλλο (κινητός σωλήνας). Διαθέτει δυο χοάνες (X και Σ) για την είσοδο και έξοδο των ηχητικών κυμάτων αντίστοιχα. Στην έξοδο Σ συμβάλλουν τα ηχητικά κύματα και το αποτέλεσμα της συμβολής τους εξαρτάται από το πόσο έχει μετακινηθεί ο κινητός σωλήνας.

Η γεννήτρια ηλεκτρικής τάσης που χρησιμοποιείται στο πείραμα αυτό έχει δυνατότητα παραγωγής ημιτονοειδών, τετραγωνικών, και τριγωνικών σημάτων. Στο πείραμα αυτό τροφοδοτεί το μεγάφωνο με ρεύμα ημιτονοειδούς μορφής, ρυθμίζοντας με το κατάλληλο κουμπί. Επίσης με τη βοήθεια άλλων κουμπιών επιλέγεται η επιθυμητή συχνότητα.



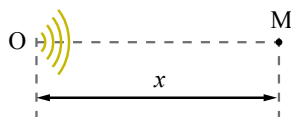
Σχήμα 12.1 – Συμβολόμετρο Quinke.

Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (piezoelectric effect) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν ασκηθεί πίεση σε ένα υλικό συγκεκριμένης κρυσταλλικής δομής, δημιουργείται στην επιφάνεια του υλικού ηλεκτρικό πεδίο. Αντίστροφα, όταν σε πιεζοηλεκτρικό υλικό εφαρμοστεί ηλεκτρική τάση, τότε δημιουργούνται μηχανικές τάσεις ανάλογες της μορφής του ηλεκτρικού πεδίου στον όγκο του. Για παράδειγμα, αν η ηλεκτρική τάση είναι εναλλασσόμενη μορφής, τότε και οι μηχανικές τάσεις θα έχουν την ίδια μορφή.

Το πιεζομικρόφωνο αποτελείται από λεπτά πλακίδια πιεζοηλεκτρικού υλικού που έχουν επικολληθεί πάνω σε μεμβράνη. Τα ηχητικά κύματα προκαλούν κάμψη του πλακιδίου που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων.

12.3.2.2 Φαινόμενο συμβολής διαμήκων κυμάτων (interference)

Έστω ότι στο σημείο O, υπάρχει πηγή αρμονικών μηχανικών διαμήκων κυμάτων (longitudinal waves), όπως στο σχήμα 12.2, που διαδίδονται με ταχύτητα v μέσα σε μέσο.



Σχήμα 12.2 – Εκπομπή μηχανικών κυμάτων (διαμήκων) από σημειακή πηγή σε υλικό μέσο.

Στο σημείο O οι ταλαντώσεις του υλικού μέσου θα είναι της μορφής:

$$\xi = \xi_0 \sin(\omega t) \Rightarrow \xi = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (12.1)$$

όπου ξ_0 το πλάτος της ταλάντωσης.

Ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσουν τα κύματα από το σημείο Ο στο σημείο Μ, το οποίο απέχει απόσταση x , είναι: $\tau = x/v$.

Επομένως η απομάκρυνση στη θέση x τη χρονική στιγμή t θα είναι το πλάτος ξ της ταλάντωσης (στιγμιαία απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας) που είχε το σημείο Ο τη χρονική στιγμή $t_1 = t - \tau$.

Δηλαδή, η εξίσωση διάδοσης του κύματος (progressive wave function) θα έχει τη μορφή:

$$\xi = \xi_0 \sin(\omega t_1) \Rightarrow \xi = \xi_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \quad (12.2)$$

Επειδή η ταχύτητα του κύματος είναι:

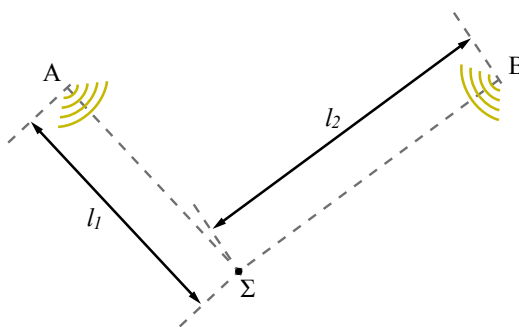
$$v = \lambda f = \frac{\lambda}{T} \quad (12.3)$$

όπου f η συχνότητα και λ το μήκος κύματος, η εξίσωση (12.2) μπορεί να γραφεί:

$$\xi = \xi_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (12.4)$$

Στη σχέση (12.4), η ποσότητα μέσα στις αγκύλες $\sin[\dots]$ ονομάζεται φάση του κύματος.

Έστω οι δυο πηγές Α, Β αρμονικών κυμάτων, όπως στο σχήμα (12.3), οι οποίες εκπέμπουν κύματα με το ίδιο μήκος κύματος λ , την ίδια αρχική φάση και το ίδιο πλάτος ξ_0 . Σε ένα σημείο Σ τα κύματα αυτά συμβάλλουν και η κίνηση που θα κάνει το σημείο Σ θα είναι η συνισταμένη των δυο ταλαντώσεων.



Σχήμα 12.3 – Εκπομπή κυμάτων από δύο πηγές, Α και Β, που συμβάλλουν στο σημείο Σ.

Η απομάκρυνση του σημείου Σ λόγω του κύματος από την πηγή Α που απέχει απόσταση l_1 από το Σ, θα είναι:

$$\xi_1 = \xi_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l_1}{\lambda} \right) \right] \quad (12.5)$$

Η απομάκρυνση του σημείου Σ, λόγω του κύματος από την πηγή Β που απέχει απόσταση l_2 από το Σ, θα είναι:

$$\xi_2 = \xi_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l_2}{\lambda} \right) \right] \quad (12.6)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η απομάκρυνση για το κύμα που προκύπτει από τη συμβολή των δύο κυμάτων θα είναι:

$$\xi_{o\lambda} = \xi_1 + \xi_2 = \xi_0 \left\{ \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l_1}{\lambda} \right) \right] + \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l_2}{\lambda} \right) \right] \right\} \quad (12.7)$$

και επειδή:

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (12.8)$$

θα ισχύει:

$$\xi_{o\lambda} = 2\xi_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{l_2 - l_1}{2\lambda} \right) \right] \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l_1 + l_2}{2\lambda} \right) \right] \quad (12.9)$$

Το πλάτος της αρμονικής ταλάντωσης δίνεται ως:

$$2\xi_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{\Delta l}{2\lambda} \right) \right] \quad (12.10)$$

όπου $\Delta l = l_2 - l_1$.

Από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι το πλάτος της ταλάντωσης στη συμβολή εξαρτάται από τη διαφορά δρόμου των δύο κυμάτων.

Συγκεκριμένα στα σημεία όπου η διαφορά δρόμου των δύο κυμάτων είναι $\Delta l = k\lambda$ ($k=0, 1, 2, 3, \dots$) το πλάτος παίρνει μέγιστη τιμή $2\xi_0$. (ενίσχυση από συμβολή) και στα σημεία όπου η διαφορά δρόμου είναι $\Delta l = (k+1)\lambda/2$ ($k=0, 1, 2, 3, \dots$) το πλάτος είναι μηδέν (εξασθένηση ή απόσβεση). Δηλαδή, εξαιτίας της συμβολής, αλλού έχουμε εξασθένηση και αλλού ενίσχυση.

Στους ήχους οι οποίοι αποτελούνται από διαμήκη κύματα μπορεί να παρατηρηθούν φαινόμενα συμβολής.

Γενικά, είναι πάρα πολύ δύσκολο να πάρουμε δύο ακριβώς όμοια κύματα από δύο διαφορετικές πηγές. Η πιο συνηθισμένη τεχνική που χρησιμοποιείται σε πειράματα συμβολής είναι η δημιουργία δύο ή περισσότερων ομοίων κυμάτων από το ίδιο αρχικό κύμα.

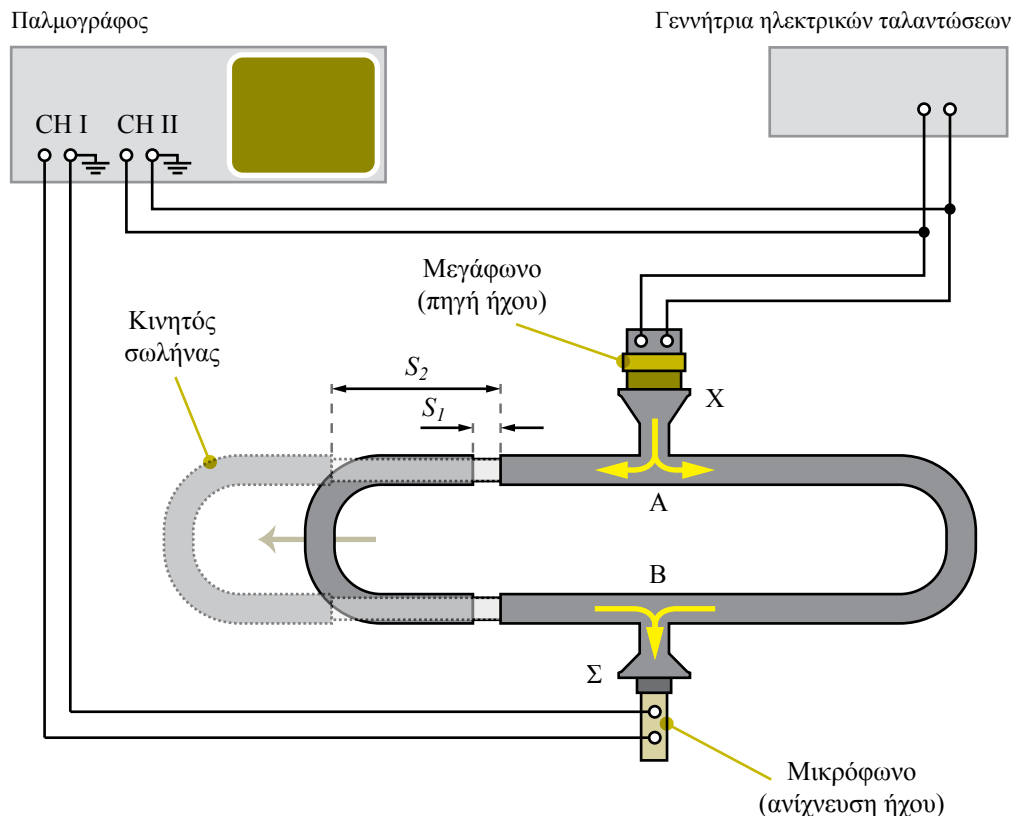
Στο συμβολόμετρο του Quinke του πειράματος ένα ηχητικό κύμα εισέρχεται στο σωλήνα δια μέσου της χοάνης X (βλέπε σχήμα 12.4) και, στη συνέχεια, χωρίζεται με φυσικό τρόπο σε δυο ακριβώς όμοια κύματα που έχουν την ίδια φάση.

Το ένα κύμα ακολουθεί την αριστερή διαδρομή μέσα στο σωλήνα και το άλλο τη δεξιά. Τα δύο αυτά κύματα συναντιούνται και συμβάλλουν στην έξοδο του σωλήνα στη δεύτερη χοάνη Σ. Η συμβολή τους θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση (ενισχυτική συμβολή) ή την ελάττωση (αποσβεστική συμβολή) της έντασης του ήχου, ανάλογα με τη διαφορά φάσης των δυο κυμάτων στο στόμιο του σωλήνα, στην έξοδο.

Αυτή η διαφορά φάσης οφείλεται στη διαφορά δρόμου Δl , ανάμεσα στα δυο κύματα. Αν το μήκος κύματος του ήχου (στον αέρα) είναι λ , τότε υπάρχει ενίσχυση της έντασης του ήχου για $\Delta l = k\lambda$ ($k=0, 1, 2, 3, \dots$) και εξασθένηση της έντασης του ήχου για $\Delta l = (k+1)\lambda/2$ ($k=0, 1, 2, 3, \dots$). Όταν ο κινητός σωλήνας είναι κλειστός ($\Delta l=0$). Αν μετακινηθεί το κινητό μέρος του σωλήνα κατά S , αυτή η μετακίνηση αντιστοιχεί σε διαφορά δρόμου $\Delta l=2S$.

12.3.2.3 Φαινόμενο συμβολής κυμάτων στο σωλήνα Quinke

Στο σημείο Α ο ήχος (μηχανικό διαμήκες κύμα) διαχωρίζεται σε δύο όμοια ηχητικά κύματα, τα οποία διαδίδονται μέσα στο σωλήνα, το ένα ακολουθώντας τη δεξιά διαδρομή και το άλλο την αριστερή. Στο σημείο Β γίνεται η συμβολή των δύο κυμάτων. Η απόσταση $S = S_2 - S_1$ ανάμεσα σε δύο επιμηκύνσεις του κινητού μέρους του σωλήνα τέτοιες, ώστε να επιτευχθούν δύο διαδοχικές αποσβέσεις ή ενισχύσεις της συμβολής, ισούται με $\lambda/2$.



Σχήμα 12.4 – Σχηματικό διάγραμμα της συνδεσμολογίας του πειράματος. Το μεγάφωνο χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του ηχητικού σήματος, ενώ το πιεζομικρόφωνο μετατρέπει τις μοριακές ταλαντώσεις του αέρα σε ηλεκτρικούς παλμούς.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 12.4, για να δημιουργηθούν στάσιμα διαμήκη κύματα (stationary longitudinal waves), η συνολική διαδρομή που πρέπει να αλλάξει στο ένα από τα δύο κύματα που συμβάλουν, ώστε να πετύχουμε δύο διαδοχικές αποσβέσεις ή ενισχύσεις συμβολής, πρέπει να ισούται με ένα μήκος κύματος λ . Η συνολική επιμήκυνση του κινητού σωλήνα ισούται με $2S = \lambda$. Το μήκος κύματος του ήχου προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{\lambda}{2} \quad (12.11)$$

Με $S = S_2 - S_1$, όπου S_1 η απόσταση κατά την οποία πρέπει να μεταβληθεί το μήκος του κινητού σωλήνα, για να διαπιστώσουμε ένα ελάχιστο (ή μέγιστο) της έντασης του ήχου και S_2 η απόσταση, κατά την οποία πρέπει να μεταβληθεί το μήκος του κινητού σωλήνα, για να διαπιστώσουμε το αμέσως επόμενο ελάχιστο (ή μέγιστο) της έντασης του ήχου.

12.3.2.4 Αρχή μέτρησης του ελαχίστου

Ο εντοπισμός των ελαχίστων αντί των μεγίστων του στάσιμου κύματος είναι ακριβέστερος. Σύμφωνα με το νόμο Fehner-Weber η ελάχιστη εκτιμώμενη διαφορά της έντασης δυο ήχων είναι ανάλογη της έντασης. Αν η συχνότητα f είναι γνωστή, τότε η ταχύτητα του ήχου v μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $v = f\lambda$, οπότε αντικαθιστώντας όπου $\lambda = 2S$ παίρνουμε:

$$v = 2fS \quad (12.12)$$

Μπορούμε, επίσης, να βρούμε την ταχύτητα του ήχου v_0 σε κανονικές συνθήκες ($T_0=273^\circ\text{K}$ και $p_0=1\text{atm}$) από τη σχέση:

$$v_0 = v \sqrt{\frac{T_0}{T}} = 2fS \sqrt{\frac{T_0}{T}} \quad (12.13)$$

όπου T η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

12.3.2.5 Υπολογισμός της αδιαβατικής σταθεράς αερίου

Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στα αέρια δίνεται από τη σχέση:

$$v = \sqrt{\frac{p\gamma}{d}} \quad (12.14)$$

όπου p η πίεση του αερίου, d η πυκνότητά του και $\gamma=C_p/C_v$. Αν συμβολίσουμε d_0 την πυκνότητα του αέρα σε $T_0=273^\circ\text{K}$ και $p_0=1\text{atm}$ ($p_0=1,01325\times 10^5\text{N/m}^2\text{atm}$) θα έχουμε:

$$d = d_0 \frac{pT_0}{p_0T} \quad (12.15)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (12.15) στη σχέση (12.14) παίρνουμε τελικά:

$$\gamma = d_0 \frac{d_0 T_0}{p_0 T} v^2 \quad (12.16)$$

12.3.3 Εκτέλεση

Ένα ηλεκτρικό εναλλασσόμενο ημιτονοειδές σήμα που παράγεται από μια ηλεκτρική γεννήτρια συχνοτήτων, μετατρέπεται σε ηχητικό κύμα με τη βοήθεια ενός μεγαφώνου. Στη συνέχεια το ηχητικό αυτό κύμα εισάγεται μέσα στη συσκευή Quinke, όπου διαχωρίζεται με φυσικό τρόπο (διακλαδίζεται συμμετρικά ο σωλήνας) σε δύο όμοια ηχητικά κύματα, τα οποία διανύουν χωριστές διαδρομές μέσα στους δυο σωλήνες.

Τα δύο ηχητικά κύματα συμβάλουν στην έξοδο των δύο σωλήνων. Το αποτέλεσμα της συμβολής των δυο ηχητικών κυμάτων μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα μέσου ενός μικροφώνου. Το νέο ηλεκτρικό σήμα απεικονίζεται σε παλμογράφο.

Μετρώντας τη διαφορά δρόμων των δύο ηχητικών κυμάτων για δύο διαδοχικά ελάχιστα συμβολής (ή μέγιστα συμβολής), με τη βοήθεια κατάλληλης σχέσης υπολογίζεται το μήκος κύματος λ του ήχου.

Από τη σχέση $v=\lambda f$ υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον αέρα. Όταν είναι γνωστή η ταχύτητα v του ήχου στον αέρα, μπορεί να υπολογιστεί και ο λόγος $\gamma=C_p/C_v$ του αέρα.

1. Αναγνωρίστε τα όργανα και ελέγξτε τη συνδεσμολογία των συσκευών όπως δείχνεται στο σχήμα (12.4).
2. Η μία διαδρομή του ήχου μέσα στη συσκευή του Quinke μπορεί να αλλάζει μήκος, γλιστρώντας το ένα μέρος του σωλήνα που είναι κινητό μέσα στο άλλο. Εξοικειωθείτε με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος. Μετά κλείστε τελείως το κινητό μέρος του σωλήνα, ώστε η διαδρομή και των δύο σωλήνων να είναι η ίδια.
3. Ανοίξτε (power ON) τη γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης και τον παλμογράφο.
4. Να δώσετε από τη γεννήτρια ένα σήμα $V=V_0 \sin(\omega t)$, με μια συχνότητα f της επιλογής σας στην περιοχή από 800Hz έως 3000Hz και ένα πλάτος $V_0=0,5\text{V}$.

5. Να συγκρίνετε μέσω του παλμογράφου τα ηλεκτρικά σήματα εισόδου και εξόδου της συσκευής Quinke, απεικονίζοντάς τα στον παλμογράφο ταυτόχρονα, με χρήση της DUAL λειτουργίας. Ως είσοδο λαμβάνουμε το ηλεκτρικό σήμα της γεννήτριας που στη συνέχεια μετατρέπεται με ένα μεγάφωνο σε ηχητικό και ως έξοδο λαμβάνουμε το ηλεκτρικό σήμα που παράγει το μικρόφωνο. Το μικρόφωνο μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα το αποτέλεσμα συμβολής των δύο ηχητικών κυμάτων. Τα δυο ηχητικά κύματα που συμβάλουν τα βλέπουμε στον παλμογράφο με μορφή ηλεκτρικών σημάτων.
6. Για συχνότητα της επιλογής σας, από 800Hz έως 1300Hz, αρχίστε να ανοίγετε σιγά-σιγά το κινητό μέρος του σωλήνα, μέχρι να βρείτε το πρώτο ελάχιστο (πλάτος) του σήματος εξόδου (αποσβεστική συμβολή) και μετρήστε με το παχύμετρο την απόσταση που έχει ανοίξει ο σωλήνας (θέση πρώτης απόσβεσης). Συνεχίστε να ανοίγετε σιγά-σιγά το κινητό μέρος του σωλήνα, μέχρι να βρείτε το δεύτερο ελάχιστο του σήματος εξόδου, και μετρήστε και πάλι με το παχύμετρο την απόσταση που έχει ανοίξει ο σωλήνας (θέση δεύτερης απόσβεσης).
Ο σωλήνας της διάταξης είναι βαθμονομημένος. Η πρώτη του ένδειξη είναι στα 3cm, και οι επόμενες είναι ανά 1cm. Επομένως, για μετρήσεις μεγάλων διαστημάτων στις οποίες δε φτάνει το παχύμετρο να τις μετρήσει, μπορείτε να υπολογίσετε την απόσταση, κάνοντας χρήση του παχύμετρου σε συνδυασμό με τη βαθμονόμηση του σωλήνα. Επαναλάβετε την παραπάνω διαδικασία, προσπαθώντας να βρείτε αυτή τη φορά το πρώτο και το δεύτερο μέγιστο του σήματος εξόδου (ενισχυτική συμβολή).
7. Επαναλάβετε ολόκληρη τη διαδικασία που περιγράφεται στο βήμα 7, για μία ακόμη φορά.
8. Επαναλάβετε ολόκληρη τη διαδικασία που περιγράφεται στο βήμα 7 και 8, για μία άλλη συχνότητα της επιλογής σας, από 800Hz έως 1.300Hz (δύο φορές για κάθε συχνότητα).
9. Καταγράψτε τις μετρήσεις σας σε πίνακα, όπως ο πίνακας 12.1.

Σήμα εξόδου	f_1 (Hz)*		f_2 (Hz)*	
	Μέτρηση 1	Μέτρηση 2	Μέτρηση 3	Μέτρηση 4
S_1 (mm)**	...	...	...	...
S_2 (mm)**	...	...	...	...
$S=S_2-S_1$ (mm)	...	...	...	...
S_{avg} (mm)***	...		...	
S_1 (mm)†	...	...	...	...
S_2 (mm)†	...	...	...	...
$S=S_2-S_1$ (mm)	...	...	...	...
S_{avg} (mm)***	...		...	

Πίνακας 12.1 – Καταχώριση μετρήσεων. *ένδειξη γεννήτριας συχνοτήτων, **θέση πρώτης/δεύτερης απόσβεσης, ***μέση τιμή της απόστασης S , †θέση πρώτης/δεύτερης ενίσχυσης.

10. Μετρήστε με θερμόμετρο, που υπάρχει στο χώρο του εργαστηρίου τη θερμοκρασία δωματίου. Θα σας χρειαστεί κατά την επεξεργασία των μετρήσεων, για να υπολογίσετε θεωρητικά το λόγο γ του αέρα.

12.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Υπολογίστε για κάθε συχνότητα και για κάθε μέτρηση την μέση τιμή S_{avg} της απόστασης S του κινητού σωλήνα για δύο διαδοχικά ελάχιστα και για δύο διαδοχικά μέγιστα του σήματος εξόδου, δηλαδή θα υπολογίσετε τέσσερις τιμές του S_{avg} .
2. Υπολογίστε, για κάθε τιμή του S_{avg} , από τη σχέση (12.12) τη ταχύτητα του ήχου v . Από τις τέσσερις τιμές του ήχου που βρήκατε, υπολογίστε τη μέση τιμή (v_{avg}) της ταχύτητας του ήχου και το σφάλμα της μέσης τιμής. Γράψτε το αποτέλεσμα ως: $v = \dots \pm \dots$ (μονάδες). Από τη βιβλιογραφία, βρείτε την τιμή της ταχύτητας του ήχου στο αέρα και συγκρίνετέ την με την τιμή που υπολογίσατε.

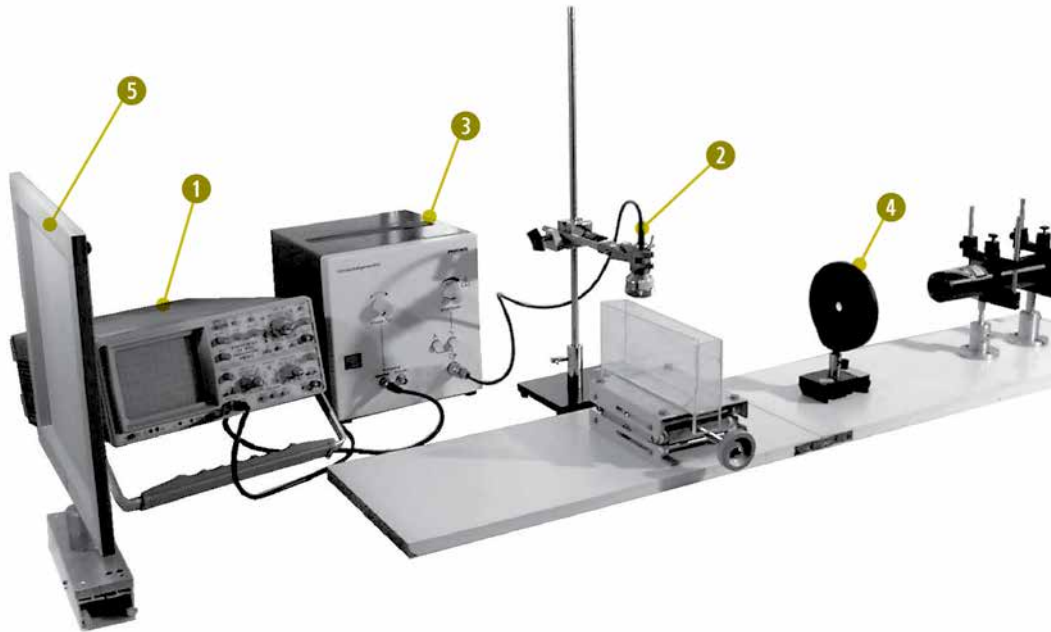
3. Από τη θερμοκρασία θ του δωματίου που μετρήσατε κατά τη διάρκεια του πειράματος, υπολογίστε την απόλυτη θερμοκρασία T . Από τη σχέση (12.13), υπολογίστε την ταχύτητα v_θ του ήχου σε κανονικές συνθήκες. Δεδομένου ότι $d_\theta = 1,293 \times 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$, υπολογίστε από τη σχέση (12.16) τον λόγο $\gamma = C_p/C_v$. Συγκρίνετε την τιμή του γ που υπολογίσατε με εκείνη που έχει ένα ιδανικό αέριο ($\gamma=1,4$).

12.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 465-487.
- [2] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves, Measurement of speed of sound,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 488-489, pp.493-497.
- [3] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 37: Inference of Light Waves,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.

ΑΣΚΗΣΗ 13

Υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου στα ρευστά



13.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Παλμογράφος.
2. Πηγή υπερήχων.
3. Τροφοδοτικό πηγής υπερήχων.
4. Φακός, συγκλίνων με εστιακή απόσταση +20mm.
5. Πέτασμα.

Προσοχή: Φροντίζετε να έχετε τη γεννήτρια των υπερήχων κλειστή, όταν η κεφαλή της βρίσκεται έξω από το υγρό (υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης).

13.2 Απαραίτητες γνώσεις

Τι είναι ήχος, υπέρηχοι, φράγμα υπερήχων, ταχύτητα του ήχου, συχνότητα, μήκος κύματος, ηχητική πίεση, στάσιμα κύματα.

13.3 Πείραμα

13.3.1 Σκοπός

- Προσδιορισμός του μήκους κύματος του ήχου στα ρευστά (νερό) μέσω της προβολής του ειδώλου πάνω σε πέτασμα και στη συνέχεια ο υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου.
- Μελέτη της εξάρτησης της ταχύτητας του ήχου από τη θερμοκρασία του ρευστού.

13.3.2 Θεωρία

13.3.2.1 Ήχος

Ο ήχος είναι μηχανικό διαμήκες κύμα (longitudinal wave) και το φως είναι εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Ήχο γενικά καλούμε το αίτιο, το οποίο διεγείρει το αισθητήριο της

ακοής. Ο ήχος δε διαδίδεται στο κενό, γιατί είναι μηχανικό κύμα και χρειάζεται υλικό μέσο, π.χ. άτομα ή μόρια αερίων – υγρών – στερεών, για να διαδοθεί. Τα ηχητικά κύματα είναι τα κύματα που προκαλούνται σε ένα μέσο λόγω παλμικής κίνησης του μέσου.

Ο ήχος είναι μηχανικό (ελαστικό) κύμα, γιατί η ταχύτητα διάδοσης του εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης και την πυκνότητα του. Οι ήχοι που μπορεί να ακούσει ο άνθρωπος βρίσκονται στην περιοχή συχνοτήτων 16Hz–20.000Hz. Τα ηχητικά κύματα είναι διαμήκη κύματα, γιατί οι ταλαντώσεις των σωματιδίων του μέσου γίνονται κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Παρατηρούμε ότι σε άλλες περιοχές προκύπτει πύκνωμα και σε άλλες αραιώμα των σωματιδίων του μέσου (πυκνώματα και αραιώματα). Τα διαμήκη κύματα, όπως και τα εγκάρσια, διακρίνονται σε διαδιδόμενα ή τρέχοντα, όπου συμβαίνει μετακίνηση της φάσης και μεταφορά της ενέργειας από σημείο του μέσου σε άλλο σημείο, και σε στάσιμα κύματα, όπου η φάση δε μετατοπίζεται και η ενέργεια δε μεταφέρεται.

Στα στάσιμα κύματα τα σημεία του μέσου που παραμένουν συνεχώς ακίνητα ονομάζονται δεσμοί, και απέχουν απόσταση ίση με το μισό του μήκους κύματος. Τα σημεία που βρίσκονται στο μέσον της απόστασης μεταξύ δύο δεσμών και ονομάζονται κοιλίες, και ταλαντώνονται με το μέγιστο πλάτος. Κατά τη διάδοση ενός στάσιμου κύματος δε συμβαίνει μεταφορά ύλης του μέσου αλλά μόνο διάδοση ενέργειας, και αυτό μόνο στα τρέχοντα κύματα, σε αντίθεση με τα στάσιμα, όπου δε μεταφέρεται ενέργεια.

13.3.2.2 Ταχύτητα διάδοσης ηχητικών κυμάτων

Η ταχύτητα του ήχου είναι η απόσταση που διανύθηκε κατά τη διάρκεια μιας μονάδας του χρόνου από ένα ηχητικό κύμα που διαδίδεται σε ελαστικό μέσο. Σε ξηρό αέρα στους 20°C, η ταχύτητα του ήχου είναι 343,2m/s. Αυτό ισοδυναμεί με 1235,62km/h, ή περίπου 1km ανά 3s.

Συνήθως η ταχύτητα του ήχου αναφέρεται στην ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων στον αέρα. Ωστόσο, η ταχύτητα του ήχου διαφέρει από υλικό σε υλικό. Ο ήχος ταξιδεύει ταχύτερα σε υγρά και μη πορώδη στερεά από ό,τι στον αέρα. Ταξιδεύει περίπου 4,3 φορές πιο γρήγορα στο νερό (1484m/s) και σχεδόν 15 φορές πιο γρήγορα σε σίδηρο (5120m/s), σε σχέση με τον αέρα στους 20°C.

Η ταχύτητα του ήχου μέσα σε ένα υλικό εξαρτάται από το μέτρο της σκληρότητας αυτού του υλικού (η αντίσταση που παρουσιάζει ένα ελαστικό υλικό κατά την παραμόρφωσή του, όταν ασκείται σε αυτό μια δύναμη), και από την πυκνότητά του.

Για παράδειγμα, ο ήχος θα ταξιδέψει 1,59 φορές γρηγορότερα στο νικέλιο (Ni) από ό,τι στο χαλκό (Cu), λόγω της μεγαλύτερης ακαμψίας του νικελίου παρόλο που έχουν περίπου την ίδια πυκνότητα. Ο ήχος ταξιδεύει περίπου 1,41 φορές πιο γρήγορα στο ελαφρύτερο αέριο του υδρογόνου (πρώτιο) σε σύγκριση με το βαρύτερο υδρογόνο (δευτέριο). Το δευτέριο έχει παρόμοιες ιδιότητες με το πρώτιο, αλλά είναι δύο φορές πυκνότερο από το πρώτιο. Ο ήχος ταξιδεύει πιο γρήγορα στα στερεά από ό,τι στα υγρά, και ταχύτερα στα υγρά από ό,τι στα αέρια, γιατί τα στερεά είναι πιο δύσκολο να συμπιεστούν από τα υγρά, και τα υγρά, με τη σειρά τους, είναι πιο δύσκολο να συμπιεστούν από τα αέρια.

Η ταχύτητα του ήχου σε ένα μέσο, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (13.1)$$

όπου K η σκληρότητα του ελαστικού υλικού (N/m²) και ρ η πυκνότητα του υλικού (kg/m³).

Όταν το μέσο είναι εκτεταμένο στερεό ή υγρό ή αέριο το K παριστά το μέτρο ελαστικότητας όγκου. Για επίμηκες στερεό μέσο (π.χ. ράβδο ή σύρμα), το K αντικαθίσταται με το μέτρο του Young, E .

Επειδή η πυκνότητα του μέσου αλλάζει με τη θερμοκρασία, σημαίνει ότι και η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα σε αυτό το μέσο αλλάζει.

Σε αέριο μέσο στη σχέση (13.1), το K μπορεί να αντικατασταθεί με το $\gamma = C_p/C_v$, εφόσον θεωρήσουμε ότι τα πυκνώματα και τα αραιώματα μέσα στο αέριο συμβαίνουν σε αδιαβατικές συνθήκες (C_p και C_v είναι η θερμοχωρητικότητα του μέσου υπό συνθήκες σταθερής πίεσης και σταθερού όγκου αντίστοιχα).

Υγρό	Ταχύτητα ήχου (m/s)
Οξικό οξύ	1.584
Ακετόνη	1.174
Αιθυλική αλκοόλη (αιθανόλη)	1.144
Βενζίνη	1.298
Χλωροφόρμιο	995
Αιθέρας	985
Γλυκερίνη	1.904
Κηροζίνη	1.324
Υδράργυρος	1.450
Μεθυλική αλκοόλη (Μεθανόλη)	1.143
Φαινόλη	1.274
Νέφτι	1.240
Νερό	1.493

Πίνακας 13.1 – Τιμές της ταχύτητας του ήχου σε διάφορα υγρά (σε θερμοκρασία 25°C).

Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα του ήχου (m/s)
0	1.403
5	1.427
10	1.447
20	1.481
25	1.493
30	1.507
40	1.526
50	1.541
60	1.552
70	1.555
80	1.555
90	1.550
100	1.543

Πίνακας 13.2 – Τιμές της ταχύτητας του ήχου στο νερό, για διάφορες θερμοκρασίες.

13.3.2.3 Ένταση του ήχου

Ένταση του ήχου σε κάποια περιοχή του χώρου ορίζεται το ποσό της ενέργειας του ήχου της διερχόμενης ανά μονάδα υποθετικής επιφάνειας, η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του ήχου στην εν λόγω περιοχή, μέσα σε κάποιο χρόνο δια του χρόνου αυτού. Δηλαδή είναι η ροή της ενέργειας του ήχου.

13.3.2.4 Υπέρηχοι

Ένα υπερηχητικό κύμα (ultrasonic wave) είναι ένα ηχητικό κύμα με συχνότητα μεγαλύτερη των 20kHz. Λόγω του πολύ μικρού μήκους κύματος των υπερηχητικών κυμάτων (συγκρίσιμο με το μήκος κύματος των ακτίνων X) έχουν μεγάλη διεισδυτική δύναμη. Το ανθρώπινο αυτί δεν μπορεί να αναγνωρίσει τους υπέρηχους, αλλά κάποια ζώα, όπως οι νυχτερίδες και τα σκυλιά, μπορούν να αισθανθούν το κύμα υπερήχων.

Οι υπέρηχοι παράγονται κατά το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού σε πιεζοηλεκτρικά υλικά και του μαγνητισμού (magnetostriktion) μαγνητικών υλικών. Κατά το μαγνητισμό αλλάζουν το σχήμα και οι διαστάσεις του μαγνητικού υλικού, με τη μεταβολή του όγκου να είναι της τάξης του 10^{-6} .

Η ενέργεια του κύματος είναι ανάλογη και με το τετράγωνο της συχνότητας και με το τετράγωνο του πλάτους και γι' αυτό οι υπέρηχοι μεταφέρουν μεγαλύτερη ενέργεια από τα ηχητικά κύματα ίδιου πλάτους και επιτυγχάνουν έντονα χημικά, βιολογικά, μηχανικά και θερμικά αποτελέσματα. Μπορούμε να αναμείξουμε υγρά δύσκολα μειγνύόμενα, να καταστραφούν μικροοργανισμοί κ.λπ. Επίσης υπάρχουν εφαρμογές στην Ιατρική, σε βυθομετρήσεις κ.ά.

13.3.2.5 Δημιουργία στάσιμου κύματος μέσα σε υγρό

Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιείται μια πηγή υπερήχων που το άκρο της είναι τοποθετημένη στην επιφάνεια (εισέρχεται λίγο εντός) μικρής δεξαμενής νερού (ή άλλου ρευστού). Οι υπέρηχοι θα διαδοθούν στο υγρό (διαμήκη κύματα, πυκνώματα-αραιώματα) και στον πυθμένα της δεξαμενής θα ανακλαστούν. Το προσπίπτον με το ανακλώμενο ηχητικό κύμα θα συμβάλλουν δημιουργώντας ένα στάσιμο ηχητικό κύμα (stationary longitudinal wave). Συγχρόνως από τα πλαϊνά διαφανή τοιχώματα της δεξαμενής διέρχεται φωτεινή δέσμη από μια πηγή λέιζερ, η οποία προσπίπτει κάθετα στα δημιουργούμενα στάσιμα κύματα των υπερήχων και καθώς εξέρχεται από την δεξαμενή την παρατηρούμε πάνω σε πέτασμα. Το πέτασμα χρησιμεύει για να παρατηρηθούν τα οπτικά φαινόμενα του φωτός λέιζερ που δημιουργούνται εξαιτίας της αλλαγής του δείκτη διάθλασης του υγρού (λόγω της δημιουργίας πυκνωμάτων και αραιωμάτων στο υγρό που οφείλονται στο στάσιμο κύμα). Στο σχήμα 13.1. παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στη πίεση του ήχου Δp και στη θέση x μέσα στο υγρό, για τέσσερις φάσεις του στάσιμου κύματος. Ο δείκτης διάθλασης αλλάζει λόγω των μεταβολών της πίεσης. Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης Δn μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της μεταβολής της πίεσης Δp .

Η σχηματική λειτουργία της πειραματικής διάταξης εξηγείται στο σχήμα 13.2. Το φως του λέιζερ, καθώς διέρχεται δια μέσου του υγρού, εκτρέπεται πάνω στους δεσμούς του στάσιμου κύματος των υπερήχων γιατί εκεί υπάρχει σημαντική τοπική μεταβολή του δείκτη διάθλασης του υγρού σε σχέση με τις κοιλίες. Στις περιοχές όπου υπάρχουν κοιλίες εκτρέπεται πολύ δύσκολα, δηλαδή διέρχεται με σχετικά μεγαλύτερη ευκολία. Επομένως οι δεσμοί της ταλάντωσης του στάσιμου κύματος των υπερήχων εμφανίζονται σαν σκοτεινές λωρίδες και οι κοιλίες σαν φωτεινές λωρίδες του κεντρικού ειδώλου του λέιζερ πάνω στο πέτασμα, βλέπε σχήμα 13.3. Στο σχήμα 13.1, στις φάσεις $t=T/4$ και $t=3T/4$ αντιστοιχούν οι κοιλίες, όπου το φως καθώς περνά δια μέσου του υγρού δεν εκτρέπεται αλλά συνεχίζει την πορεία του δημιουργώντας φωτεινές λωρίδες (βλέπε σχήμα 13.3). Η απόσταση μεταξύ των δεσμών ($\lambda/2$), και επομένως το μήκος κύματος λ των υπερήχων, μπορεί να υπολογισθεί από το ύψος d του προβαλλόμενου ειδώλου πάνω στο πέτασμα και του αριθμού N των κροσσών (φωτεινές λωρίδες) που περιέχει (βλέπε σχήμα 13.3), χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\lambda = 2a \frac{s_1}{s_1 + s_2} \quad (13.2)$$

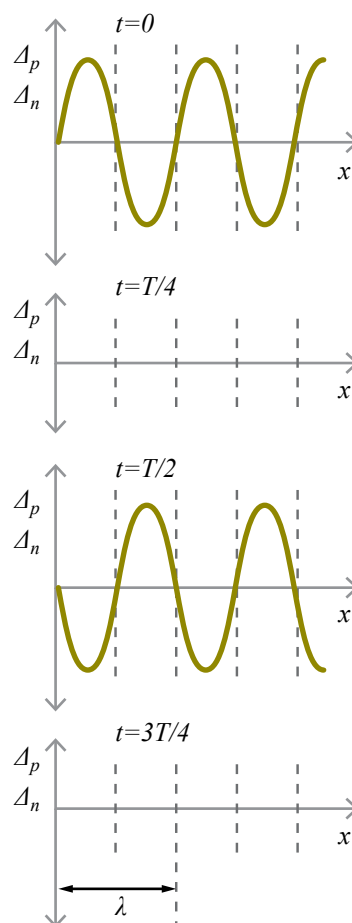
όπου:

$$a = \frac{d}{N + 1} \quad (13.3)$$

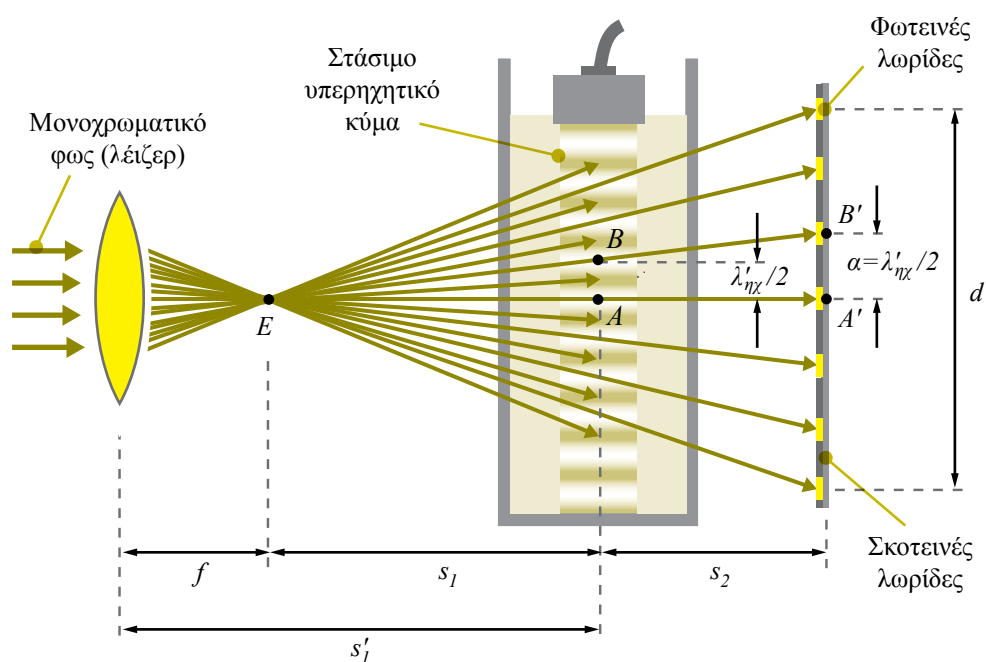
Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα στο υγρό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c = \lambda \nu \quad (13.4)$$

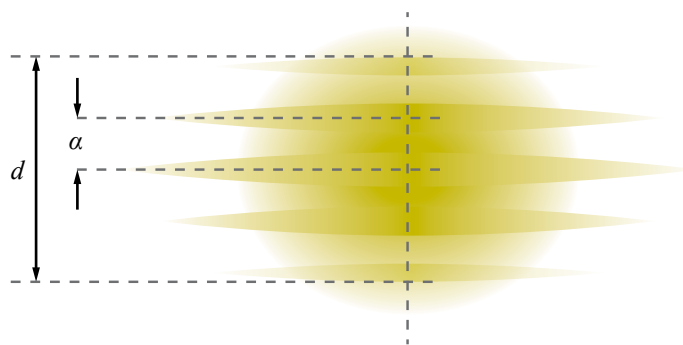
όπου ν η συχνότητα των υπερήχων.



Σχήμα 13.1 – Η τοπική κατανομή της μεταβολής της πίεσης και του δείκτη διάθλασης ως συνάρτηση του γεωμετρικού τόπου μέσα στο οπτικό μέσο, κατά διεύθυνση κάθετη στη διάδοση του φωτός, για τέσσερις φάσεις ενός στάσιμου κύματος. Η κατανομή αυτή, μέσα σε ένα ρευστό οπτικό μέσο, εξαρτάται από το μήκος κύματος του στάσιμου κύματος. Στις φάσεις $t=T/4$ (ή $\lambda/4$) και $t=3T/4$ (ή $3\lambda/4$), (όπου T είναι η περίοδος ταλάντωσης του στάσιμου κύματος των υπερήχων και λ το μήκος κύματος), η μεταβολή της πίεσης και του δείκτη διάθλασης είναι μηδέν και παρατηρούνται οι κοιλίες του στάσιμου κύματος. Στις φάσεις $t=0$ και $t=T/2$ (ή $\lambda/2$), παρουσιάζονται καθαρά δεσμοί που απέχουν ο ένας από τον άλλο διάστημα $\lambda/2$.



Σχήμα 13.2 – Σχηματική λειτουργία της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 13.3 – Φωτεινές λωρίδες πάνω στο πέτασμα.

13.3.3 Εκτέλεση

Η μέτρηση του μήκους κύματος του ηχητικού κύματος επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας στάσιμου κύματος μέσα στο ρευστό στο οποίο διαδίδεται ο ήχος.

Το στάσιμο κύμα αλλάζει τον ομοιογενή δείκτη διάθλασης του ρευστού σε διαδοχικές διαστρώσεις μεγάλου και μικρού δείκτη διάθλασης (πυκνώματα και αραιώματα ρευστού). Το στάσιμο ηχητικό κύμα φωτίζεται με φως λέιζερ και απεικονίζεται πάνω σε πέτασμα, όπου και μετριέται.

Προσοχή: Φροντίστε να έχετε τη γεννήτρια των υπερήχων κλειστή, όταν η κεφαλή της βρίσκεται έξω από το υγρό (υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης).

1. Γεμίστε το γυάλινο δοχείο μέχρι περίπου τα 2/3 με νερό, το οποίο πρέπει να βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
2. Τοποθετήστε το γυάλινο δοχείο με το νερό στη βάση του, ανάμεσα στο φακό και στο πέτασμα.
3. Τοποθετήστε τη κεφαλή της πηγής, ώστε να εισέρχεται μερικά χιλιοστά μέσα στο υγρό, με τη βάση της παράλληλη προς τον πυθμένα του δοχείου. Η δέσμη λέιζερ αποκλίνει με τη βοήθεια ενός συγκλίνοντος φακού εστιακής απόστασης $f=20\text{mm}$.
4. Ελέγξτε και, αν χρειάζεται, διορθώστε, ώστε ο φακός να απέχει περίπου 30–40cm από το δοχείο με το υγρό και το πέτασμα περίπου 1m από το δοχείο.
5. Ανοίξτε το λέιζερ.
6. Ρυθμίστε το λέιζερ και το φακό έτσι, ώστε η δέσμη του λέιζερ να διασχίζει το υγρό, περνώντας ανάμεσα από την κεφαλή της πηγής και τον πυθμένα του δοχείου.
7. Ανοίξτε τη γεννήτρια των υπερήχων. Προσπαθήστε να ρυθμίσετε την κλίση της κεφαλής, έτσι ώστε η βάση της να είναι όσο το δυνατόν παράλληλη με τον πυθμένα του δοχείου και να φανεί μια καθαρή εικόνα από φωτεινές και σκοτεινές λωρίδες πάνω στο πέτασμα, όπως περίπου στο σχήμα 13.3. Αν χρειαστεί αυξομειώστε ελαφρώς το πλάτος, από τη γεννήτρια.
8. Μετρήστε την απόσταση d για έναν συγκεκριμένο αριθμό N φωτεινών λωρίδων.
9. Από τον παλμογράφο μετρήστε την περίοδο T , ώστε να υπολογίσετε τη συχνότητα του κύματος. Για να μην αλλάξει η θερμοκρασία του υγρού, όση ώρα μετράτε, διατηρείτε κλειστή τη γεννήτρια των υπερήχων.
10. Μετρήστε τις αποστάσεις s_2 και s_1' .
11. Μετρήστε με το θερμόμετρο τη θερμοκρασία του νερού.
12. Αδειάστε το νερό από το γυάλινο δοχείο μέσα στη συσκευή θέρμανσης.
13. Επαναλάβετε από το βήμα 1 την ίδια διαδικασία, για υγρό διαφορετικής θερμοκρασίας. Ανοίξτε τη συσκευή θέρμανσης του νερού, ρυθμίζοντας το διακόπτη θερμοκρασίας στους 50°C . Μόλις ο λαμπτήρας της συσκευής σβήσει το νερό έχει θερμανθεί περίπου στους 50°C .
14. Να μετρήσετε τη θερμοκρασία του ζεστού νερού που έχετε τοποθετήσει μέσα στο δοχείο.

13.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Για κάθε θερμοκρασία του νερού:

1. Υπολογίστε την απόσταση a μεταξύ δύο διαδοχικών φωτεινών λωρίδων από τη σχέση (13.3).
2. Υπολογίστε τη συχνότητα του κύματος $\nu=1/T$.
3. Υπολογίστε την απόσταση s_j , ($s_j=s'_j/f$), με $f=20\text{mm}$.
4. Από τη σχέση (13.2), υπολογίστε το μήκος κύματος λ .
5. Από τη σχέση (13.4) υπολογίστε την ταχύτητα του ήχου στο νερό στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη θερμοκρασία των 50°C .
6. Συγκρίνετε τις τιμές που υπολογίσατε με τις αντίστοιχες θεωρητικές από τον πίνακα 13.2 και βρείτε την εκατοστιαία απόκλιση των τιμών σας.

13.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία

[1] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 465-487.

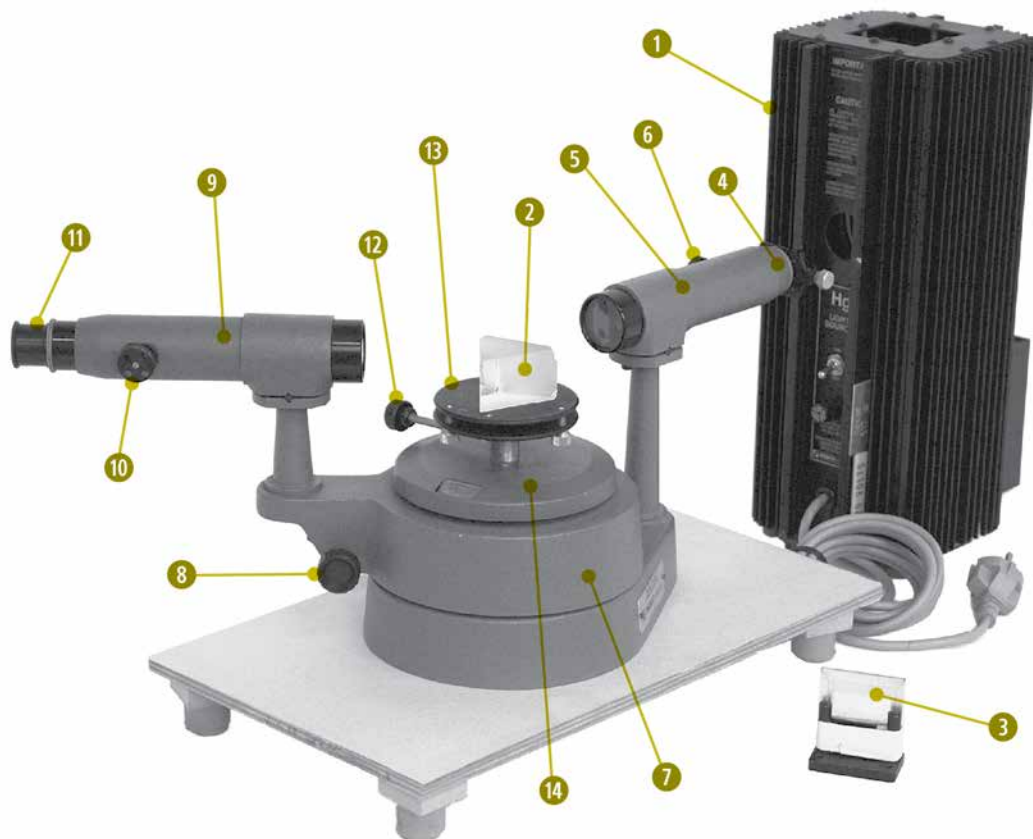
[2] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves, Measurement of speed of sound,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 473-482, pp. 488-489, pp.493-497.

[3] *Handbook Laser Physics I, Experiments with Coherent Light*, No. 01179.02, PHYWE series of publications, Göttingen: German, 1990.

[4] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 37: Inference of Light Waves,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.

ΑΣΚΗΣΗ 14

Ανάλυση του φωτός με φασματόμετρο πρίσματος και φασματόμετρο φράγματος



14.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Λυχνία διάπυρων ατμών υδραργύρου (Hg).
2. Γυάλινο ισόπλευρο πρίσμα, θλαστικής γωνίας 60° .
3. Φράγμα περίθλασης.

Διάταξη φασματόμετρου που αποτελείται από:

4. Σχισμή μεταβλητού εύρους που βρίσκεται στην είσοδο της άκρης του κατευθυντήρα, το εύρος της οποίας ρυθμίζεται από κοχλία στο πλάι του κατευθυντήρα (δε φαίνονται στη φωτογραφία).
5. Βάση κατευθυντήρα.
6. Κοχλία εστίασης κατευθυντήρα.
7. Περιστρεφόμενη τράπεζα της βάσης διόπτρας.
8. Κοχλία μικρομετρικής κίνησης της τράπεζας της βάσης διόπτρας (ο κοχλίας ακινητοποίησης της διόπτρας, βρίσκεται πίσω από τον κοχλία 8).
9. Βάση διόπτρας.
10. Κοχλία εστίασης διόπτρας.
11. Προσοφθάλμιο φακό, κινητός κατά μήκος της διόπτρας για καλύτερη εστίαση.
12. Κοχλία ρύθμισης ύψους της τράπεζας στήριξης του πρίσματος ή φράγματος.
13. Τράπεζα στήριξης του πρίσματος ή του φράγματος.

14. Οπτική τράπεζα του φασματόμετρου με κυκλικό βερνιέρο, με κοχλία μικρομετρικής ρύθμισης της θέσης της κλίμακας και κοχλία ακινητοποίησής της, που βρίσκονται στο πλάι της κάτω βάσης της διάταξης (δε φαίνονται στη φωτογραφία).

14.2 Απαραίτητες γνώσεις

Πρίσμα, φράγμα περίθλασης, δείκτης διάθλασης οπτικού μέσου, φαινόμενο διασκεδασμού φωτός, διάδοση του φωτός κατά τη γεωμετρική και κυματική οπτική, φαινόμενα διάθλασης, συμβολής και περίθλασης φωτός, φάσματα εκπομπής και απορρόφησης, μήκος κύματος φωτός.

14.3 Πείραμα 1

14.3.1 Σκοπός

- Υπολογισμός του δείκτη διάθλασης n του γυαλιού για διαφορετικά μήκη κύματος φωτός με τη χρήση φασματόμετρου πρίσματος και επιβεβαίωση του φαινομένου του διασκεδασμού.
- Υπολογισμός της διακριτικής ικανότητας και της διασκεδαστικής ικανότητας (αριθμός Abbe) του πρίσματος.

14.3.2 Θεωρία

14.3.2.1 Πολυχρωματικό φως, φασματική ανάλυση

Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα και έχει ταχύτητα $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$ ανεξάρτητα από τη συχνότητά του. Ένταση φωτός είναι το μέτρο της μέσης ροής ενέργειας του φωτός.

Όταν συμβαίνουν τα φαινόμενα της ανάκλασης, της διάθλασης και της περίθλασης, το φως αποκλίνει από την ευθύγραμμη πορεία του.

Η ανάλυση του πολυχρωματικού φωτός στα διάφορα μήκη κύματος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κατάλληλων οπτικών (στοιχεία διασποράς), με τα πρίσματα, και με τα περιθλαστικά φράγματα (diffraction gratings). Σε ειδικές περιπτώσεις με χαμηλές απαιτήσεις σε φασματική ανάλυση, χρησιμοποιούνται οπτικά φίλτρα αποκοπής (long/short-pass), ή διελεύσεως ζώνης (band-pass).

Στην οπτική, πρίσμα είναι ένα διαφανές οπτικό στοιχείο, το οποίο έχει την ιδιότητα να διαθλά το φως και να διαχωρίζει το πολυχρωματικό φως στα χρώματα, από τα οποία αποτελείται.

Το φαινόμενο του **διασκεδασμού** (dispersion) είναι η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του υλικού ενός οπτικού μέσου από το μήκος κύματος του φωτός.

Ο δείκτης διάθλασης (index of refraction) n ενός μέσου ορίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας του φωτός στο κενό c_0 , προς την ταχύτητα του v μέσα οπτικό μέσο. Ο δείκτης διάθλασης του κενού είναι ίσος με τη μονάδα (1).

$$n = \frac{c_0}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (14.1)$$

Ο ορισμός του δείκτη διάθλασης σε μοριακό επίπεδο συνδέεται με την επαγόμενη μοριακή πόλωση υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός και, κατά συνέπεια, με την ηλεκτρονική πολωσιμότητα. Συμβολίζουμε με ϵ , ϵ_0 τις διηλεκτρικές σταθερές των αντίστοιχων οπτικών μέσων.

Επειδή δεν υπάρχει αραιότερο οπτικό μέσο από το κενό, συμπεραίνουμε ότι για κάθε υλικό ο δείκτης διάθλασής του είναι μεγαλύτερος από 1. Συμβατικά θεωρούμε 1 και το δείκτη διάθλασης του αέρα, αν και η πραγματική τιμή του σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερ-

μοκρασίας είναι 1,00028. Ο δείκτης διάθλασης ενός μέσου συνήθως δίνεται για μήκος κύματος κίτρινου φωτός, εκπεμπόμενο από λυχνία Νατρίου (Na).

14.3.2.2 Φαινόμενο διάθλασης (refraction)

Το φως διαθλάται επειδή διαπερνάει διαφορετικά μέσα με διαφορετική ταχύτητα. Στο κενό και στον αέρα, όλα τα χρώματα ταξιδεύουν με την ίδια ταχύτητα.

Όταν μια ακτίνα φωτός, που διαδίδεται σε ένα διαφανές μέσο, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια με άλλο διαφανές μέσο, αλλάζουν το μήκος κύματος, η ταχύτητα και η διεύθυνση κίνησης του φωτός.

- Μέρος αυτού ανακλάται και το υπόλοιπο διαθλάται στο δεύτερο οπτικό μέσο.
- Η διαθλώμενη ακτίνα δε συνεχίζει την πορεία της προσπίπτουσας, αλλά σχηματίζει μια γωνία με την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια των διαφορετικών οπτικών μέσων.
- Οι ακτίνες ανακλώμενου, προσπίπτοντος και διαθλώμενου φωτός βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Το πόσο αλλάζει η διεύθυνση κίνησης του φωτός περιγράφεται από το νόμο της διάθλασης ή διαφορετικά αποκαλούμενο νόμο του Snell, σχέση (14.3).

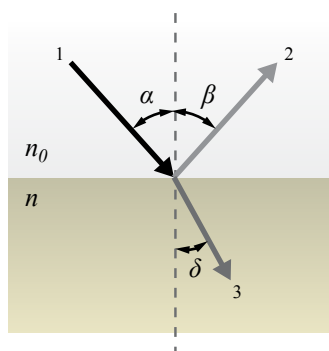
Όταν το φως περνάει από ένα οπτικά αραιό υλικό, όπως ο αέρας, σε ένα οπτικά πυκνότερο, όπως το γυαλί, η ταχύτητα του φωτός μειώνεται. Αντίθετα, όταν διέρχεται από ένα πυκνότερο σε ένα αραιότερο μέσο, η ταχύτητά του αυξάνεται.

Όταν το φως διαδίδεται από ένα οπτικό μέσο σε ένα άλλο, αλλάζει και το μήκος κύματος του. Για διάδοση φωτός από το κενό σε ένα άλλο οπτικό μέσο ισχύει η σχέση:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_o}{n_1} \quad (14.2)$$

όπου λ_o είναι το μήκος κύματος του φωτός στο κενό, λ_1 το μήκος κύματος στο οπτικό μέσο, n_1 ο δείκτης διάθλασης του οπτικού μέσου στο οποίο το φως διαδίδεται.

Για λόγους απλοποίησης, θεωρούμε μονοχρωματική φωτεινή ακτίνα (ακτίνα ενός μήκος κύματος λ) που προσπίπτει με γωνία α στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, του αέρα και ενός άλλου πυκνότερου με δείκτη διάθλασης n . Τότε η φωτεινή ακτίνα εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διέρχεται από το υλικό, και σχηματίζει με την κάθετη στη διαθλώσα επιφάνεια γωνία ανάκλασης β και διάθλασης δ (σχήμα 14.1)



Σχήμα 14.1 – Φαινόμενο διάθλασης φωτός από οπτικά αραιό σε οπτικά πυκνό μέσο: (1) μονοχρωματική ακτίνα ορατού φωτός, (2) ανακλώμενη ακτίνα, (3) διαθλώμενη ακτίνα.

Γωνία εκτροπής ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει η ακτινοβολία, καθώς εξέρχεται από πρίσμα σε σχέση με την εισερχόμενη δέσμη. Η γωνία εκτροπής μειώνεται με την αύξηση του μήκους κύματος λ (βλέπε γωνία ε στο σχήμα 14.2).

Εσωτερική ολική ανάκλαση (total internal reflection): Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι: $\alpha > \alpha_c$, όπου α_c τιμή κρίσιμης γωνίας για την οποία η υπολογιζόμενη γωνία διάθλασης είναι

ίση με 90° , τότε δεν παρατηρείται διάθλαση, αλλά ολική ανάκλαση. Συμβαίνει μόνο όταν το φως διαδίδεται από n_1 προς $n_2 < n_1$. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ σημαντικό και έχει εφαρμογή στη διάδοση φωτός στις οπτικές ίνες.

14.3.2.3 Νόμος της ανάκλασης

Όταν μια δέσμη φωτός προσπίπτει σε μια λεία επιφάνεια μέρος αυτής ανακλάται. Κατά το νόμο αυτόν, η γωνία πρόσπτωσης είναι ίδια με τη γωνία ανάκλασης, $\alpha = \beta$, ενώ οι ανακλώμενες ακτίνες παραμένουν παράλληλες.

Αν η επιφάνεια δεν είναι λεία, τότε οι ανακλώμενες ακτίνες είναι ακανόνιστες, και παρουσιάζεται το φαινόμενο της διάχυσης (διάχυτη ανάκλαση).

14.3.2.4 Νόμος του Snell

Ο νόμος του Snell για το σχήμα 14.1 δίνεται ως:

$$n_o \sin \alpha = n \sin \delta \quad (14.3)$$

όπου n_o ο δείκτης διάθλασης του πρώτου μέσου (για το κενό ή τον αέρα $n_o \approx 1$), και n ο δείκτης διάθλασης του δεύτερου μέσου.

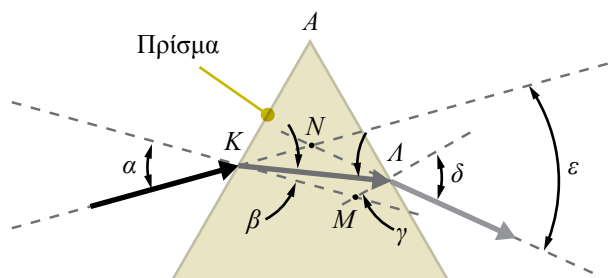
14.3.2.5 Μέτρηση του δείκτη διάθλασης με φασματόμετρο πρίσματος

Η μέτρηση του δείκτη διάθλασης n ενός διαφανούς υλικού μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Στην παρούσα άσκηση θα χρησιμοποιείται φασματόμετρο πρίσματος. Η μέτρηση του δείκτη διάθλασης ενός διαφανούς υλικού μπορεί να γίνει με φασματόμετρο στο οποίο το πρίσμα έχει κατασκευαστεί από το υλικό του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε το δείκτη διάθλασης.

Με εφαρμογή των νόμων της ανάκλασης και της διάθλασης στο σχήμα 14.2, στην περίπτωση που η εισαγόμενη και η εξερχόμενη ακτίνα φωτός σχηματίζουν ίσες γωνίες ($\alpha = \delta$) με την κάθετο στις πλευρές του πρίσματος, τότε, και μόνο τότε, αποδεικνύεται ότι ο δείκτης διάθλασης ενός ισόπλευρου πρίσματος θλαστικής γωνίας 60° υπολογίζεται από τη σχέση:

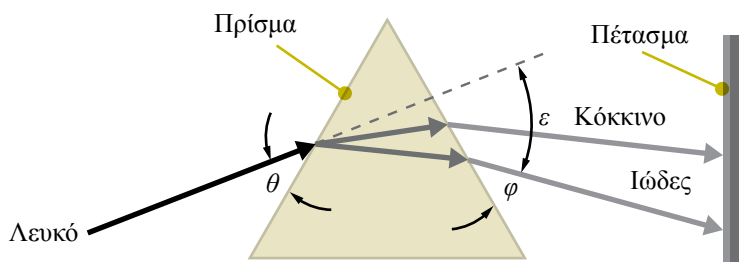
$$n = \frac{\sin \frac{60^\circ + \varepsilon}{2}}{\sin \frac{60^\circ}{2}} \quad (14.4)$$

όπου 60° η θλαστική γωνία A του πρίσματος και ε η ελάχιστη γωνία εκτροπής της εξερχόμενης ακτίνας σε σχέση με την εισερχόμενη.



Σχήμα 14.2 – Πορεία φωτεινής μονοχρωματικής ακτίνας όταν εισέρχεται σε πρίσμα. Η τιμή της γωνίας εκτροπής ε εξαρτάται από το δείκτη διάθλαση από τη θέση του πρίσματος ως προς την εισερχόμενη ακτίνα και από το μήκος κύματος της ακτίνας. Μόνο όταν οι γωνίες α και δ είναι ίσες παρατηρείται η μικρότερη τιμή γωνίας εκτροπής.

Η **εκτροπή**, την οποία υφίσταται το λευκό φως, όταν περάσει από τον αέρα στο γυαλί, εξαρτάται και από το μήκος κύματος του φωτός, όπως δείχνεται στο σχήμα 14.3. Το κόκκινο έχει το μεγαλύτερο μήκος κύματος, στον αέρα είναι περίπου 700nm. Το ιώδες έχει το μικρότερο μήκος κύματος, στον αέρα είναι περίπου 450nm.



Σχήμα 14.3 – Διάθλαση λευκού φωτός σε πρίσμα. Οι ακτίνες του ιώδους παθαίνουν μεγαλύτερη εκτροπή από εκείνες του μπλε. Το μήκος κύματος του ιώδους είναι ~400-440nm (συχνότητα $750-680 \times 10^{12}$ Hz), το μήκος κύματος του μπλε είναι ~440-500nm (συχνότητα ~680-600 $\times 10^{12}$ Hz).

Η εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός και του δείκτη διάθλασης ενός μέσου από το μήκος κύματος λέγεται διασκεδασμός (dispersion).

Ο **διασκεδασμός** (διασπορά) χαρακτηρίζεται, χρησιμοποιώντας τρία μήκη κύματος του ορατού φάσματος (γραμμές Fraunhofer): δύο από τις άκρες και ένα από το μέσον.

Δεν πρέπει να συγχέονται τα φαινόμενα της εκτροπής φωτός με αυτό του διασκεδασμού. Ένα πρίσμα από υλικό με μεγάλο δείκτη διάθλασης μπορεί να προκαλέσει μεγάλη εκτροπή σε ακτίνα δεδομένου μήκους κύματος, ενώ ο διαχωρισμός μεταξύ δύο κοντινών μηκών κύματος να μην είναι μεγάλος. Ο διαχωρισμός εξαρτάται από τη διακριτική ικανότητα του πρίσματος R , βλέπε σχέση (14.8).

Στην παρούσα άσκηση χρησιμοποιούμε ως φωτεινή πηγή το φως μιας λυχνίας διάπυρων ατμών υδραργύρου (Hg), η οποία δίνει γραμμικό φάσμα εκπομπής. Το φως της λυχνίας προσπίπτει στην πλευρά πρίσματος, αναλύεται και δίνει έγχρωμες γραμμές. Οι γραμμές οφείλουν τη μορφή τους στο ότι το φως της λυχνίας διέρχεται μέσα από μια σχισμή.

Για τα συνηθισμένα οπτικά μέσα και για την περίπτωση του ορατού φάσματος, η σχέση που δίνει το δείκτη διάθλασης ενός υλικού σε συνάρτηση με το μήκος κύματος δίνεται, με ικανοποιητική προσέγγιση, από τον εμπειρικό τύπο που διατύπωσε ο Cauchy το 1836:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots \quad (14.5)$$

όπου A , B , C , ... είναι σταθερές, χαρακτηριστικές του υλικού, που μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά.

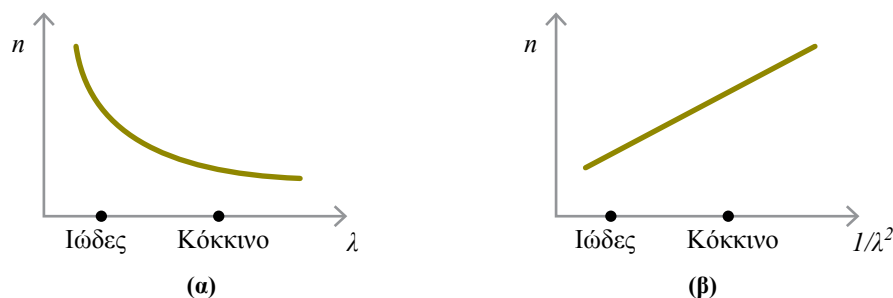
Για πρακτική εφαρμογή, χρησιμοποιούνται συνήθως μόνο οι δύο πρώτοι όροι της προηγούμενης σχέσης, οπότε έχουμε:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (14.6)$$

Η γραφική παράσταση $n=f(\lambda)$ της σχέσης (14.6) ονομάζεται καμπύλη διασκεδασμού (βλέπε σχήμα 14.4.α).

Οι χαρακτηριστικές σταθερές A και B μπορούν να υπολογιστούν πειραματικά, αν κάνουμε τη γραφική παράσταση $n=f(1/\lambda^2)$ η οποία είναι γραμμική (βλέπε σχήμα 14.4.β), δηλαδή είναι της μορφής $y=a+bx$, όπου στην περίπτωσή μας είναι $y=n$, $x=1/\lambda^2$ και $a=A$, $b=B$.

Προσοχή: Η σταθερά A είναι αδιάστατη, ενώ η σταθερά B έχει μονάδες (μήκος). Στον πίνακα 14.1 φαίνονται οι σταθερές A και B για διάφορους τύπους γυαλιού.



Σχήμα 14.4 – Καμπύλες διασκεδασμού (α) $n=f(\lambda)$, (β) $n=f(1/\lambda^2)$.

Υλικό	A	B (μm)
Γυαλί τύπου fused silica	1,4580	0,00354
Γυαλί τύπου borosilicate BK7	1,5046	0,00420
Γυαλί τύπου hard crown K5	1,5220	0,00459
Γυαλί τύπου Barium crown BaK4	1,5690	0,00531
Γυαλί τύπου Barium flint BaF10	1,6700	0,00743
Γυαλί τύπου SF10	1,7280	0,01342

Πίνακας 14.1 – Σταθερές A και B για διάφορους τύπους γυαλιού.

Χρησιμοποιώντας, π.χ. τα μήκη κύματος $\lambda_F=484,1\text{nm}$, $\lambda_C=656,3\text{nm}$ και $\lambda_D=589,3\text{nm}$ που αντιστοιχούν στις γραμμές H_β , H_α και Na του υδρογόνου και του νατρίου, βρίσκουμε ότι ο λόγος της γωνιακής απόκλισης ε για τα μήκη κύματος λ_F και λ_C ως προς την εκτροπή του μήκους κύματος λ_D ισούται με:

$$\delta = \frac{D}{\varepsilon} = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} \quad (14.7)$$

Η ποσότητα δ ονομάζεται **διασκεδαστική ικανότητα** και συσχετίζει τη διασπορά με την εκτροπή ενός πρίσματος. Το αντίστροφο της διασκεδαστικής ικανότητας, $\gamma=1/\delta$, είναι γνωστό ως **αριθμός Abbe**. Γενικά ισχύει ότι $20 < \gamma = 1/\delta < 100$.

Η διακριτική ικανότητα (resolution) πρισμάτων υπολογίζεται ως εξής:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = b \frac{\Delta n}{\Delta\lambda} \quad (14.8)$$

όπου b το μήκος της βάσης του πρίσματος, $\Delta n/\Delta\lambda$ η κλίση του διαγράμματος της μεταβολής του δείκτη διάθλασης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος. Από την εξίσωση του Chauchy, σχέση (14.5), υπολογίζεται η σχέση:

$$\frac{\Delta n}{\Delta\lambda} = \frac{2B}{\lambda^3} \quad (14.9)$$

όπου B σταθερά με μονάδες μήκους από την εξίσωση του Chauchy.

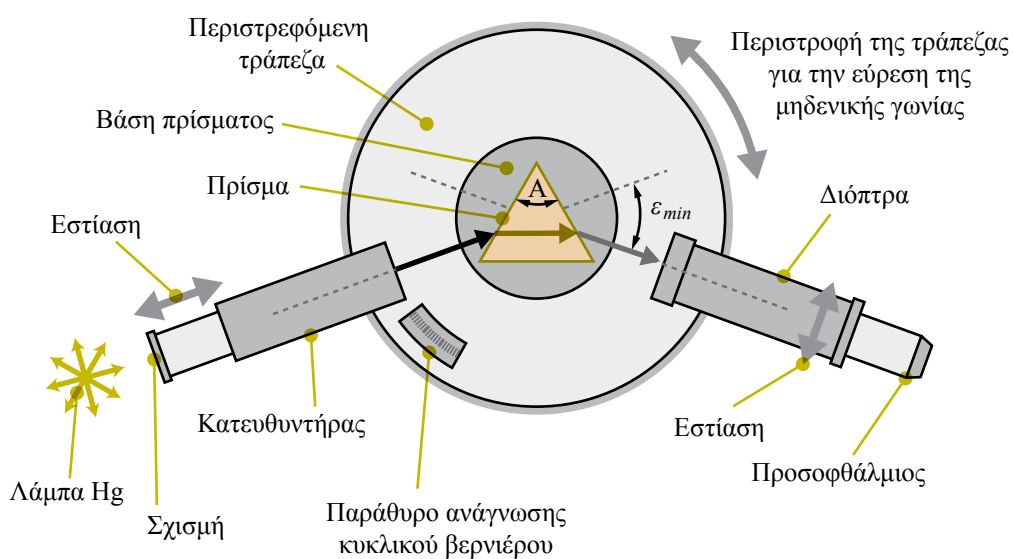
14.3.2.6 Φασματόμετρο (spectrometer – goniometer)

Μια δέσμη ορατού φωτός που δεν αποτελείται από ένα μόνο μήκος κύματος και ένα πρίσμα (ή ένα φράγμα περίθλασης) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν τα διάφορα μήκη κύματος, που αποτελούν το φάσμα της φωτεινής δέσμης. Το φράγμα έχει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, αλλά μερικές φορές προτιμούμε τη χρήση του πρίσματος. Αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις στις οποίες το φως είναι ασθενές. Το πρίσμα δίνει εντονότερες

γραμμές. Αυτό οφείλεται στο ό,τι το πρίσμα δίνει μια σειρά φασματικών γραμμών, ενώ το φράγμα την ίδια ενέργεια την κατανέμει σε περισσότερες σειρές γραμμών, λόγω των πολλών τάξεων κροσσών.

Η παρατήρηση και η μελέτη των διαφόρων φασμάτων γίνεται με διατάξεις που ονομάζονται φασματόμετρα ή φασματοσκόπια. Αυτά χρησιμοποιούν είτε φράγμα περίθλασης είτε πρίσμα. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης των οπτικών μέσων εξαρτάται από το μήκος κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας που διαδίδεται μέσα σε αυτά (φαινόμενο διασποράς).

Αν η φωτεινή ακτινοβολία που εισέρχεται στο υλικό αποτελείται από διαφορετικά μήκη κύματος, οι ακτίνες που αντιστοιχούν σε αυτά τα μήκη κύματος υφίστανται διαφορετική εκτροπή και προβάλλονται σε διαφορετικές θέσεις σε πέτασμα ή σε φίλμ ή στο μάτι, ανάλογα με το μήκος κύματος. Η εικόνα που εμφανίζεται αποτελεί το φάσμα της ακτινοβολίας.



Σχήμα 14.5 – Αναπαράσταση φασματόμετρου.

Φωτογραφία ενός φασματόμετρου δείχνεται στην αρχή της άσκησης. Κάθε φασματόμετρο αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Τον κατευθυντήρα, που αποστολή του είναι να δημιουργεί παράλληλη δέσμη ακτίνων. Είναι ένας σωλήνας, που στο ένα άκρο φέρει μια σχισμή και στο άλλο έχει ένα συγκλίνοντα φακό, ή σύστημα φακών. Η εστιακή απόσταση του φακού του κατευθυντήρα ισούται με το μήκος του σωλήνα. Η εστία του ρυθμίζεται στη θέση της σχισμής, ώστε από την άλλη άκρη του κατευθυντήρα να βγαίνει παράλληλη δέσμη φωτός.
- Τη διόπτρα, που τοποθετείται κατά μήκος της διεύθυνσης, που ορίζει η δέσμη που εξέρχεται από το πρίσμα. Η διόπτρα είναι ένας σωλήνας, που στο ένα άκρο έχει συγκλίνοντα φακό και στο άλλο προσοφθάλμιο σύστημα για την παρατήρηση του φάσματος (βλέπε σχήμα 14.5). Ο φακός στην είσοδο της διόπτρας σχηματίζει πραγματικό είδωλο της φωτεινής δέσμης πριν τον προσοφθάλμιο φακό, που βρίσκεται στο άλλο άκρο της. Το πραγματικό είδωλο βρίσκεται πάνω σε σύστημα δύο τεμνόμενων νημάτων (σταυρόνημα). Ο παρατηρητής βλέπει μέσα από τον προσοφθάλμιο φακό το φανταστικό είδωλο της σχισμής του κατευθυντήρα (ορθό και μεγαλύτερο του πραγματικού) και τα φανταστικά είδωλα των δύο νημάτων. Με τη βοήθεια του σημείου τομής των νημάτων γίνεται η σκόπευση μιας γραμμής του φάσματος. Επειδή τα φάσματα γενικά έχουν έκταση και δεν περιλαμβάνονται ολόκληρα στο οπτικό πεδίο της διόπτρας, αυτή μπορεί να στρέφεται και έτσι διερευνάται κατά περιοχές όλο το φάσμα.
- Ένα πρίσμα ή ένα φράγμα. Το πρίσμα είναι κατασκευασμένο από διαφανές υλικό γνωστού δείκτη διάθλασης. Το πρίσμα τοποθετείται, ώστε πάνω στη μια πλευρά του να πέφτει η παράλληλη δέσμη ακτίνων που εξέρχεται από τον κατευθυντήρα (σχήμα 14.5). Το φράγμα

είναι μια πλάκα γυαλιού στην οποία έχουν χαραχθεί πάνω της αυλάκια, δηλαδή γραμμές. Η χάραξη μπορεί να γίνει είτε με διαμάντι είτε με λείζερ. Το καθένα από τα διαστήματα ανάμεσα στις γραμμές παίζει το ρόλο ορθογώνιας σχισμής. Ένα φράγμα μπορεί να αποτελείται από μερικές εκατοντάδες ως μερικές χιλιάδες γραμμές ανά χιλιοστό. Το φράγμα τοποθετείται με την επιφάνειά του κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της φωτεινής δέσμης.

14.3.2.7 *Συνεχή φάσματα εκπομπής*

Τα φάσματα αυτά εκπέμπονται από στερεά και υγρά σώματα που βρίσκονται σε υψηλή θερμοκρασία (διάπυρα σώματα) και έχουν σαν χαρακτηριστικό γνώρισμα τη συνέχεια στα διαδοχικά μήκη κύματος που εκπέμπουν. Για παράδειγμα, τα φάσματα που εκπέμπονται από τους λαμπτήρες πυράκτωσης, τα βολταϊκά τόξα, αλλά και από στερεά που βρίσκονται σε υγρή κατάσταση, είναι συνεχή.

Τα συνεχή φάσματα που εκπέμπονται από διάφορα διάπυρα σώματα δε διαφέρουν μεταξύ τους. Είναι ανεξάρτητα από τη φύση του υλικού και εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία. Όταν η θερμοκρασία είναι σχετικά χαμηλή, το σώμα εκπέμπει κυρίως υπέρυθη και κόκκινη ακτινοβολία, ενώ οι άλλες ακτινοβολίες, ιώδης, κίτρινη κ.λπ. είναι πολύ ασθενείς.

Γι' αυτό έχουμε την εντύπωση του ερυθρού φωτός, για παράδειγμα, τα ερυθροπυρωμένα κάρβουνα. Με αύξηση της θερμοκρασίας, το φάσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την πηγή επεκτείνεται και σε μικρότερα μήκη κύματος, έτσι ώστε το σώμα βαθμιαία να αποκτά λευκό χρώμα. Κατά συνέπεια, η μόνη πληροφορία που προέρχεται από το συνεχές φάσμα μιας πηγής έχει σχέση μόνο με τη θερμοκρασία της.

14.3.2.8 *Γραμμικά φάσματα εκπομπής*

Τα γραμμικά φάσματα εκπομπής (emission line spectrum) εκπέμπονται από διεγερμένα άτομα αερίων που βρίσκονται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικής εκκένωσης, αλλά και από τους ατμούς των μετάλλων. Κύριο γνώρισμα των φασμάτων αυτών είναι η ασυνέχεια των μηκών κύματος που εκπέμπονται. Αυτό που παίρνουμε δηλαδή είναι μια σειρά από διακριτές έγχρωμες γραμμές.

Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Σε αντίθεση με τα συνεχή φάσματα εκπομπής, τα γραμμικά φάσματα των στοιχείων είναι συγκεκριμένα και διαφέρουν από άτομο σε άτομο του περιοδικού συστήματος. Για το λόγο αυτό, τα γραμμικά φάσματα εκπομπής χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανίχνευση ατόμων μέσα σε αέρια ή ατμούς μετάλλων (φασματοσκοπία).

14.3.2.9 *Απορρόφηση ακτινοβολίας – φάσματα απορρόφησης*

Όταν ακτινοβολία με συνεχές φάσμα εκπομπής διέρχεται μέσα από ύλη, τότε το φάσμα της ακτινοβολίας, που εξέρχεται μέσα από την ύλη, ονομάζεται φάσμα απορρόφησης. Τα φάσματα απορρόφησης τα διακρίνουμε σε συνεχή και γραμμικά. Ανάλογα με τη φύση και την κατάσταση απορρόφησης περιέχουν περιοχές μηκών κύματος που η ένταση της ακτινοβολίας είναι πολύ μικρή ή μηδέν.

14.3.2.10 *Συνεχή φάσματα απορρόφησης*

Τα φάσματα αυτά προκύπτουν, αν μια ακτινοβολία συνεχούς φάσματος περάσει μέσα από έγχρωμο και διαφανές στερεό ή υγρό υλικό ή ανακλαστεί από αυτό. Αν η ακτινοβολία, που εισέρχεται στο υλικό, έχει συνεχές φάσμα εκπομπής, τότε το φάσμα της εξερχόμενης ακτινοβολίας θα περιέχει και σκοτεινές περιοχές, που οφείλονται στο ότι ορισμένα χρώματα έχουν απορροφηθεί κατά τη διέλευσή τους από το διαφανές υλικό. Η μελέτη αυτών των φασμάτων δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον.

Επίσης παρατηρούμε ότι τα μήκη κύματος που διέρχονται αντιστοιχούν στα μήκη κύματος που μπορεί να εκπέμψει το υλικό απορρόφησης. Για παράδειγμα, αν στην πορεία των ακτίνων λευκού φωτός τοποθετηθεί κόκκινο γυαλί, τότε τα μήκη κύματος της εξερχόμενης ακτινοβολίας θα αντιστοιχούν στο κόκκινο χρώμα.

14.3.2.11 Γραμμικά φάσματα απορρόφησης

Γραμμικό φάσμα απορρόφησης παίρνουμε, όταν η ακτινοβολία που εκπέμπεται από πηγή περάσει μέσα από διεγερμένο αέριο ή από ατμούς μετάλλων. Το φάσμα της εξερχόμενης ακτινοβολίας θα περιέχει σκοτεινές γραμμές που αντιστοιχούν σε εκείνα ακριβώς τα μήκη κύματος που αποτελούν το γραμμικό φάσμα εκπομπής του αερίου ή των ατμών μετάλλου. Το γραμμικό φάσμα απορρόφησης εξαρτάται άμεσα από το είδος των ατόμων που απαρτίζουν το απορροφητικό μέσο. Για το λόγο αυτό, τα γραμμικά φάσματα απορρόφησης χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ατόμων μέσα σε αέρια.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα γραμμικού φάσματος απορρόφησης αποτελεί το φάσμα του Ήλιου. Η επιφάνεια του Ήλιου βρίσκεται σε θερμοκρασία 6000°K και το φως που εκπέμπει δίνει συνεχές φάσμα εκπομπής. Όταν το φως αυτό διέρχεται μέσα από την ατμόσφαιρα του Ήλιου (στοιβάδα χρωμόσφαιρας), που αποτελείται από διεγερμένα αέρια, απορροφάται και, έτσι, δημιουργείται το γραμμικό φάσμα απορρόφησης του. Τα διακριτά μήκη κύματος που απορροφήθηκαν αντιστοιχούν στα μήκη κύματος που μπορεί να εκπέμψει απ' ευθείας η ατμόσφαιρα του Ήλιου. Με τη βοήθεια του γραμμικού φάσματος απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορούμε να ανιχνεύσουμε τα στοιχεία που αποτελούν την ατμόσφαιρα του Ήλιου.

14.3.2.12 Φάσμα ουράνιου τόξου (φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας)

Όταν το ηλιακό φως διέρχεται μέσα από ένα πρίσμα, αναλύεται στα χρώματα του ουράνιου τόξου. Τότε παρατηρούνται και σκοτεινές γραμμές, γραμμές Fraunhofer. Αυτές είναι γραμμές απορρόφησης στο ηλιακό φάσμα. Υπάρχουν, επειδή ψυχρότερο αέριο, το οποίο είναι υψηλότερα στην ατμόσφαιρα του Ήλιου, απορροφά ορισμένα χρώματα του φωτός που εκπέμπονται από θερμότερο αέριο, το οποίο είναι χαμηλότερα στην ατμόσφαιρα του Ήλιου.

14.3.3 Εκτέλεση

Σε αυτό το πείραμα θα υπολογιστεί ο δείκτης διάθλασης ενός γυάλινου πρίσματος, χρησιμοποιώντας φασματόμετρο πρίσματος και πολυχρωματική φωτεινή πηγή υδραργύρου. Το πρίσμα που έχετε στη διάθεσή σας έχει έδρες ισόπλευρα τρίγωνα. Επομένως όλες οι γωνίες του είναι θλαστικές, ίσες με 60° .

Για να υπολογιστεί ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού με τη χρήση πρίσματος, θα μετρήσετε την ελάχιστη γωνία εκτροπής για κάθε χρώμα, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

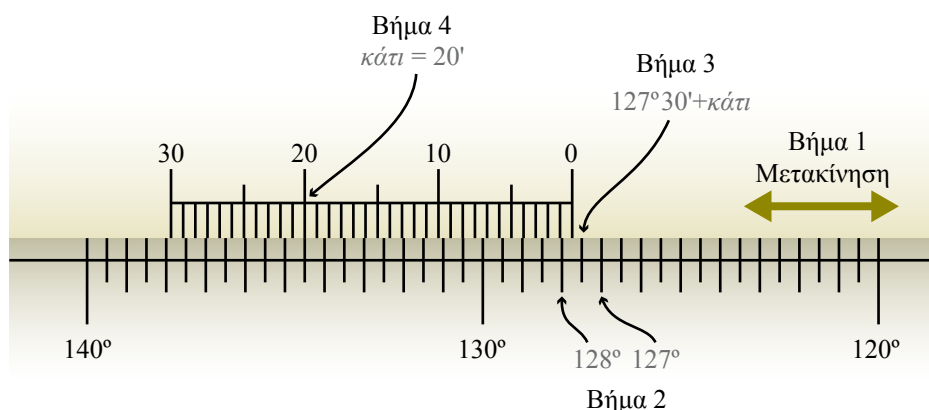
1. Εξοικειωθείτε με το φασματόμετρο. Αναγνωρίστε τον κατευθυντήρα με τη σχισμή, τη διόπτρα με τον προσοφθάλμιο, τη βάση πρίσματος, τους κοχλίες που επιτρέπουν τις ρυθμίσεις της βάσης της διόπτρας και της αλλαγής του ύψους της βάσης του πρίσματος. Εντοπίστε και ρυθμίστε την εστίαση του προσοφθάλμιου φακού.
2. Εξασκηθείτε στην ανάγνωση της κλίμακας του κυκλικού βερνιέρου. Για παράδειγμα, η γωνία του σχήματος 14.6 είναι $127^{\circ}30'$ ή $127,33^{\circ}$.
 - Η γωνία εκτροπής μετριέται σε μοίρες ($^{\circ}$, degree) με ακρίβεια λεπτού του τόξου ($'$, arc min).
 - Κάθε μοίρα έχει 60 υποδιαιρέσεις, $1\text{ arc min}=1/60\text{degree}$, $1^{\circ}=60'$.
 - Το φασματόμετρο φέρει κυκλικό βερνιέρο ακρίβειας $1'$.
 - Η μεγάλη κλίμακα είναι ακρίβειας $\pm 0,5^{\circ}$ και σε αυτήν μετράμε τις μοίρες.
 - Η μικρή κλίμακα είναι ακρίβειας $\pm 1'$.

Η διαδικασία για την ανάγνωση της γωνίας στον κυκλικό βερνιέρο αναλύεται παρακάτω:

Η μέτρηση όσον αφορά στις μοίρες είναι οι μοίρες της κοντινότερης υποδιαίρεσης προς το μηδέν (0) της κλίμακας του κυκλικού βερνιέρου.

Περίπτωση που το 0 βρίσκεται μετά από κάποια υποδιαίρεση, π.χ. μετά το $127^{\circ}30'$ και πριν το 128° . Η τιμή της γωνίας θα είναι συνολικά $\varphi=127^{\circ}30'+\text{«κάτι» arc min}$. Αυτό το «κάτι» το δείχνει η κλίμακα του βερνιέρου (μικρή κλίμακα). Κοιτάζτε τη γραμμή που ευθυγραμμίζεται ακριβώς με μια γραμμή κάτω απ' αυτήν. Στην περίπτωση του σχήματος 14.6, η τιμή

που συμπίπτει με τη γραμμή της μικρής κλίμακας αντιστοιχεί σε $20'$, οπότε η γωνία θα έχει τιμή $\varphi = 127^\circ 30' + 20'/60' \approx 127,33^\circ$.



Σχήμα 14.6 – Παράδειγμα μέτρησης γωνίας με βερνιέρο. Η γωνία έχει τιμή μεταξύ $127,30^\circ$ και $128,00^\circ$. Παρατηρώντας τη σύμπτωση με την κλίμακα του βερνιέρου, η τιμή υπολογίζεται σε $127,33^\circ$.

- Ευθυγραμμίστε τον κατευθυντήρα και τη διόπτρα με τη φωτεινή πηγή, χωρίς το πρίσμα, έτσι ώστε, όταν η διόπτρα στοχεύει το κέντρο της λυχνίας, η γωνία που διαβάσετε στο βερνιέρο να είναι ίση με μηδέν, $0^\circ 0'$. Αν δεν είναι μηδέν, απασφαλίζετε την οπτική τράπεζα του φασματόμετρου που φέρει την κλίμακα του βερνιέρου (ο κοχλίας ακινητοποίησής της βρίσκεται στο πλάι της κάτω βάσης της διάταξης). Με τον κοχλία μικρομετρικής ρύθμισης της θέσης της κλίμακας ρυθμίστε, ώστε να δείχνει μηδέν. Αν δεν κάνετε το μηδενισμό της κλίμακας, πρέπει να σημειώσετε την τιμή της γωνίας, για να την αφαιρέσετε από τις μετρήσεις σας.
- Εστίαση της διόπτρας χωρίς να υπάρχει το πρίσμα. Σκοπεύουμε με τη διόπτρα στρέφοντάς την σε μακρινό αντικείμενο, και με το προσοφθάλμιο σύστημα της διόπτρας ρυθμίζουμε ώστε το είδωλο να φαίνεται ευκρινές.
- Ρύθμιση του κατευθυντήρα χωρίς το πρίσμα. Ευθυγραμμίστε τον κατευθυντήρα και τη διόπτρα με τη φωτεινή πηγή, χωρίς το πρίσμα, έτσι ώστε η διόπτρα να στοχεύει το κέντρο της λυχνίας. Ως φωτεινή πηγή χρησιμοποιούμε μια λυχνία διάπυρων ατμών υδραργύρου (Hg). Στον πίνακα 14.2 δίνονται τα χαρακτηριστικά του γραμμικού φάσματός της. Ρυθμίστε τον κατευθυντήρα, ώστε στο οπτικό πεδίο να εμφανίζεται το είδωλο της σχισμής.

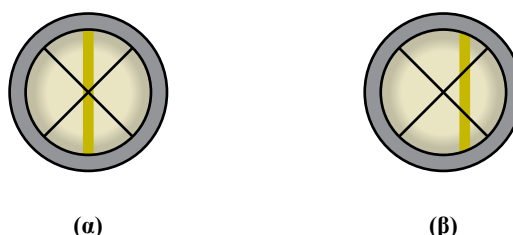
λ (nm)	Χρώμα	Ένταση
404,656	βιολετί	ισχυρή
407,780	ιώδες	ισχυρή
435,835	μπλε	πολύ ισχυρή
491,604	κυανό (πορτοκαλί-κίτρινο)	πολύ ασθενής (δύσκολο να παρατηρηθεί)
546,074	πράσινο	πολύ ισχυρή
576,959	κίτρινο 1	Ισχυρή
579,065	κίτρινο 2	ασθενής
623,437	κόκκινο	ασθενής (δύσκολο να παρατηρηθεί)

Πίνακας 14.2 – Τα χαρακτηριστικά του γραμμικού φάσματος της λυχνίας διάπυρων ατμών υδραργύρου (Hg).

- Μετρήστε το μήκος της βάσης του πρίσματος b και στη συνέχεια τοποθετήστε το πρίσμα πάνω στη βάση του, ώστε η κορυφή της θλαστικής του γωνίας να βρίσκεται προς τη φωτεινή πηγή και η διεύθυνση του κατευθυντήρα να είναι διχοτόμος της γωνίας αυτής.
- Στρέψτε την τράπεζα του πρίσματος, ώστε η θλαστική γωνία του πρίσματος να έρθει σε θέση παρόμοια με εκείνη που δείχνει το σχήμα 14.5.
- Έχοντας αρχικά τη διόπτρα σε ευθεία με τον κατευθυντήρα, αρχίστε να τη στρέφετε αντιστερόστροφα (counter-clockwise, ccw), ψάχνοντας να δείτε το γραμμικό φάσμα του φωτός της λυχνίας (χρωματιστές κατακόρυφες γραμμές). Η γωνία που σχηματίζει η εισερχόμενη με την εξερχόμενη ακτίνα είναι η γωνία εκτροπής ε (σχήμα 14.5). Η γωνία ε εκτός του μή-

κους κύματος εξαρτάται και από τη γωνία της διεύθυνσης της εισερχόμενης ακτίνας με τη διεύθυνση της πλευράς του πρίσματος, δηλαδή από τη θέση του πρίσματος. Για να βρείτε τη θέση του πρίσματος, ώστε η γωνία εκτροπής να είναι ελάχιστη, ακολουθήστε την παρακάτω διαδικασία:

- Παρατηρήσετε με τον προσοφθάλμιο της διόπτρας την πράσινη γραμμή του φάσματος.
 - Ελευθερώστε την τράπεζα του πρίσματος και αρχίστε να τη στρέφετε αριστερόστροφα. Θα παρατηρήσετε ότι η γραμμή μετακινείται δεξιόστροφα, δηλαδή η εκτροπή μεγαλώνει.
 - Τώρα αρχίστε να στρέφετε την τράπεζα του πρίσματος δεξιόστροφα (clockwise, cc), οπότε παρατηρείτε ότι η γραμμή μετακινείται αριστερόστροφα, δηλαδή η γωνία εκτροπής μικραίνει, μέχρι κάποιο οριακό σημείο μετά το οποίο η γραμμή αρχίζει πάλι να φεύγει δεξιόστροφα. Σε αυτό το οριακό σημείο έχουμε τη θέση ελάχιστης εκτροπής, και εκεί σταθεροποιούμε με τον κοχλία τη βάση του πρίσματος.
9. Αφού έχετε σταθεροποιήσει το πρίσμα στη θέση ελάχιστης εκτροπής, σκοπεύστε με τη διόπτρα κάθε φασματική γραμμή (βλέπε πίνακα 14.2) και μετρήστε με την ακρίβεια του βερνιέρου τη γωνία ελάχιστης εκτροπής για κάθε γραμμή. Η σωστή σκόπευση μιας φασματικής γραμμής γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 14.7.



Σχήμα 14.7 – Η σωστή σκόπευση μιας φασματικής γραμμής: (α) σωστή σκόπευση, (β) λάθος σκόπευση.

10. Τοποθετήστε τη διόπτρα σε ευθεία με τον κατευθυντήρα και την πηγή και μετρήστε τη γωνία ε_o της απ' ευθείας δέσμης του φωτός της λυχνίας. Η τιμή αυτή, αν δεν είναι μηδέν, πρέπει να αφαιρείται από όλες τις μετρήσεις σας. Καταχωρήστε τις μετρήσεις σας σε έναν πίνακα μετρήσεων όπως ο πίνακας 14.3.

$\varepsilon_o = \dots^\circ \dots'$ $b = \dots$ (mm)*				
	ε_{min}		$\varepsilon_{min} - \varepsilon_o$	
Χρώμα	Μοίρες	Λεπτά του τόξου	Μοίρες	Λεπτά του τόξου
Ιώδες 1	...	...	...	...
Ιώδες 2				
Κυανό				
Πράσινο				
Κίτρινο 1				
Κίτρινο 2				

Πίνακας 14.3 – Καταχώριση μετρήσεων. *Μήκος βάσης πρίσματος.

14.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Με χρήση της σχέσης (14.4) και τους πίνακες 14.2 και 14.3 υπολογίστε το δείκτη διάθλασης του γυαλιού του πρίσματος, για το μήκος κύματος της κάθε φασματικής γραμμής.
2. Σχεδιάστε σε χαρτί μιλιμετρέ το δείκτη διάθλασης του γυαλιού του πειράματός σας, ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Η καμπύλη αυτή καλείται **καμπύλη διασποράς**.
3. Υπολογίστε την εξίσωση της ευθείας και σχεδιάστε την ευθεία $n_\gamma = f(1/\lambda^2)$ με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Πριν υπολογίσετε την ποσότητα $1/\lambda^2$, θα πρέπει να μετατρέψετε το μήκος κύματος λ σε μm .
4. Από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίστε την εξίσωση ευθείας της $n_\gamma = f(1/\lambda^2)$ και τον συντελεστή συσχέτισης R^2 ή r^2 (correlation coefficient). Όσο η τιμή του R^2 πλησιάζει τη μονάδα, τόσο πιο μεγάλη είναι η προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων με τις θεωρι-

τικές τιμές του Cauchy. Φαίνεται ότι ο σταθερός όρος και η κλίση της ευθείας είναι οι όροι A και B της εξίσωσης του Chauchy, σχέση (14.6).

5. Συγκρίνετε τις τιμές των A και B που υπολογίσατε στο βήμα 4 με τις αντίστοιχες στον πίνακα 14.1 και βρείτε ποιο είναι το υλικό του πρίσματος.
6. Από τη σχέση (14.6) υπολογίστε το δείκτη διάθλασης του πρίσματος του πειράματος, για μήκη κύματος $\lambda_F=484,1\text{nm}$, $\lambda_C=656,3\text{nm}$ και $\lambda_D=589,3\text{nm}$, χρησιμοποιώντας τις σταθερές A και B που υπολογίσατε στο βήμα 4. Στη συνέχεια από τη σχέση (14.7) υπολογίστε τον αριθμό Abbe. Βρίσκεται μέσα στην αναμενόμενη περιοχή τιμών;
7. Από τις σταθερές A και B που υπολογίσατε στο βήμα 5 να υπολογίσετε τις τιμές των μηκών κύματος κάθε χρωματικής φασματικής γραμμής που παρατηρήσατε σε αυτό το πείραμα, κάνοντας χρήση του τύπου του Cauchy.
8. Υπολογίστε τη διακριτική ικανότητα του πρίσματος του πειράματός σας, από τη σχέση (14.8), χρησιμοποιώντας ως λ_1 και λ_2 τα θεωρητικά λ_1 και λ_2 των γραμμών του κίτρινου (κίτρινο 1 και κίτρινο 2), όπου $\Delta\lambda=\lambda_1-\lambda_2$ και $\lambda=\lambda_1$.

14.4 Πείραμα 2

14.4.1 Σκοπός

- Ανάλυση πολυχρωματικού φωτός με φασματόμετρο φράγματος.
- Υπολογισμός των μηκών κύματος άγνωστου φάσματος (π.χ. Hg).
- Υπολογισμός της διακριτικής ικανότητας φράγματος.

14.4.2 Θεωρία

14.4.2.1 Ανάλυση πολυχρωματικού φωτός με φράγμα περίθλασης

Φράγμα περίθλασης είναι μία οποιαδήποτε περιοδική διάταξη περιθλώντων στοιχείων (οπές ή εμπόδια). Ένα τυπικό περιθλαστικό φράγμα φέρει N σχισμές, παράλληλες, εύρους a , με σταθερή τη μεταξύ τους απόσταση d .

Ένας τρόπος να αναλυθεί το πολυχρωματικό φως σε ένα φασματόμετρο είναι με φράγμα πολλών σχισμών. Σταθερά ενός φράγματος ονομάζουμε το μέγεθος d , το οποίο είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές σχισμές.

Αν το επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει στο φράγμα κάθετα όπου η απόσταση μεταξύ των σχισμών του είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος του φωτός, τότε λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα συμβολής και περίθλασης του φωτός. Το αποτέλεσμα τους είναι η δημιουργία, για κάθε χρώμα, φωτεινών και σκοτεινών περιοχών (κροσσών συμβολής) μετά το φράγμα. Η συνθήκη της συμβολής δίνεται από τη σχέση:

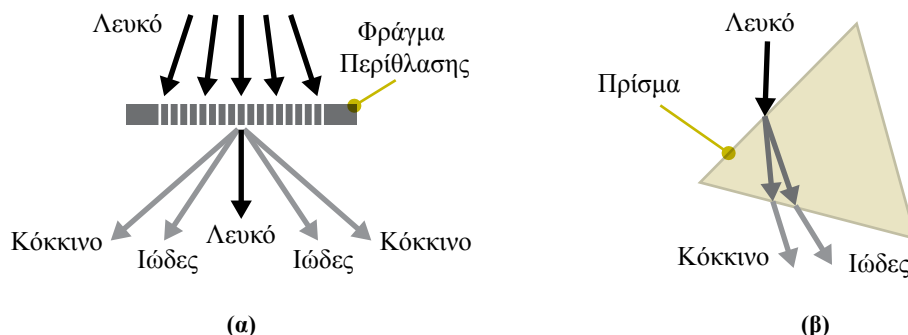
$$m\lambda = d \sin \theta_m \quad (14.10)$$

όπου m η τάξη του κροσσού συμβολής και είναι ακέραιος αριθμός ($m=0, 1, 2, 3, \dots$) με $m=0$ να αντιστοιχεί στον κεντρικό κροσσό, ενώ, π.χ. για $m=1$, έχουμε την πρώτη τάξη κροσσών (αριστερά και δεξιά από τον κεντρικό κροσσό), ενώ για $m=2$, έχουμε τη δεύτερη τάξη κροσσών (αριστερά και δεξιά από τον κεντρικό κροσσό), λ το μήκος κύματος της φωτεινής πηγής, d η σταθερά του φράγματος που ορίζεται ως η απόσταση δύο διαδοχικών σχισμών, π.χ. για ένα φράγμα με 1.000 σχισμές ανά χιλιοστό, είναι $d=1/1.000\text{mm}$, θ_m η γωνία εκτροπής της φωτεινής ακτίνας από το κέντρο της πηγής (είναι αντίστοιχη της γωνίας εκτροπής ε στο πρίσμα) που αντιστοιχεί σε κροσσό m τάξης.

Στην περίπτωση που έχουμε πολυχρωματικό φως, δηλαδή αποτελείται από πολλά μήκη κύματος, σύμφωνα με τη σχέση (14.10), κάθε χρώμα (για κάθε m) θα εκτρέπεται υπό διαφορετική γωνία και, επομένως, θα γίνεται ανάλυση του φωτός για κάθε τάξη κροσσού. Το φάσμα επαναλαμβάνεται για κάθε τάξη m .

Είναι προφανές ότι στο κέντρο ($m=0$, $\theta_0=0$) όλα τα χρώματα θα βρίσκονται στην ίδια θέση και, επομένως, θα συνθέτουν το χρώμα της φωτεινής πηγής.

Η σχέση $\sin\theta_m \leq 1$ περιορίζει τις τιμές m που επαληθεύουν τη σχέση για φως, δεδομένων μήκους κύματος λ και φράγματος με απόσταση σχισμών d . Για παράδειγμα, αν $\lambda=6.000\text{\AA}$ και $d=2\mu\text{m}$, για $m \geq 4$ δεν παρατηρούνται μέγιστα. Έχουμε μέγιστα μόνο για $\theta=0^\circ$, $17,5^\circ$, $36,3^\circ$ και $64,2^\circ$.



Σχήμα 14.8 – (α) Διάθλαση λευκού φωτός σε φράγμα περίθλασης και (β) σε πρίσμα. Παρατηρήστε ότι στην πρώτη περίπτωση το κόκκινο εκτρέπεται περισσότερο από ό,τι στη δεύτερη. Επίσης, στην πρώτη περίπτωση δημιουργούνται φάσματα δεξιά και αριστερά του παρατηρητή ενώ στην άλλη περίπτωση μόνο από τη μια μεριά.

14.4.2.2 Μέτρηση του μήκους κύματος

Από τη σχέση (14.10), όταν είναι γνωστή η σταθερά d του φράγματος και μετρηθούν οι γωνίες θ_m , μπορούμε να προσδιορίσουμε το μήκος κύματος του ορατού φωτός που προκαλέσει κάθε φασματική γραμμή. Το πόσες τάξεις m συμβολής μπορούμε να παρατηρήσουμε εξαρτάται από τη διακριτική ικανότητα R του φράγματος.

14.4.2.3 Διακριτική ικανότητα (spectral resolution, R)

Τα φράγματα περίθλασης και τα πρίσματα διαχωρίζουν το φως στις επιμέρους συνιστώσες μηκών κύματος λ_1 , λ_2 , λ_3 κ.λπ. Τα φράγματα περίθλασης είναι μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας σε σχέση με τα πρίσματα.

Η διακριτική ικανότητα φράγματος N σχισμών υπολογίζεται ως εξής:

$$R = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\bar{\lambda}}{\Delta\lambda} = Nm \quad (14.11)$$

όπου m οι τάξεις κροσσών που μπορεί να παρατηρηθούν με το φράγμα, λ_1 , λ_2 είναι δύο μήκη κύματος που είναι πολύ κοντά μεταξύ τους ($\lambda \sim \lambda_1 \sim \lambda_2$), ενώ ως $\bar{\lambda}$ ορίζουμε τη μέση τιμή των δύο μηκών κύματος:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (14.12)$$

14.4.3 Εκτέλεση

1. Αντικαταστήστε το πρίσμα με το φράγμα περίθλασης 600 γραμμές/mm. Η επιφάνεια του φράγματος τοποθετείται κάθετα στην πορεία της φωτεινής δέσμης της λυχνίας. Ρυθμίστε το φασματόμετρο, έτσι ώστε, όταν η διόπτρα στοχεύει το κεντρικό χρώμα του φάσματος της λυχνίας, η γωνία που διαβάζετε στο βερνιέρο να είναι ίση με μηδέν, $0^\circ 0'$. Αν δεν είναι μηδέν, απασφαλίστε την οπτική τράπεζα του φασματόμετρου που φέρει την κλίμακα του βερνιέρου (ο κοχλίας ακινητοποίησης της βρίσκεται στο πλάι της κάτω βάσης της διάταξης). Με τον κοχλία μικρομετρικής ρύθμισης της θέσης της κυκλικής κλίμακας ρυθμίστε

το βερνιέρο, ώστε να δείχνει μηδέν. Αν δεν κάνετε το μηδενισμό της κλίμακας πρέπει να σημειώσετε την τιμή της γωνίας για να την αφαιρέσετε από τις μετρήσεις σας.

2. Για να δείτε οξείες γραμμές φάσματος, ρυθμίστε στον κατευθυντήρα στενό εύρος σχισμής, 0,1 έως 0,3mm. Για να δείτε καθαρά το σταυρόνημα, ρυθμίστε εμπρός-πίσω τον προσοφθάλμιο φακό στη διόπτρα.
3. Στρέψτε με αργό ρυθμό τη διόπτρα αριστερόστροφα, για να παρατηρήσετε το γραμμικό φάσμα, που εμφανίζεται αμέσως μετά τον κεντρικό κροσσό για την πρώτη και δεύτερη σειρά φάσματος. Για την πρώτη φορά το $m=1$, και για τη δεύτερη φορά, που επαναλαμβάνεται αμέσως μετά την πρώτη σειρά φάσματος, το $m=2$.
4. Για το γραμμικό φάσμα που εμφανίζεται για πρώτη φορά ($m=1$), δεξιά ως προς τον παρατηρητή, θέστε το σταυρόνημα της διόπτρας πάνω σε κάθε χρωματική γραμμή που συναντάτε, και για κάθε μια από αυτές μετρήσετε τη γωνία εκτροπής της, καταγράφοντας τις παρατηρήσεις σας σε πίνακα της μορφής του πίνακα 14.3.
5. Επαναλάβετε τη διαδικασία, στρέφοντας τη διόπτρα αριστερά ως προς τον παρατηρητή. Σε αυτή την περίπτωση η γωνία εκτροπής που μετράτε στο βερνιέρο πρέπει να αφαιρεθεί από τις 360° .

14.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Υπολογίστε τη μέση τιμή της γωνίας εκτροπής (τιμή δεξιά+τιμή αριστερά)/2 για την πρώτη τάξη κροσσών. Από τη σχέση (14.10) και τις μέσες τιμές των μετρήσεών σας, υπολογίστε την πειραματική τιμή του μήκους κύματος κάθε χρωματικής φασματικής γραμμής.
2. Συγκρίνετε ποσοτικά, (εκατοστιαία διαφορά), τις πειραματικές τιμές των μηκών κύματος, που βρήκατε με τις θεωρητικές τιμές των μηκών κύματος του πίνακα 14.2.
3. Συγκρίνετε τα αποτελέσματά σας με τα αντίστοιχα του πειράματος 1.
4. Υπολογίστε τη διακριτική ικανότητα, σχέση (14.11), του φράγματος περίθλασης του πειράματός σας, χρησιμοποιώντας ως λ_1 και λ_2 τις δύο γραμμές του κίτρινου (κίτρινο 1 και κίτρινο 2).

14.5 Ενδεικτική βιβλιογραφία

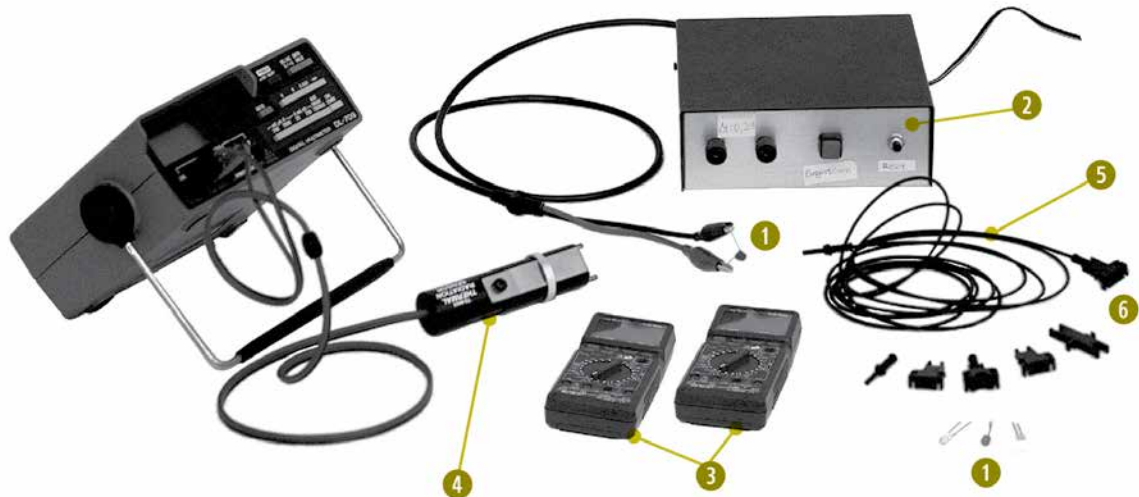
[1] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 465-487.

[2] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 20: Diffraction of Light waves, Diffraction grating,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 549-553.

[3] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 38: Diffraction of light Waves,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.

ΑΣΚΗΣΗ 15

Μελέτη φωτοδιόδου (φωτοανιχνευτή) και διόδου εκπομπής φωτός LED



15.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. LED, Φωτοδιόδοι (φωτοανιχνευτές).
2. Τροφοδοτικό με δύο εξόδους.
3. Δύο ψηφιακά πολύμετρα.
4. Optical power meter για τη μέτρηση της οπτικής ισχύος που προσπίπτει σε φωτοανιχνευτή
5. Οπτική ίνα.
6. Προσαρμογείς συνδέσεων.
7. Αντιστάσεις 500kΩ (δεν φαίνονται στη φωτογραφία).

15.2 Απαραίτητες γνώσεις

Ηλεκτρική αγωγιμότητα στερεών, ημιαγωγοί τύπου n, ημιαγωγοί τύπου p, δίοδοι ημιαγωγών, επαφές p–n, οπτικές πηγές LED, εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (φωτοαγωγιμότητα, φωτοβολταϊκό φαινόμενο), φωτοανιχνευτές.

15.3 Πείραμα

15.3.1 Σκοπός

- Προσδιορισμός των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών μιας φωτοδιόδου, δηλαδή της γραφικής παράστασης $I=f(V)$, της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τη φωτοδίοδο ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης V για διάφορες τιμές της ισχύος P της οπτικής ακτινοβολίας.
- Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της ενέργειας της φωτοδιόδου, δηλαδή των γραφικών παραστάσεων $I_p=f(P)$ και $V_p=f(P)$, του φωτορεύματος, που δίνει η φωτοδίοδος, και της φωτοβολταϊκής τάσης ως συνάρτηση της οπτικής ισχύος.

15.3.2 Θεωρία

15.3.2.1 Εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Όταν ένας ημιαγωγός (semiconductor) φωτίζεται, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας και, γενικά, την αλλαγή των ηλεκτροφυσικών παραμέτρων του. Το φαινόμενο αυτό είναι το εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (photoelectric effect), πάνω στο οποίο στηρίζεται η φωτοαγωγιμότητα (photoconductivity) και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (photovoltaic effect).

Κατά το φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας, όταν φως πέφτει πάνω σε έναν ημιαγωγό, δημιουργούνται προϋποθέσεις τέτοιες, ώστε να προκαλείται αύξηση των ελευθέρων ηλεκτρικών φορέων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο εμφανίζεται σε διατάξεις ημιαγωγών, όπως επαφές p-n, και οφείλεται στο φράγμα δυναμικού που αναπτύσσεται στην περιοχή της επαφής (junction). Με την πρόσπτωση του φωτός πάνω στον ημιαγωγό, το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο διαχωρίζει τους ηλεκτρικούς φορείς που δημιουργούνται, ηλεκτρόνια, θετικές οπές. Λόγω αυτού του διαχωρισμού, παράγεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη που ονομάζεται φωτοηλεκτρεγερτική.

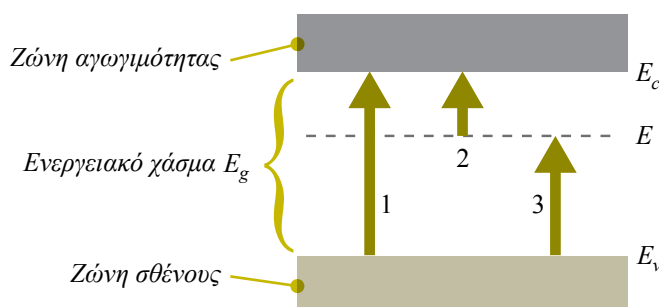
Τα παραπάνω φαινόμενα, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή φωτοανιχνευτικών διατάξεων. Συγκεκριμένα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο βρίσκει εφαρμογή στις φωτοδίοδους, στα φωτοτρανσίστορ, και σε άλλες διατάξεις με επαφή p-n, ενώ η φωτοαγωγιμότητα βρίσκει εφαρμογή στις φωτοαντιστάσεις.

Λόγω των ιδιοτήτων τους, οι φωτοανιχνευτικές διατάξεις εφαρμόζονται με μεγάλη επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις:

- Μπορούν να ανιχνεύσουν οπτικές ακτινοβολίες με μεγάλη ευαισθησία.
- Μετατρέπουν οπτικά σήματα σε ηλεκτρικά με μεγάλη πιστότητα.
- Μπορούν να κάνουν εσωτερική ενίσχυση του σήματος και, συνεπώς, έχουν μεγάλη απόδοση.
- Παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα στις χαρακτηριστικές τους, δεδομένου ότι η επίδραση της θερμοκρασίας θεωρείται αμελητέα.
- Για τη λειτουργία τους χρειάζεται η εφαρμογή χαμηλής ηλεκτρικής τάσης, ενώ διατάξεις, όπως π.χ. οι φωτοδίοδοι, λειτουργούν και χωρίς την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης.
- Οι διαστάσεις τους είναι πολύ μικρές και προσαρμόζονται εύκολα σε διατάξεις, π.χ. σε οπτικές ίνες.
- Είναι αρκετά ανθεκτικές, αφού συμπληρώνουν αρκετά χρόνια λειτουργίας, όταν λειτουργούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

15.3.2.2 Φωτοαγωγιμότητα

Έστω ότι φωτόνια με μήκος κύματος $\lambda < \lambda_g$, πέφτουν πάνω σε ένα ημιαγωγό. Αυτά τα φωτόνια δίνουν την ενέργεια τους στα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη σθένους (valence band) και τα καθιστούν ικανά να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Δηλαδή τα φωτόνια μεταφέρουν την ενέργεια τους στα ηλεκτρόνια, διεγείρουν τα άτομα του ημιαγωγού και δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρόνια και θετικές οπές). Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται η αγωγιμότητα του ημιαγωγού (μετάβαση 1 στο σχήμα 15.1).



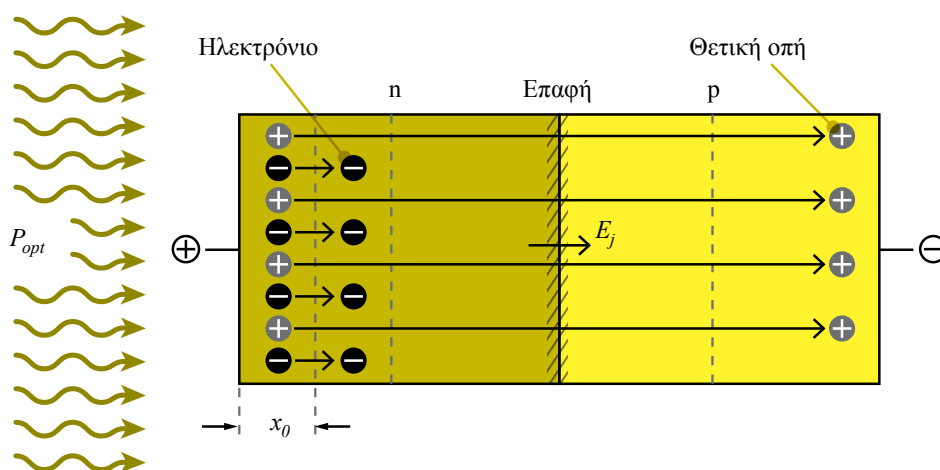
Σχήμα 15.1 – Εξήγηση του φαινομένου της φωτοαγωγιμότητας.

Σε ημιαγωγούς που έχουν προσμίξεις άλλων ατόμων, όταν απορροφήσουν ακτινοβολία, η ενέργεια των φωτονίων δαπανάζεται και για τη διέγερση των ατόμων πρόσμιξης (μεταβάσεις 2 και 3 στο σχήμα 15.1).

Για προσπίπτουσα οπτική ακτινοβολία με δεδομένο μήκος κύματος, το φωτορεύμα που δημιουργείται στον ημιαγωγό είναι ανάλογο της οπτικής ισχύος που προσπίπτει σε αυτόν.

15.3.2.3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Στο σχήμα 15.2, οπτική ακτινοβολία πέφτει κάθετα στο επίπεδο της επαφής p-n σε μία δίοδο ημιαγωγών και «φωτίζει» την περιοχή n της διόδου. Όταν το υλικό απορροφά τα φωτόνια, των οποίων η ενέργεια είναι μεγαλύτερη ή ίση από το εύρος E_g του ενεργειακού χάσματος (energy gap), στην περιοχή n της διόδου εμφανίζονται ζεύγη ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρόνια – θετικές οπές), μέχρι ένα βάθος x_0 από την επιφάνεια του ημιαγωγού.



Σχήμα 15.2 – Εξήγηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Αυτοί οι φορείς, φωτοφορείς, διαχέονται (diffusion) μέσα στον ημιαγωγό, μέχρι να φτάσουν στην επιφάνεια επαφής. Ο ημιαγωγός πρέπει να έχει τέτοιο πάχος, ώστε ένα μεγάλο μέρος από αυτούς να φτάνει στην επαφή πριν επανασυνδεθούν. Εκεί επέρχεται ο διαχωρισμός των φωτοφορέων. Τα ηλεκτρόνια εμποδίζονται να διαχυθούν στον ημιαγωγό p από το ηλεκτρικό πεδίο επαφής E_j , και έτσι αυτά συσσωρεύονται στη περιοχή του ημιαγωγού n που συνορεύει με την επαφή (βλέπε σχήμα 15.2).

Αντίθετα, οι θετικές οπές επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο επαφής E_j , περνάνε την επαφή και διαχέονται στον ημιαγωγό p. Επομένως παρατηρούμε ότι, το ρεύμα των φορέων που διαρρέει την επαφή p-n είναι αποτέλεσμα των φορέων μειονότητας (θετικές οπές).

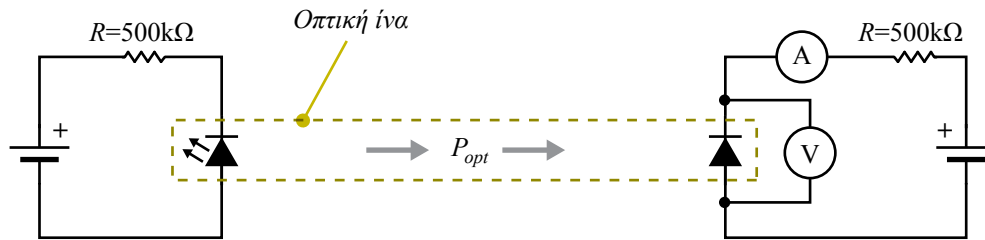
Ως τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η εμφάνιση ηλεκτρικής πόλωσης στα άκρα της φωτοδίοδου, όπου ο ημιαγωγός n φορτίζεται αρνητικά και ο ημιαγωγός p φορτίζεται θετικά. Αυτή η πόλωση ονομάζεται **φωτοβολταϊκή τάση** και η πηγή που προκύπτει ονομάζεται **φωτοβολταϊκό στοιχείο**.

15.3.2.4 Φωτοδίοδοι p-n

Οι φωτοδίοδοι είναι φωτοευαίσθητοι δίοδοι ημιαγωγών (p-n), των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Όταν φωτίζονται, οι δίοδοι αυτοί συμπεριφέρονται σαν κανονικοί δίοδοι, ενώ, όταν φωτίζονται, αλλάζουν την ηλεκτρική τους συμπεριφορά, εξαιτίας του εσωτερικού φωτοηλεκτρικού φαινομένου που αναπτύσσεται σε αυτές. Το φαινόμενο αυτό, όπως προαναφέραμε, μπορεί να εκδηλωθεί είτε ως φωτοβολταϊκό, όταν δεν υπάρχει εξωτερική ηλεκτρική πόλωση, είτε ως φωτοαγωγιμότητα, όταν υπάρχει πόλωση. Δηλαδή οι δίοδοι μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως φωτοβολταϊκά στοιχεία είτε ως φωτοαγωγία υλικά.

15.3.3 Εκτέλεση

Τα κυκλώματα της πειραματικής διάταξης φαίνονται στο σχήμα 15.3. Οι αντιστάσεις R συνδέονται για την προστασία των κυκλωμάτων.



Σχήμα 15.3 – Κυκλώματα φωτοεκπομπού και φωτοανιχνευτή. Το LED και η φωτοδίοδος συνδέονται με οπτική ίνα.

15.3.3.1 Ηλεκτρική χαρακτηριστική φωτοδιόδου

1. Τροφοδοτήστε το LED με μία τάση. Συνδέστε το LED με την οπτική ίνα (optical fiber) στο power meter και μετρήστε τη φωτεινή ισχύ P_1 . Αποσυνδέστε την οπτική ίνα από το μετρητή ισχύος.
2. Συνδέστε το LED με την οπτική ίνα στη φωτοδίοδο.
3. Η φωτοδίοδος πρέπει να πολωθεί ορθά και ανάστροφα:
 - Πολώστε τη φωτοδίοδο ανάστροφα και μεταβάλλοντας την τάση της από $V_d = -4V$ έως $V_d = -1V$, με βήμα $+1V$, και μετρήστε το αντίστοιχο ρεύμα I_d που τη διαρρέει. Στη συνέχεια πάρετε περίπου πέντε μετρήσεις τάσης και ρεύματος, έως ότου να γίνει το ρεύμα $I_d = 0\mu A$.
 - Πολώστε τη φωτοδίοδο ορθά και πάρετε περίπου πέντε μετρήσεις τάσης και ρεύματος έως ότου να γίνει το ρεύμα $I_d = 20\mu A$.
4. Επαναλάβετε τα παραπάνω βήματα για μια άλλη μεγαλύτερη ισχύ P_2 , αυξάνοντας την τάση στο τροφοδοτικό του LED.
5. Καταγράψτε τις μετρήσεις σας σε πίνακα όπως ο πίνακας 15.1.

$P_1 (\mu W)$		$P_2 (\mu W)$	
$V_d (V)$	$I_d (\mu A)$	$V_d (V)$	$I_d (\mu A)$
-4	...	-4	...
-3		-3	
-2		-2	
-1		-1	
...			

Πίνακας 15.1 – Καταχώριση μετρήσεων.

15.3.3.2 Χαρακτηριστικές της ενέργειας του φωτοανιχνευτή

Αποσυνδέστε τη φωτοδίοδο από το κύκλωμα τροφοδοσίας της.

Για τις τιμές της οπτικής ισχύος, που φαίνονται στον πίνακα 15.2, την οποία θα μετράτε κάθε φορά συνδέοντας το LED με την οπτική ίνα στο power meter, να μετράτε τη φωτοβολταϊκή τάση V_p και το φωτορεύμα I_p στα άκρα της φωτοδιόδου. Κάθε φορά, αφού πρώτα έχετε μετρήσει την οπτική ισχύ, θα συνδέετε το LED με την οπτική ίνα στη φωτοδίοδο.

15.3.4 Επεξεργασία μετρήσεων

1. Από τις τιμές του πίνακα 15.1, να χαράξετε στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων τις γραφικές παραστάσεις $I_d = f(V_d)$ για P_1 και P_2 .
2. Από τις τιμές του πίνακα 15.2, να χαράξετε τις γραφικές παραστάσεις $I_p = f(P)$ και $V_p = f(P)$.

3. Να γράψετε τις παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις γραφικές παραστάσεις.

P_i (μW)	V_p (V)	I_p (μA)
0,05	...	...
0,10		
0,15		
0,20		
0,30		
0,50		
0,80		
1,20		
2,00		
3,00		
6,00		
10,00		
15,00		
20,00		
40,00		
60,00		

Πίνακας 15.2 – Καταχώριση μετρήσεων.

15.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 20: Advance Level Physics, Photo-voltaic Cells, Diffraction grating,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 851-852.
- [2] *Handbook Laser Physics I, Experiments with Coherent Light*, No. 01179.02, PHYWE series of publications, Göttingen: German, 1990.

