

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Οπτικές πηγές

#### XX.1 Οπτικές πηγές

Χαρακτηρίζουμε ως οπτικές πηγές τις διατάξεις που εκπέμπουν Ηλεκτρομαγνητική (H/M) ακτινοβολία στην περιοχή μηκών κύματος του ορατού φάσματος και των παρυφών του. Το *ορατό φάσμα* (VIS = Visible) περικλείεται στην περιοχή μηκών κύματος 400 – 700 nm περίπου. Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί σε ενέργειες φωτονίων 1,8 – 3,1 eV (ισχύει η σχέση:  $E \cdot \lambda = 1239 \text{ eV nm}$ ). Ακτινοβολία με μήκη κύματος μικρότερα των 400 nm χαρακτηρίζεται ως *υπεριώδης* (UV = Ultra-Violet), ενώ ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 700 nm χαρακτηρίζεται ως *υπέρυθρη* (IR = Infra-Red).

Ανάλογα με το αν η εκπεμπόμενη ακτινοβολία έχει διάκριτο ή συνεχή χαρακτήρα στο πεδίο των συχνοτήτων, οι οπτικές πηγές χαρακτηρίζονται ως πηγές *γραμμικού* ή *συνεχούς* φάσματος, αντίστοιχα. Μία ενδιαμέση κατηγορία πηγών είναι οι πηγές συνεχούς μεν φάσματος, ενδιαμέσου όμως εύρους (LED, Λέιζερ βαφής).

#### 4.2 Οπτικές πηγές συνεχούς φάσματος

Πηγές οι οποίες εκπέμπουν σε μία, εκτεταμένη ή περιορισμένη, πάντως συνεχή περιοχή μηκών κύματος, χαρακτηρίζονται ως πηγές συνεχούς φάσματος. Θα παρουσιάσουμε τρεις χαρακτηριστικές οικογένειες πηγών συνεχούς φάσματος, με διαφορετική αρχή λειτουργίας η κάθε μία: (α) οι πηγές μέλανος σώματος, (β) οι πηγές εκκένωσης αερίων υπό υψηλή πίεση, και (γ) οι πηγές σύγχροτρον.

##### 4.2.1 Πηγές μέλανος σώματος

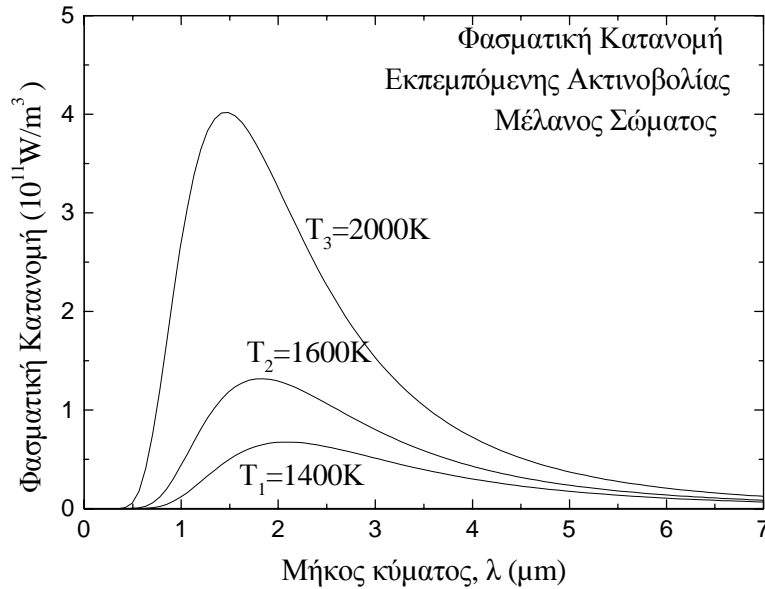
Οι πηγές μέλανος σώματος έχουν ως ενεργό (εκπέμπον) στοιχείο ένα ερυθροπυρωμένο στερεό σώμα (συνήθως αγωγίμο, με τη μορφή νήματος), του οποίου η θερμοκρασία ελέγχεται μέσω του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία προέρχεται από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του στερεού σώματος τα οποία υφίστανται στατιστικές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις λόγω κρούσεων με τα ιόντα του στερεού. Η ένταση και η φασματική κατανομή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του μέλανος σώματος. Για μία πηγή μέλανος σώματος με πεπερασμένες διαστάσεις ορίζουμε ως *λαμπρότητα* (σε  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ) ή *φωτεινότητα* (σε  $\text{lm m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ) την ισχύ που ακτινοβολείται από μονάδα επιφάνειας της πηγής, ανά στερακτίνο, σε μια περιοχή συχνοτήτων  $d\omega$ . Η εξάρτηση των δύο αυτών μεγεθών από τη θερμοκρασία της πηγής και τη συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας διέπεται από τον γνωστό νόμο του Planck

$$L_{\omega}(\omega, T)d\omega = \frac{\omega^2}{8\pi^3 c^2} \frac{\hbar\omega d\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1}, \quad (4.1)$$

όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό,  $k$  η σταθερά του Boltzmann και  $\hbar \equiv h/2\pi$  όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η εκπομπή γίνεται σε μία στερεά γωνία  $2\pi$  sterad (και όχι  $4\pi$  sterad, λόγω του μη σημειακού χαρακτήρα της πηγής). Η συνολική ισχύς που εκπέμπεται ανά στερακτίνο από μονάδα επιφάνειας της πηγής, σε όλες τις συχνότητες, προκύπτει από την ολοκλήρωση της σχέσης (4.1) ως προς  $\omega$ , και είναι ίση με

$$L(T) = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\pi^2 k^4}{60 \hbar^3 c^2} \right) T^4 = \frac{R}{2\pi} T^4, \quad (4.2)$$

όπου  $R = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  είναι η σταθερά ακτινοβολίας των Stefan-Boltzmann. Οι μονάδες της  $L(T)$  είναι  $\text{W/m}^2 \text{ sterad}$ .



**Σχήμα 4.1.** Φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος, για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες.

Από τη σχέση (4.1) μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, εκτός από την αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, έχει ως αποτέλεσμα και τη μετατόπιση του συνολικού φάσματος εκπομπής προς μεγαλύτερες συχνότητες (μικρότερα μήκη κύματος), (βλ. Σχ. 4.1). Το γεγονός αυτό περιγράφεται από τον νόμο της μετατόπισης του Wien

$$\lambda_m T = 2898 \text{ } \mu\text{m K}, \quad (4.3)$$

όπου  $\lambda_m$  είναι το μήκος κύματος στο οποίο παρουσιάζεται το μέγιστο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος σε θερμοκρασία  $T$ . Για παράδειγμα, ο Ήλιος, όπως φαίνεται μέσα από την ατμόσφαιρα, είναι ένα σχεδόν μέλαν σώμα με επιφανειακή θερμοκρασία 6000 K και  $\lambda_m \approx 483 \text{ nm}$ , ελαφρά μικρότερο από τα μήκη κύματος όπου παρουσιάζει τη μέγιστη ευαισθησία του το ανθρώπινο μάτι, δηλαδή  $\lambda_\phi = 560 \text{ nm}$  κατά την ημέρα (φωτωπική όραση) και  $\lambda_\sigma = 500 \text{ nm}$  κατά τη νύχτα (σκοτωπική όραση).

Εμπορικές πηγές ακτινοβολίας, οι οποίες αναπαράγουν αρκετά πιστά την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, διατίθενται αρκετές, όπως: (i) οι λεγόμενοι προσομοιωτές μέλανος σώματος, που είναι απορροφητικές κοιλότητες διαφόρων σχημάτων (κωνικές, κυλινδρικές, σφαιρικές) με μικρές οπές για τον έλεγχο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, (ii) πηγές ερυθροπυρούμενου σώματος, που αποτελούνται από ένα στερεό σώμα, συνήθως σε μορφή κυλίνδρου, το οποίο θερμαίνεται με τη δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος, π.χ. Nernst Glower (κύλινδρος οξειδίου ζirkονίου, υτρίου, βορίου, κ.ά.), Globar (κύλινδρος καρβιδίου το πυριτίου, SiC), Gas Matle (πλέγμα

οξειδίου του θορίου), με αντίστοιχη θερμοκρασία μέλανος σώματος περί τους 900 K, (iii) λάμπες νήματος βολφραμίου, στις οποίες προστίθεται συνήθως μικρή ποσότητα αλογόνου για την αύξηση του χρόνου ζωής τους (γνωστές ως tungsten-halogen), με αντίστοιχη θερμοκρασία μέλανος σώματος άνω των 3000 K.

Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω, οι πηγές μέλανος σώματος χρησιμοποιούνται για την περιοχή του ερυθρού και του υπερώου τμήματος του φάσματος.

#### **4.2.2 Πηγές εκκένωσης αερίων υπό υψηλή πίεση**

Οι πηγές εκκένωσης αερίου υψηλής πίεσης, επίσης εκπέμπουν ένα συνεχές φάσμα, το οποίο δεν διαφέρει πολύ από εκείνο του μέλανος σώματος, δεδομένου ότι οι στοιχειώδεις ακτινοβολητές είναι πάλι τα στατιστικώς επιταχυνόμενα και επιβραδυνόμενα ηλεκτρόνια, μέσω των τυχαίων κρούσεων στο εσωτερικό ενός αερίου σε κατάσταση πλάσματος. Οι πηγές εκκένωσης αερίου όμως έχουν το πλεονέκτημα της υψηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας, π.χ. η θερμοκρασία σε μία λάμπα εκκένωσης υδραργύρου (Hg) μπορεί να πλησιάσει τους 6000 K, για πίεση πλάσματος 1 – 2 ατμόσφαιρες, με αποτέλεσμα την έντονη εκπομπή στην περιοχή του ορατού φάσματος ανάλογη εκείνης του Ηλίου. Παράλληλα, αυτές οι λάμπες μπορούν να περιοριστούν σε έναν πολύ μικρό όγκο, δίδοντας στοιχεία εκπομπής μικρών διαστάσεων, όπως π.χ. 0,1 mm<sup>2</sup>.

Οι υψηλές τιμές θερμοκρασίας και πίεσης προκαλούν διεύρυνση και αλληλεπικάλυψη των ηλεκτρονικών καταστάσεων των ατόμων των αερίων με αποτέλεσμα μία εκπομπή φωτός ευρείας ζώνης, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω. Η πίεση λειτουργίας φθάνει, σε μερικές περιπτώσεις, τις 100 ατμόσφαιρες. Σε αυτές τις πιέσεις, εκτός του ότι υπάρχει κίνδυνος έκρηξης, χρειάζεται επίσης ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο προιονισμού για την έναρξη της εκκένωσης, η οποία επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός παλμού τάσης στην περίπτωση που η υψηλή πίεση υφίσταται πριν την έναρξη λειτουργίας και δεν είναι αποτέλεσμα της υψηλής θερμοκρασίας.

Η απόδοση των πηγών εκκένωσης αερίου υπό υψηλή πίεση, οριζόμενη ως το πηλίκο της ωφέλιμης φωτεινής ισχύος προς την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ, μπορεί να φθάσει το 50 % (σε σχέση με τις λάμπες ερυθροπυρούμενου νήματος, οι οποίες δεν ξεπερνούν το 10 %), ενώ η αντίστοιχη λαμπρότητα μπορεί να φτάνει τα 250 W/cm<sup>2</sup> sterad. Για φασματοσκοπικές εφαρμογές στην περιοχή του υπεριώδους, χρησιμοποιούνται πηγές εκκένωσης αερίων υδρογόνου, ηλίου ή ατμών υδραργύρου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το γυάλινο περίβλημα των πηγών κατασκευάζεται από χαλαζία (SiO<sub>2</sub>) ο οποίος επιτρέπει τη διέλευση και της υπεριώδους ακτινοβολίας. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται προφυλάξεις, καθόσον η υπεριώδης ακτινοβολία είναι επικίνδυνη για τους οφθαλμούς και το δέρμα, ενώ υπεριώδης ακτινοβολία με μήκη κύματος μικρότερα των 250 nm μετατρέπει το ατμοσφαιρικό οξυγόνο σε όζον το οποίο είναι τοξικό.

Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω, οι πηγές εκκένωσης αερίου υπό υψηλή πίεση χρησιμοποιούνται για την περιοχή του ορατού (Xe) και του υπεριώδους (Hg) τμήματος του φάσματος.

#### **4.2.3 Πηγές σύγχροτρον**

Οι πηγές σύγχροτρον είναι συνήθως μεγάλης κλίμακας διατάξεις, οι οποίες επιταχύνουν δέσμες ηλεκτρονίων σε σχετικιστικές ταχύτητες και κυκλικές τροχιές. Το φασματικό εύρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι συνήθως μεγαλύτερο εκείνου των πηγών μέλανος σώματος, εκτείνεται κυρίως στην περιοχή του υπεριώδους ή των ακτίνων X, ενώ υπάρχουν και πηγές σύγχροτρον ειδικά σχεδιασμένες για να εκπέμπουν στο

υπέρυθρο. Εν αντιθέσει με τις πηγές μέλανος σώματος, οι πηγές σύγχροτρον χαρακτηρίζονται από περιορισμένη στερεά γωνία εκπομπής.

Αν οι σχετικιστικές παράμετροι ταχύτητας,  $v$ , και ενέργειας,  $E$ , της δέσμης των ηλεκτρονίων που κινούνται σε κυκλική τροχιά είναι

$$\beta = v/c, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad E = \gamma m_0 c_0^2 \quad (4.4, \alpha, \beta, \gamma)$$

τότε το γωνιακό άνοιγμα της εμπροσθοεκπεμπόμενης (σε σχέση με την κίνηση των ηλεκτρονίων) δέσμης είναι

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{m_0 c^2}{E}, \quad (4.5)$$

ενώ η πόλωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι παράλληλη προς το επίπεδο της κυκλικής τροχιάς των ηλεκτρονίων.

Η φασματική κατανομή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας έχει τη μορφή

$$P_\lambda(\lambda) \propto \frac{c\gamma^7}{R^3} \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^3 \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(x) dx, \quad (4.6)$$

όπου  $R$  η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς,  $K_{5/3}$  η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel, και  $\lambda_c$  το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην (υψηλότερη) συχνότητα αποκοπής του φάσματος.

### 4.3 Οπτικές πηγές γραμμικού φάσματος

Οι οπτικές πηγές γραμμικού φάσματος έχουν ως ενεργό στοιχείο κάποιο αέριο σε χαμηλή πίεση (μερικές δεκάδες Torr) και σε θερμοκρασία δωματίου. Σε αυτές τις συνθήκες, η διεύρυνση και η αλληλεπικάλυψη των ενεργειακών καταστάσεων των ηλεκτρονίων στα άτομα (ή τα μόρια) του αερίου είναι ασήμαντες, οπότε αναδεικνύεται και πάλι ο κβαντικός χαρακτήρας των συστημάτων, με αποτέλεσμα το ενεργειακό διάγραμμα και τα αντίστοιχα φάσματα εκπομπής να είναι διάκριτα (γραμμικά).

Ένα παράδειγμα πηγής γραμμικού φάσματος είναι εκείνο μίας λυχνίας ατομικού υδρογόνου σε χαμηλή πίεση. Το πλεονέκτημα αυτού του παραδείγματος έγκειται στο ότι το άτομο του υδρογόνου είναι ένα σχετικά απλό κβαντικό σύστημα, του οποίου το πειραματικά μετρούμενο φάσμα εκπομπής μπορεί να ερμηνευθεί ικανοποιητικά στο πλαίσιο της παλαιάς Κβαντομηχανικής. Στο πλαίσιο αυτής της ημικλασικής προσέγγισης, η εξίσωση κίνησης ενός ηλεκτρονίου που κινείται σε κυκλική τροχιά ακτίνας  $r$ , υπό την επίδραση της δύναμης Coulomb που ασκεί σε αυτό ένα πρωτόνιο, παίρνει τη μορφή

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (4.7)$$

ενώ η συνολική του ενέργεια είναι

$$E = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (4.8)$$

Οι δύο αυτές σχέσεις, συνδυαζόμενες, οδηγούν στη σχέση:

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}. \quad (4.9)$$

Αν το αποτέλεσμα αυτό συνδυαστεί με τη συνθήκη κβάντωσης του Bohr

$$pr(= m_e v r) = n\hbar, \quad (4.10)$$

προκύπτει η κβάντωση των ακτίνων των τροχιών, σύμφωνα με τη σχέση

$$r = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e}, \quad (4.11)$$

οπότε και οι ενεργειακές καταστάσεις του ηλεκτρονίου [Εξ. (4.9)] αποκτούν διάκριτες τιμές

$$E_n = -\frac{e^4 m_e}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{2\pi c \hbar R}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)}, \quad (4.12)$$

όπου η σταθερά του Rydberg είναι  $R = 1,09738 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  για βαρέα άτομα, και λίγο μικρότερη (0,055%) για την περίπτωση του υδρογόνου, στο οποίο η κίνηση του ηλεκτρονίου επηρεάζει την κινητική κατάσταση του πρωτονίου.

Η σχέση (4.12), για  $n = 1$  αντιστοιχεί στη βασική κατάσταση, για μεγαλύτερα  $n$  αντιστοιχεί σε διεγερμένες καταστάσεις, και για  $n \rightarrow \infty$  αντιστοιχεί στο ελεύθερο ηλεκτρόνιο του ιονισμένου ατόμου. Είναι φανερό ότι κατά τη μετάπτωση ενός ηλεκτρονίου από τη διεγερμένη κατάσταση  $n_2$  στην κατάσταση  $n_1$ , η διαφορά ενέργειας  $\Delta E$ , η οποία εκπέμπεται με τη μορφή φωτονίου συχνότητας  $\nu = \Delta E / h$ , ικανοποιεί τη σχέση

$$\Delta E = h\nu = hcR \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = 13,6 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \text{ (eV)}. \quad (4.13).$$

Ανάλογα με το αν η εκπεμπόμενη ακτινοβολία προέρχεται από διαδικασίες αυθόρμητης ή εξαναγκασμένης αποδιέγερσης, οπότε και χαρακτηρίζεται από μικρό ή μεγάλο βαθμό συμφωνίας αντίστοιχα, διακρίνουμε τις πηγές γραμμικού φάσματος σε δύο κατηγορίες: (α) *ασύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος* (ή λάμπες βαθμονόμησης), και (β) *σύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος* (λυχνίες λείζερ).

#### 4.3.1 Ασύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος

Οι ασύμφωνες πηγές εκπομπής γραμμικών φασμάτων αποτελούνται από μία γυάλινη λυχνία με δύο ηλεκτρόδια, στο εσωτερικό της οποίας τοποθετείται ποσότητα αερίου σε χαμηλή πίεση (μερικά Torr) ή, στην περίπτωση των μεταλλικών στοιχείων, μικρή ποσότητα μετάλλου (π.χ. Hg, Cd, κ.λπ.). Στα ηλεκτρόδια εφαρμόζεται υψηλή τάση (5 – 10 kV), με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικής εκκένωσης που προκαλεί διέγερση των ατομικών ηλεκτρονίων. Οι αποδιεγέρσεις αυτών των ηλεκτρονίων έχουν ως αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά φάσματα εκπομπής. Στην περίπτωση που για τη διέγερση του μεταλλικού στοιχείου απαιτείται η παρουσία βοηθητικού αερίου ή ηλεκτροδίου άνθρακα, τότε το φάσμα του μεταλλικού στοιχείου συνυπάρχει με το φάσμα του βοηθητικού αερίου ή του άνθρακα.

Στην περίπτωση του υδρογόνου, ανάλογα με τον συνδυασμό των  $n_1$  και  $n_2$  έχουμε τις διάφορες σειρές των γραμμών εκπομπής που προέρχονται από τις ατομικές μεταπτώσεις του υδρογόνου, όπως φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.1

**Πίνακας 4.1.** Ατομικές μεταπτώσεις του υδρογόνου

$n_1$	$n_2$	Σειρά	Περιοχή
1	2, 3, 4,...	Lyman	Βαθύ υπεριώδες
2	3, 4, 5,...	Balmer	Εγγύς υπεριώδες και ορατό
3	4, 5, 6,...	Paschen	Εγγύς υπέρυθρο
4	5, 6, 7,...	Bracket	Υπέρυθρο
5	6, 7, 8,...	Pfund	Υπέρυθρο

Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται τα μήκη κύματος χαρακτηριστικών γραμμών εκπομπής από διάφορα στοιχεία, για τις επιμέρους περιοχές του ορατού φάσματος

**Πίνακας 4.2.** Χρώματα και μήκη κύματος γραμμικών πηγών

Στοιχείο	Χρώμα και μήκος κύματος (nm)					
	Κόκκινο	Πορτοκαλί	Κίτρινο	Πράσινο	Μπλε	Ιώδες
H	656	-	-	-	486	410
Na	-	615	589	498	466	449
Hg	691	-	577	546	436	405
K	759	-	587	556	-	445
Kr	-	-	-	-	-	427
He	-	-	-	-	-	412
Ar	696	-	-	-	-	395
Ne	627	598	585	533	-	-

#### 4.3.2 Σύμφωνες πηγές γραμμικού φάσματος (Λείζερ)

Οι σύμφωνες πηγές εκπομπής γραμμικών (ή και ευρύτερης ζώνης) φασμάτων ή πηγές λέιζερ (LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), είναι πηγές των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής. Το ενεργό υλικό των πηγών λέιζερ μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε φάση (στερεά, υγρή, αέρια, πλάσμα), και το φάσμα εκπομπής εκτείνεται, ανάλογα με το ενεργό υλικό, από το υπέρυθρο μέχρι το υπεριώδες.

##### 4.3.2.1 Λείζερ αερίου

Τα λέιζερ αερίου αποτελούνται από μία γυάλινη (ή κεραμική) λυχνία με δύο ηλεκτρόδια, στο εσωτερικό της οποίας τοποθετείται ποσότητα αερίου σε χαμηλή πίεση (μερικά Torr) ή, στην περίπτωση των μεταλλικών στοιχείων, μικρή ποσότητα μετάλλου. Στα ηλεκτρόδια εφαρμόζεται υψηλή τάση (~1 kV), με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικής εκκένωσης που προκαλεί διέγερση των ατομικών ηλεκτρονίων. Οι αυθόρμητες αποδιεγέρσεις αυτών των ηλεκτρονίων έχουν ως αποτέλεσμα, αρχικά, ένα γραμμικό φάσμα εκπομπής ασύμφωνης ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία αυτή

υποχρεώνεται, με τη βοήθεια δύο παράλληλων κατόπτρων, στο εσωτερικό των οποίων βρίσκεται η λυχνία, να επανέλθουν στην περιοχή του διεγερμένου αερίου, προκαλώντας *εξαναγκασμένες αποδιεγέρσεις* των διεγερμένων ατόμων. Οι διαδικασίες αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την εκπομπή ενός *γραμμικού φάσματος σύμφωνης ακτινοβολίας*. Ανάμεσα στους δύο καθρέπτες (*οπτική κοιλότητα*) και τη λυχνία, παρεμβάλλεται συνήθως και ένα πρίσμα με τη βοήθεια του οποίου επιλέγεται ένα μόνο μήκος κύματος. Η παρουσία της οπτικής κοιλότητας και ο μηχανισμός εξαναγκασμένης εκπομπής έχουν ως αποτέλεσμα, εκτός από τον σύμφωνο χαρακτήρα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, και ένα εξαιρετικά μικρό γωνιακό εύρος ( $< 1 \text{ mrad} \approx 3,5$  δευτέρα λεπτά της μοίρας) της σχεδόν παράλληλης δέσμης που εκπέμπουν τα λέιζερ.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται διάφορα συστήματα λέιζερ αερίων και τα μήκη κύματος των κυριότερων γραμμών εκπομπής τους.

**Πίνακας 4.3.** Χαρακτηριστικά λέιζερ αερίων συνεχούς λειτουργίας

<i>Αέριο</i>	<i>Τύπος</i>	<i>Μήκη κύματος (nm)</i>
He-Ne	ατομικό	632, 1152, 3391
CO <sub>2</sub>	μοριακό	9600, 10600
Ar	ιοντικό	351, 364, 458, 466, 476, 478, 488, 496, 511, 514
Kr	ιοντικό	521, 531, 568, 647, 676, 752, 793, 799

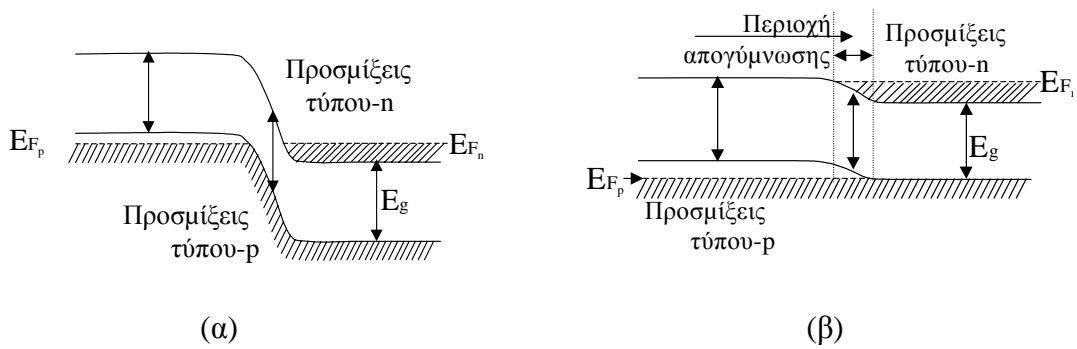
Εκτός από τα συστήματα λέιζερ με αέριο ως ενεργό υλικό, υπάρχουν και συστήματα λέιζερ με ενεργό υλικό στερεό. Τα λέιζερ αυτά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (α) Λέιζερ ιόντων σπανίων γαιών σε διηλεκτρικό περιβάλλον, και (β) λέιζερ ημιαγωγών.

*(α) Λέιζερ ιόντων (συνήθως σπανίων γαιών) σε διηλεκτρικό περιβάλλον*

Αυτά τα λέιζερ στερεού χρησιμοποιούν ως ενεργό υλικό ιόντα (συνήθως σπανίων γαιών) τα οποία φιλοξενούνται σε περιβάλλον διηλεκτρικού υλικού. Η αναστροφή πληθυσμών σε αυτά τα λέιζερ επιτυγχάνεται με οπτική άντληση (διέγερση). Το υλικό φιλοξενίας (γυαλί ή κρυσταλλικό) έχει συνήθως τη μορφή ράβδου. Το πρώτο λέιζερ το οποίο λειτούργησε το 1965, γνωστό ως λέιζερ ρουμπινιού (ruby), με εκπομπή στα 694 nm, ήταν αυτής της κατηγορίας και το ενεργό υλικό ήταν τρισθενή ιόντα χρωμίου ( $\text{Cr}^{3+}$ ) σε περιβάλλον  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Από το πιο γνωστά λέιζερ αυτής της κατηγορίας είναι τα λέιζερ του νεοδυμίου [Nd-YAG (= Yttrium Aluminum Garnet, garnet = πετράδι, ημιπολύτιμος λίθος) και Nd-Glass] τα οποία εκπέμπουν στα 1060 nm (και με διπλασιασμό και τριπλασιασμό συχνότητας μπορούν να εκπέμψουν αποδοτικά επίσης στα 532 nm και 355 nm αντίστοιχα). Λιγότερο διαδεδομένα είναι τα λέιζερ ιόντων ερβίου (Er), το οποίο όταν φιλοξενείται σε κρυσταλλικό περιβάλλον (συνήθως  $\text{YLiF}_4$ ) εκπέμπει στα 850 nm (αλλά και στα 1230 και 1730 nm), καθώς και το λέιζερ ολμίου (Ho) το οποίο εκπέμπει στα 2060 nm (είτε φιλοξενείται σε περιβάλλον YLF είτε σε YAG).

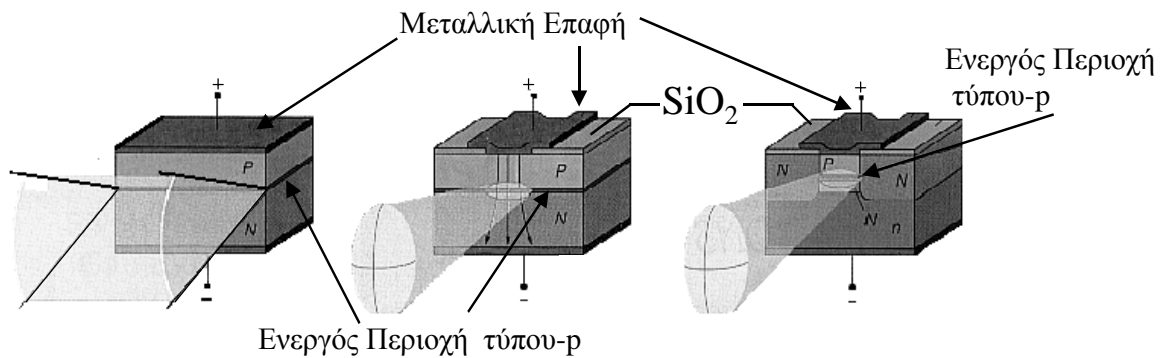
*(β) Λέιζερ ημιαγωγών*

Τα λέιζερ ημιαγωγών χρησιμοποιούν ως ενεργό υλικό ένα ημιαγωγίμο υλικό και συγκεκριμένα τη διοδική επαφή ανάμεσα σε δύο περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από προσμειζεις διαφορετικού τύπου (n και p, Σχ. 4.2α).



**Σχήμα XX.2.** Επαφή ημιαγωγών τύπου p-n, (α) χωρίς πόλωση, και (β) με ορθή πόλωση.

Η διοδική αυτή επαφή λειτουργεί σε ευθεία πόλωση (ο θετικός πόλος της πηγής τροφοδοσίας είναι συνδεδεμένος στην περιοχή τύπου p και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου n, Σχ. 4.2β), έτσι ώστε οι ανασυνδέσεις ηλεκτρονίου-οπής που συμβαίνουν στην περιοχή απογύμνωσης να έχουν ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτός με μήκη κύματος τα οποία αντιστοιχούν περίπου στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγίμου υλικού. Τα φωτόνια που προκύπτουν από αυτές τις αυθόρμητες επανασυνδέσεις έχουν χαρακτηριστικά ασύμφωνης ακτινοβολίας. Η οπτική κοιλότητα που είναι απαραίτητη για την έναρξη του φαινομένου της εξαναγκασμένης εκπομπής (μέσω εξαναγκασμένων επανασυνδέσεων ηλεκτρονίου-οπής) δημιουργείται από δύο παράλληλες κατοπτρικές επιφάνειες, κάθετες στην επαφή p-n, οι οποίες είναι συνήθως πλεγματικά επίπεδα του κρυσταλλικού υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η διοδική επαφή p-n (Σχ. 4.3)



**Σχήμα 4.3.** Σχηματική παράσταση διαφόρων τύπων ημιαγωγίμων λέιζερ.

Ανάλογα με το αν το υλικό που βρίσκεται εκατέρωθεν της διοδικής επαφής είναι ίδιο ή διαφορετικό, έχουμε ημιαγωγικά λέιζερ *ομο-* ή *ετερο-επαφής*. Μερικά από τα εμπορικά διαθέσιμα λέιζερ ημιαγωγών είναι τα λέιζερ GaAs (904 nm), GaAlAs (720 – 900 nm), InGaAs (1060 nm), InGaAsP (1300 – 1550 nm). Τα λέιζερ ημιαγωγών ευρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε διατάξεις ανάγνωσης (ψηφιακών δίσκων, ραβδόμορφων κωδικών, κ.λ.π.), καθώς και σε εκτυπωτές λέιζερ και συστήματα φωτοαναπαραγωγής.



#### 4.4 Πηγές συνεχούς φάσματος ενδιάμεσου εύρους.

Ως πηγές φάσματος ενδιάμεσου εύρους (από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες nm) μπορούμε να θεωρήσουμε τα λέιζερ χρωστικών (dye laser) και τις διόδους εκπομπής φωτός (LED = Light Emitting Diodes).

##### 4.4.1 Λείζερ χρωστικών (dye laser)

Οι χρωστικές είναι συνήθως οργανικά μακρομόρια (περίπλοκα μοριακά συστήματα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας) τα οποία χαρακτηρίζονται, ως εκ τούτου, από ευρείες και ισχυρές ζώνες απορρόφησης στην περιοχή του ορατού ή του υπεριώδους. Διαλύματα αυτών των χρωστικών, σε οργανικούς διαλύτες, όταν διεγερθούν με κατάλληλο μήκος κύματος, παρουσιάζουν ισχυρό φάσμα φθορισμού, και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργά υλικά λέιζερ. Με τη βοήθεια κατάλληλης οπτικής κοιλότητας, η οποία εκτός από τα οπτικά άντλησης και ανάδρασης περιλαμβάνει και ένα οπτικό στοιχείο επιλογής μήκους κύματος (συνήθως ένα διπλοθλαστικό πλακίδιο μεταβλητού προσανατολισμού), τα λέιζερ αυτά μπορούν να εκπέμψουν σε μία ευρεία περιοχή συχνοτήτων αλλά και με δυνατότητα επιλογής μήκους κύματος. Μερικά από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα χρωστικών, με τις οποίες μπορεί να καλύψει κανείς ευρείες περιοχές μηκών κύματος (ανάλογα και με την πηγή διέγερσης η οποία είναι πάντα ένα άλλο λέιζερ), είναι η Ροδαμίνη 6G (ή Rhodamine 560), η οποία ανάλογα με τη διέγερση μπορεί να εκπέμψει στις περιοχές από 420 nm μέχρι 650 nm, η Στιλβήνη 420 (Stilbene, 410 έως 470 nm), η p-Terphenyl (320 μέχρι 350 nm).

##### 4.4.2 Δίοδοι εκπομπής φωτός (LED)

Οι δίοδοι εκπομπής φωτός είναι διοδικές επαφές p-n, οι οποίες, όπως και στην περίπτωση των διοδικών λέιζερ, είναι πολωμένες στην ευθεία φορά, με αποτέλεσμα να παίρνουμε εκπομπή φωτός από τις επανασυνδέσεις ηλεκτρονίου-οπής που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής. Η διαφορά από τα διοδικά λέιζερ είναι ότι δεν υπάρχει οπτική κοιλότητα, με αποτέλεσμα η εκπεμπόμενη ακτινοβολία να είναι ασύμφωνη. Το ρεύμα επίσης που διαρρέει τις διόδους εκπομπής φωτός είναι γενικά χαμηλότερης έντασης από εκείνο που απαιτείται κατά τη λειτουργία των ημιαγωγικών λέιζερ ενώ και το εκπεμπόμενο φάσμα των LED είναι ευρύτερο εκείνου των διοδικών λέιζερ. Το κοινό χαρακτηριστικό διοδικών λέιζερ και LED είναι ότι το ημιαγώγιμο υλικό πρέπει να είναι υλικό με άμεσο ενεργειακό χάσμα. Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο της ζώνης σθένους και το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας πρέπει να βρίσκονται στο κέντρο της ζώνης Brillouin, έτσι ώστε η επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής να είναι επιτρεπτή χωρίς τη μεσολάβηση φωνονίου (πλεγματικής ταλάντωσης) η οποία καθιστά τη διαδικασία επανασύνδεσης λιγότερο πιθανή και επομένως την εκπομπή φωτός πολύ λιγότερο αποδοτική. Το κατάλληλο ημιαγώγιμο υλικό εξασφαλίζεται με επιλεκτική σύνθεση τριμερών ή τετραμερών ενώσεων από στοιχεία, συνήθως, των ομάδων III και V του περιοδικού συστήματος. Για παράδειγμα, μεταβάλλοντας τη σύνθεση της ένωσης  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ , από  $x = 0$  μέχρι  $x = 1$ , μπορεί κανείς να κατασκευάσει διόδους εκπομπής φωτός οι οποίες να εκπέμπουν από την περιοχή του υπερόθρου (940 nm) μέχρι και το πράσινο (565 nm).

#### Βιβλιογραφία

M. Bass (ed.), *Handbook of Optics*, Vol. I, McGraw-Hill, NY 1995, Part 4. *Optical Sources*, σελ. 10.1-14.29.