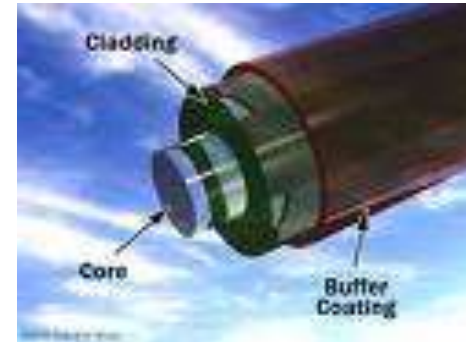


ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ, ΔΙΚΤΥΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

2^η & 3^η Διάλεξη: Οπτική ίνα

- Παράμετροι
- Διασπορά
- Απώλειες
- Κατασκευή
- Είδη ινών και καλωδίων



Λίγα Λόγια από τα Παλιά

ΚΑΙ ΕΙΠΕΝ Ο ΘΕΟΣ

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0} \quad \text{ή} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{N. Gauss})(1)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{ή} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{N. Gauss για μαγνητισμό})(2)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I_c + \epsilon_0 \frac{\partial \varphi_E}{\partial t}) \quad \text{ή} \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (\text{N. Ampere})(3)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \varphi_B}{\partial t} \quad \text{ή} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{N. Faraday})(4)$$

ΚΑΙ ΕΓΕΝΕΤΟ ΦΩΣ

Οι 4 νόμοι του Maxwell που περιγράφουν όλα τα φαινόμενα που έχουν σχέση με τον ηλεκτρομαγνητισμό.

Το φως θα το μελετάμε άλλοτε ως κύμα και άλλοτε ως σωματίδιο

Λίγα Λόγια από τα Παλιά

- Φως η διχασμένη προσωπικότητα
- Άλλοτε συμπεριφέρεται σαν κύμα και έχει μήκος κύματος και συχνότητα.

$$\Psi(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \Rightarrow \Psi(x, t) = A e^{-j(kx - \omega t)}$$

$$\vec{E} = E_o \cos(\omega t - kx) \hat{y} \quad \& \quad \vec{H} = H_o \cos(\omega t - kx) \hat{z}$$

$$f = \frac{1}{T}, \omega = 2\pi f, \lambda = \frac{C}{f}$$

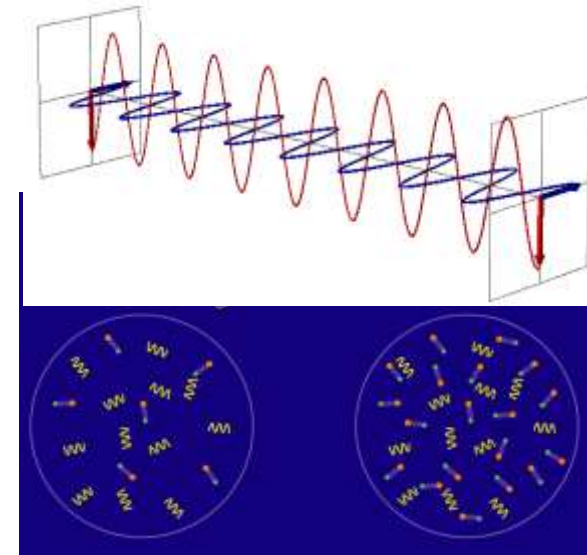
- Άλλοτε σαν σωματίδιο με ορμή και ενέργεια.

$$E = h \cdot f, \vec{p} = \hbar \cdot \mathbf{k}, p = \frac{h}{\lambda}$$

$$C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

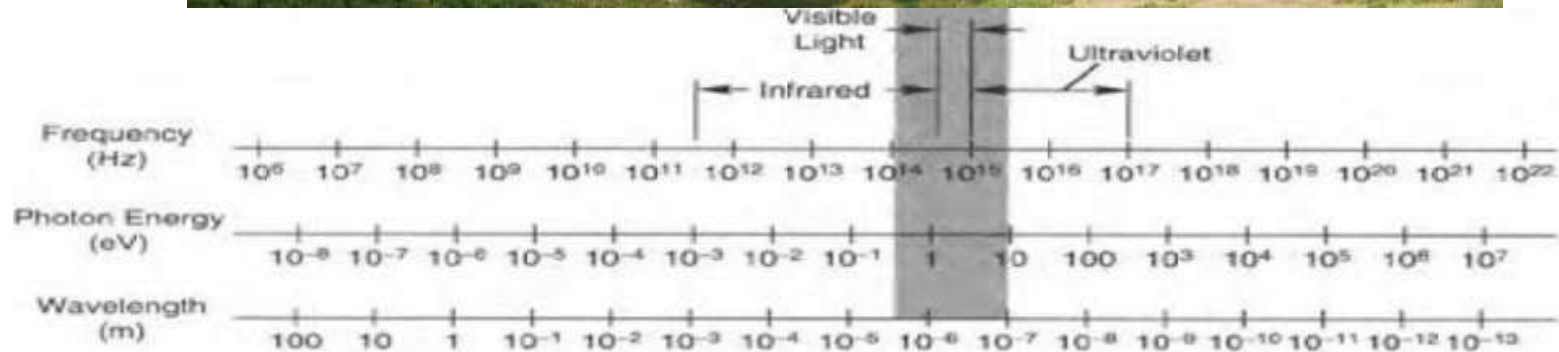
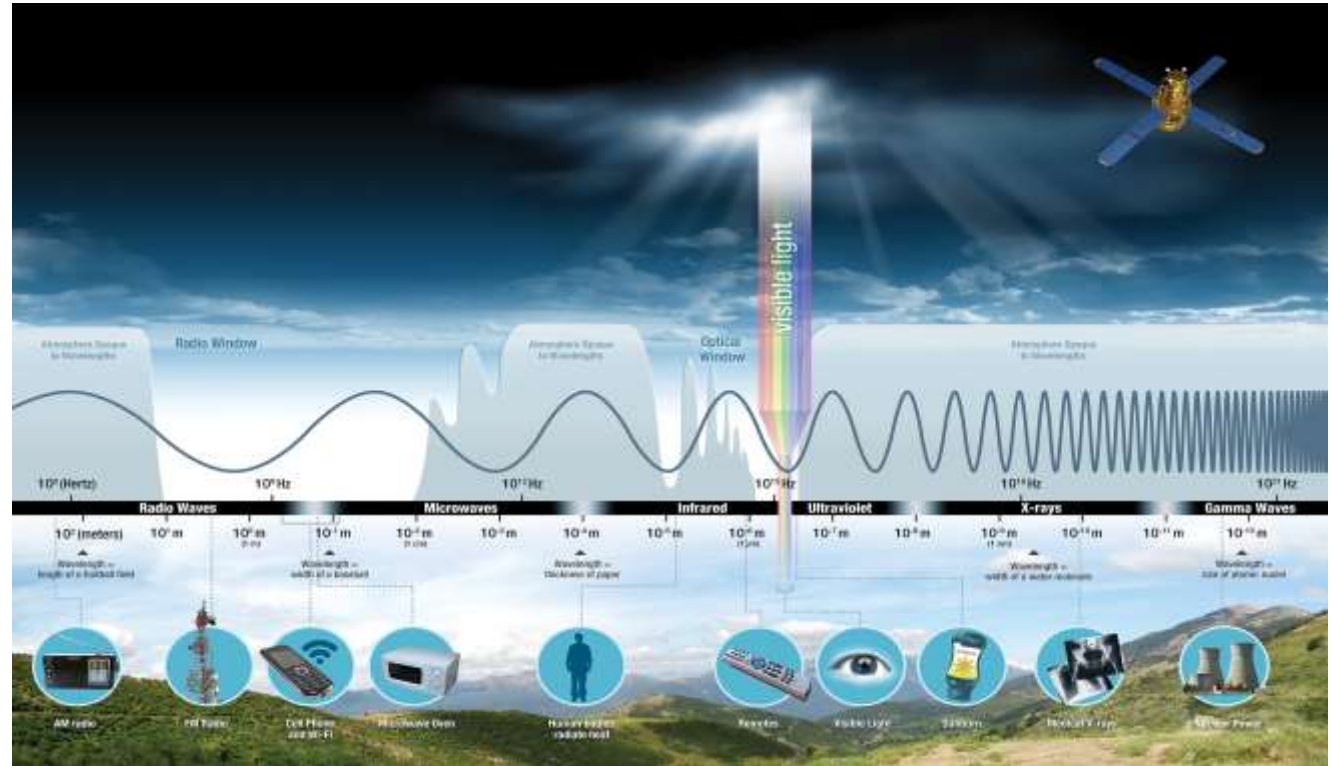
$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 6.63 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s} = 4.1310^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$



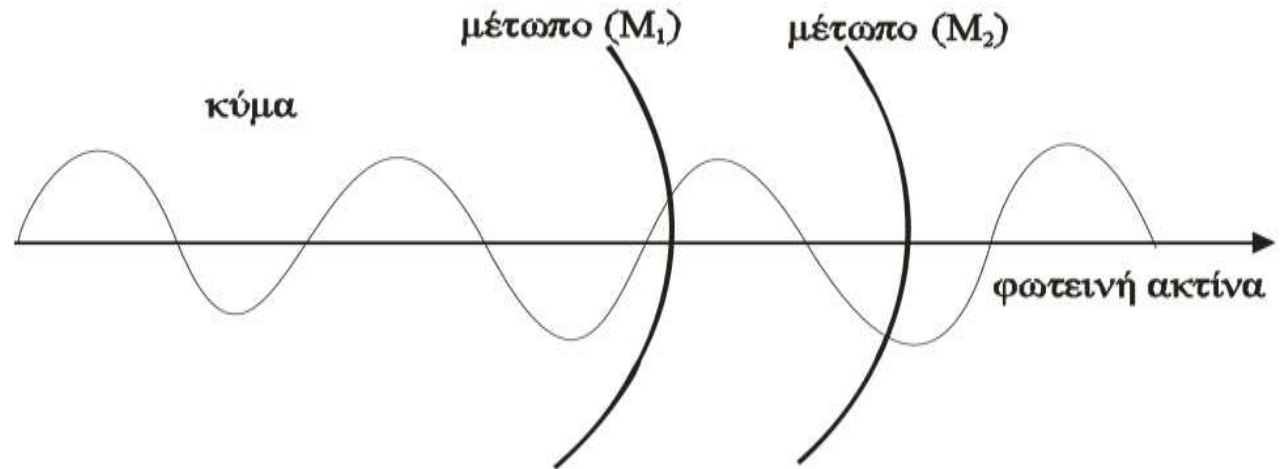
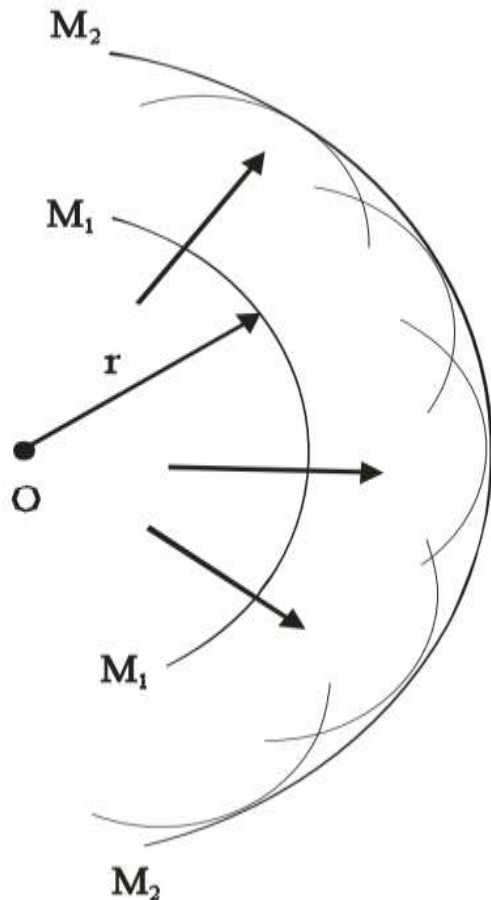
Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Ανάλογα με τη συχνότητα του Η/Μ κύματος μπορούμε να το κατατάξουμε σε διάφορες μπάντες του Η/Μ ΦΑΣΜΑΤΟΣ



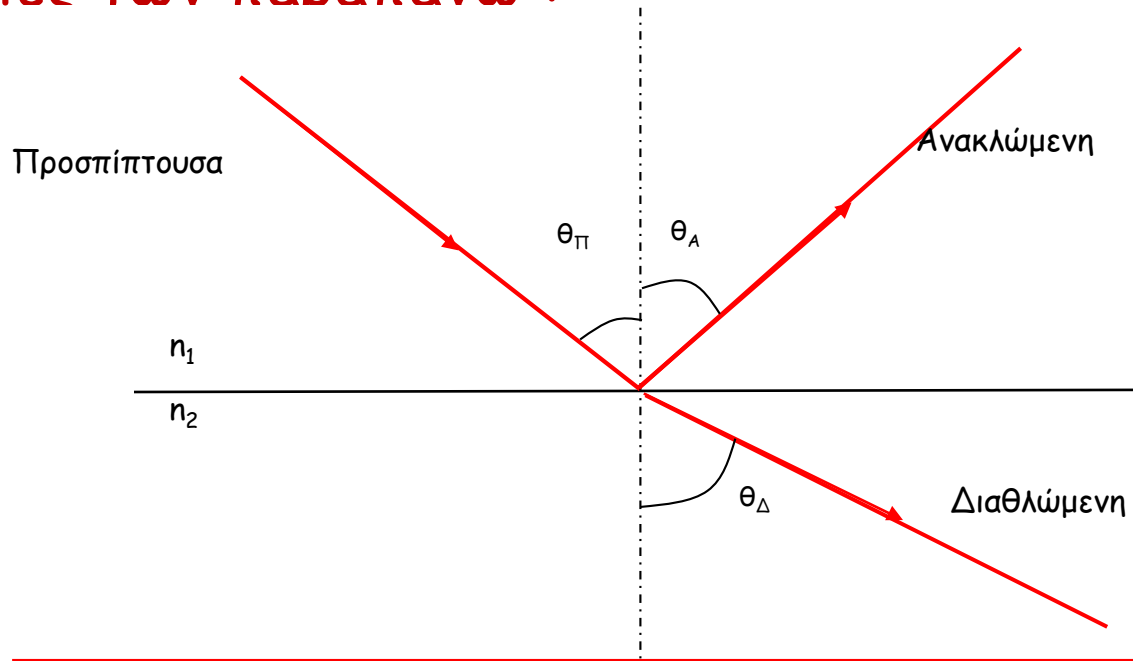
Γεωμετρική Οπτική

- Αρχή Huygens για δευτερογενή κύματα.
- Το φως διαδίδεται μέσω κυματικών μετώπων έτσι ώστε κάθε σημείο του μετώπου είναι πηγή δευτερογενών κυμάτων που διαδίδονται προς τα έξω σαν σφαιρικό κύμα κ.ο.κ.
- Η φωτεινή ακτίνα είναι η κάθετη στα μέτωπα του κύματος



Αρχή του Fermat

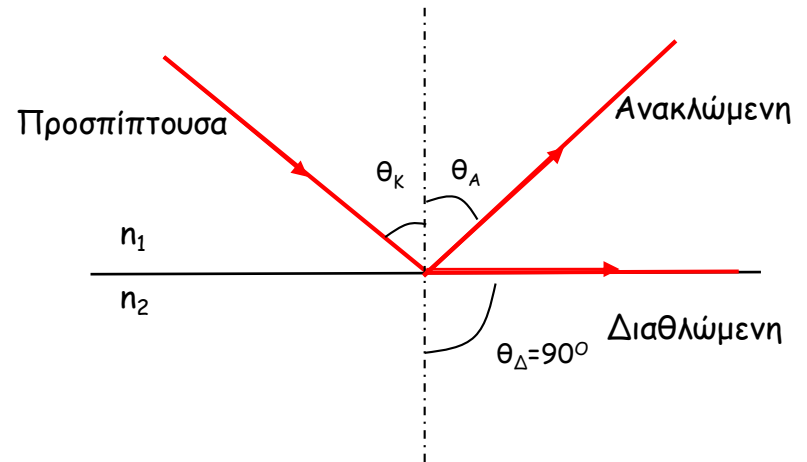
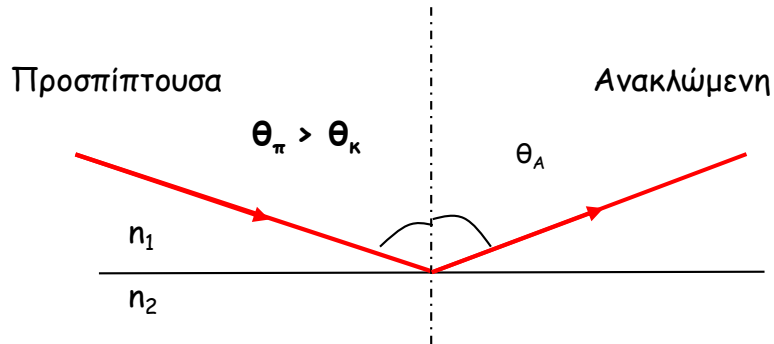
- Αρχή ελάχιστου χρόνου (principle of least action) : "Κατά τη μετάβασή του από ένα σημείο σε ένα άλλο , το φως επιλέγει να ακολουθήσει το δρόμο εκείνο που καθιστά το χρόνο της διαδρομής ελάχιστο".
- Συνέπειες των παραπάνω :



Νόμος ανάκλασης
 $\theta_{\pi} = \theta_{\alpha}$

Νόμος διάθλασης (Snell)
 $n_1 \sin \theta_{\pi} = n_2 \sin \theta_{\Delta}$

Ολική ανάκλαση

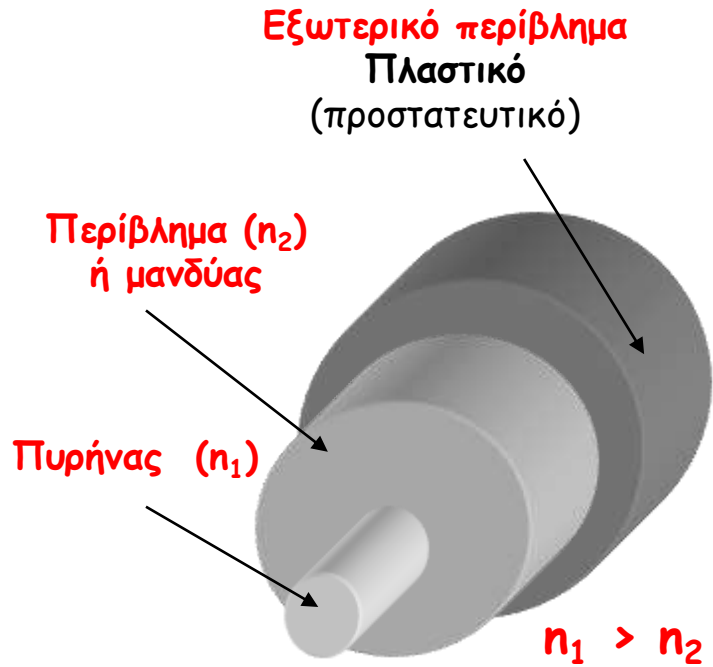


Κρίσιμη γωνία θ_{κ} : $\theta_{\pi} = \theta_{\kappa}$ όταν $\theta_{\Delta} = 90^{\circ}$

$$\sin \theta_{\kappa} = \frac{n_2}{n_1}$$

Ολική εσωτερική ανάκλαση
 $\theta_{\pi} > \theta_{\kappa}$

Οπτική Ύψα

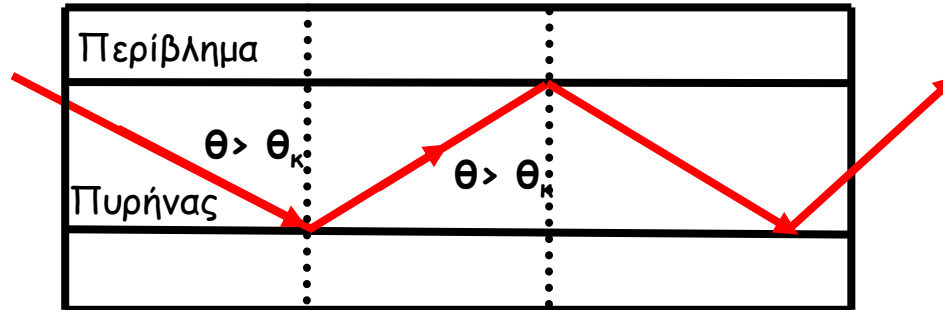


Δείκτης διάθλασης

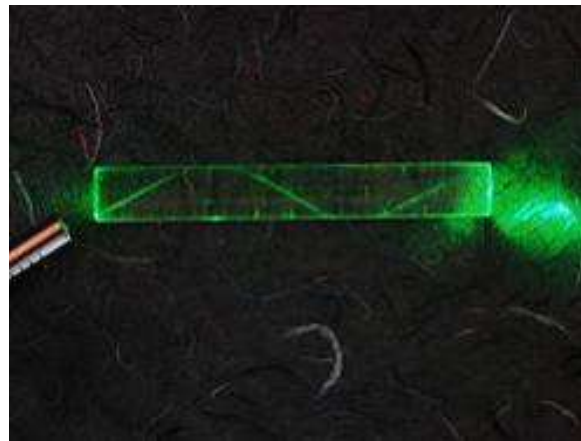
$$n = \frac{c}{v}$$

Υλικό	n
Κενό	1
Αέρας	1.0003
Νερό	1.33
Γυαλί	1.46-1.96
Διαμάντι	2.42

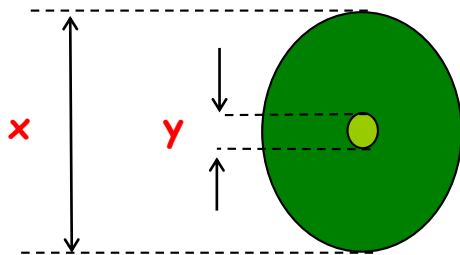
Κυματοδήγηση



Το φως διαδίδεται στον πυρήνα της οπτικής ίνας με διαδοχικές ολικές ανακλάσεις



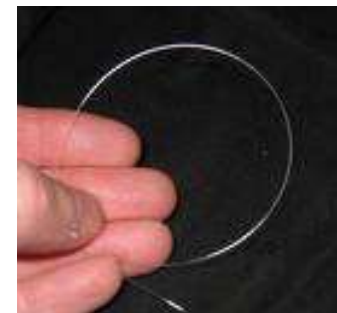
Διαστάσεις οπτικών ινών



(x/y)
Διάμετρος περιβλήματος / Διάμετρος πυρήνα

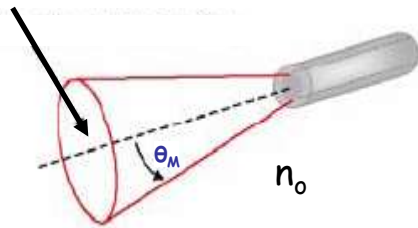
Ενδεικτικές διαστάσεις:

- 125 μm / 10 μm γυάλινη μονότροπη
- 125 μm / 50 μm ή 125 μm / 62.5 μm γυάλινη πολύτροπη
- 2 mm / 1.96 mm πλαστική



Παράμετροι

Μέγιστη γωνία πρόπτωσης /εκπομπής: θ_M



Για $\varphi > \theta_M$ δεν υπάρχει διάδοση

• Αριθμητικό άνοιγμα (Numerical aperture-NA):

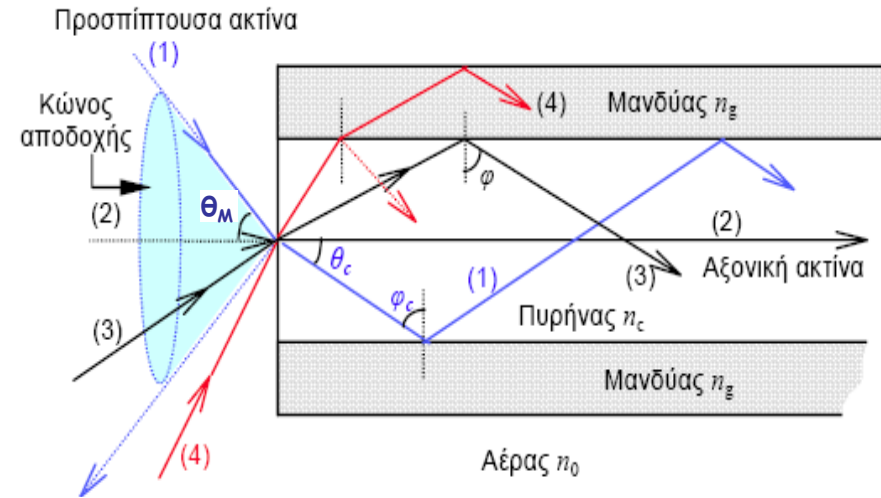
$$NA = n_0 \sin \theta_M = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

• Δ : σχετικός δείκτης διάθλασης της ίνας

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ: $\Delta = 0.001 - 0.03$

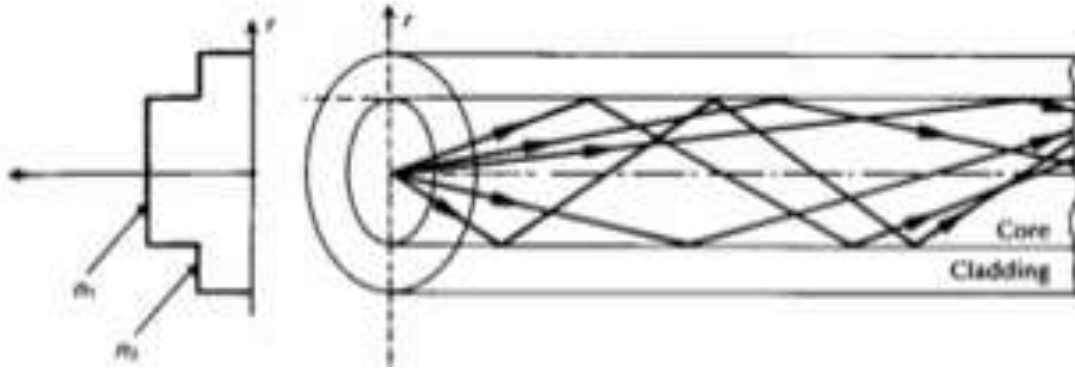
Κατά προσέγγιση για $\Delta \ll 1$: $\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$



Ασκήσεις εξάσκησης

- Μια γυάλινη οπτική ίνα έχει δείκτη διάθλασης πυρήνα ίσο με 1.50 και περιβλήματος 1.47. Να προσδιορίσετε: α) Την κρίσιμη γωνία στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα -περιβλήματος, β) Το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας και γ) τη μέγιστη γωνία πρόσπτωσης αν η ίνα βρίσκεται σε περιβάλλον αέρα
- Μια τυπική τιμή του σχετικού δείκτη διάθλασης της ίνας για οπτικές ίνες μεγάλων αποστάσεων είναι 1%. Για μια τέτοια ίνα να υπολογίσετε α) το αριθμητικό της άνοιγμα αν ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι 1.46 και β) την κρίσιμη γωνία στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα -περιβλήματος

Οπτικοί τρόποι διάδοσης

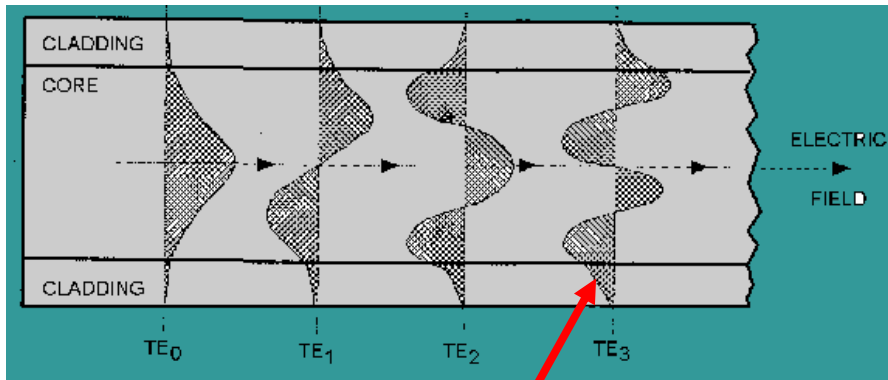


Πολύτροπη ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης

Οι ακτίνες του οπτικού σήματος, ανάλογα με τη γωνία εισόδου τους στην οπτική ίνα, μεταδίδονται ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες. (Προσέγγιση γεωμετρικής οπτικής)

Κάθε ακτίνα αντιστοιχεί σε ένα τρόπο διάδοσης.

Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου

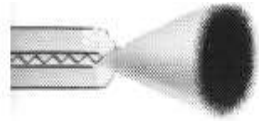


Απορροφώμενο πεδίο (Evanescent field)

Κάθε οπτικός τρόπος μετάδοσης (ακτίνα) αντιπροσωπεύει μία λύση της κυματικής εξίσωσης που προκύπτει από τις εξισώσεις Maxwell.

Οπτικοί τρόποι διάδοσης

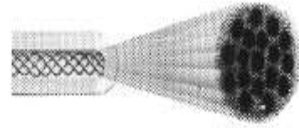
Απεικόνιση οπτικών τρόπων μετάδοσης



Output from singlemode fibre, HE₁₁ mode



Output from a fibre supporting two modes

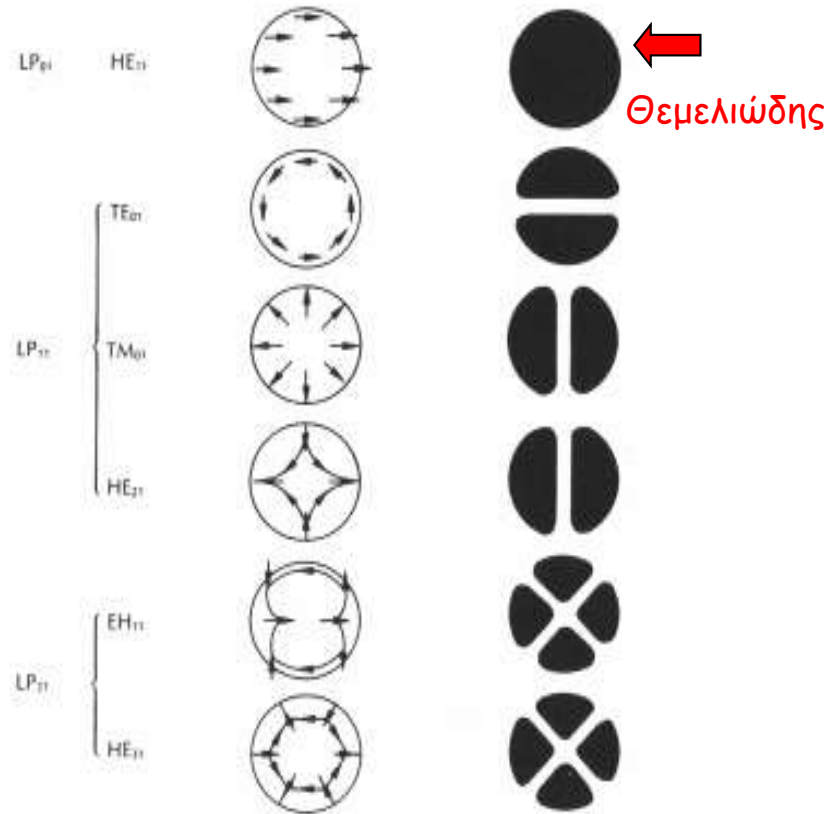


Output from a multimode fibre, a so-called speckle pattern



Ηλεκτρικό πεδίο

Κατανομή έντασης



Κανονικοποιημένη συχνότητα V

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{ή} \quad V = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta}$$

a : ακτίνα πυρήνα

λ : μήκος κύματος ακτινοβολίας

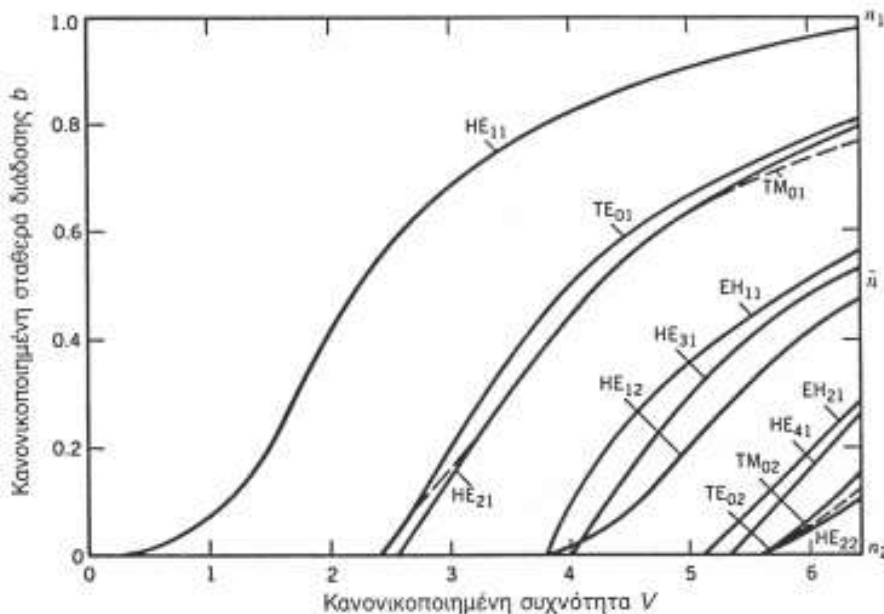
Αριθμός οπτικών τρόπων διάδοσης M
 πολύτροπης ίνας βηματικού δείκτη
 διάθλασης:

$$M = \frac{V^2}{2}$$

Μήκος κύματος αποκοπής οπτικής ίνας λ_c :

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{V_c} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad V_c = 2.405$$

**Μονότροπη λειτουργία επιτυγχάνεται
 μόνο για $\lambda > \lambda_c$**

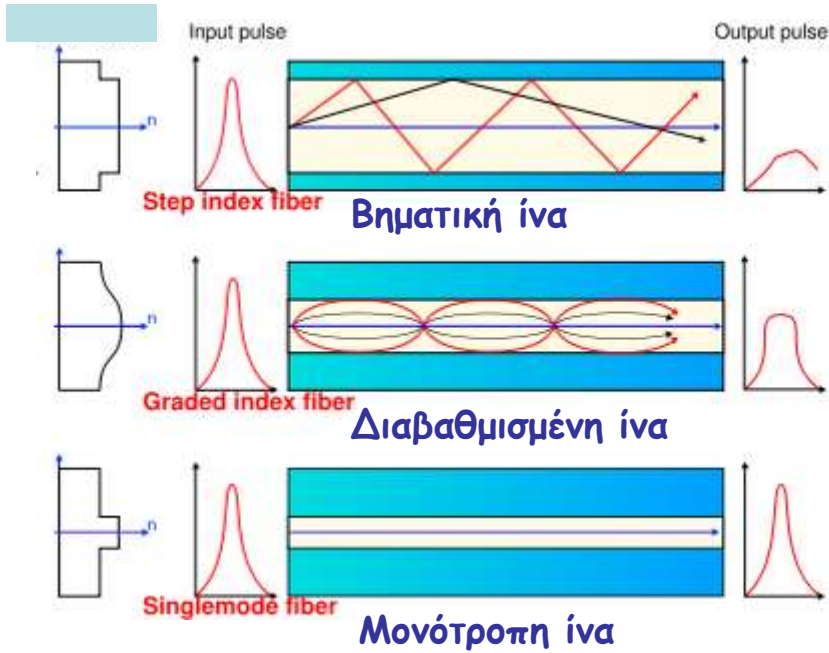


Για $V < 2.405$ μόνο ένας τρόπος μετάδοσης
 υποστηρίζεται \longrightarrow **Μονότροπη ίνα**

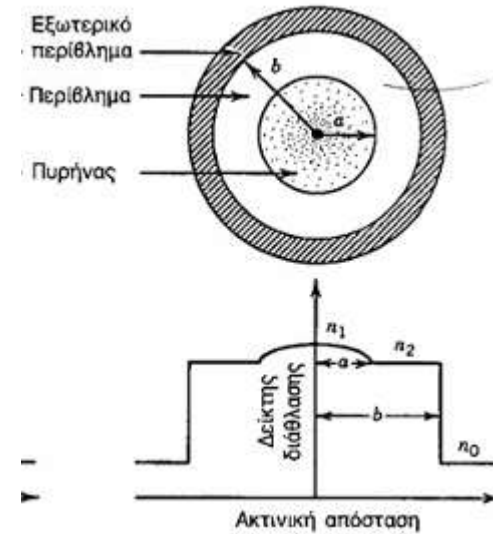
Ασκήσεις εξάσκησης

- Έστω ότι επιθυμούμε να κατασκευάσουμε οπτική ίνα που να έχει μονότροπη λειτουργία για μήκη κύματος μεγαλύτερα του $1.2 \mu\text{m}$. Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για τον πυρήνα έχει δείκτη διάθλασης 1.45 και ο σχετικός δείκτης διάθλασης της ίνας είναι $0,003$. Να υπολογιστεί η ακτίνα του πυρήνα.
- Επιθυμούμε να σχεδιάσουμε πολύτροπη οπτική ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης με κανονικοποιημένη συχνότητα 100 και αριθμητικό άνοιγμα 0.3 . Η ίνα θα χρησιμοποιηθεί σε οπτική ζεύξη μήκους κύματος 820 nm ενώ ο πυρήνας της θα κατασκευαστεί από πυρίτιο με δείκτη διάθλασης 1.45 . Να υπολογιστεί η ακτίνα του πυρήνα και ο δείκτης διάθλασης του περιβλήματος.

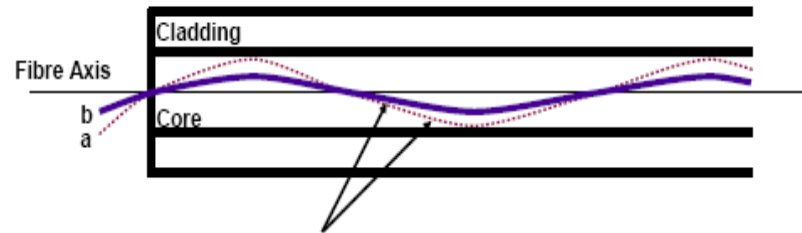
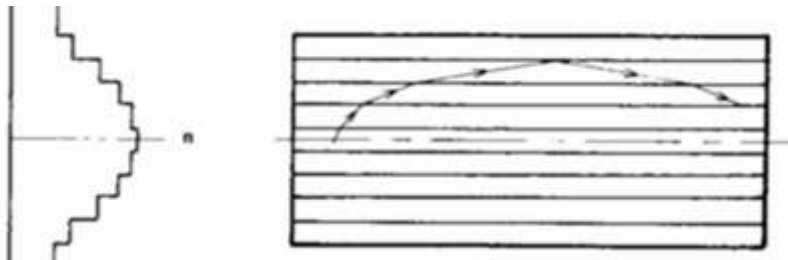
Τύποι ινών



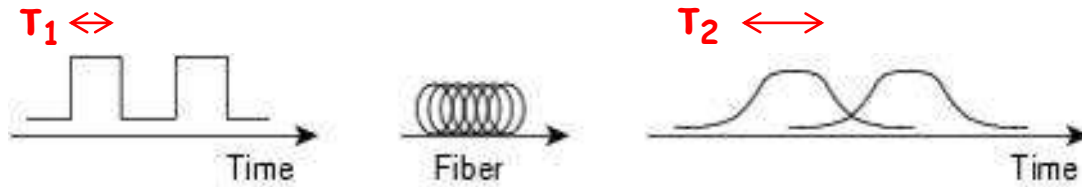
Κατανομή του δείκτη διάθλασης ίνας διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης



Διάδοση σε ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης



Διασπορά (Dispersion)



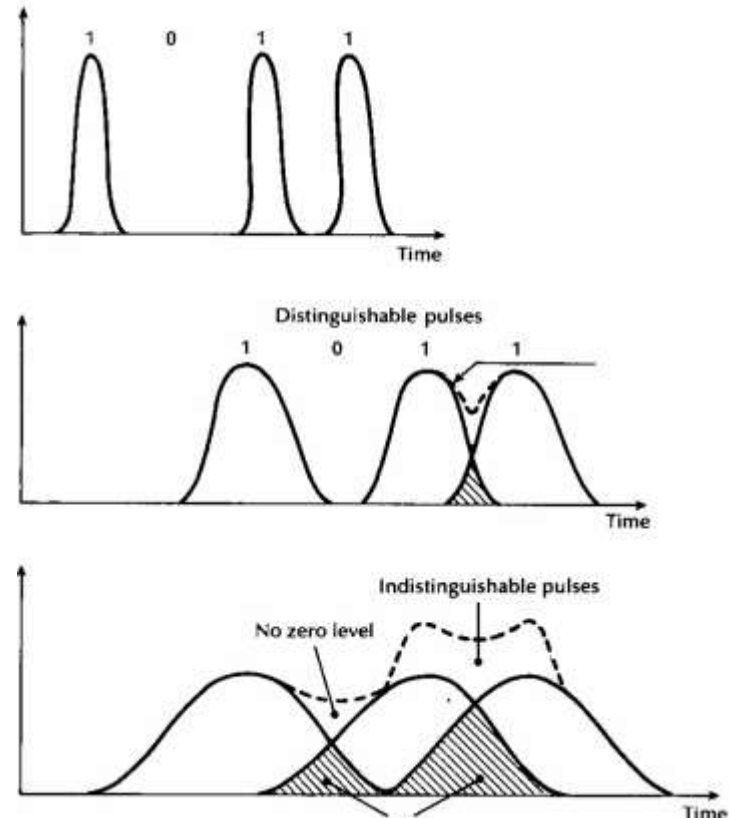
$$\delta T = T_2 - T_1$$

Φαινόμενο που προκαλεί τη χρονική διαπλάτυνση ΔT των παλμών κατά τη μετάδοση.

Η διασπορά $\left(\frac{\text{ps}}{\text{km} \cdot \text{nm}}\right)$ περιορίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης B μιας οπτικής ζεύξης. $B_{\text{MAX}} = \frac{1}{\delta \tau}$

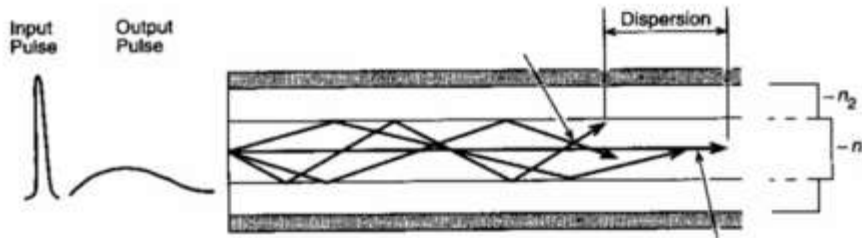
Είδη διασποράς

- **Διατροπική (δT):** Εξαιτίας των διαφορετικών τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζονται.
- **Ενδοτροπική (δT):** Σημαντική σε μονότροπη ίνα
 - Διασπορά υλικού
 - Διασπορά κυματοδηγού



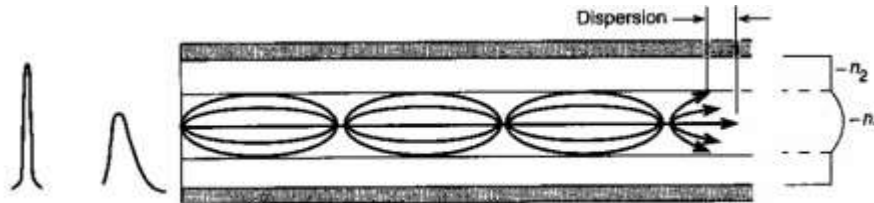
Διατροπική διασπορά

Οπτικοί τρόποι μετάδοσης που διανύουν διαφορετικές διαδρομές στο εσωτερικό της ίνας φτάνουν στην έξοδο με χρονική καθυστέρηση



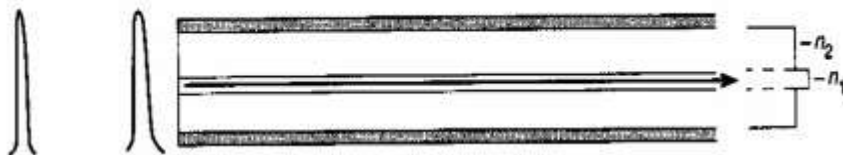
Πολύτροπη ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης

$$B \cdot L = 20 \text{ Mbps km} \quad \delta\tau_{\text{BHM}} = n_1 \frac{L}{2c} \Delta$$



Πολύτροπη ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης

$$B \cdot L = 1 \text{ Gbps km} \quad \delta\tau_{\text{ΔΙΑΒ}} = n_1 \frac{L}{4c} \Delta^2$$



Μονότροπη ίνα

$$B \cdot L > 100 \text{ Gbps km} \quad \delta\tau_{\text{ΜΟΝ}} = 0$$

Ενδοτροπική ή χρωματική διασπορά

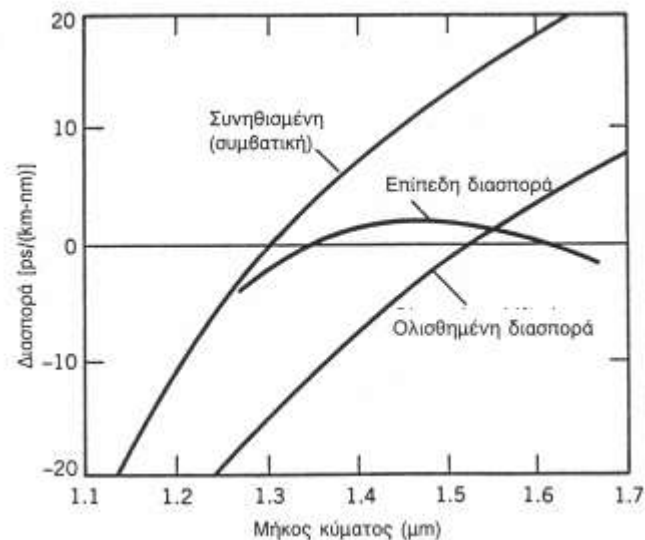
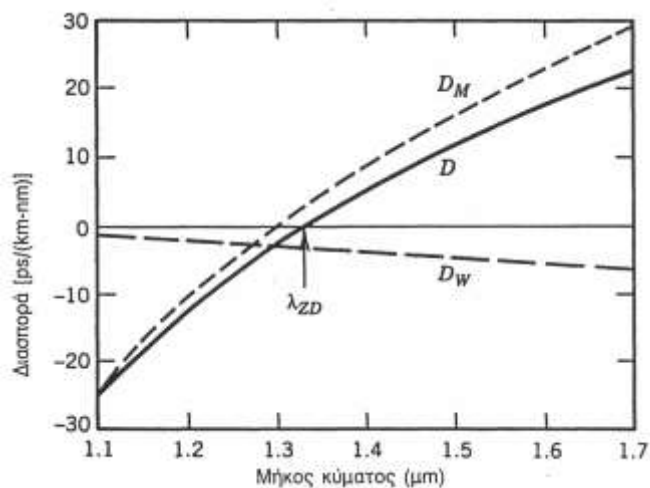
$$D = D_M + D_W$$

➤ Διασπορά υλικού (D_M)

Προκαλείτε από την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος

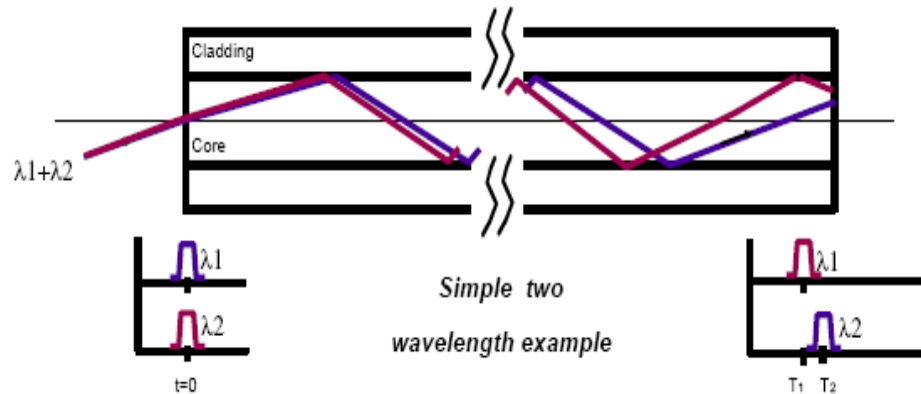
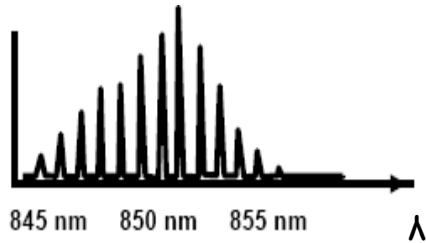
➤ Διασπορά κυματοδηγού (D_W)

Προκαλείτε από την εξάρτηση της κυματοδήγησης από το μήκος κύματος



Διασπορά υλικού

Φάσμα laser

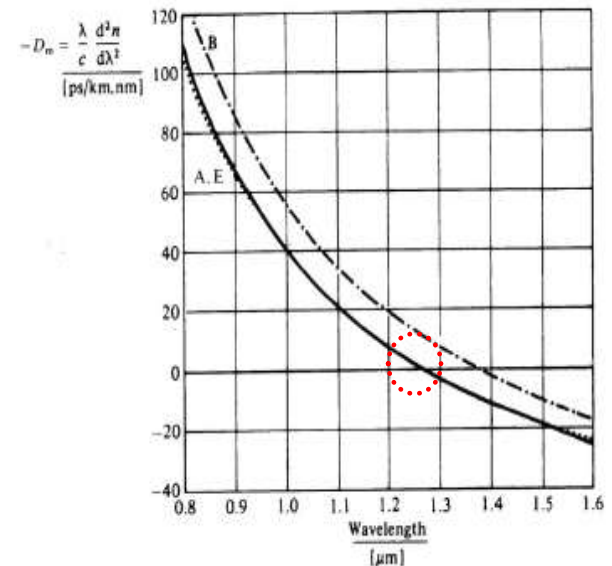


Ο δείκτης διάθλασης στη silica εξαρτάται από το μήκος κύματος
 ➔ διαφορετικές φασματικές συνιστώσες της οπτικής πηγής ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα στον πυρήνα

$$\delta \tau_{\text{ΥΛΙΚΟΥ}} = -L \delta \lambda \left(\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right)$$

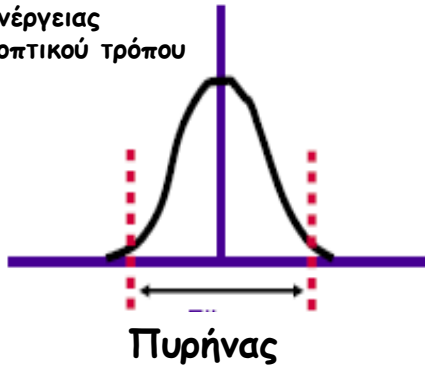
$\Delta\lambda$: φασματικό εύρος πηγής

Παράμετρος διασποράς υλικού

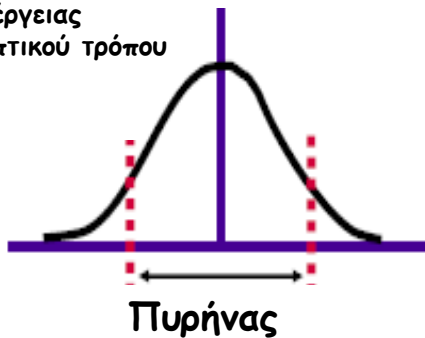


Διασπορά κυματοδηγού


Κατανομή ενέργειας
θεμελιώδη οπτικού τρόπου
για λ_1



Κατανομή ενέργειας
θεμελιώδη οπτικού τρόπου
για $\lambda_2 > \lambda_1$



Σε μονότροπη οπτική ίνα καθώς αυξάνει το μήκος κύματος της ακτινοβολίας αυξάνει και το ποσοστό του κύματος που διαχέεται στο περίβλημα.

 διαφορετικά τμήματα του οπτικού παλμού διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες

Απώλειες διάδοσης

- Σε μία οπτική ίνα η $\Delta.E$ για την διάδοση μιας φωτεινής δέσμης είναι

$$\frac{dP}{dz} = -aP \Rightarrow P(z) = P_{in} e^{-az} \quad \alpha \text{ ο συντελεστής εξασθένισης}$$



- Για εισερχόμενη ένταση P_{in} η εξερχόμενη ένταση είναι

$$P_{out} = P_{in} e^{-aL} \Leftrightarrow \frac{P_{out}}{P_{in}} = e^{-aL}$$

- Λογαριθμίζοντας

$$\ln\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) = -aL \Leftrightarrow a = -\frac{1}{\log(e)L} \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

Απώλειες διάδοσης

Ορίζουμε dB για ποσότητες $dB = 10 \log_{10} \frac{P}{P_o}$

Στην περίπτωση μας απώλειες οπτικών ινών σε dB

$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

Για ένα μήκος L που εισέρχεται ένταση P_{in} και Εξέρχεται P_{out}

$$a10 \log(e) = -\frac{10}{L} \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

Ορίζουμε Συντελεστής εξασθένισης ανά μονάδα μήκους α (dB/km):

$$\alpha\left(\frac{dB}{km}\right) \equiv a10 \log(e) = -\frac{10}{L} \log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

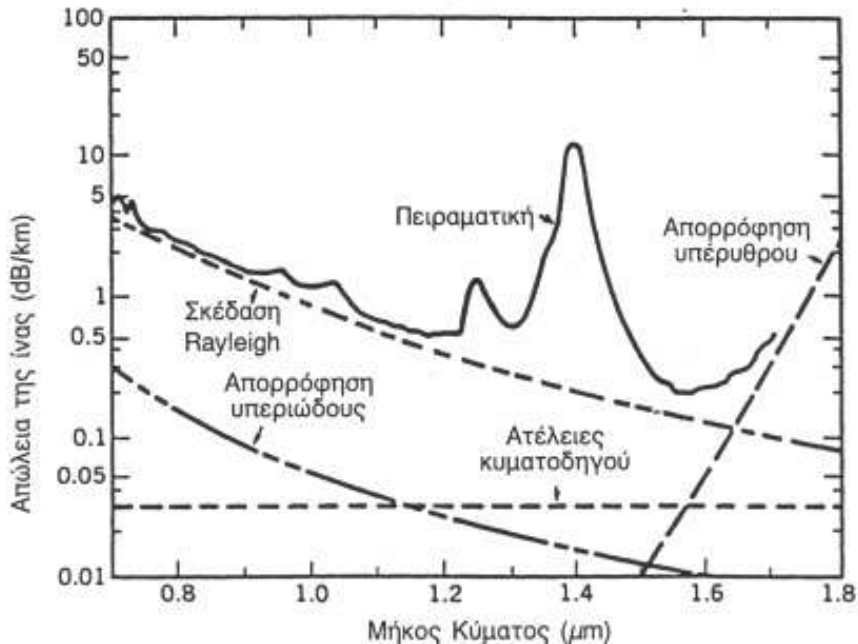
Μετατροπή από dB σε %

dB	P_{in}/P_{out} (%)
0	100
1	~79
3	50
6	25
9	12.5
10	10
14	4
17	2
20	1
40	~0

Στις οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούμε τα dBm όπου στάθμη αναφοράς είναι το 1mW

$$1dBm = 10 \log\left(\frac{P}{1mW}\right)$$

Απώλειες διάδοσης γυάλινων οπτικών ινών



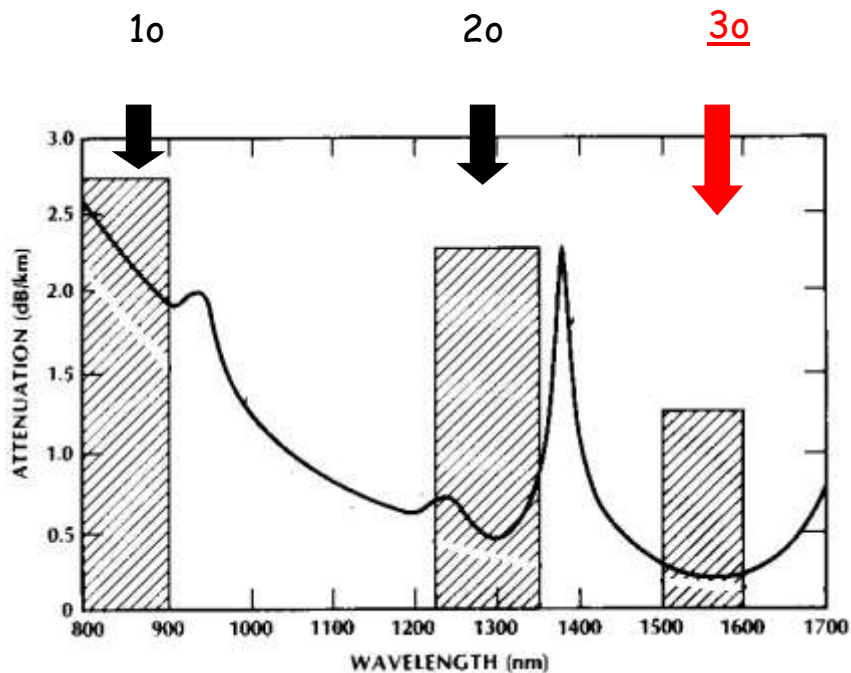
- ο **Απορρόφηση** που οφείλεται σε προσμίξεις (Fe, Cu) αλλά κυρίως σε ιόντα OH που προκαλούν κορυφές απορρόφησης στα 1.39 μm, 1.24 μm και 0.95 μm.
- ο **Σκέδαση** (κυρίως Rayleigh αλλά και μη γραμμική: Raman, Brillouin) που προκαλείται από τις κατά τόπους μικροσκοπικές διακυμάνσεις της πυκνότητας του υλικού
- ο **Ατέλειες κυματοδηγού**

Από τις κεραίες στον γαλανό ουρανό και στις Οπτικές ίνες

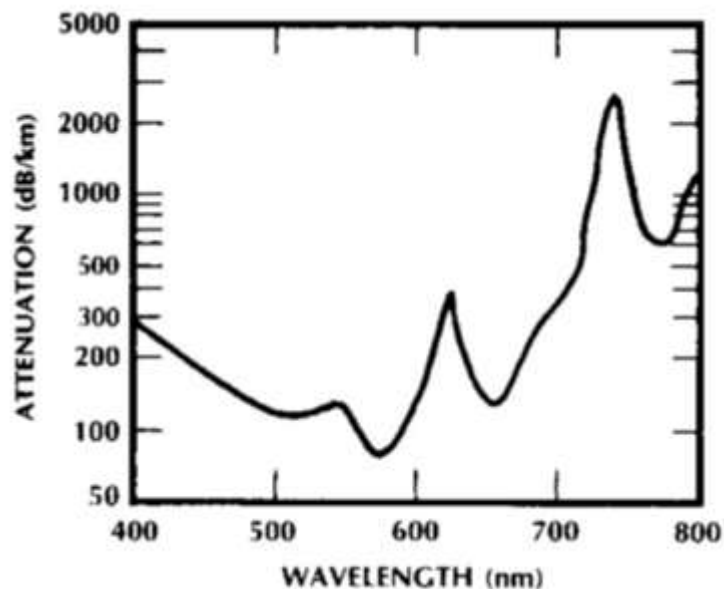
- Στην ατμόσφαιρα όταν προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία σε σωματίδια μικρότερα του μήκους κύματος τότε αυτά δρουν σαν διπολικές κεραίες και επανεκπέμπουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία
- Η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται είναι
$$I_{rad} = \frac{\mu_0 \pi^2}{2\lambda^4 c} \frac{P_m^2}{r^2} \sin^2 \theta \hat{r}$$
- Άρα η ακτινοβολία που σκεδάζεται περισσότερο θα είναι αυτή με το μικρότερο μήκος κύματος (μπλε) σε σχέση με τα μεγαλύτερα έτσι όπου και να κοιτάξουμε βλέπουμε το σκεδαζόμενο φως (μπλε χρώμα)
- Αν το φως αναγκαστεί να περάσει από ένα παχύτερο στρώμα (ανατολή δύση του ήλιου ή κάτι άλλο τότε απομακρύνεται ένα μεγάλο ποσοστό από τα μικρά και μεγάλα μήκη κύματος και γι' αυτό βλέπουμε το ήλιο πιο κόκκινο .

Γυάλινες -Πλαστικές οπτικές ίνες

Παράθυρα μετάδοσης γυάλινης οπτικής ίνας



Απώλειες πλαστικής ίνας



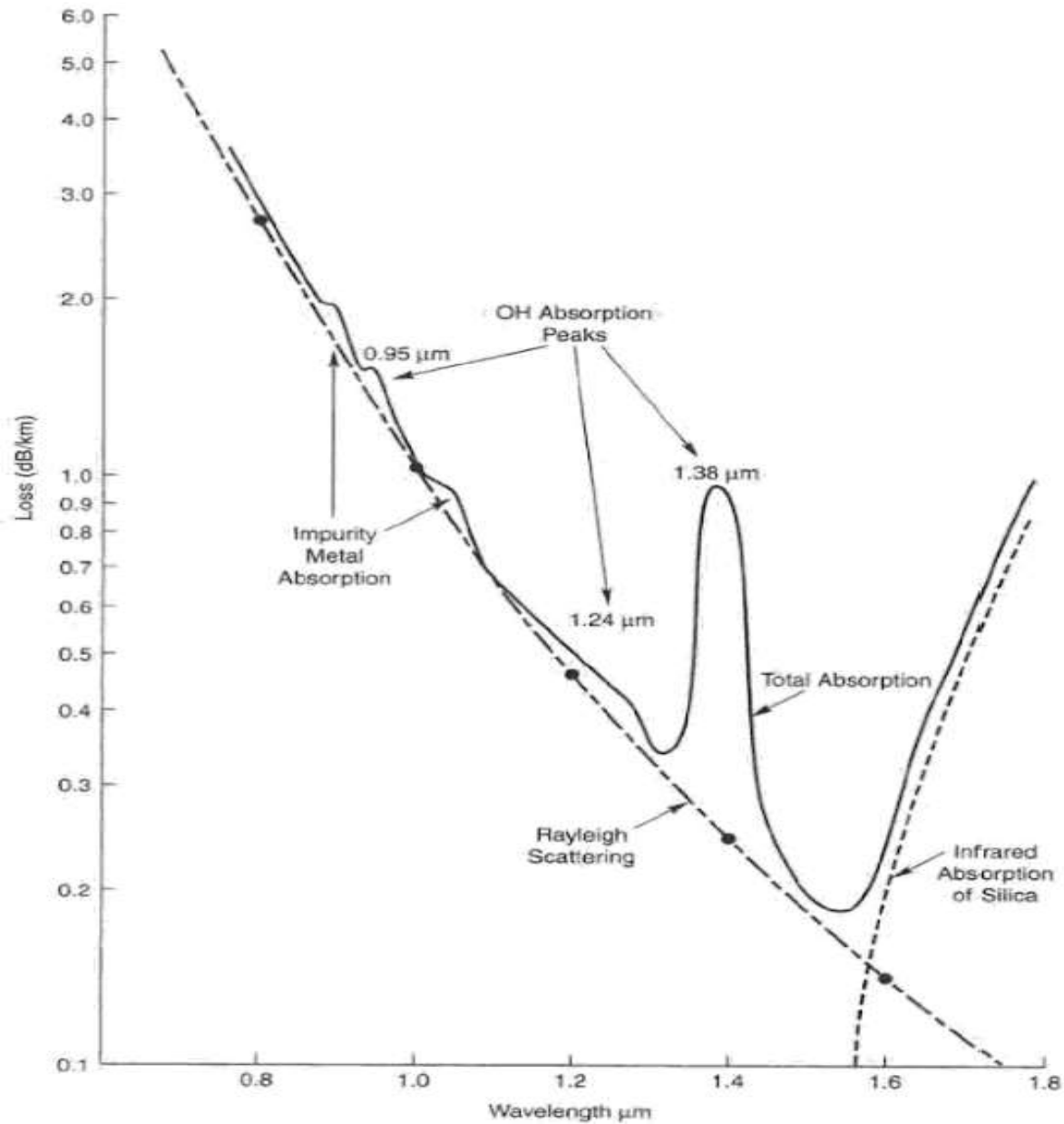


FIGURE 5.2
Total attenuation in a fiber is the sum of absorption and scattering losses.

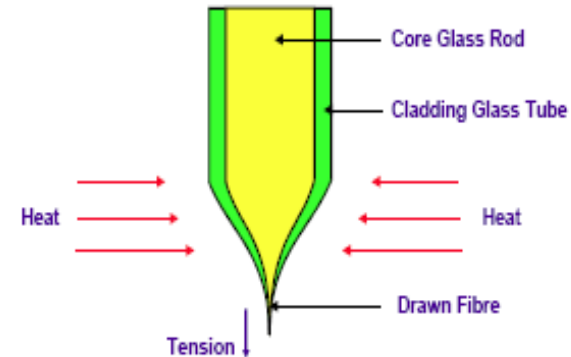
Ασκήσεις

1. Σε οπτική ίνα Μήκους 1 m μεταδίδεται το 99,9% του φωτός που εισέρχεται σε αυτήν. Πόσο φως θα παραμείνει μετά από 10 km
2. Σε οπτική ίνα εισέρχεται δέσμη έντασης $0,01 \text{ W/m}^2$ σε 10 km η δέσμη αυτή είναι 1000 ασθενέστερη.
 - a) Πόσα dB έπεσε η στάθμη έντασης της φωτεινής δέσμης.
 - b) Ποιος είναι ο συντελεστής εξασθένισης της Οπτικής ίνας αυτής.
 - c) Σε πόσα dBm αντιστοιχεί η ένταση αυτή.
3. Σε προσπάθεια σύνδεσης μια οπτικής ίνας σε μία οπτική πηγή έντασης 1mW χάνετε 1dB. Για να έχουμε αξιόπιστη ζεύξη στο τέλος της ίνας χρειαζόμαστε ένταση 0.1 mW. Ποία η μέγιστη απόσταση που μπορεί να έχει ίνα με συντελεστή απωλειών 0.5 dB/km?
4. Σε οπτική ίνα με διασπορά 10 ns/km εισέρχεται παλμός διάρκειας 100 ns πόση θα είναι η διάρκειά του μετά από 20 km στην ίνα.

Κατασκευή γυάλινων οπτικών ίνών

Διαδικασία με δύο φάσεις:

- Κατασκευή προμορφής (preform)
- “Τράβηγμα” της προμορφής σε ίνα

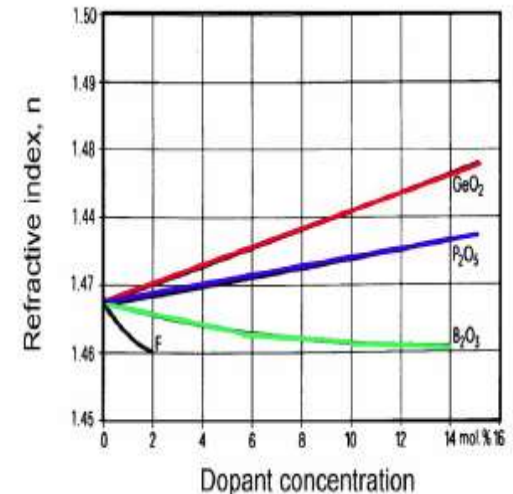


Χαρακτηριστικά προμορφής:

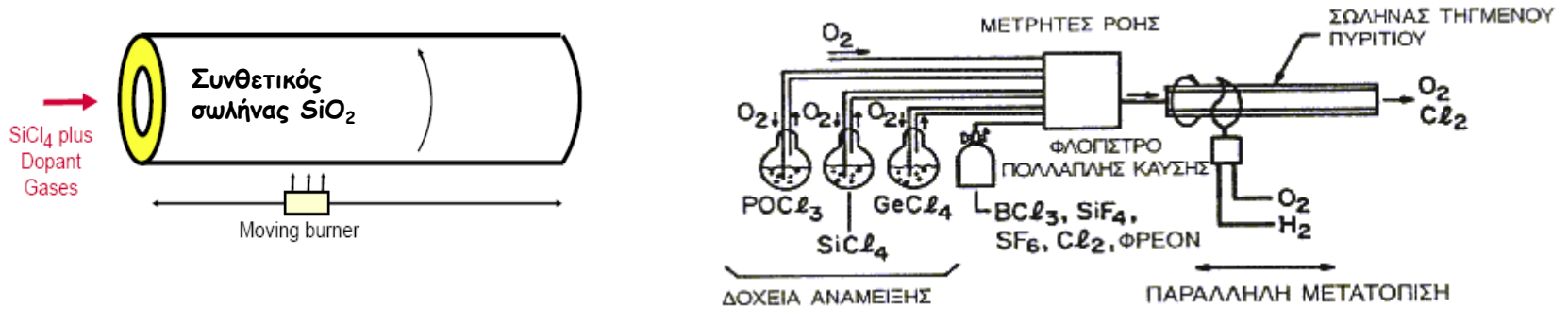
- Συγκεκριμένη κατανομή δεικτών διάθλασης
- Διαστάσεις: διάμετρος 1-6 cm, μήκος 1-2 m.
- Δίνει ίνα μήκους 15 -100 km.

“Πρώτες ύλες”

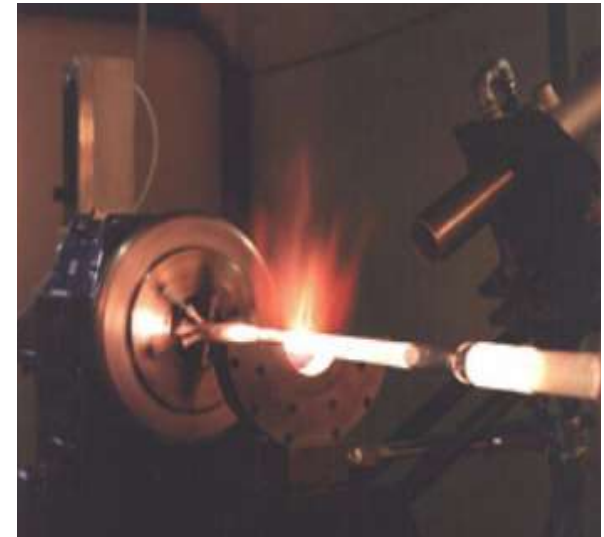
- Silica (διοξείδιο του πυριτίου SiO_2) $\xrightarrow{\text{Αέριο}}$ SiCl_4
- Προσμίξεις για μεταβολή του δείκτη διάθλασης GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3



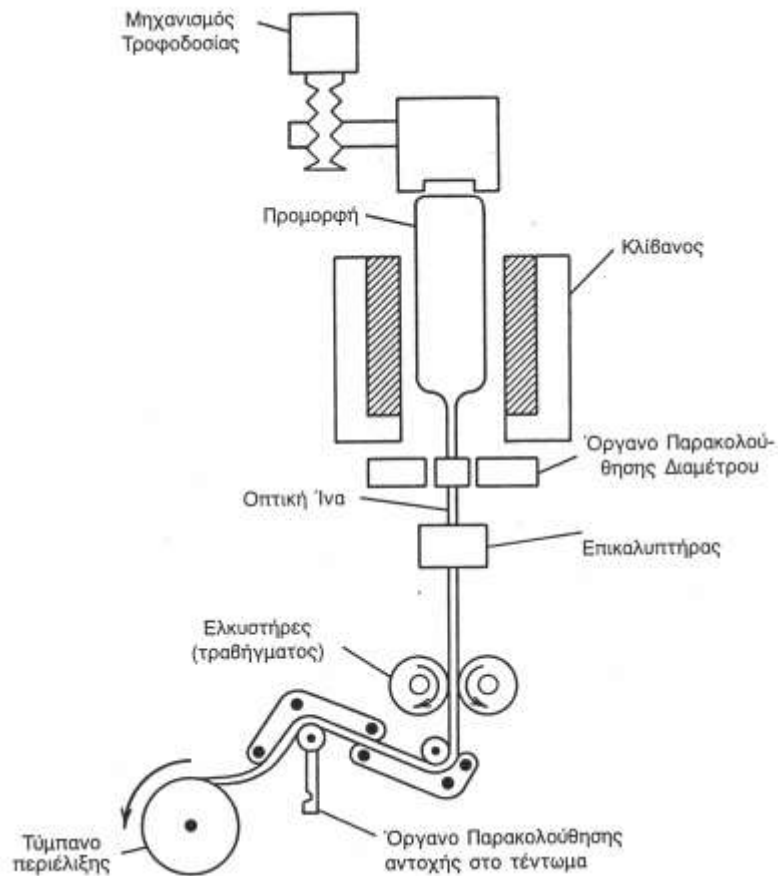
Κατασκευή προμορφής



- Modified chemical vapor deposition (MCVD).
- Outside vapor deposition (OVD).
- Vapor Axial deposition (VAD).



Κατασκευή ίνας



Nokia drawing tower

Ύψος: 25 m

Μπορεί να παράγει μέχρι και
1600 μέτρα ίνας ανά λεπτό

Και ένα video

- <https://www.youtube.com/watch?v=uSnjo5tOGQA>

