

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Οπτική και Ηλεκτρονική Μικροσκοπία

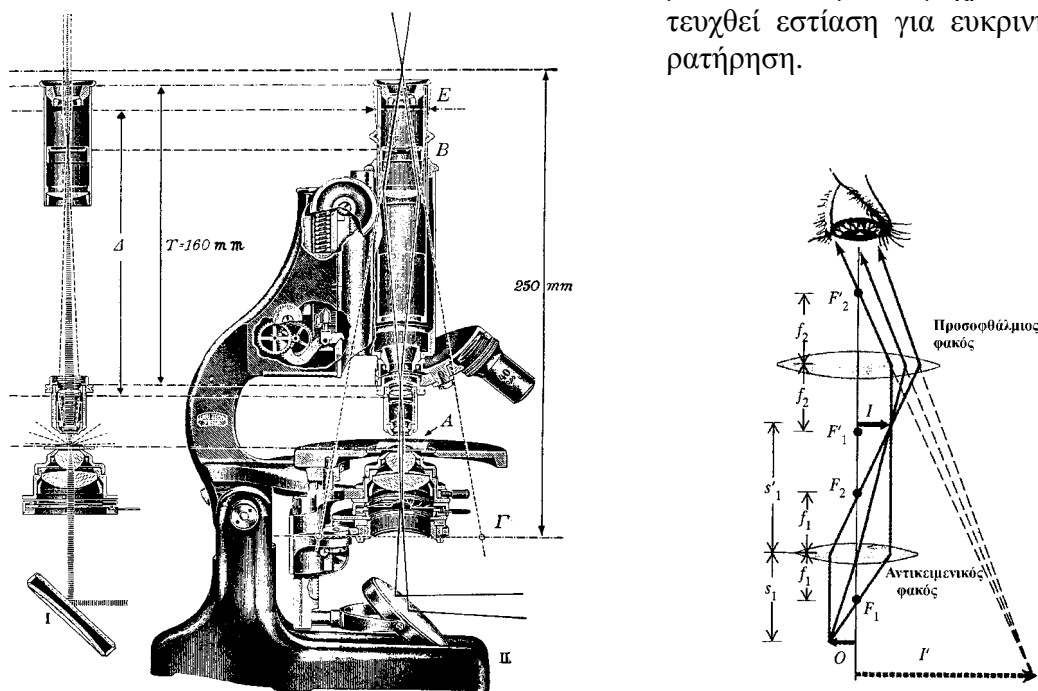
7.1 Το οπτικό μικροσκόπιο

Το οπτικό μικροσκόπιο είναι οπτικό σύστημα για την παρατήρηση αντικειμένων υπό μεγέθυνση, με τη βοήθεια του φωτός. Η παρατήρηση μπορεί να γίνεται είτε μέσω του ανακλώμενου είτε μέσω του διερχόμενου, από τα προς παρατήρηση αντικείμενα, φωτός. Το οπτικό μικροσκόπιο χρησιμοποιείται σε μία ευρεία περιοχή εφαρμογών όπως είναι η Χημεία, η Βιολογία, η Μεταλλουργία, η Επιστήμη των Υλικών κ.λπ.

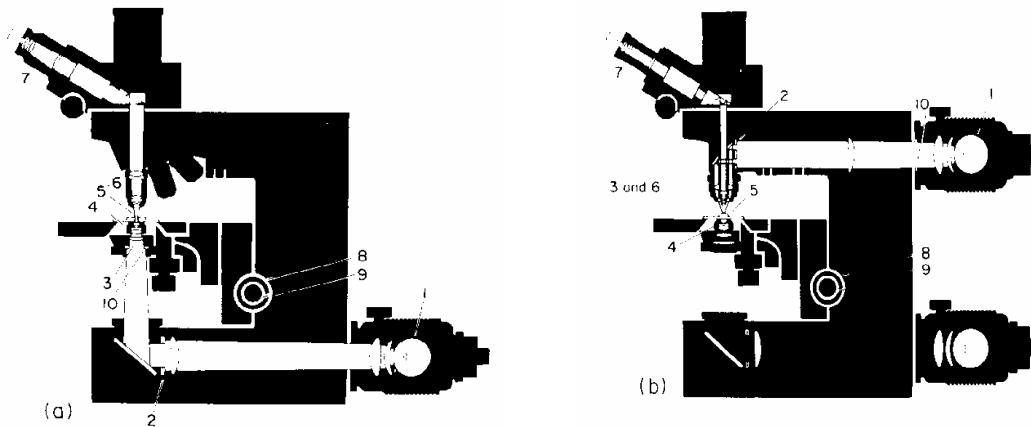
Το απλούστερο μικροσκόπιο είναι ο απλός μεγεθυντικός φακός, ο οποίος όμως δεν ξεπερνά μία μέγιστη μεγέθυνση της τάξης του είκοσι ($20\times$) στην καλύτερη περίπτωση. Το σύνθετο μικροσκόπιο είναι ένα οπτικό όργανο που χρησιμοποιείται για την παρατήρηση, υπό μεγέθυνση (μέχρι και $2000\times$), αντικειμένων που βρίσκονται κοντά στον παρατηρητή (Σχ. 7.1). Αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία: (α) μία πηγή φωτός, (β) έναν συγκεντρωτικό φακό, (γ) έναν αντικειμενικό φακό, και (δ) έναν προσοφθάλμιο φακό.

Το αντικείμενο τοποθετείται πολύ κοντά σε ένα συγκλίνοντα φακό (τον αντικειμενικό ή αντοφθάλμιο φακό), πολύ μικρής εστιακής απόστασης, ο οποίος σχηματίζει ένα πραγματικό είδωλό του. Το είδωλο αυτό μεγεθύνεται από έναν άλλο συγκλίνοντα φακό (τον προσοφθάλμιο φακό), ο οποίος σχηματίζει ένα φανταστικό είδωλο σε μια απόσταση από το μάτι που βρίσκεται ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως. Το μάτι παρατηρεί αυτό το είδωλο. Το μήκος του σωλήνα του μικροσκοπίου έχει συνήθως σταθερό μήκος (τυπικά 160 mm). Έτσι, η εστίαση γίνεται με μετακίνηση του όλου οπτικού συστήματος ως προς το παρατηρού-

μενο αντικείμενο, μέχρι να επιτευχθεί εστίαση για ευκρινή παρατήρηση.



Σχήμα 7.1. Οπτικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 7.2. Η δομή δύο σύγχρονων μικροσκοπίων:
(a) διέλευσης φωτός, και (b) ανάκλασης φωτός.

Στο Σχ. 7.2 φαίνεται η δομή δύο σύγχρονων μικροσκοπίων. Τα δύο μικροσκόπια διαφέρουν ως προς τον τρόπο φωτισμού του παρατηρούμενου αντικειμένου: το ένα, (a), είναι μικροσκόπιο *διέλευσης* φωτός, ενώ το άλλο, (b), είναι μικροσκόπιο *ανάκλασης* φωτός. Οι τρόποι φωτισμού των δειγμάτων, καθώς και οι βασικές επιμέρους συνιστώσες των μικροσκοπίων, όπως φαίνονται στο σχήμα, είναι οι εξής:

(1) πηγή φωτός, (2) διάφραγμα πεδίου (field aperture ή field stop), το οποίο καθορίζει τις διαστάσεις του παρατηρούμενου οπτικού πεδίου, (3) συγκεντρωτικός φακός (condenser), ο οποίος εστιάζει την ακτινοβολία της φωτεινής πηγής στο παρατηρούμενο αντικείμενο, (4) εγγύς συγκεντρωτικός φακός, με ανάλογη λειτουργία, (5) αντικείμενο (δείγμα), (6) αντικειμενικός φακός (objective), ο οποίος δημιουργεί ένα πραγματικό είδωλο του αντικειμένου, με μία εγκάρσια μεγέθυνση (objective Transverse Magnification) M_{To} , τυπικές τιμές της οποίας είναι από $1\times$ μέχρι $100\times$, (7) προσοφθάλμιος (eyepiece, ή ocular, σύστημα προσοφθαλμίων), ο οποίος σχηματίζει την τελική εικόνα του αντικειμένου με μία επιπλέον γωνιακή μεγέθυνση (eyepiece Angular Magnification) M_{Ae} , με τυπικές τιμές από $5\times$ μέχρι $25\times$, (8) αδρή εστίαση, (9) λεπτή εστίαση, (10) διάφραγμα ανοίγματος (φωτισμού), το οποίο καθορίζει την ενεργό διάμετρο του συγκεντρωτικού φακού.

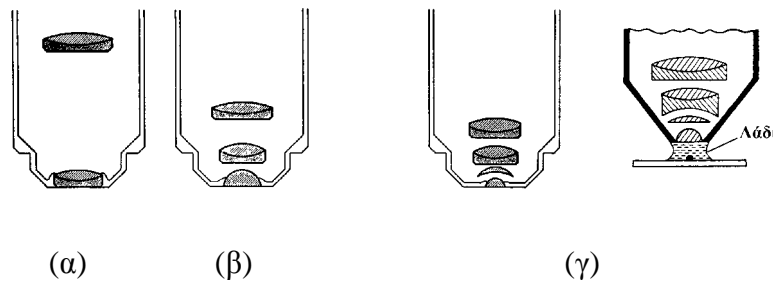
Η τελική *μεγεθυντική ισχύς* (Magnifying Power) MP του μικροσκοπίου είναι

$$MP = M_{To} M_{Ae}, \quad (7.1)$$

με τυπικές τιμές από $5\times$ μέχρι $2500\times$. Οι μεγεθύνσεις M_{To} και M_{Ae} αναγράφονται από τον κατασκευαστή στα αντίστοιχα στοιχεία του μικροσκοπίου, και με κατάλληλο συνδυασμό επιτυγχάνεται η επιθυμητή ολική μεγέθυνση. Τρεις αντικειμενικοί φακοί φαίνονται στο Σχ. 7.3. Τα χαρακτηριστικά των τριών συστημάτων του σχήματος δίνονται στον Πίνακα 7.1.

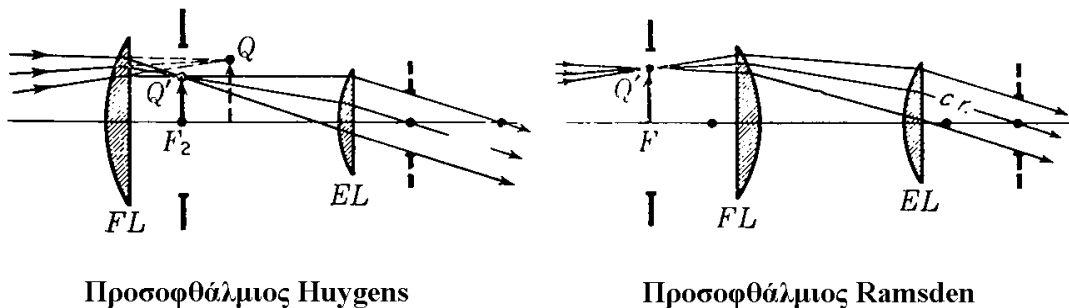
Πίνακας 7.1. Χαρακτηριστικά στοιχεία αντικειμενικών συστημάτων φακών μικροσκοπίου.

Σύστημα (Σχ. 7.3)	Μεγέθυνση	Εστιακή απόσταση (mm)	Απόσταση από το παρατηρούμενο αντικείμενο (mm)
(α)	×10	16	7
(β)	×40	4	6
(γ) (καταδυτικό)	×100	1,6	0,35



Σχήμα 7.3. Αντικειμενικοί φακοί μικροσκοπίου.

Δύο από τα συνηθέστερα συστήματα προσοφθάλμιων φακών φαίνονται στο Σχ. 7.4.



Σχήμα 7.4. Προσοφθάλμιοι φακοί μικροσκοπίου.

Δύο άλλα μεγέθη, τα οποία χαρακτηρίζουν επίσης ένα μικροσκόπιο είναι το *αριθμητικό άνοιγμα* ($NA = \text{Numerical Aperture}$) και η *διακριτική ικανότητα* ($R = \text{Resolution}$), η οποία προσδιορίζεται από το αριθμητικό άνοιγμα NA και το μήκος κύματος λ του φωτός που χρησιμοποιείται για το φωτισμό του αντικειμένου. Το αριθμητικό άνοιγμα NA ορίζεται ως το γινόμενο

$$NA = n \sin \theta, \quad (7.2)$$

όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου που παρεμβάλλεται μεταξύ αντικειμένου και αντικειμενικού φακού (για τον αέρα $n \approx 1$), και θ είναι το μισό γωνιακό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού (η κλίση, ως προς τον οπτικό άξονα, των εξωτερικών ακτίνων που συμμετέχουν στο σχηματισμό της εικόνας). Η διακριτική ικανότητα R_m , ενός οπτικού μικροσκοπίου, που ορίζεται ως η μικρότερη απόσταση δύο σημείων του

αντικειμένου τα οποία είναι διακρίσιμα στην τελική εικόνα, προσδιορίζεται από τα φαινόμενα περίθλασης του αντικειμενικού φακού, και αποδεικνύεται ότι δίνεται από τη σχέση

$$R_m = 0,61 \lambda / NA. \quad (7.3)$$

Μπορούμε, επομένως, να εκτιμήσουμε την διακριτική ικανότητα ενός μικροσκοπίου ανάλογα με τα κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά. Αν, δηλαδή, λειτουργεί έτσι ώστε μεταξύ δείγματος και αντικειμενικού φακού να παρεμβάλλεται αέρας, και οι περιφερειακές, ως προς τον αντικειμενικό φακό, ακτίνες σχηματίζουν γωνία 60° με τον οπτικό άξονα, τότε, χρησιμοποιώντας ένα μέσο μήκος κύματος από το μέσον του ορατού φάσματος ($\lambda \approx 0,55 \mu\text{m}$), υπολογίζουμε τη διακριτική ικανότητα σε $R_m \approx 400 \text{ nm}$. Στην περίπτωση αντικειμενικού φακού που εμβαπτίζεται σε σταγόνα λαδιού μεγάλου δείκτη διάθλασης, έτσι ώστε $NA = 1,4$ και φωτίζεται με φως στο μέσο του ορατού φάσματος, τότε $R_m \approx 240 \text{ nm}$. Οι αντικειμενικοί φακοί σχεδιάζονται συνήθως έτσι ώστε ο συνδυασμός μεγεθυντικής ισχύος (MP) και αριθμητικού ανοίγματος να είναι τέτοιος ώστε οι λεπτομέρειες του αντικειμένου που είναι διακρίσιμες από τον αντικειμενικό φακό να παρουσιάζονται στην τελική εικόνα, μετά τη συνολική μεγέθυνση, με διαστάσεις που αντιστοιχούν στη διακριτική ικανότητα του γυμνού οφθαλμού. Λαμβάνοντας υπόψη αυτήν τη διακριτική ικανότητα του ματιού ($R_e \approx 200 \mu\text{m}$), και τη διακριτική ικανότητα του συγκεκριμένου αντικειμενικού φακού, R_m μπορούμε να υπολογίσουμε τη *μέγιστη χρήσιμη μεγέθυνση* ενός μικροσκοπίου,

$$M = R_e / R_m, \quad (7.4)$$

η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 500 μέχρι 800, για τα δύο παραπάνω παραδείγματα, χωρίς και με εμβάπτιση του αντικειμενικού σε σταγόνα λαδιού, αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις που η ολική μεγέθυνση είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη χρήσιμη μεγέθυνση, κατά περίπτωση, έχουμε τη λεγόμενη «κενή μεγέθυνση», δεδομένου ότι δεν είναι δυνατόν να διακριθεί καμία επιπλέον λεπτομέρεια με την περαιτέρω αύξηση της μεγέθυνσης.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος κάθε μικροσκοπίου είναι το *βάθος πεδίου* ($DOF = \text{Depth of Field}$), το οποίο ορίζεται ως η διαμήκης απόσταση στο πεδίο του δείγματος εντός της οποίας οι λεπτομέρειες του αντικειμένου απεικονίζονται με ένα αποδεκτό βαθμό εστίασης. Το βάθος πεδίου συνδέεται με το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας φωτισμού, το αριθμητικό άνοιγμα NA , και το δείκτη διάθλασης n του μέσου που παρεμβάλλεται μεταξύ αντικειμενικού φακού και δείγματος, με τη σχέση

$$DOF = \lambda \frac{(n^2 - NA^2)^{1/2}}{NA^2}, \quad (7.5)$$

Στον Πίνακα 7.2 που ακολουθεί, παρατίθενται τυπικές τιμές βάθους πεδίου σε συνδυασμό με αριθμητικά ανοίγματα και τα αντίστοιχα συστήματα φακών. Όπως φαίνεται στον πίνακα, οι μεγάλες μεγεθύνσεις και η υψηλή διακριτική ικανότητα των μικροσκοπίων, οι οποίες προκύπτουν για μεγάλες τιμές του αριθμητικού ανοίγματος, έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του βάθους πεδίου.

Πίνακας 7.2.

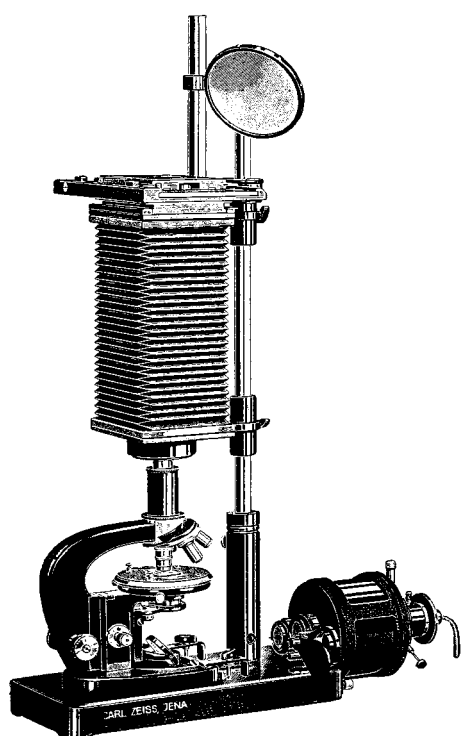
Τυπικές τιμές Αριθμητικού Ανοίγματος (NA), Βάθους Πεδίου (DOF) και των αντιστοιχών συστημάτων φακών, για φωτισμό με πράσινο φως ($\lambda = 0,54 \mu\text{m}$).

Αριθμητικό άνοιγμα	Βάθος πεδίου (μm)	Σύστημα αντικειμενικού φακού
0,25	8	Μη εμβαπτιζόμενος αντικειμενικός φακός
0,40	3	
0,65	1	
0,95	0,18	Εμβαπτιζόμενος αντικειμενικός φακός
1,00	0,62	
1,40	0,16	

Τα μικροσκόπια που περιγράψαμε προηγουμένως, συνήθως λειτουργούν χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνικές φωτισμού και απεικόνισης, οι οποίες προσαρμόζονται κάθε φορά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του παρατηρούμενου δείγματος. Μεταξύ αυτών των τεχνικών φωτισμού και απεικόνισης, η λειτουργία με φωτισμό φωτεινού πεδίου είναι η πλέον συνηθισμένη. Κατά τη λειτουργία με φωτισμό φωτεινού πεδίου η δέσμη φωτισμού εστιάζεται επί του δείγματος, κατά μήκος του οπτικού άξονα του συστήματος, σε γεωμετρία είτε ανάκλασης είτε διάδοσης, οπότε ο μηχανισμός απεικόνισης είναι η σκέδαση ή η απορρόφηση αντίστοιχα. Κατά τη λειτουργία με φωτισμό σκοτεινού πεδίου η δέσμη φωτισμού εστιάζεται επί του δείγματος αφού το κεντρικό μέρος της αποκοπεί από κατάλληλο δίσκο αποκοπής. Με τον τρόπο αυτό, στον αντικειμενικό φακό εισέρχονται μόνο σκεδαζόμενες ακτίνες, και επομένως είναι ο κατάλληλος τρόπος λειτουργίας για την παρατήρηση δειγμάτων που παρουσιάζουν χαμηλή αντίθεση (contrast) σε ανάκλαση ή διάδοση αλλά έχουν λεπτομέρειες οι οποίες σκεδάζουν έντονα το φως. Άλλη τεχνική φωτισμού και απεικόνισης είναι η λειτουργία με χρήση πολωμένου φωτός, κατά την οποία δύο πολωτές, διασταυρωμένοι μεταξύ τους, παρεμβάλλονται, ο μιν ένας μεταξύ πηγής και

αντικειμένου ο δε άλλος μεταξύ αντικειμενικού και προσοφθάλμιου φακού. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την παρατήρηση διπλοθλαστικών ή φωτοελαστικών δειγμάτων, και είναι πολύ χρήσιμη για την παρατήρηση ανισότροπων σκοτεινών δειγμάτων, όταν μελετώνται κατανομές φάσεων, μέγεθος και προσανατολισμός κρυσταλλικών κόκκων, κρυσταλλικές διδυμίες κ.ά.

Το μικροσκόπιο μπορεί να συνδυαστεί με φωτογραφική μηχανή, για τη φωτογράφιση μεγεθυμένων εικόνων των αντικειμένων (Σχ. 7.5).



Σχήμα 7.5. Διάταξη μικροφωτογράφισης.

7.2 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία

Ένα από τα πιο ισχυρά και αποτελεσματικά όργανα για τη μελέτη της μικροδομής των υλικών είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, το οποίο επιτρέπει την μεγεθυμένη απεικόνιση ενός αντικειμένου (δείγματος) με διακριτική ικανότητα της τάξης του nm, μέσω της αλληλεπίδρασής του με μία δέσμη ηλεκτρονίων. Ο χειρισμός της δέσμης των ηλεκτρονίων που προσπίπτει στο δείγμα, όσο και εκείνων που σκεδάζονται (περιθλώνται) από αυτό, γίνεται με τη βοήθεια μαγνητικών φακών. Υπάρχουν διαφόρων ειδών ηλεκτρονικά μικροσκόπια, τα οποία, ανάλογα με τον βασικό μηχανισμό αλληλεπίδρασης είναι γνωστά ως: (α) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης, (β) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Ανάκλασης, (γ) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Εκπομπής, (δ) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, (ε) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Υψηλής Τάσης, κ.α.

Το πρώτο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο κατασκευάστηκε το 1933 από τον Γερμανό μηχανικό Ernst Ruska, ο οποίος τιμήθηκε γι' αυτήν του την ανακάλυψη, με την απονομή του μισού Βραβείου Νόμπελ Φυσικής του 1986, [για τη διάλεξη του E. Ruska, με την αφορμή της απονομής του βραβείου Νόμπελ, βλ. E. Ruska, "The development of the electron microscope and the electron microscopy", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 59(3), Part I, p. 627 (1987)]. Το άλλο μισό βραβείο Nobel, του ίδιου έτους, απενεμήθη στους Gerd Binnig και Heinrich Rohrer για την ανάπτυξη του Σαρωτικού Μικροσκοπίου Σήραγγας (Scanning Tunneling Microscope), [για τη διάλεξη των G. Binnig και H. Rohrer, με την αφορμή της απονομής του βραβείου Νόμπελ, βλ. Gerd Binnig and Heinrich Rohrer, "Scanning tunneling microscopy – from birth to adolescence", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 59 (3), Part I, p. 615 (1987)].

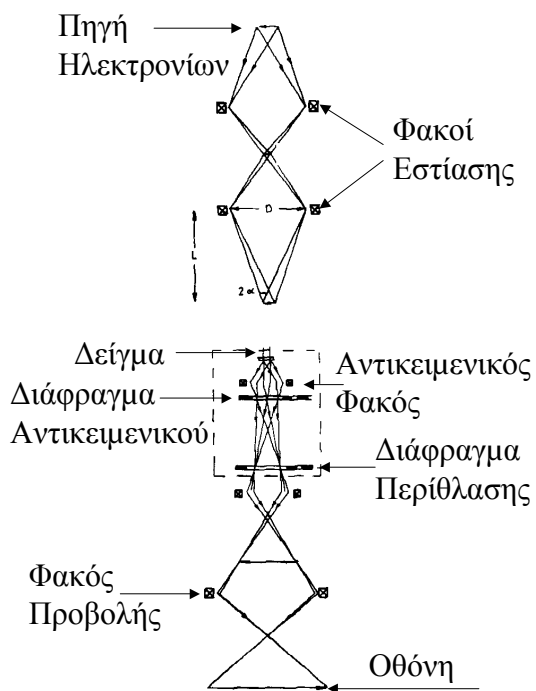
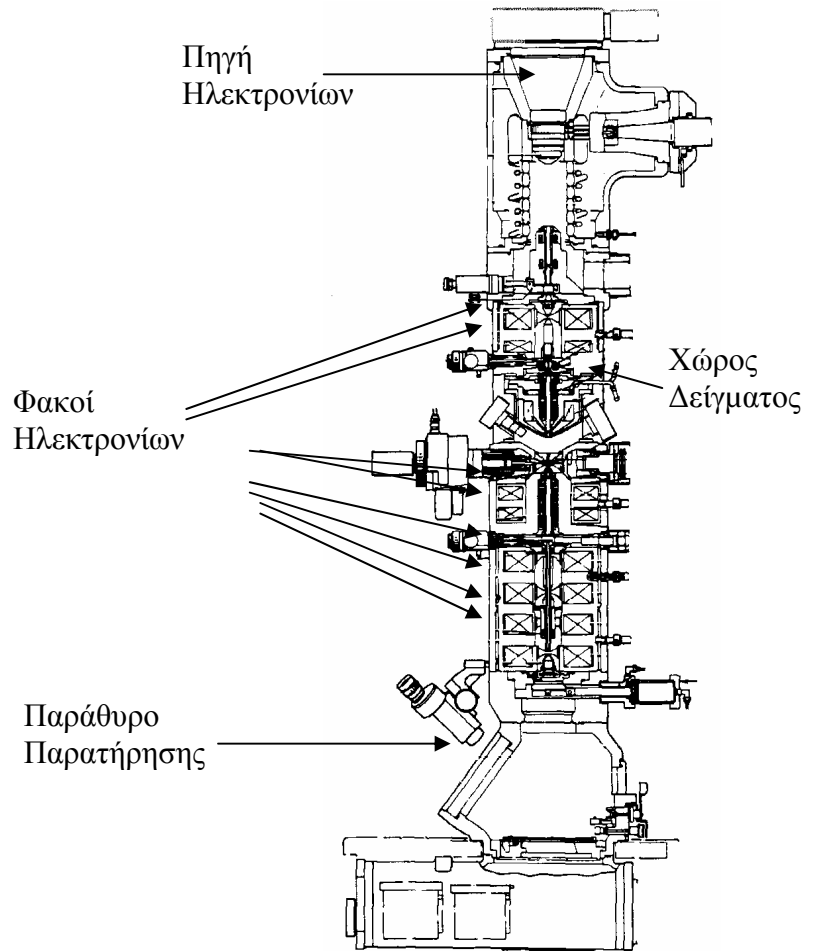
7.2.1 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης

Σε ένα συμβατικό Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης (TEM = Transmission Electron Microscopy), ένα λεπτό δείγμα ακτινοβολείται από μία δέσμη ηλεκτρονίων ομοιόμορφης πυκνότητας ρεύματος. Το δυναμικό επιτάχυνσης σε ένα τυπικό μικροσκόπιο είναι 80 - 120 kV. Μικροσκόπια υψηλότερης διακριτικής ικανότητας λειτουργούν με δυναμικά 200 - 500 kV, ενώ τα μικροσκόπια υψηλής τάσης φτάνουν μέχρι τα 3 MV.

Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από μία κάθοδο, είτε με θερμιονική εκπομπή, είτε με εκπομπή τύπου Schottky, είτε με εκπομπή πεδίου. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια συγκεντρωτικών μαγνητικών φακών, ελέγχεται η περιοχή που φωτίζεται καθώς και η εστίαση της δέσμης. Μετά το δείγμα τα ηλεκτρόνια οδηγούνται, με τη βοήθεια συγκεντρωτικών φακών (επίσης μαγνητικού τύπου), σε μία φθορίζουσα οθόνη. Επειδή τα ηλεκτρόνια υφίστανται ισχυρή ελαστική και μη ελαστική σκέδαση από τα άτομα του δείγματος, για τούτο και το δείγμα πρέπει να είναι αρκούντως λεπτό, ανάλογα, βέβαια, και με την πυκνότητα και τη στοιχειακή σύνθεσή του (π.χ. 5 - 100 nm για ηλεκτρόνια 100 kV).

Η μορφή ενός τυπικού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου φαίνεται στο Σχ. 7.6, όπου διακρίνονται και τα βασικά μέρη του. Παράλληλα, στο Σχ. 7.7 φαίνεται σε σχηματικό διάγραμμα η πορεία των ηλεκτρονίων και η λειτουργία των διαδοχικών μαγνητικών φακών.

Σχήμα 7.6.
Ηλεκτρονικό
μικροσκόπιο
διέλευσης



Σχήμα 7.7.
Η πορεία των ηλεκτρονίων σε ένα
ηλεκτρονικό μικροσκόπιο
διέλευσης.

Στο επάνω μέρος μίας στήλης κενού, υπάρχει η πηγή ηλεκτρονίων, (ή ηλεκτρικό πυροβόλο), το οποίο είναι είτε ένα θερμαινόμενο νήμα βολφραμίου (περίπτωση θερμοηλεκτρονικής εκπομπής), είτε μια λεπτή μεταλλική ακίδα παρουσία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου (περίπτωση εκπομπής πεδίου). Για την αποφυγή ασταθειών στην εκπομπή ηλεκτρονίων, η πρώτη αυτή βαθμίδα βρίσκεται σε υπερυψηλό κενό (της τάξης του 10^{-10} mbar). Η εκπεμπόμενη δέσμη ηλεκτρονίων επιταχύνεται με τη βοήθεια ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε υψηλή τάση (kV – MV).

Ακολουθούν, συνήθως δύο, συγκεντρωτικοί φακοί μαγνητικού τύπου, με τη βοήθεια των οποίων εστιάζεται η δέσμη ηλεκτρονίων. Οι μαγνητικοί φακοί είναι ηλεκτρομαγνητικά πηνία τοποθετημένα έτσι ώστε η δέσμη των ηλεκτρονίων να περνά κατά μήκος του άξονά τους. Στην περιοχή των μαγνητικών φακών το κενό είναι της τάξης του 10^{-7} έως 10^{-4} mbar, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα μόρια του αέρα. Οι συγκεντρωτικοί φακοί προκαλούν εστίαση της δέσμης ηλεκτρονίων, σε μία περιοχή διαστάσεων ολίγων τετραγωνικών μικρομέτρων (μm^2), στο επίπεδο που βρίσκεται το αντικείμενο.

Το αντικείμενο, στην περίπτωση της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διέλευσης, έχει τη μορφή λεπτού δίσκου, το πάχος του οποίου είναι από μερικές δεκάδες μέχρι εκατοντάδες nm. Για την προετοιμασία των δειγμάτων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, όπως: (α) λέπτυνση με δέσμη ηλεκτρονίων, (β) χρήση μικροτόμων υψηλής λεπτότητας, (γ) χημική λέπτυνση, (δ) σχισμός παράλληλα σε κρυσταλλικά επίπεδα, (ε) βομβαρδισμός με δέσμες ιόντων. Η πλευρική διάσταση του δείγματος, το οποίο έχει συνήθως τη μορφή δίσκου, είναι μερικά mm. Το δείγμα εισάγεται στον θάλαμο του μικροσκοπίου μέσω ειδικής θυρίδας που εξασφαλίζει τη διατήρηση του κενού, και τοποθετείται σε διάταξη μικρομετρικών μετατοπίσεων. Τα ηλεκτρόνια τα οποία διέρχονται από το δείγμα περιθλώνται, (σύμφωνα με τον νόμο του Bragg), σε διαφορετικές γωνίες, ανάλογα με τα κρυσταλλικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής του.

Ο αντικειμενικός φακός, ο οποίος βρίσκεται αμέσως μετά το δείγμα, σχηματίζει στο εστιακό του επίπεδο την περίθλαση μακρινού πεδίου του δείγματος (περίθλαση Fraunhofer), η οποία αποτελεί τον μετασχηματισμό Fourier (σε αντίστροφο χώρο) των κρυσταλλικών χαρακτηριστικών του δείγματος. Αυτό επιτρέπει να μελετηθεί η κρυσταλλική δομή του αντικειμένου, με έναν τρόπο ανάλογο εκείνου που χρησιμοποιείται στην περίπτωση της περίθλασης ακτίνων X. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια διέρχονται από έναν ενδιάμεσο φακό, με τη βοήθεια του οποίου σχηματίζεται ένα ενδιάμεσο είδωλο, το οποίο (ως αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier του προηγούμενου) αποτελεί μεγεθυμένη απεικόνιση (σε ευθύ χώρο) του αντικειμένου. Το ενδιάμεσο αυτό είδωλο, μέσω ενός τελευταίου φακού (φακός προβολής), προβάλλεται, μετά από μία τελευταία μεγέθυνση, σε φθορίζουσα οθόνη, για παρατήρηση ή φωτογράφιση.

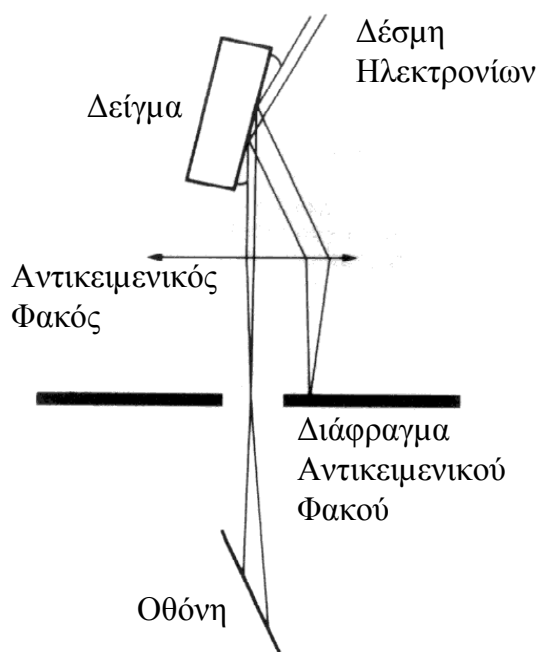
Άλλοι τύποι ηλεκτρονικών μικροσκοπίων

Εκτός από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης, άλλοι τύποι ηλεκτρονικών μικροσκοπίων με ευρεία χρήση είναι οι ακόλουθοι:

7.2.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Ανάκλασης

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ανάκλασης (REM = Reflection Electron Microscope) λειτουργεί με βάση τα αρχικά (οπισθοσκεδαζόμενα) ηλεκτρόνια από το προς παρατήρηση δείγμα. Η απεικόνιση της επιφάνειας που ανακλά τα ηλεκτρόνια

επιτυγχάνεται με μία γεωμετρία πρόσπτωσης-ανάκλασης, όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχ. 7.8.



Σχήμα 7.8.
Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ανάκλασης.

Το στοιχείο παρατήρησης (ανιχνευτής ή φθορίζουσα οθόνη) βρίσκεται σχεδόν πάνω στον άξονα της αρχικής δέσμης των ηλεκτρονίων. Το προς παρατήρηση δείγμα παρεμβάλλεται έτσι ώστε η πρόσπτωση και η ανάκλαση των ηλεκτρονίων να γίνονται σε μικρές γωνίες (“ξυστά”) ως προς την επιφάνεια του δείγματος, ($\leq 10^\circ$). Με αυτόν τον τρόπο, το εύρος της ενεργειακής διασποράς των ανακλώμενων ηλεκτρονίων είναι της τάξης των 100 έως 200 eV, οπότε τα αντίστοιχα «χρωματικά» σφάλματα κατά την απεικόνισή τους ελαχιστοποιούνται. Η διακριτική ικανότητα ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ανάκλασης μπορεί να πλησιάσει τα 10 - 20 nm, με τη βοήθεια περαιτέρω ενεργειακής επιλογής, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτροστατικών φακών που λειτουργούν ως ηθμοί (φίλτρα). Λόγω, βέβαια, της μικρής γωνίας εισόδου, υπάρχει ένας περιορισμός ως προς την έκταση των περιοχών που μπορούν να απεικονιστούν με αποδεκτό βαθμό αντίθεσης (contrast), και οι οποίες εκτείνονται, αναγκαστικά, κατά μήκος «ισοϋψών» γραμμών, ως προς το κεκλιμένο δείγμα. Η γωνιακή κατανομή των περιθλώμενων ηλεκτρονίων, στην περίπτωση που το δείγμα είναι κρυσταλλικό, συνιστά ένα σχήμα περίθλασης ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας από ανάκλαση (RHEED = Reflection High Energy Electron Diffraction), σύμφωνα πάλι με τη συνθήκη του Bragg. Αν απομονωθούν συγκεκριμένες κηλίδες περίθλασης Bragg, μπορεί να σχηματισθούν εικόνες οι οποίες παρουσιάζουν κρυσταλλογραφική διακριτικότητα (contrast). Είναι φανερό ότι ένα Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης μπορεί να λειτουργήσει ως Μικροσκόπιο Ανάκλασης με τη χρήση ενός κατάλληλου δειγματοφορέα, ώστε να εξασφαλίζεται η υπό κλίση πρόσπτωση των ηλεκτρονίων στο δείγμα και η πορεία των ανακλώμενων ηλεκτρονίων παράλληλα στον άξονα του αντικειμενικού φακού.

7.2.3 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Εκπομπής

Σε ένα Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Εκπομπής (EEM = Emission Electron Microscope), το προς παρατήρηση δείγμα αποτελεί την κάθοδο εκπομπής της δέσμης ηλεκτρονίων του μικροσκοπίου. Τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από έναν

ηλεκτροστατικό φακό και σχηματίζουν μία ενδιάμεση εικόνα της κατανομής έντασης της εκπομπής, από την επιφάνεια του δείγματος-καθόδου. Αυτή η εικόνα μπορεί να μεγεθυνθεί περαιτέρω, με τη χρήση επιπρόσθετων φακών, και να προβληθεί είτε σε φθορίζουσα οθόνη είτε με τη βοήθεια ενισχυτών εικόνας. Η εκπομπή ηλεκτρονίων από το δείγμα-κάθοδο μπορεί να προκληθεί με διάφορους τρόπους, όπως:

(α) Θέρμανση της καθόδου (θερμιονική εκπομπή), οπότε η παρατήρηση μπορεί να γίνει σε υψηλές θερμοκρασίες και σε ορισμένα υλικά διαφορετικά, η θερμοκρασία μπορεί να διατηρηθεί σε θερμοκρασίες όχι υψηλότερες από 500-1000 °C, αν εναποτεθεί στην επιφάνεια μία λεπτή στρώση Βαρίου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του έργου εξόδου του υλικού της καθόδου, ώστε η εκπομπή ηλεκτρονίων με τη βοήθεια ηλεκτρικού πεδίου να γίνεται πιο εύκολα.

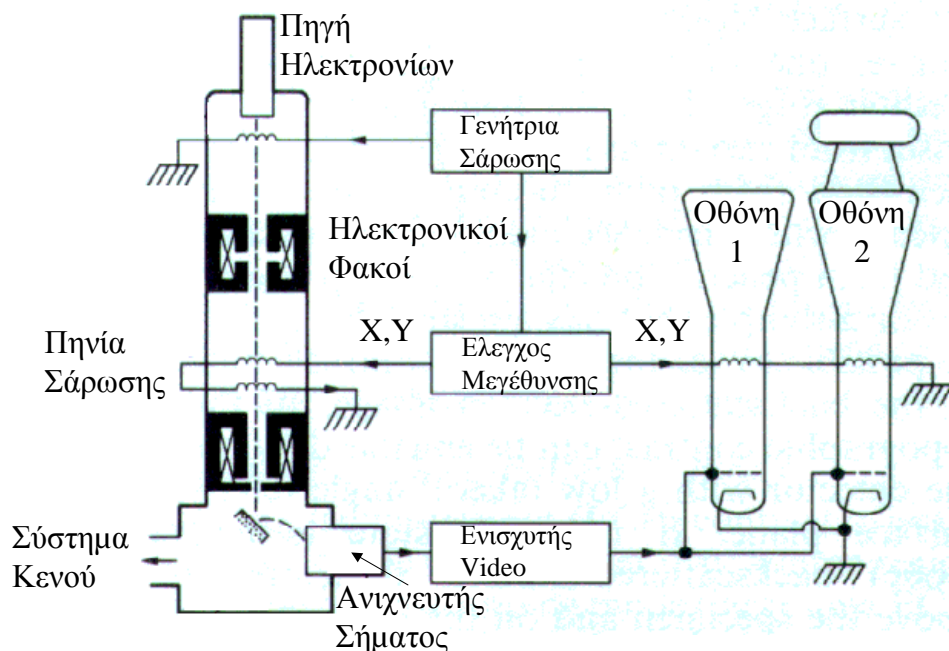
(β) Διέγερση δευτερογενών ηλεκτρονίων, η οποία επιτυγχάνεται με βομβαρδισμό της επιφάνειας του δείγματος-καθόδου με μία ανεξάρτητη δέσμη ηλεκτρονίων ή ιόντων υψηλής ενέργειας, σε μεγάλη γωνία εισόδου.

(γ) Ακτινοβολία της καθόδου με υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία προκαλεί την εκπομπή φωτοηλεκτρονίων.

Η παρατήρηση επιφανειών με την τεχνική της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Εκπομπής μπορεί να στηριχθεί σε μία από τις ανωτέρω τεχνικές για να πετύχει διαφορετική διακριτότητα (contrast). Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η απαίτηση για επίπεδη επιφάνεια παρατήρησης, γι' αυτόν το λόγο και έχει υποσκελισθεί από τις τεχνικές της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM) (βλ. παρακάτω), και της Σαρωτικής Μικροσκοπίας Σήραγγας (STM).

7.2.4 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM = Scanning Electron Microscope) είναι ένα από τα πλέον χρήσιμα συστήματα, από όσα χρησιμοποιούν οπτική ηλεκτρονίων, για τη μελέτη των συμπαγών δειγμάτων. Ένα σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης φαίνεται στο Σχ. 7.9.



Σχήμα 7.9. Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης χρησιμοποιεί μία λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων (ενέργειας από 0 έως 50 keV), η οποία, αφού περάσει από μία ακολουθία δύο ή τριών φακών εστίασης, οι οποίοι είναι συνδυασμένοι με κατάλληλα διαφράγματα, καταλήγει να έχει διάμετρο 2 - 10 nm, η ελάχιστη τιμή της οποίας περιορίζεται από το ελάχιστο αποδεκτό ρεύμα της δέσμης ανίχνευσης το οποίο δεν μπορεί να είναι χαμηλότερο από μερικά pA (10^{-12} A), για λόγους εξασφάλισης ικανοποιητικού λόγου Σήμα/Θόρυβος. Η λεπτή αυτή δέσμη κατευθύνεται, με τη βοήθεια ενός πηνίου οδήγησης, έτσι ώστε να σαρώνει με περιοδικό τρόπο την προς μελέτη επιφάνεια του δείγματος. Η προσπίπτουσα δέσμη προκαλεί την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων (SE = Secondary Electrons), με ενέργειες 2 έως 5 eV, και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BSE = Back-Scattered Electrons), με ενέργειες που κυμαίνονται από την ενέργεια των ηλεκτρονίων της δέσμης μέχρι περίπου 50 eV. Εκπέμπονται επίσης ηλεκτρόνια που έχουν υποστεί ελαστική σκέδαση ή χαμηλή απώλεια ενέργειας, καθώς και ακτίνες X αλλά και φωταύγεια. Τα προηγούμενα σήματα, αλλά κυρίως τα σήματα δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, ενισχύονται και στη συνέχεια διαμορφώνουν την ένταση μίας εξωτερικής (ανεξάρτητης) καθοδικής δέσμης η οποία προσπίπτει σε φθορίζουσα οθόνη ακολουθώντας την ίδια σάρωση η οποία οδηγεί τη δέσμη του μικροσκοπίου. Το αποτέλεσμα είναι η μεγεθυμένη απεικόνιση, στη φθορίζουσα οθόνη, της επιφάνειας του δείγματος που σαρώνει η δέσμη του μικροσκοπίου. Ανάλογα με την επιλογή του σήματος που θα χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή της εικόνας, αναδεικνύονται διαφορετικά χαρακτηριστικά του δείγματος, δεδομένου ότι τόσο η παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων όσο και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης εξαρτώνται από τις τοπικές τιμές της γωνίας πρόσπτωσης (τοπογραφικά χαρακτηριστικά), τον μέσο ατομικό αριθμό (πληροφορίες για τη σύνθεση) και τον κρυσταλλικό προσανατολισμό (κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά).