



HMY 477 – Βιοϊατρική Οπτική

Διδάσκων: Δρ. Κωνσταντίνος Πίτρης

Θεωρίες της φύσης του φωτός: Φως ως σωματίδιο ή Φως ως κύμα



- Η μοριακή (corpuscular) θεωρία του φωτός επικρατούσε μέχρι και το 1660
- Ο Francesco Maria Grimaldi (Bologna) περιέγραψε τη διάθλαση (diffraction) το 1660

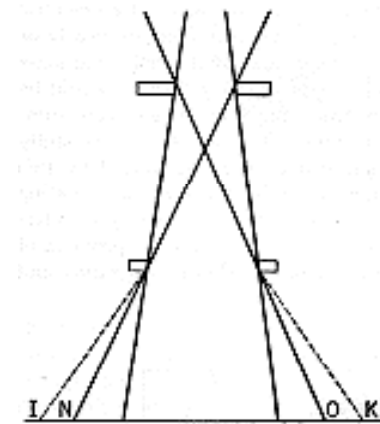
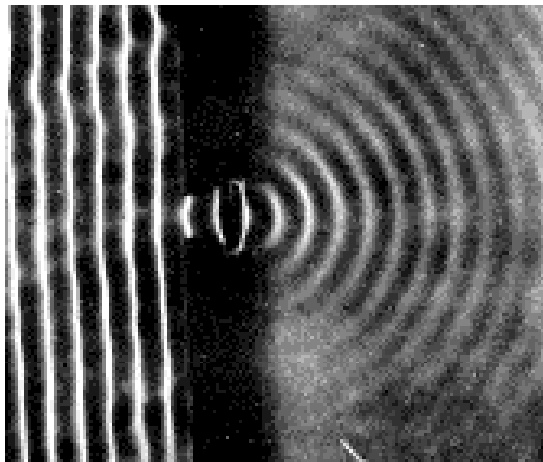


FIG. 315. GRIMALDI'S OBSERVATION OF DIFFRACTION



Το φως ως σωματίδιο



Sir Isaac Newton (1642-1727)

- Ασπάσθηκε τη μοριακή (corpuscular) θεωρία του φωτός λόγω της αδυναμίας της κυματικής να εξηγήσει την ευθύγραμμη διάδοση (rectilinear propagation) .
- Έδειξε ότι το άσπρο φως είναι ένα μείγμα από διάφορα ανεξάρτητα χρώματα.
- Διαφορετικά χρώματα διεγείρουν χαρακτηριστικές δονήσεις στον αιώρα – Η αίσθηση του κόκκινου αντιστοιχεί σε μακρύτερες δονήσεις στον αιώρα.

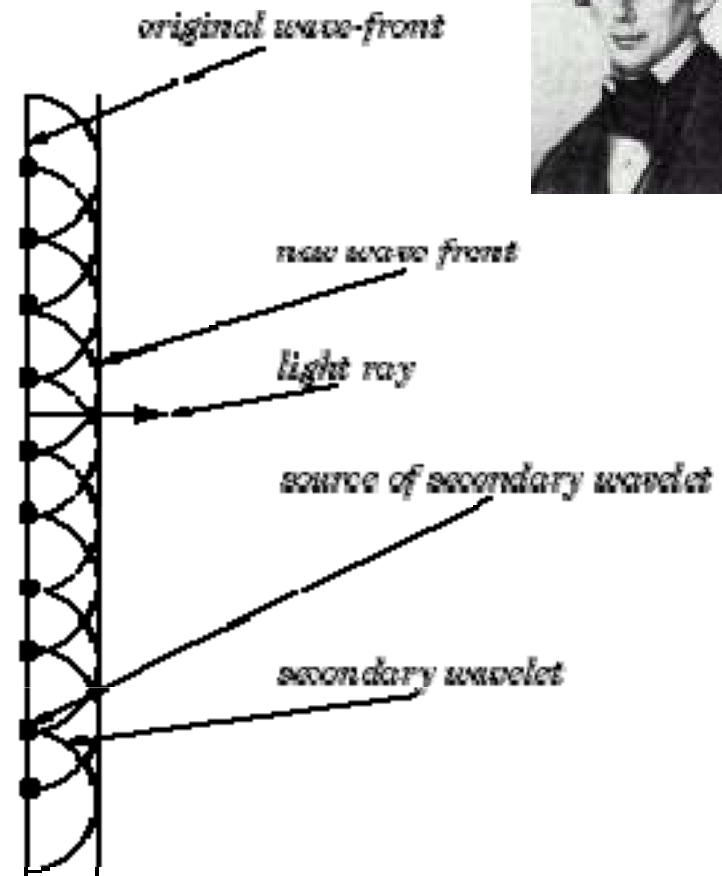


Το φως ως κύμα



Christiaan Huygens
(1629-1695)

- Αρχή του Huygens (Traite de la Lumière, 1678):
- Κάθε σημείο στη πρωτοταγή (primary) κυματομορφή (wavefront) αποτελεί πηγή δευτεροταγούς (secondary) σφαιρικού κυματιδίου, έτσι ώστε σε κάποιο μεταγενέστερο χρόνο η πρωτοταγής κυματομορφή είναι η περιβάλλουσα (envelope) αυτών των κυματιδίων. Τα κυματίδια διαδίδονται με ταχύτητα και συχνότητα ίδια με του πρωτοταγούς κύματος σε σημείο του χώρου.



Το φως ως κύμα

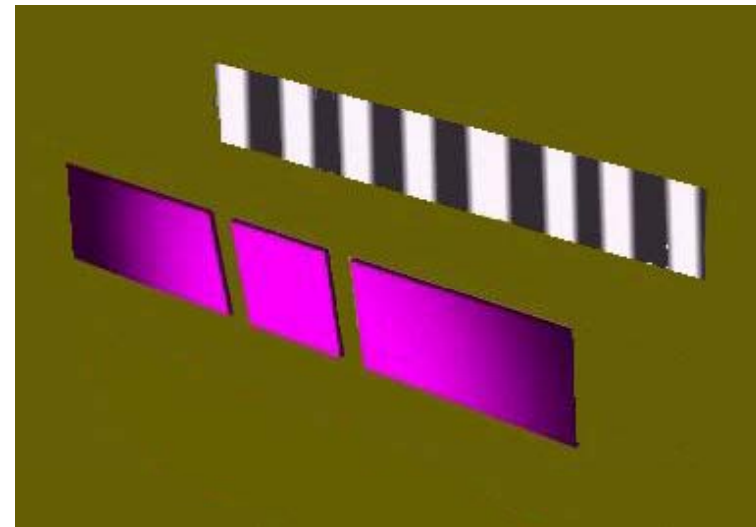


Thomas Young (1773-1829)

- 1801-1803: Εκτέλεσε το πείραμα της διπλής σχισμής, δείχνοντας συμβολή (interference) φωτός από μια πηγή που περνά από δύο λεπτές και παρακείμενες σχισμές, προβαλλόμενη σε μια οθόνη μακριά από τις σχισμές.



Thomas Young (1773-1829)



<http://vsg.quasihome.com/interfer.htm>

Το φως ως κύμα



Augustine Fresnel (1788-1827)

- **1818: Ανέπτυξε μαθηματικές θεωρίες κυματικής συνδυάζοντας έννοιες από τη θεωρία για τη διάδοση των κυμάτων του Huygens και κυματική συμβολή για να περιγράψει τη διάθλαση από σχισμές και μικρές οπές (apertures)**



Το φως ως κύμα



- Michael Faraday (1791-1865)
- 1845: Απέδειξε την ηλεκτρομαγνητική φύση του φωτός δείχνοντας ότι μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση πόλωσης του φωτός χρησιμοποιώντας ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο

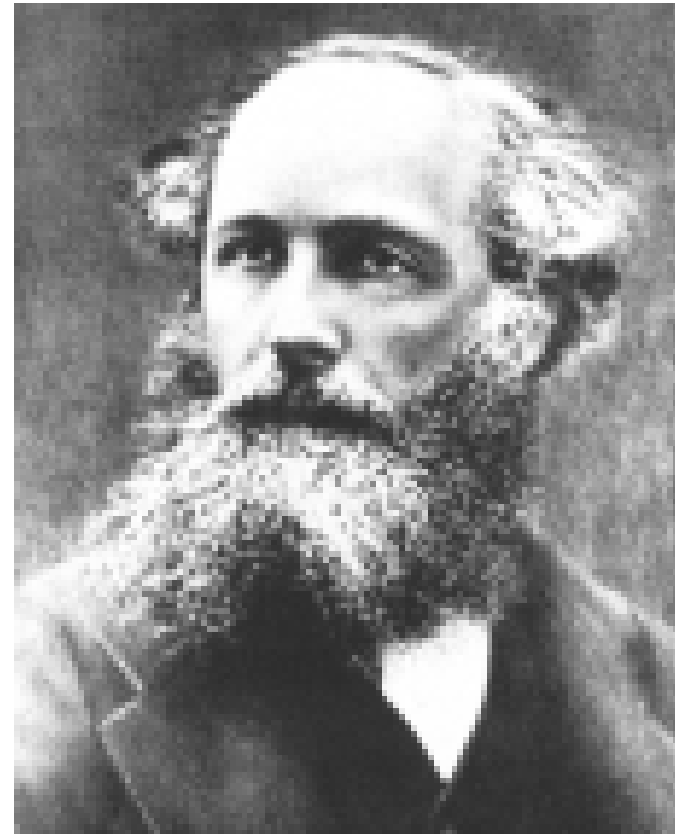


Το φως ως κύμα



James Clerk Maxwell (1831-1879)

- 1873: Θεωρία της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- Το φως είναι μια ηλεκτρομαγνητική διατάραξη σε μορφή κυμάτων που διαδίδονται μέσα από τον “αιθέρα” (ether)



Κβαντική Μηχανική



Max Planck

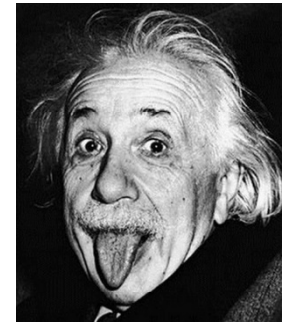


Niels Bohr



Louis de Broglie

- 1900: Ο Max Planck διατυπώνει τη θεωρία ότι παλλόμενα ηλεκτρικά συστήματα μεταδίδουν την ενέργεια τους στο ΗΜ πεδίο σε κβάντα
- 1905: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο του Einstein
 - Το φως αποτελείται από διακριτά ενεργειακά κβάντα, τα φωτόνια, τα οποία αλληλεπιδρούν με ηλεκτρόνια σαν σωματίδια
- 1900-1930: Γίνεται φανερό ότι οι έννοιες των κυμάτων και των σωματιδίων πρέπει να συγχωγευθούν σε υπο-μικροσκοπικά πεδία
- Τα φωτόνια, πρωτόνια, ηλεκτρόνια, και νετρόνια έχουν χαρακτηριστικά τόσο κυμάτων όσο και σωματιδίων
 - Ένα σωματίδιο με ροπή (momentum) p έχει μήκος κύματος που καθορίζεται από τη σχέση $p=h/\lambda$
- Η ΚΜ διευκρινίζει τον τρόπο με τον οποίο το φως απορροφάται και εκπέμπεται από τα άτομα



Einstein



Heisenberg



Schrödinger

Κύματα σε ομοιογενή μέσα



- Εξισώσεις του Maxwell

Name	Differential form	Integral form
Gauss's law	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oiint_{\partial V} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q(V)}{\epsilon_0}$
Gauss's law for magnetism	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oiint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
Maxwell–Faraday equation (Faraday's law of induction)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_S(\mathbf{B})}{\partial t}$
Ampère's circuital law (with Maxwell's correction)	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \Phi_S(\mathbf{E})}{\partial t}$

Κύματα σε ομοιογενή μέσα



- Σε κενό (vacuum) και χωρίς φορτίο μέσο:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

- Παίρνοντας curl του curl:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{B} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

- Χρησιμοποιώντας τη διανυσματική ταυτότητα

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{V}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{V}) - \nabla^2 \mathbf{V}$$

- Καταλήγουμε στις εξισώσεις του κύματος:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - c_0^2 \cdot \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - c_0^2 \cdot \nabla^2 \mathbf{B} = 0$$

- όπου

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

- είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Κύματα σε ομοιογενή μέσα



- **Εξίσωση μονοδιάστατου κύματος**

$$\psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t - \delta) = \text{Re} \left\{ A \exp \left[j(kx - \omega t - \delta) \right] \right\}$$

- Μήκος κύματος (Wavelength): $\lambda = 2\pi/k$
- Συχνότητα (Frequency): $f = \omega/2\pi$
- Ταχύτητα (Speed): $v = \omega k^{-1} = \lambda f$
- Φάση (Phase): $\phi(x, t) = kx - \omega t - \delta$
- Διαφορά Φάσης (Phase shift): $\Delta\phi = 2\pi\Delta x\lambda^{-1}$

- **Επίπεδο Κύμα (Plane Wave)**

$$\psi(\vec{r}) = A \exp[j(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t - \delta)]$$

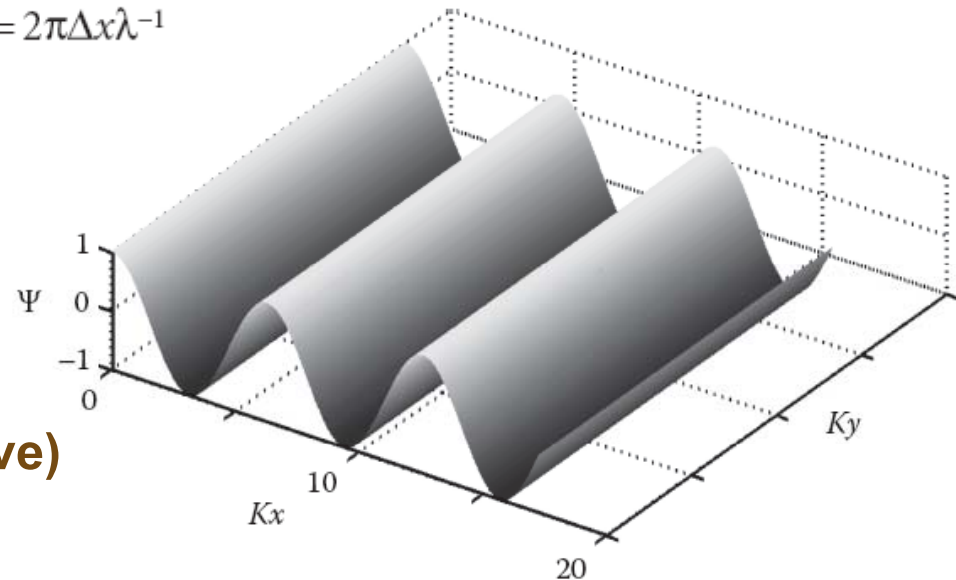
- **Σφαιρικό Κύμα (Spherical Wave)**

$$\psi(\vec{r}, t) = \frac{A}{r} \exp[j(kr - \omega t - \delta)]$$

- **Κυλινδρικό Κύμα (Cylindrical Wave)**

$$\psi(\vec{r}, t) = \frac{A}{\sqrt{r}} \exp[j(kr - \omega t - \delta)]$$

- **Σημεία ίσης φάσης $\rightarrow$ μέτωπα κύματος (wavefronts)**



Κύματα σε ομοιογενή μέσα



- **Γκαουσιανό (Gaussian) κύμα**

$$\vec{E}(r) = \vec{u}A_0 \left(\frac{W_0}{W(z)} \right) \exp\left(-\frac{r^2}{W^2(z)} \right) \exp\left(-jkz - jk \frac{r^2}{2R(z)} + j\zeta(z) \right)$$

- Ακτίνα στην οποία E πέφτει στο $1/e$ και I στο $1/e^2$:

$$W(z) = W_0 \left(1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right)^{1/2}$$

- Ακτίνα σε $z=0$:

$$W_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{z} \right)^{1/2}$$

- Ακτίνα καμπυλότητας:

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right]$$

- Διαφορά φάσης Gouy:

$$\zeta(z) = \tan^{-1} \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

- **Κατανομή Έντασης (intensity) (ή ακτινοβολίας (irradiance)) κατά μέσο όρο στο χρόνο (time-averaged)**

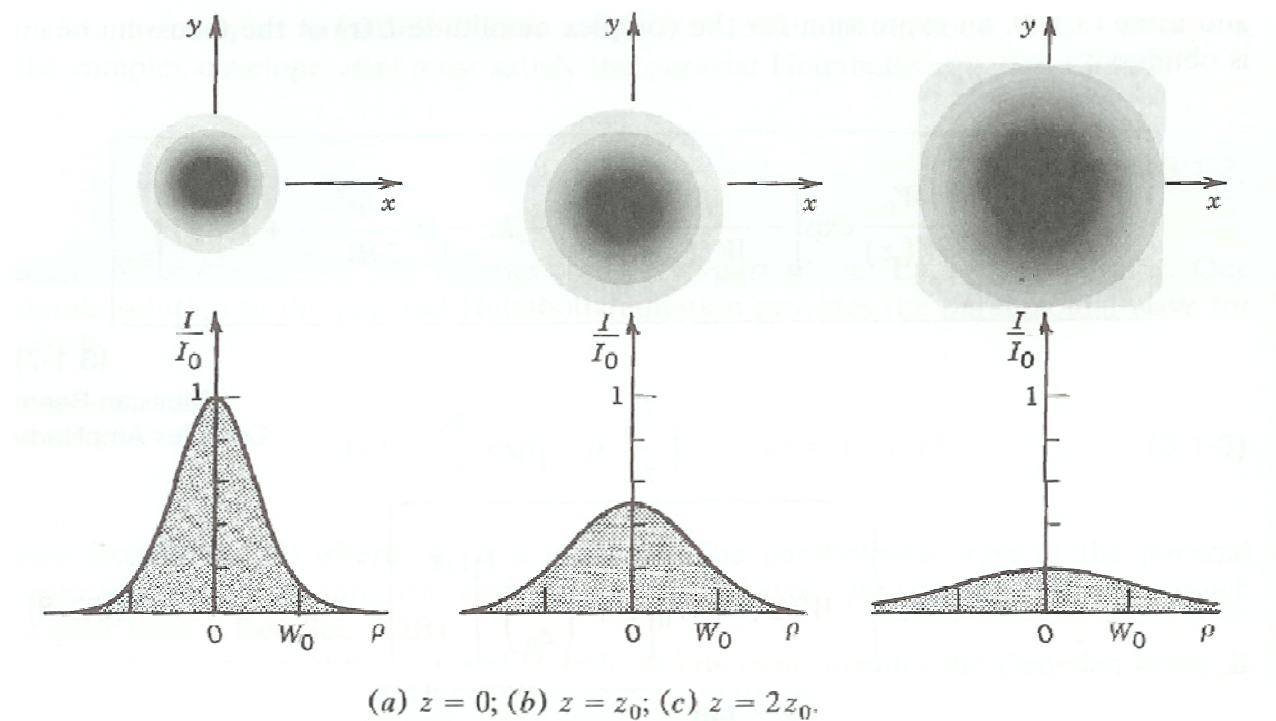
$$I(r) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp\left(-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right)$$

Κύματα σε ομοιογενή μέσα



- Γκαουσιανό (Gaussian) κύμα

$$I(r) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left(-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right) \quad W(z) = W_0 \left(1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right)^{1/2}$$



Κύματα σε ομοιογενή μέσα



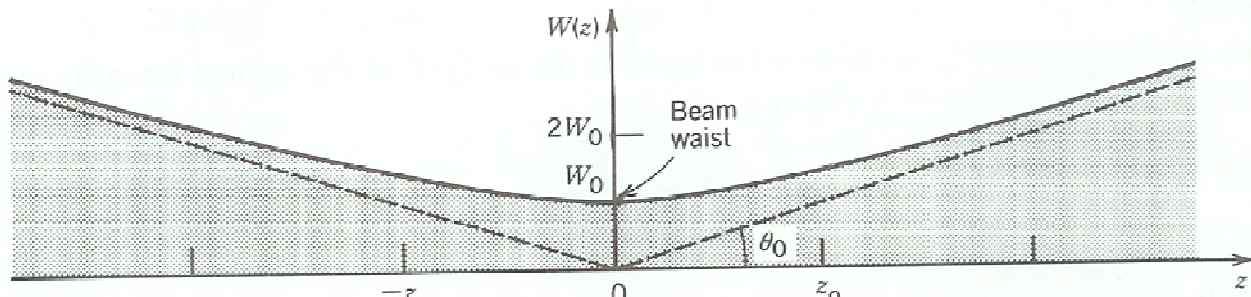
- Γκαουσιανό (Gaussian) κύμα

- Πλάτος ακτίνας μιας Γκαουσιανής δέσμης

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2},$$

W_0 είναι η ακτίνα στη μέση (waist). $2W_0$ είναι το μέγεθος της κηλίδας

όταν $z \gg z_0$, $W(z) \approx W_0 \left(\frac{z}{z_0} \right) = \theta_0 z$,



86% της ενέργειας βρίσκεται μέσα στο κώνο

Κύματα σε ομοιογενή μέσα

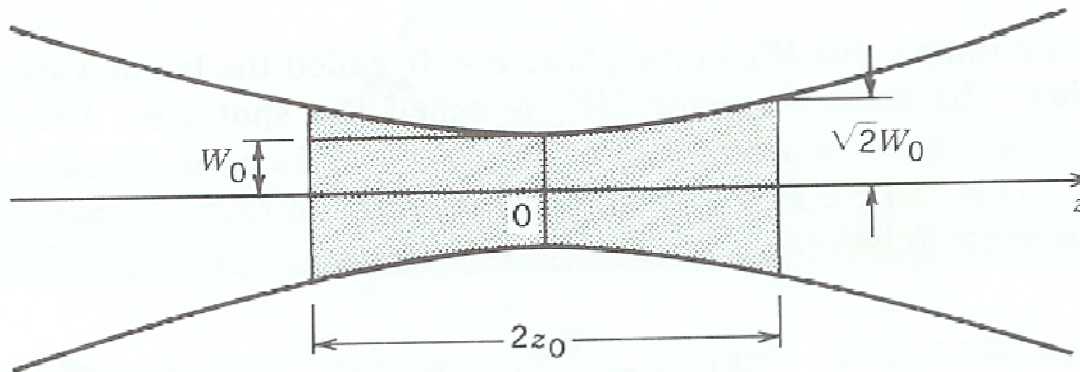


- **Γκαουσιανό (Gaussian) κύμα**

- βάθος της εστίασης (depth of focus)

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2},$$

W_0 είναι η ακτίνα στη μέση (waist). $2W_0$ είναι το μέγεθος της κηλίδας



Η γκαουσιανή έχει το μικρότερο πλάτος στο $z = 0$

Η απόσταση όπου το πλάτος γίνεται $\sqrt{2}W_0$ καλείται βάθος εστίασης.

Κύματα σε ομοιογενή μέσα



- **Γκαουσιανό (Gaussian) κύμα**

- Ισχύς (Power) γκαουσιανής δέσμης

Ολική Ισχύς (Total Power):
$$P = \int_0^\infty I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho = \frac{1}{2} I_0 [\pi W_0]^2,$$

Ποσοστό ισχύος που μεταφέρεται μέσα σε ένα κύκλο με ακτίνα ρ_0

$$\frac{1}{P} \int_0^{\rho_0} I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho = 1 - \exp\left(-\frac{2\rho_0^2}{W^2(z)}\right),$$

Η ισχύς που εμπεριέχεται σε ένα κύκλο με ακτίνα $\rho_0 = W(z)$
→ 86% της ολικής ισχύος.

99% της ολικής ισχύος εμπεριέχεται σε ένα κύκλο με ακτίνα $1.5W(z)$

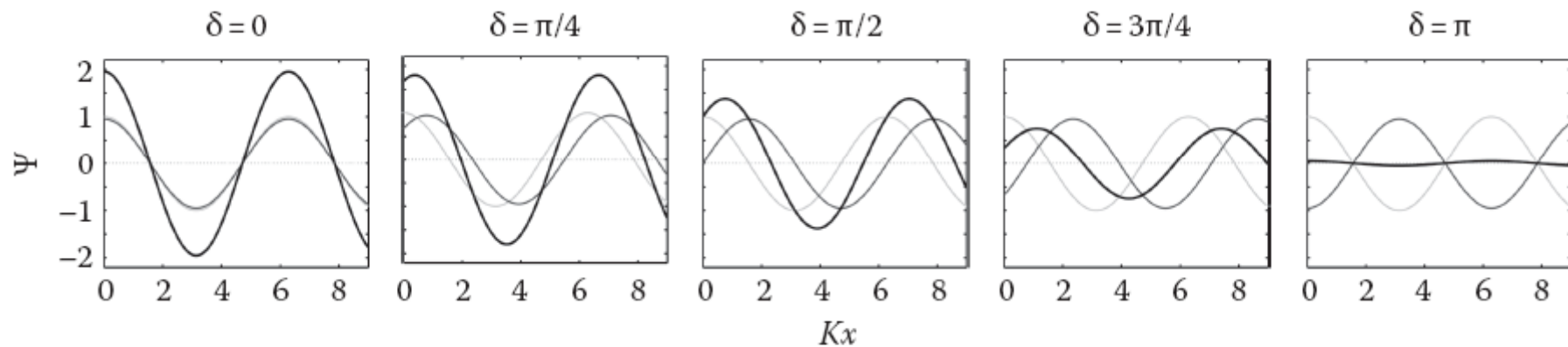
Κύματα σε ομοιογενή μέσα



- Αρχή της επαλληλίας
(superposition)

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$$

- $\bar{\Psi}_1 = 1.0 \cos(kx)$, $\bar{\Psi}_2 = 0.95 \cos(kx - \delta)$



Ενισχυτική
συμβολή
(Constructive
Interference)

Εξουδετερωτική
συμβολή
(Destructive
Interference)

Μονοχρωματικά Κύματα σε Ανομοιογενή Μέσα



- **Αρχή του Fermat και Νόμος του Snell**

- Αρχή του Fermat (Fermat's Principle):
- Η διαδρομή που ακολουθεί το φως είναι αυτή που χρειάζεται τον μικρότερο ολικό χρόνο

- Νόμος του Snell (Snell's Law)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

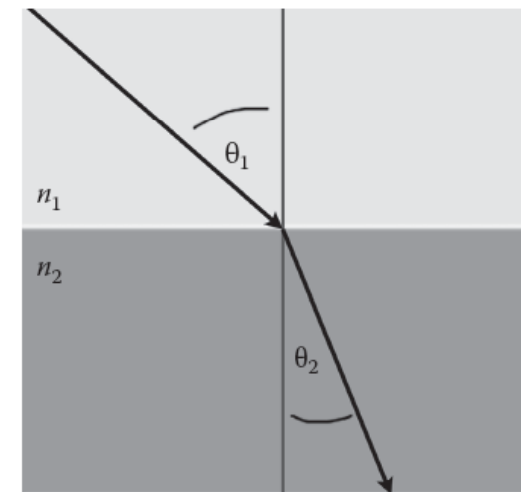
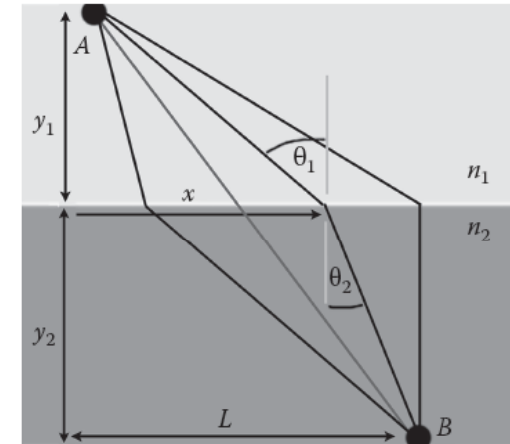
- Ολική Εσωτερική Ανάκλαση (Total internal reflection)

- $n_1 > n_2$
- Κρίσιμη Γωνία (Critical Angle)

$$\theta_c = \theta_i = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right),$$



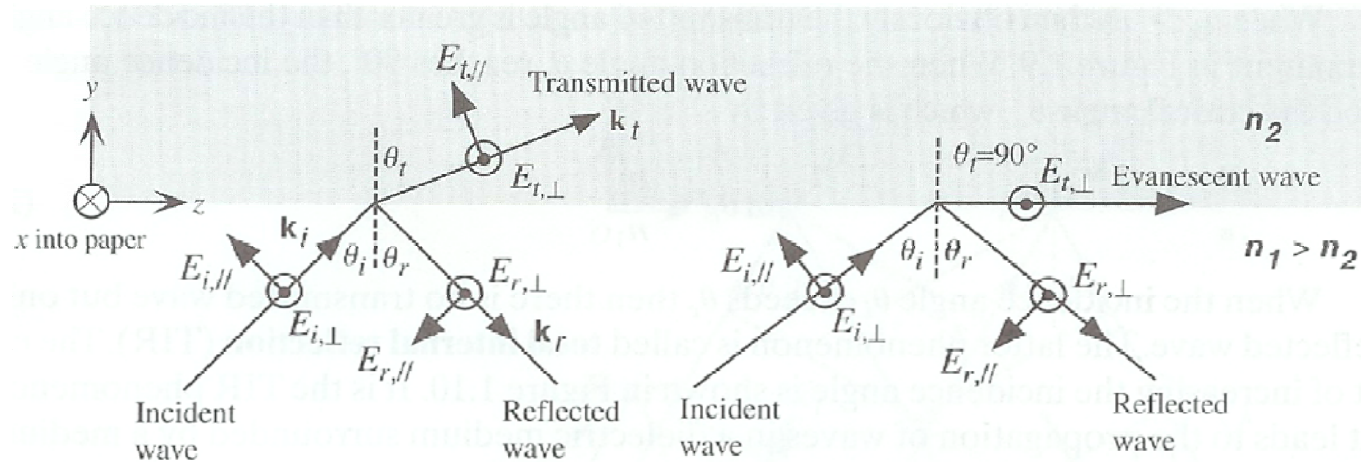
- Διαφεύγοντα κύματα (Evanescent waves) (?)



Μονοχρωματικά Κύματα σε Ανομοιογενή Μέσα



- Εξισώσεις του Fresnel:



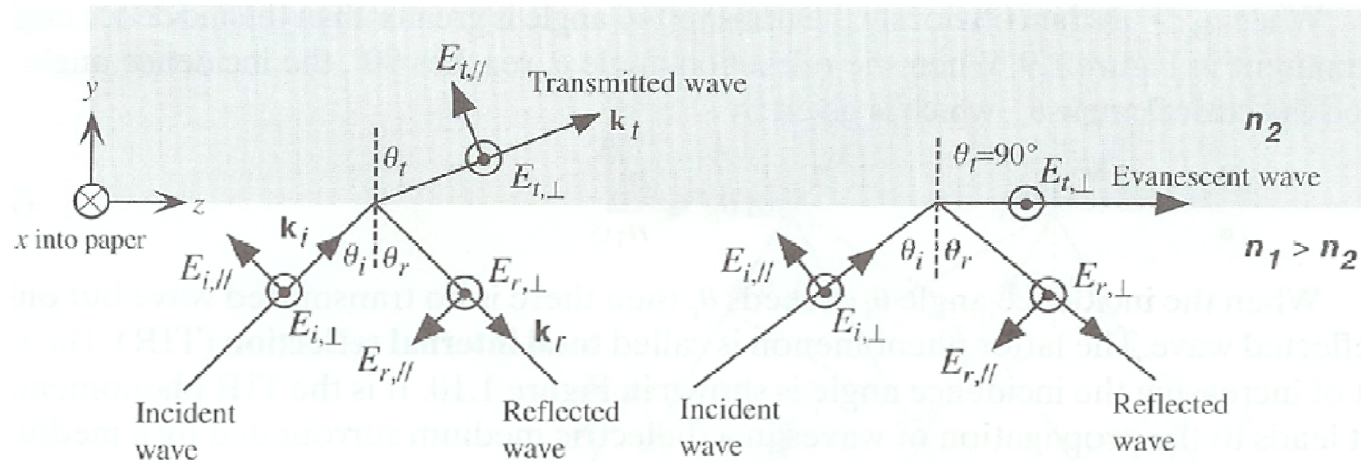
$$r_{\perp} = \frac{E_{r0,\perp}}{E_{i0,\perp}} = \frac{\cos \theta_i - \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \sin^2 \theta_i \right]^{1/2}}{\cos \theta_i + \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \sin^2 \theta_i \right]^{1/2}}, \quad t_{\perp} = \frac{E_{t0,\perp}}{E_{i0,\perp}} = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \sin^2 \theta_i \right]^{1/2}},$$

$$r_{\parallel} = \frac{E_{r0,\parallel}}{E_{i0,\parallel}} = \frac{\left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \sin^2 \theta_i \right]^{1/2} - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \cos \theta_i}{\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \cos \theta_i + \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \sin^2 \theta_i \right]^{1/2}}, \quad t_{\parallel} = \frac{E_{t0,\parallel}}{E_{i0,\parallel}} = \frac{2 \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \cos \theta_i}{\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \cos \theta_i + \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \sin^2 \theta_i \right]^{1/2}},$$

Μονοχρωματικά Κύματα σε Ανομοιογενή Μέσα



- Εξισώσεις του Fresnel:

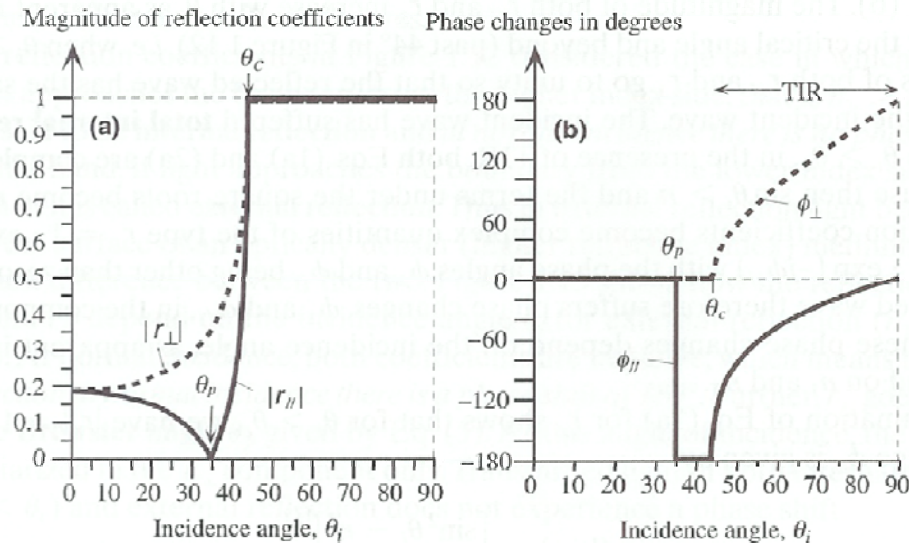


- Οι εξισώσεις Fresnel προκύπτει από τις οριακές συνθήκες (boundary conditions).
- Αλλαγή Φάσης (phase change):
- όταν $\theta_i = 0$ $r_{//} = r_{\perp} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$,
- Για κάθετη πρόσπτωση,
 - καθόλου διαφορά φάσης για $n_1 > n_2$,
 - 180° διαφορά φάσης για $n_2 > n_1$.

Μονοχρωματικά Κύματα σε Ανομοιογενή Μέσα



- Εξισώσεις του Fresnel:

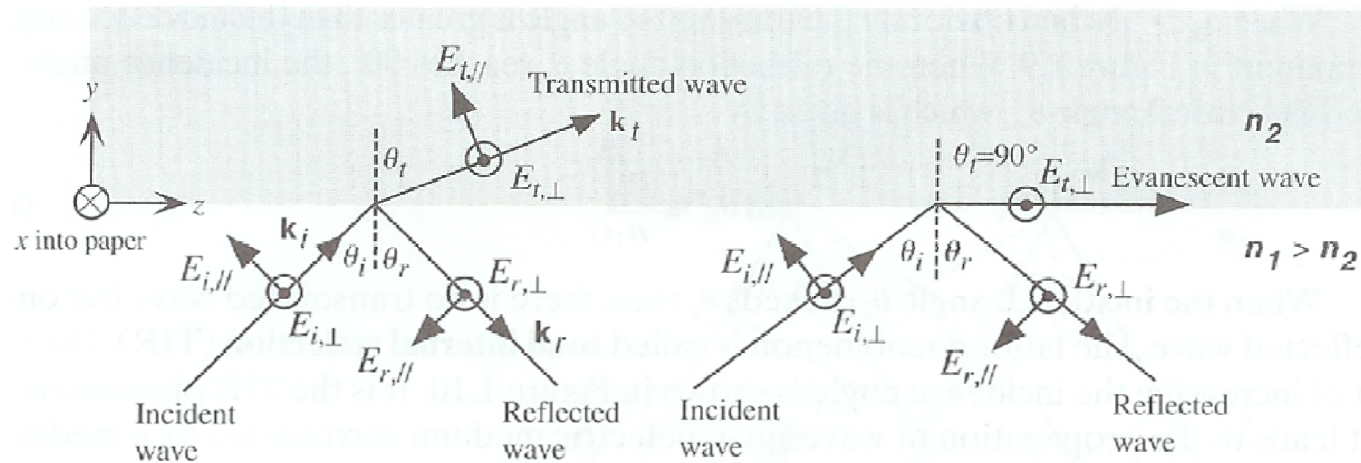


- Γωνία Πόλωσης (Polarization angle) ή Γωνία Brewster:
 - Σε γωνία θ_B , $\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$. $|r_{\parallel}| = 0$. Ανακλώμενο κύμα $\rightarrow$ γραμμικά πολωμένο
- Κρίσιμη Γωνία (Critical angle):
 - At θ_c , $\theta_c = \theta_i = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$, $|r_{\perp}| = |r_{\parallel}| = 1$. Total Internal reflection.
- Η φάση του ανακλώμενου κύματος αλλάζει ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης.

Μονοχρωματικά Κύματα σε Ανομοιογενή Μέσα



- Εξισώσεις του Fresnel:



- Ολική Εσωτερική Ανάκλαση (total internal reflection) και διαφεύγοντα κύματα (evanescent waves)

- Διαφεύγον Κύμα: $E_{\perp} = e^{-\alpha y} \exp(j\omega t - k_z z),$

$$\alpha = [k_{2,z}^2 - k_2^2]^{1/2} = \frac{2\pi}{\lambda} [\sin^2 \theta_i - (\frac{n_2}{n_1})^2]^{1/2},$$

- Βάθος διείσδυσης:

$$\delta = 1/\alpha,$$

Μονοχρωματικά Κύματα σε Ανομοιογενή Μέσα



- **Εξισώσεις Fresnel:**

- Ανακλαστικότητα (Reflectance) και Περρατότητα (Transmittance)

$$R_{\perp} = \frac{|E_{r0,\perp}|^2}{|E_{i0,\perp}|^2} = |r_{\perp}|^2, \quad R_{//} = \frac{|E_{r0,//}|^2}{|E_{i0,//}|^2} = |r_{//}|^2,$$

$$T_{\perp} = \frac{n_2}{n_1} \frac{|E_{t0,\perp}|^2}{|E_{i0,\perp}|^2} = \frac{n_2}{n_1} |t_{\perp}|^2, \quad T_{//} = \frac{n_2}{n_1} \frac{|E_{t0,//}|^2}{|E_{i0,//}|^2} = \frac{n_2}{n_1} |t_{//}|^2,$$

- Για κάθετη πρόσπτωση

$$R_{\perp} = R_{//} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad T_{\perp} = T_{//} = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2},$$

Πολυχρωματικά Κύματα



- Πολυχρωματικά κύματα (Polychromatic waves)

$$E(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) e^{i(k(\omega) \cdot r - \omega t)} d\omega, \quad k(\omega) = k_{\omega_0} + \left. \frac{dk}{d\omega} \right|_{\omega_0} (\omega - \omega_0) + \dots,$$

$$\Rightarrow E(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) e^{i(k(\omega) \cdot r - \omega t)} d\omega = 2A(\omega_0) \Delta\omega \frac{\sin \psi}{\psi} e^{i(k_0 \cdot r - \omega_0 t)}, \quad \psi = \left[\left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{\omega_0} r - t \right] \Delta\omega,$$

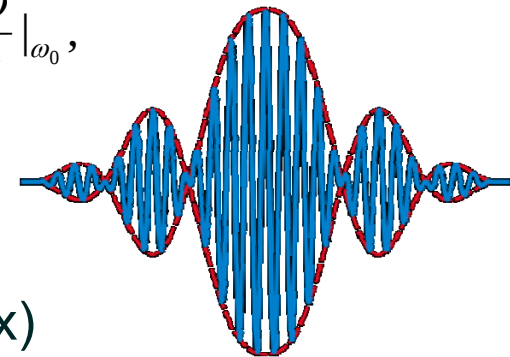
•

- Ομαδική Ταχύτητα (Group velocity)

- Ταχύτητα Κυματοπακέτου (Wave packet): $v_g = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{\omega_0},$

$$v_g = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{\omega_0} = \frac{c}{n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}},$$

$$N_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \text{ είναι ο ομαδικός δείκτης (group index)}$$



- Άσκηση: Ποια η διαφορά μεταξύ ταχύτητα φάσης (phase velocity) και ομαδικής ταχύτητας (group velocity);

Πολυχρωματικά Κύματα



- Απορρόφηση (Absorption) και διασπορά (dispersion)

$$E(r,t) = Ae^{i(k \cdot r - \omega t)}, \quad k(\omega) = k_0 n = k_0 (1 + \chi)^{1/2} = k_0 (1 + \chi' + i\chi'')^{1/2} = \beta - i\frac{1}{2}\alpha,$$

- Συντελεστής Απορρόφησης ή Εξασθένησης (attenuation)

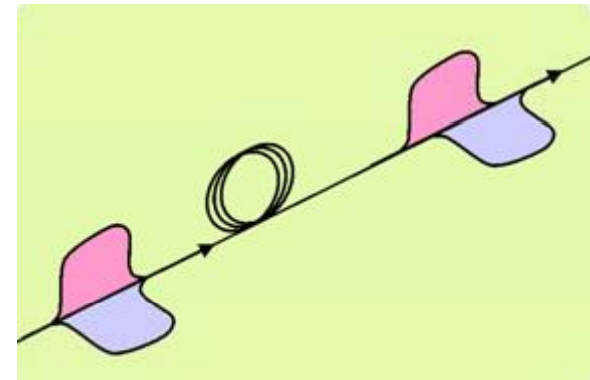
α ,

- Μέσα Διασποράς (Dispersive media) = Η ταχύτητα εξαρτάται από τη συχνότητα

$$\beta = nk_0,$$

- Διαπλάτυνση κυματοπακέτου σε μήκος L:

$$\Delta T = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta \omega = L \frac{d^2 k}{d\omega^2} \Delta \omega,$$



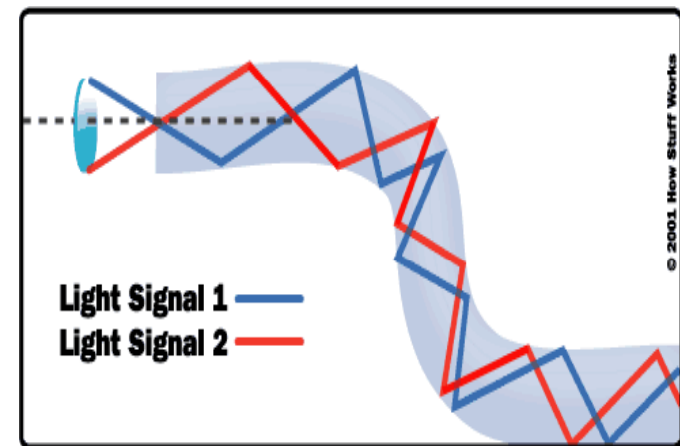
- Παράμετρος Διασποράς (Dispersion parameter):

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2 k}{d\omega^2} \text{ (ps / (km - nm))},$$

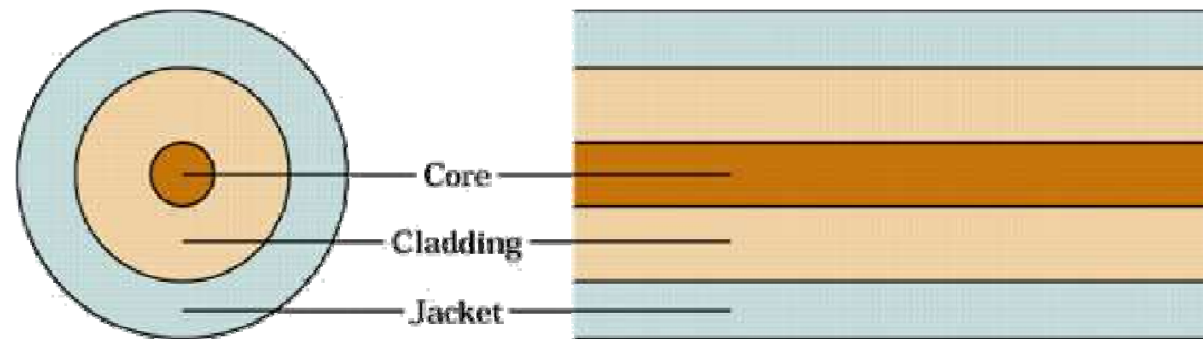
Οπτικές Ίνες (Optical Fibers)



- Μια οπτική ίνα (optical fiber) είναι ένας κυματοδηγός (waveguide) για φως
- Αποτελείται από ένα πυρήνα (core) και μια επίστρωση (cladding) που περιβάλλει τον πυρήνα
- Ο δείκτης διάθλασης (index of refraction) της επίστρωσης είναι πιο μικρός από τον πυρήνα
 - Οι ακτίνες ανακλούνται ολικά και επιστρέφουν στον πυρήνα
- **Προτερήματα των οπτικών ινών:**
 - Μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth) από τα χάλκινα σύρματα
 - Μικρότερες απώλειες (loss)
 - Δεν παρουσιάζεται διαφωνία (crosstalk)
 - Καθόλου ηλεκτρικοί κίνδυνοι (electrical hazard)



Οπτικές Ίνες και Επικοινωνίες



(a) Fiber cross section

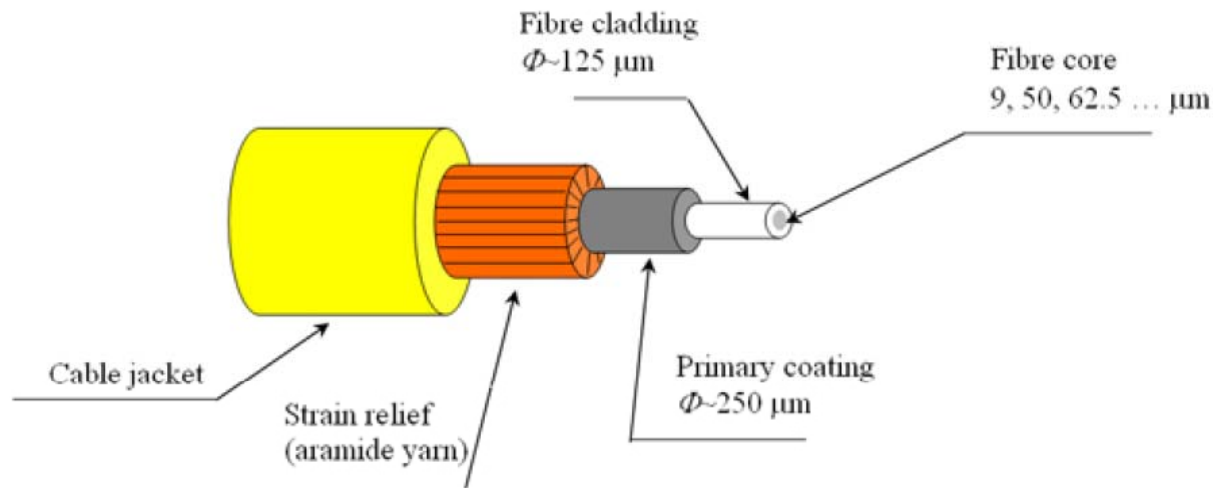


(b) System

Οπτικές Ίνες



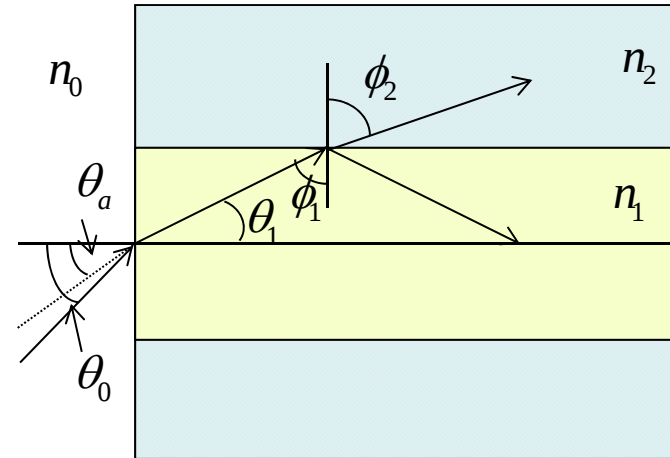
- Οι οπτικές ίνες κατασκευάζονται από λεπτά νήματα γυαλιού ή πλαστικού
- Δεν έχουν μηχανική αντοχή γι' αυτό και πρέπει να καλύπτονται με προστατευτικό κάλυμμα.
- Πολλές φορές δύο ή περισσότερες ίνες περικλείονται στο ίδιο καλώδιο για να αυξήσουν το εύρος ζώνης αλλά και τον πλεονασμό (redundancy) σε περίπτωση που μια σπάσει
- Είναι επίσης πιο εύκολο να γίνει μια ζεύξη πλήρως αμφίδρομης κατεύθυνσης (full-duplex) με δύο ίνες (μία για μετάδοση και μία για λήψη)



Ολική Εσωτερική Ανάκλαση



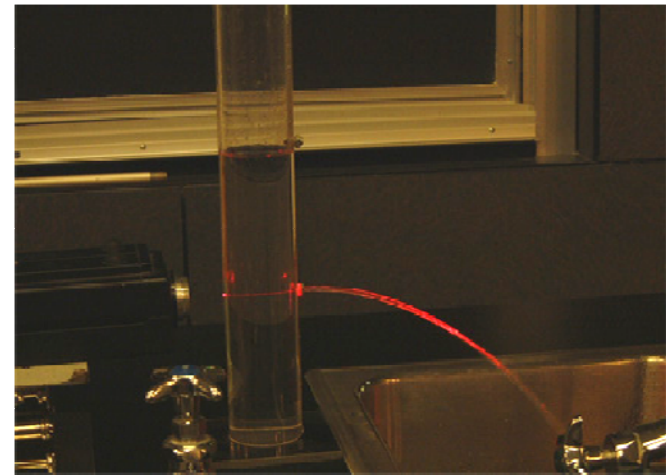
- Οι οπτικές ίνες βασίζονται στη ολική εσωτερική ανάκλαση
- Η γωνία διάθλασης καθορίζεται από το νόμο του Snell:



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- Και η κρίσιμη γωνία είναι:

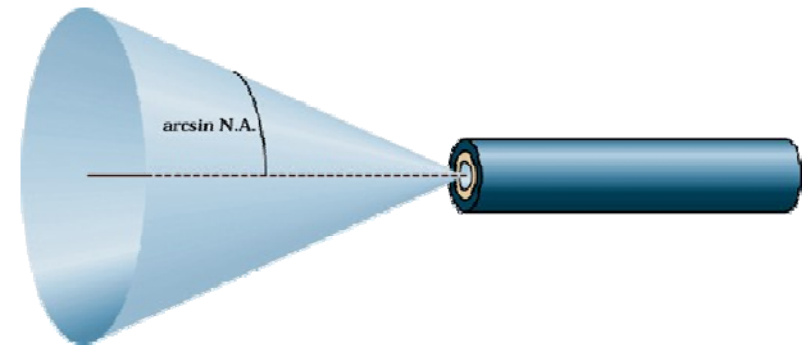
$$\theta_c = \theta_i = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right),$$



Αριθμητικό Άνοιγμα (Numerical Aperture)

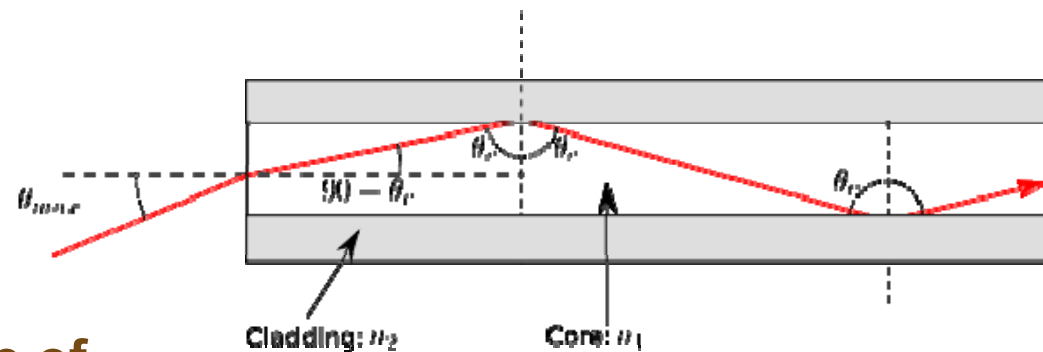


- Το αριθμητικό άνοιγμα (NA) (που σχετίζεται με την κρίσιμη γωνία) είναι ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά στο σχεδιασμό συστημάτων οπτικών ινών



- Το NA καθορίζεται από την εξίσωση:

$$N.A. = n \sin \theta_{\max} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



- Η γωνία της αποδοχής (angle of acceptance) είναι διπλάσιο από το NA.

Τρόποι (Modes)



- **Οπτική Ίνα = κυματοδηγός**

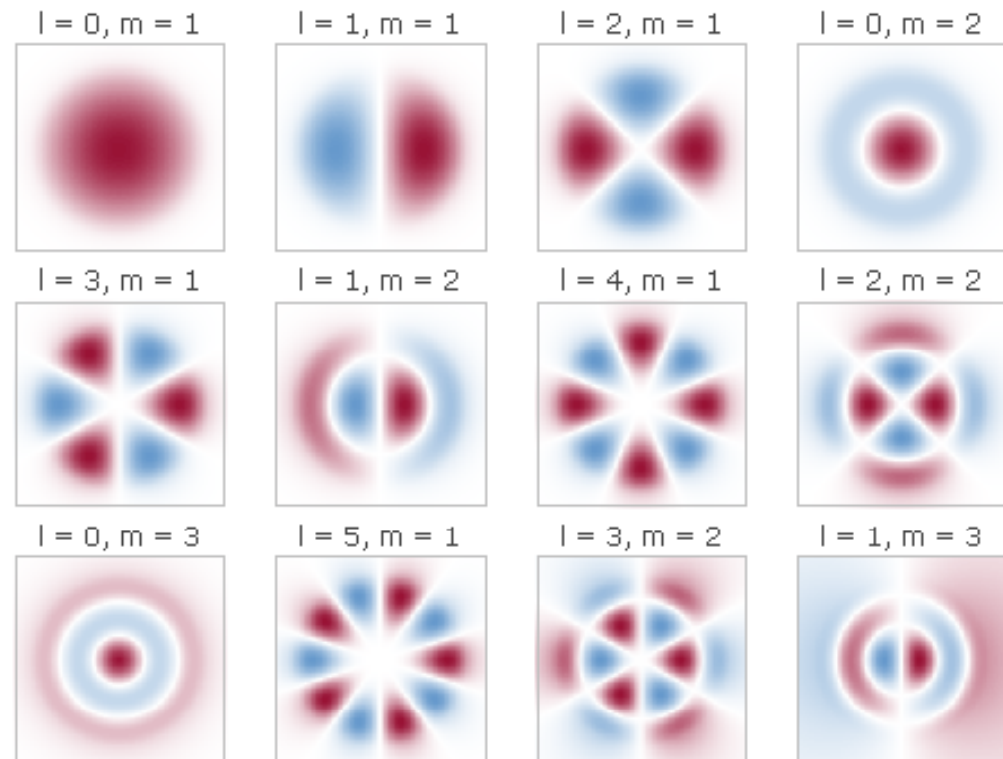
- Το φως διαδίδεται με διάφορους τρόπους (modes)

- **Μεγάλη διάμετρος**

- Φως εισέρχεται με διαφορετικές γωνίες → διεγείρει διαφορετικούς τρόπους

- **Μικρή διάμετρος**

- Μπορεί να διεγείρει μόνο ένα τρόπο



Αριθμός V (V-Number) και Τρόποι (Modes)

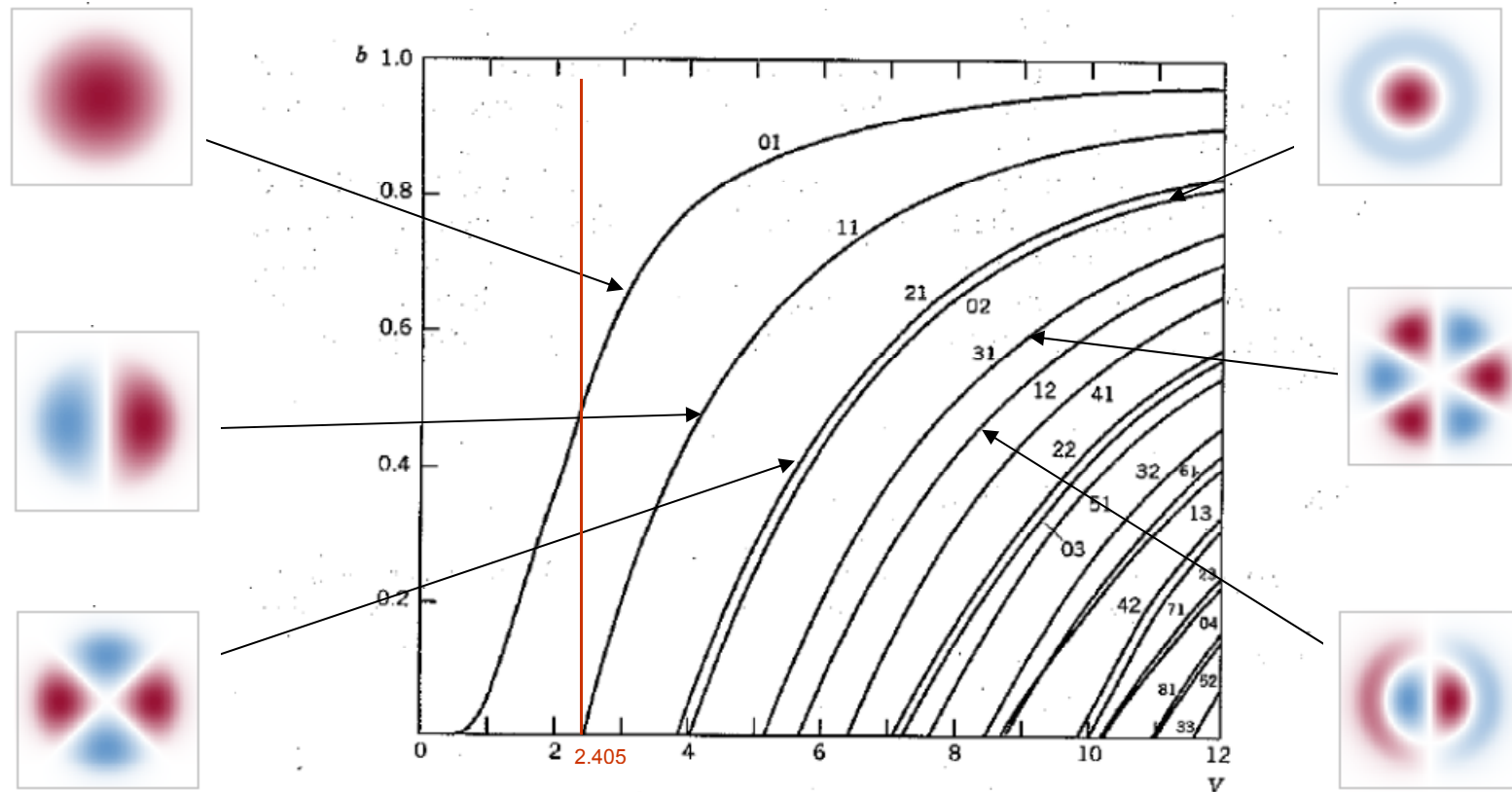


Figure 3.10. Normalized propagation constant, b , for designated LP modes as functions of V .

$$V = 2\pi a (NA) / \lambda$$

a : radius of core
 λ : wavelength of light

Μήκος κύματος αποκοπής (Cut-off Wavelength)



Ορισμός:

- Το μήκος κύματος κάτω από το οποίο πολλαπλοί τρόποι μπορούν να διαδίδονται μέσα σε μια οπτική ίνα, δηλ.,

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \times NA$$

- $\lambda \geq \lambda_c$, μονότροπη (single mode)
- $\lambda < \lambda_c$, πολύτροπη (multi-mode)

Πολύτροπες ή Μονότροπες Ίνες

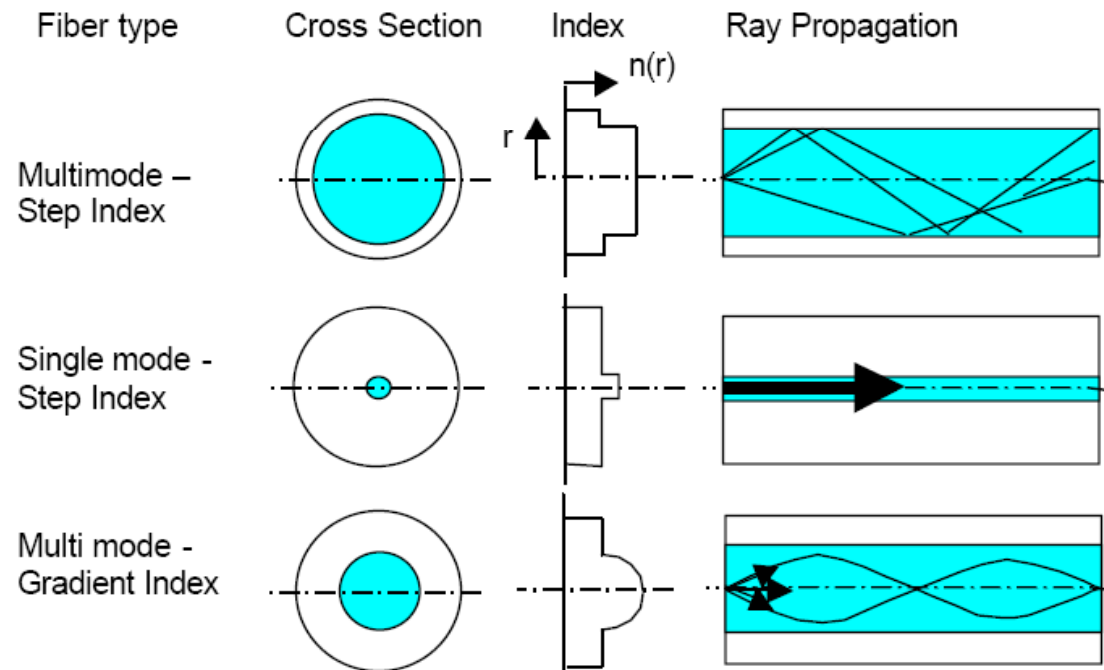


- **Πολύτροπη (Multi-mode) Ίνα**

- Παρουσιάζει διασπορά
→ Διαπλάτυνση παλμών →
περιορισμός του
χρήσιμου εύρους
ζώνης

- **Μονότροπη (Single-mode) Ίνα**

- Πολύ λιγότερη
διασπορά, αλλά ...
- Πιο δαπανηρή η
παραγωγή
- Πιο δύσκολη η σύζευξη
με πηγές φωτός
 - Μικρό μέγεθος
 - Μικρό αριθμητικό
άνοιγμα (NA)



Είδη Ινών – Βηματικού Δείκτη Διάθλασης

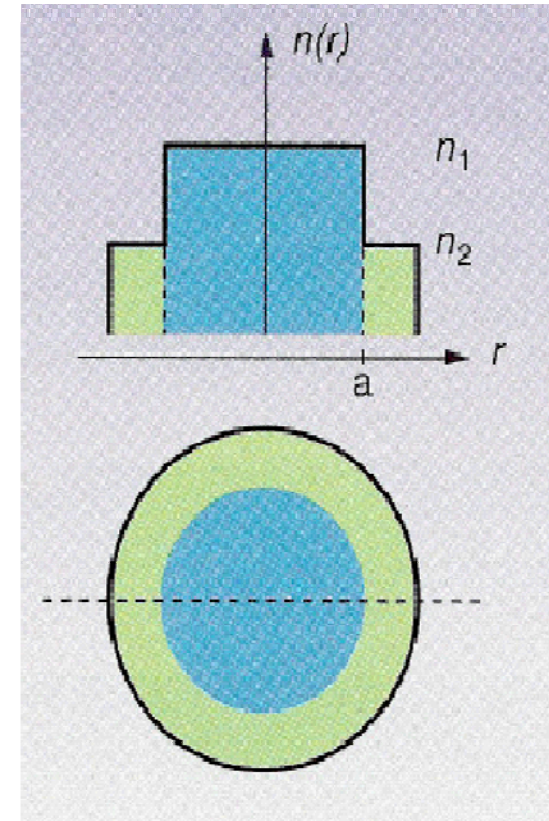


Ακτινική μεταβολή δείκτη διάθλασης

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & r < a \\ n_2 & r \geq a \end{cases}$$

Τυπικές Τιμές

$$\Delta = 1\text{‰} - 1\%$$
$$n = 1.44 - 1.46$$



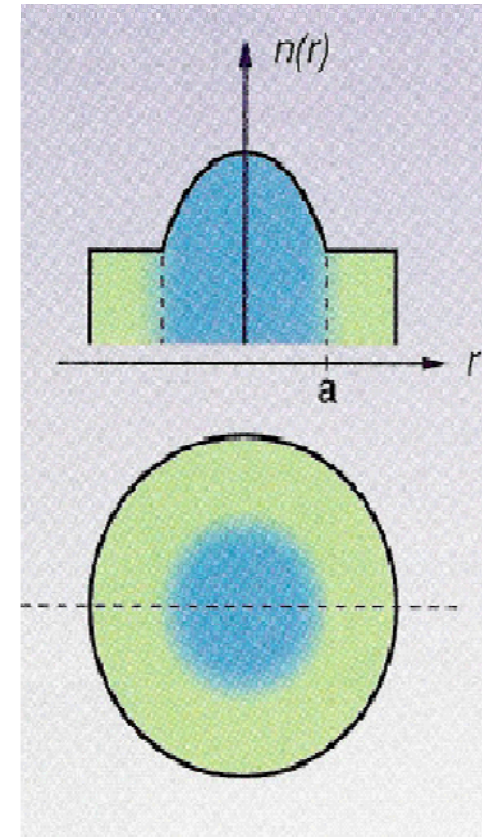
Είδη Ινών – Βαθμιδωτού Δείκτη Διάθλασης



Ακτινική μεταβολή δείκτη διάθλασης

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^x \right] & r < a \\ n_2 & r \geq a \end{cases}$$

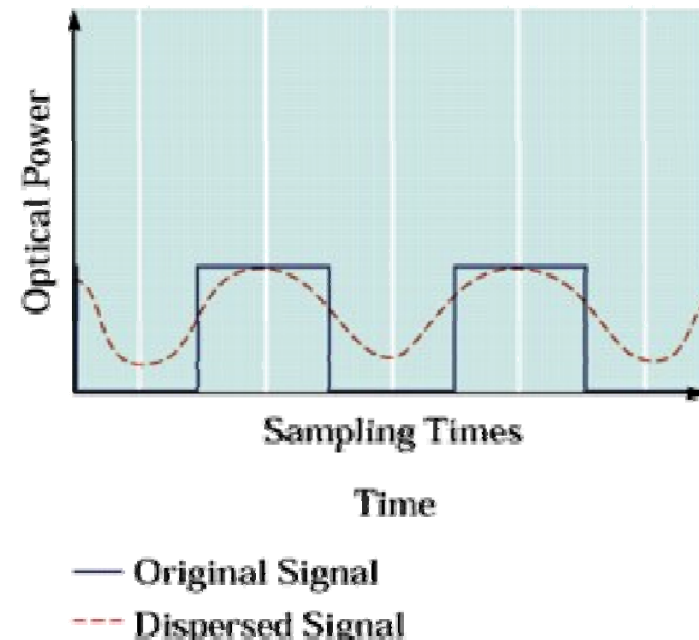
Οι ίνες βαθμιδωτού δείκτη παρουσιάζουν λιγότερη διασπορά σε σχέση με τις πολύτροπες ίνες βηματικού δείκτη



Διασπορά



- **Διασπορά (Dispersion) στις οπτικές ίνες προέρχεται από το γεγονός ότι σε πολύτροπη διάδοση το σήμα σε κάποιους τρόπους (modes) ταξιδεύει πιο γρήγορα από ότι σε άλλους**
 - Ίνες βαθμιδωτού δείκτη μειώνουν τη διασπορά με αξιοποιώντας τρόπους ψηλότερης τάξης (higher-order modes)
- **Οι μονότροπες ίνες δεν παρουσιάζουν διασπορά εκτός από ενδοτροπική (intramodal) διασπορά**
 - Μια μορφή ενδοτροπικής διασποράς ονομάζεται διασπορά υλικού και εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού της ίνας
 - Μια άλλη μορφή διασποράς είναι η διασπορά κυματοδηγού
- **Η διασπορά αυξάνεται με το εύρος ζώνης (bandwidth) του φωτός**



Απώλειες (Losses)

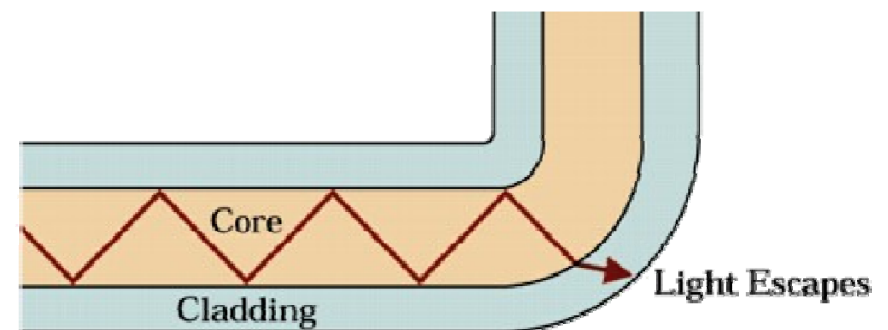
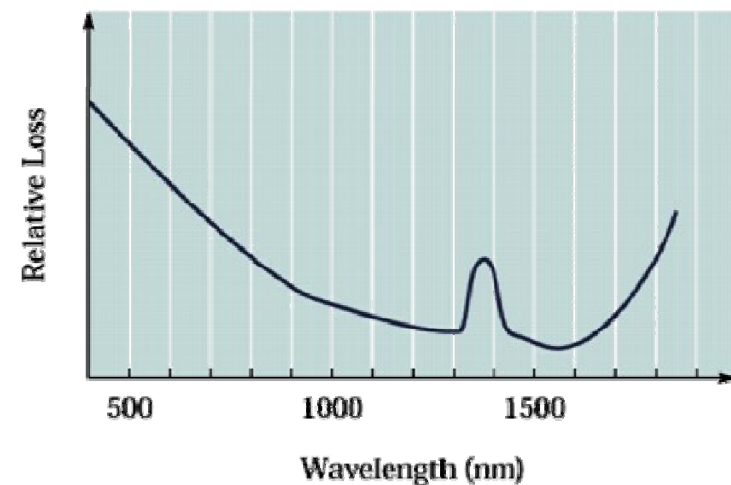


- **Απώλειες στις οπτικές ίνες προέρχονται από**

- Εξασθένηση (attenuation) μέσα στο ίδιο το υλικό
- Σκέδαση (Scattering) → μερικές ακτίνες φθάνουν στο περίβλημα με γωνία μικρότερη της κρίσιμης
- Απότομη κάμψη της οπτικής ίνας → μερικές ακτίνες φθάνουν στο περίβλημα με γωνία μικρότερη της κρίσιμης

- **Οι απώλειες εξαρτώνται από το τύπο της οπτικής ίνας**

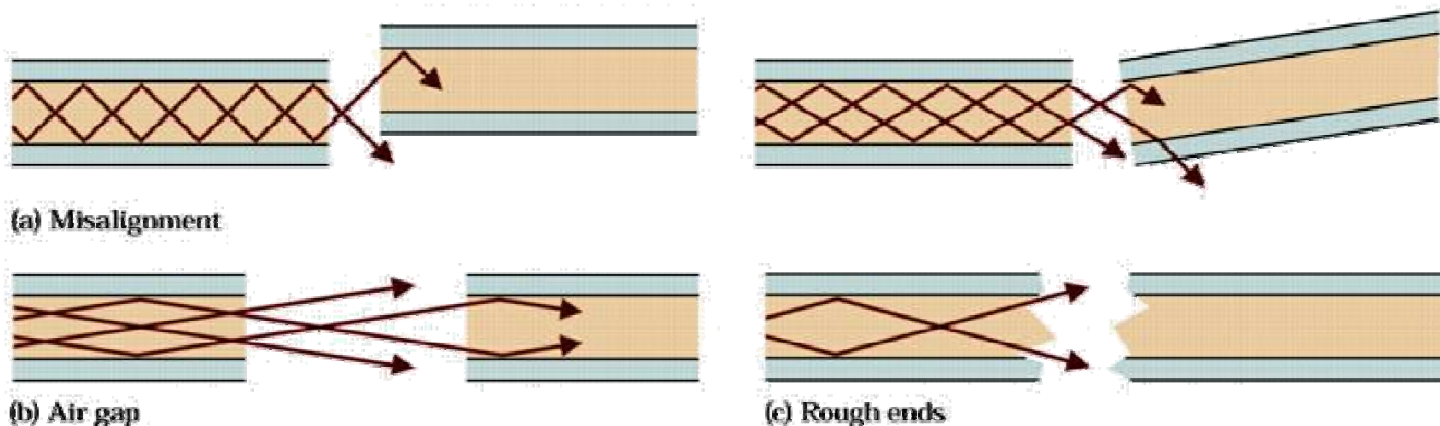
- Πλαστικές ίνες → εκατοντάδες dB ανά χιλιόμετρο
- Πολύτροπες ίνες γυαλιού με βαθμιδωτό δείκτη → 2–4 dB ανά χιλιόμετρο
- Μονότροπες ίνες → 0.4 dB ανά χιλιόμετρο ή λιγότερο



Συνδέσεις (Splices) και Σύνδεσμοι (Connectors)

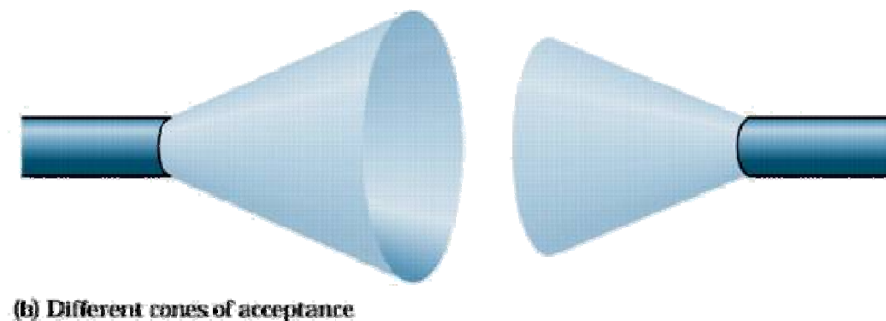
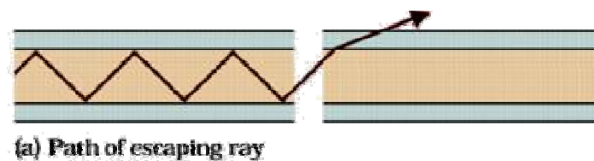


- Σε συστήματα οπτικών ινών, οι απώλειες από συνδέσεις και συνδέσμους είναι περισσότερες από την ίδια την ίνα
- Οι απώλειες προέρχονται από:
 - Αξονική ή γωνιακή μετατόπιση (Axial or angular misalignment)
 - Κενά αέρα μεταξύ των ινών
 - Τραχιές επιφάνειες στα άκρα των ινών



Σύνδεσμοι (Connectors) Οπτικών Ινών

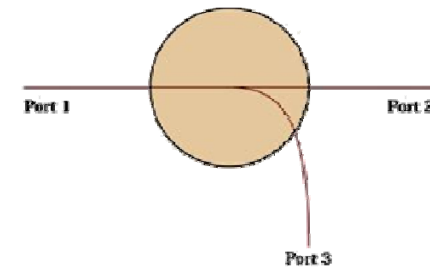
- Σύζευξη της ίνας με πηγές και ανιχνευτές προκαλεί απώλειες ειδικά όταν παρουσιάζονται αναντιστοιχίες στο αριθμητικό άνοιγμα (NA) ή στο μέγεθος των οπτικών ινών
- Καλές συνδέσεις είναι ακόμα πιο κρίσιμες σε μονότροπες οπτικές ίνες, λόγω της μικρότερης διαμέτρου και αριθμητικό άνοιγμα τους
- Μια σύνδεση (splice) είναι μια μόνιμη σύζευξη ενώ ένα σύνδεσμος (connector) αφαιρείται



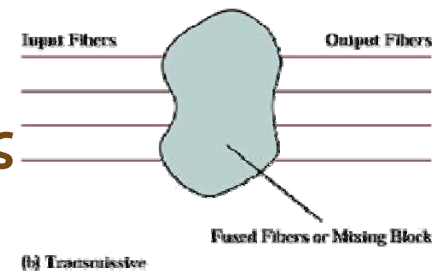
Οπτικών Ζεύκτες (Couplers) και Διακόπτες (Switches)



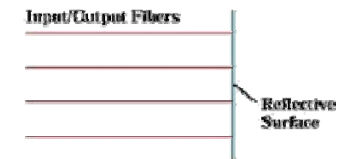
- Όπως και με τα ομοαξονικά καλώδια και τους κυματοδηγούς μικροκυμάτων, είναι δυνατό να δημιουργήσουμε διαιρέτες ισχύος (power splitters) και κατεύθυντικούς ζεύκτες (directional couplers) για τις οπτικές ίνες
- Είναι πιο περίπλοκο και ακριβό για οπτικές ίνες από ό, τι για σύρματα χαλκού
- Οι οπτικοί ζεύκτες κατηγοριοποιούνται είτε ως “αστέρες” με πολλαπλές εισόδους και εξόδους ή ως “ταφ”, τα οποία έχουν μία είσοδο και δύο εξόδους
- Οπτικοί ζεύκτες μπορούν να κατασκευαστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους:
 - Ένας αριθμός των ινών μπορούν να λιώσουν μαζί για να κάνουν ένα διαπερατό ζεύκτη
 - Ένας ανακλαστικός ζεύκτης επιτρέπει ένα σήμα εισόδου σε κάθε ίνα να βγει από όλες τις άλλες ίνες, έτσι ώστε η ζεύξη είναι αμφίδρομη



(a) Schematic representation of directional coupler



(b) Transmissive

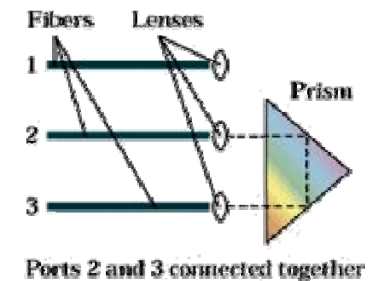
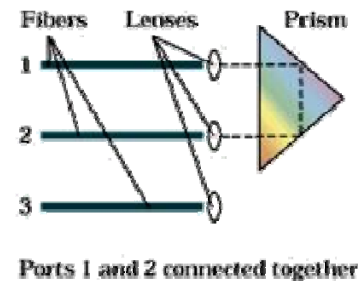
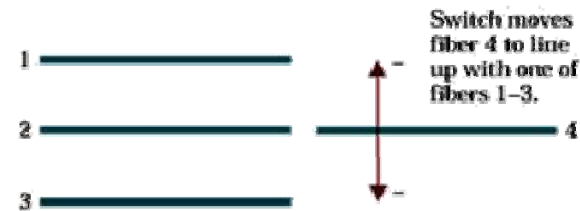


(c) Reflective

Οπτικοί Διακόπτες (Switches) και Αναστροφείς (Relays)



- Σε κάποιες περιπτώσεις, είναι απαραίτητο να αλλάξουν κατεύθυνση τα οπτικά σήματα από μια ίνα σε άλλη
- Ο πιο απλός τύπος διακόπτη οπτικών ινών κινεί μια ίνα εισόδου και την τοποθετεί δίπλα στην κατάλληλη ίνα εξόδου
- Μια άλλη προσέγγιση είναι να κατευθυνθεί το εισερχόμενο φως σε ένα πρίσμα, το οποίο αντανακλά στην ίνα εξόδου. Κινώντας το πρίσμα, το φως μπορεί να μεταπηδήσει μεταξύ των διαφορετικών ινών εξόδου
- Φακοί είναι απαραίτητα σε αυτή την προσέγγιση για να αποφεύγεται η υπερβολική απώλεια του φωτός





- Οι φακοί θα καλυφθούν στη διάλεξη για την απεικόνιση
- Η Συμφωνία (Coherence) θα καλυφθεί στη διάλεξη για το OCT

