

Συστήματα Μετάδοσης

Οπτικές Ίνες

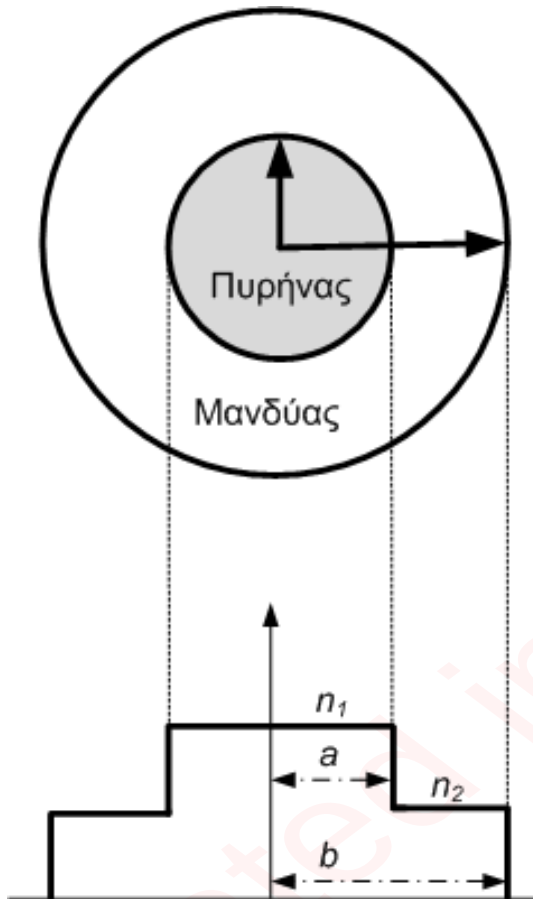


Kyriakos Vlachos, Computer Engineering and Informatics Dept.,
University of Patras, GREECE, contact: kvlachos@ceid.upatras.gr

Κυματοδότηση



Οπτική Ίνα Βηματικού Δείκτη Διάθλασης



Πυρήνας

- ❑ Διηλεκτρικό υλικό με μεγάλο δείκτη διάθλασης n_1
- ❑ Διατομή ίση με a

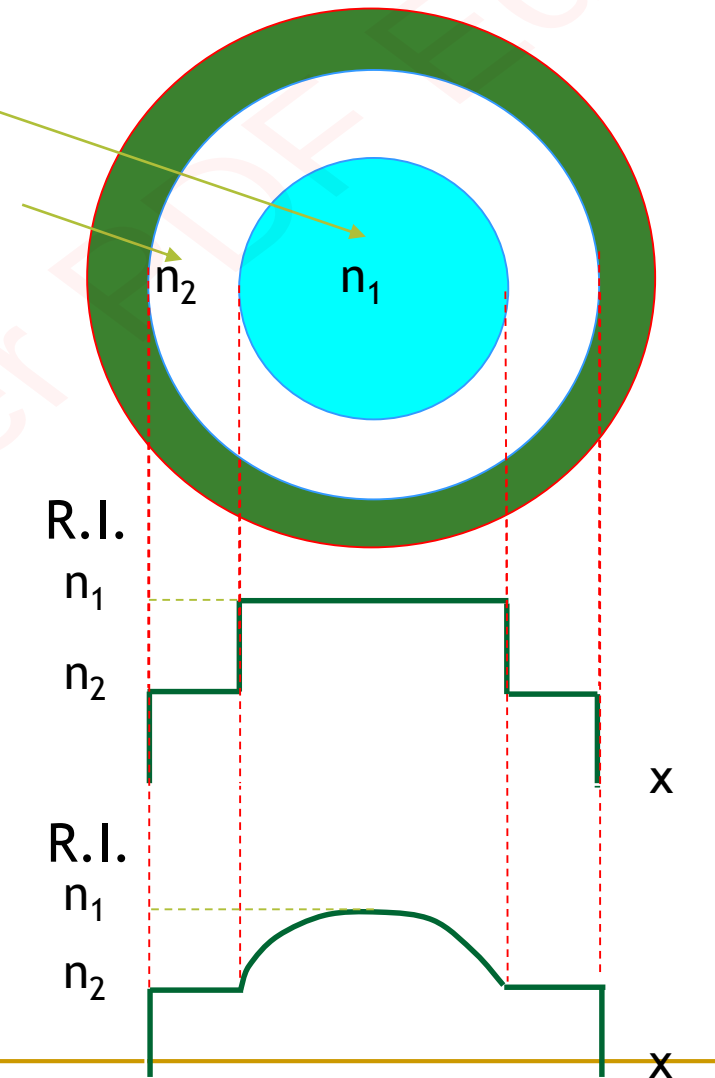
Μανδύας

- ❑ Διηλεκτρικό με μικρότερο δείκτη διάθλασης n_2
- ❑ Διατομή ίση με b

Οπτική Ίνα Βαθμιαίου Δείκτη Διάθλασης

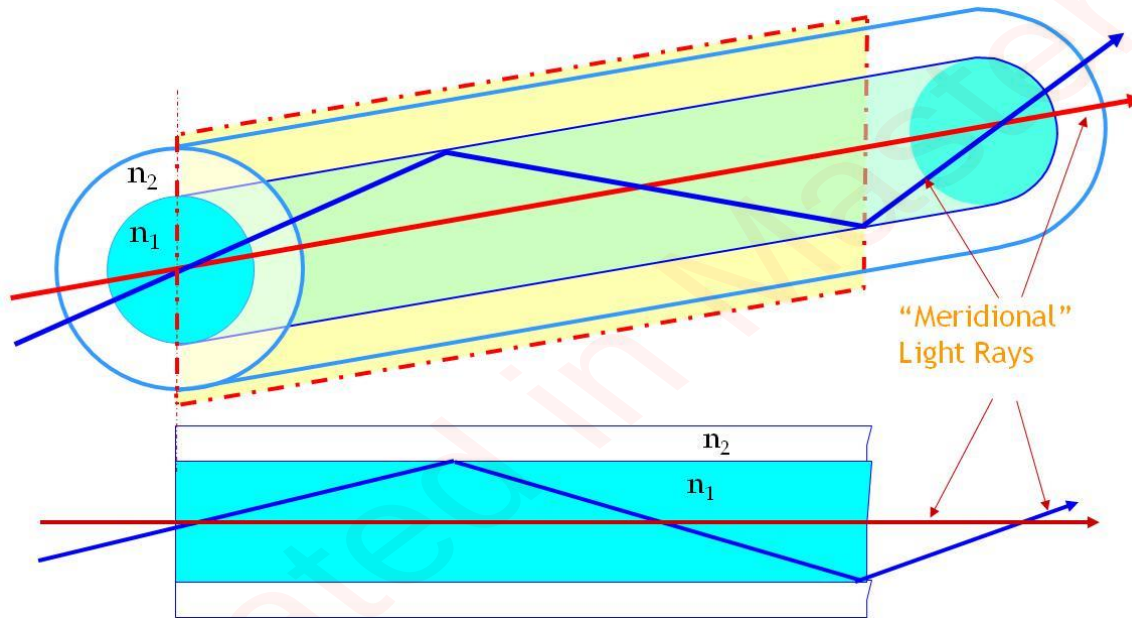
■ Core Refractive Index (n_1)

- Cladding Refractive Index (n_2)
- Step Index Profile
- Graded Index Profile
- $n_1 - n_2 \ll 1$
- Why different profiles?

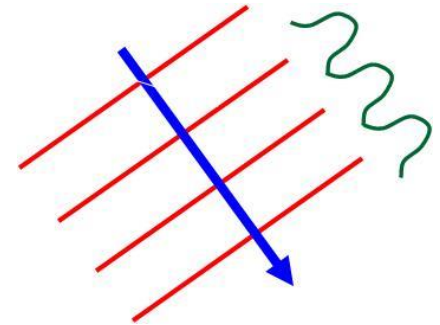


Μετάδοση Φωτός

- Το φως μεταδίδεται σαν κύμα: $E(z, t) = E \cos(\omega t - \beta z)$

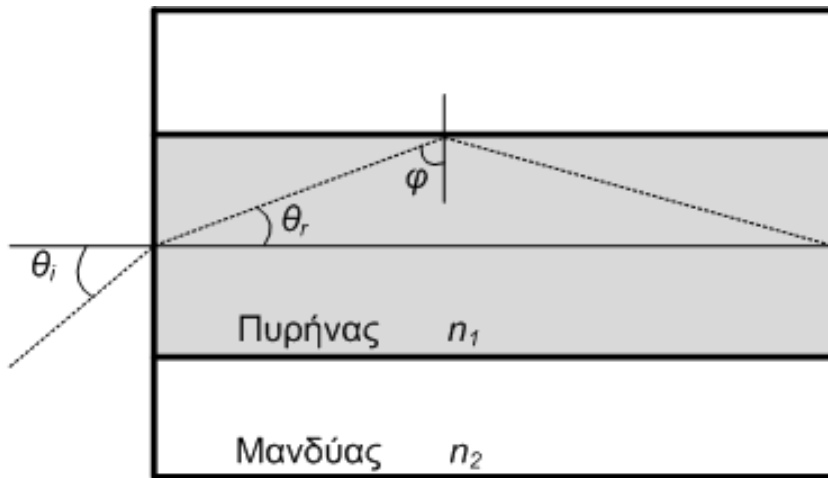


Plane wavefronts



Light ray

Προσέγγιση Γεωμετρικής Οπτικής (I)



- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίνας (ακτίνα a) είναι πολύ μεγαλύτερα από το μήκος κύματος λ του διαδιδόμενου φωτός

- ⇒ Οπτικές ακτίνες προσπίπτουν στον πυρήνα της οπτικής ίνας με γωνία θ_i .
- ⇒ Η γωνία ανάκλασης θ_r εντός της οπτικής ίνας προκύπτει από τη γεωμετρική οπτική

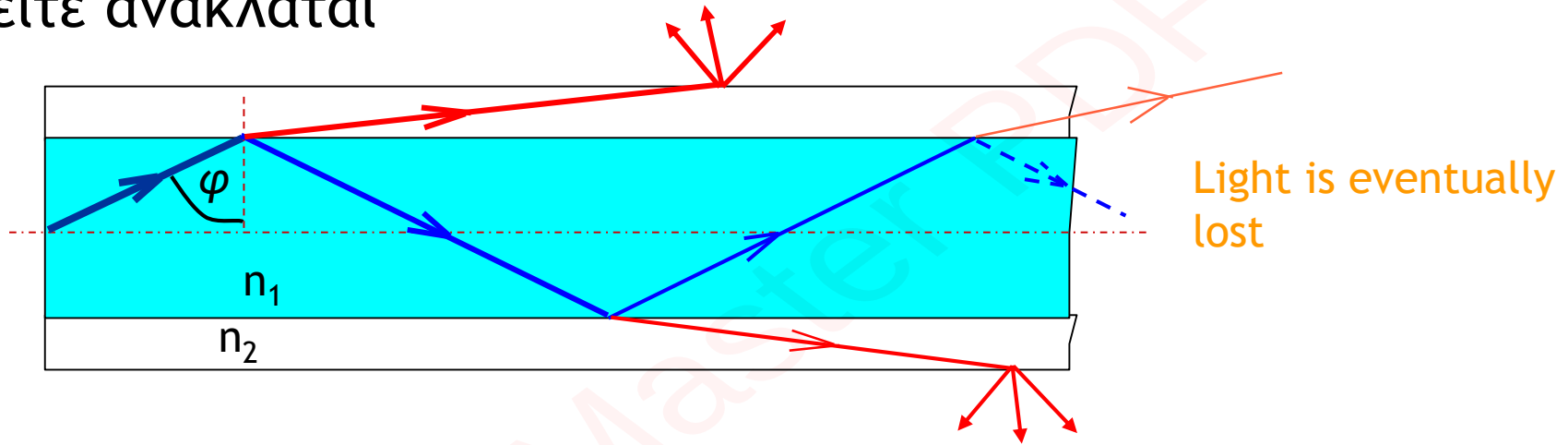
$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r$$

- ⇒ Οι ακτίνες ανακλούνται στο όριο μανδύα-πυρήνα όταν

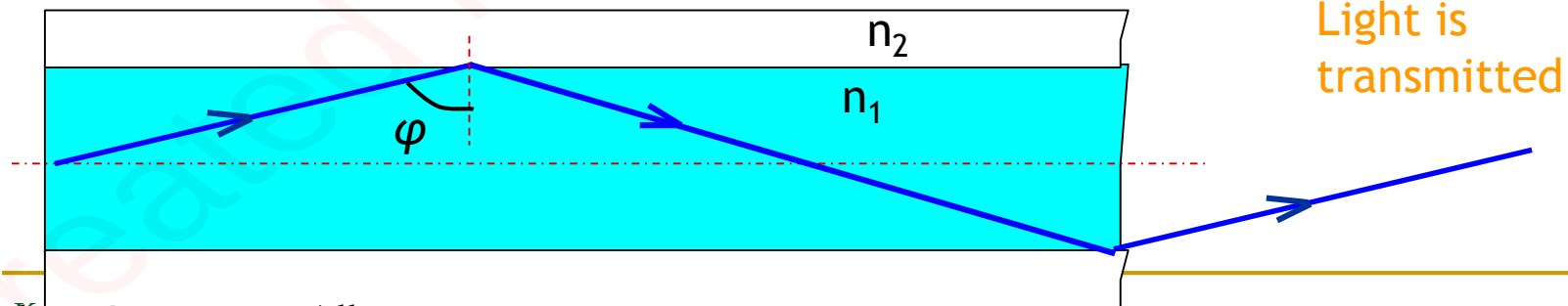
$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Προσέγγιση Γεωμετρικής Οπτικής (I)

Εάν $\varphi <$ κρίσιμη φωνία εισόδου τότε η ακτίνα είτε διαθλάται είτε ανακλάται



if $\theta_1 >$ critical angle θ_{cr} , ray totally reflected



Προσέγγιση Γεωμετρικής Οπτικής (II)

⇒ Αριθμητικό άνοιγμα οπτικής ίνας (γωνίες πρόσπτωσης που υφίστανται ολική ανάκλαση):

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r = n_1 \cos \phi_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

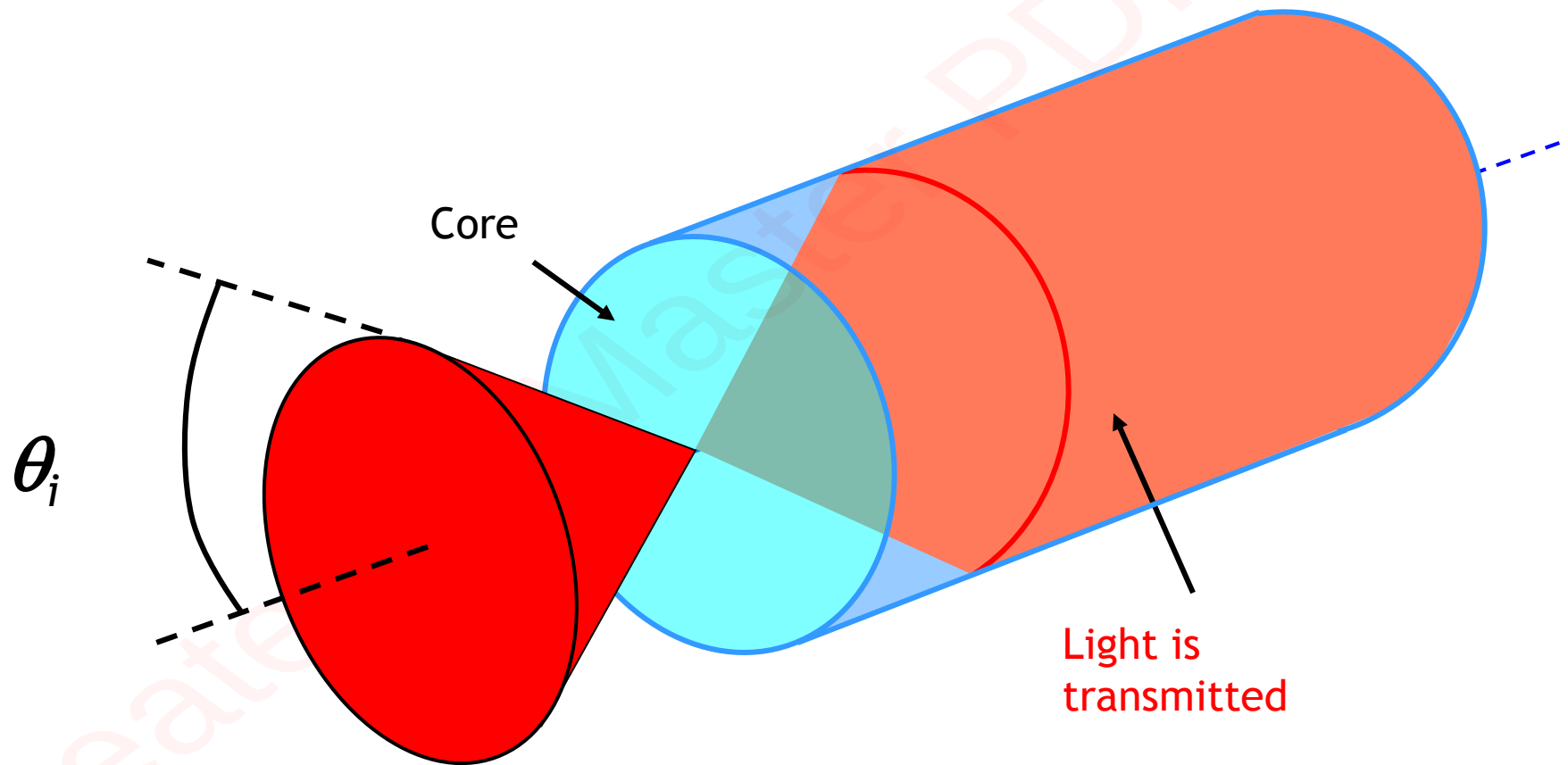
✘ Βασικό πρόβλημα: Οι οπτικές ακτίνες ταξιδεύουν με ταχύτητα εξαρτώμενη από την γωνία πρόσπτωσης τους

$$v_n = \frac{c \sin \phi_n}{n_1}$$

✘ Αποτέλεσμα: Χρονική διαπλάτυνση οπτικών παλμών

$$\Delta T = \frac{n_1}{c} \left(\frac{L}{\sin \phi_c} - L \right) = \frac{L}{c} \frac{n_1^2}{n_2} \Delta, \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Αριθμητικό Άνοιγμα



Ίνες Βαθμιαίου Δείκτη Διάθλασης

- Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα μεταβάλλεται ως προς τη διατομή

$$n(\rho) = \begin{cases} n_1 \left[1 - \Delta \left(\frac{\rho}{\alpha} \right)^n \right], & \rho \leq \alpha \\ n_1 [1 - \Delta] = n_2, & \rho > \alpha \end{cases}$$

- ⇒ Οι οπτικές ακτίνες που ταξιδεύουν κοντά στον πυρήνα διανύουν μικρότερο μήκος διάδοσης, αλλά αντιμετωπίζουν μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης, οπότε ταξιδεύουν με μικρότερη ταχύτητα.
- ⇒ Οι ακτίνες που ταξιδεύουν με κρίσιμη γωνία διανύουν το μεγαλύτερο μήκος, αλλά έχουν και τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης.
- ✓ Αποτέλεσμα: Μείωση της διασποράς των ταχυτήτων διάδοσης στην οπτική ίνα και συνεπώς της χρονικής διαλάτυνσης των οπτικών παλμών.

Κυματική Περιγραφή Διάδοσης (I)

- Επίλυση της κυματικής εξίσωσης διάδοσης σε κυλινδρικές συντεταγμένες

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 E_z = 0$$

- ⇒ Προκύπτει ηλεκτρικό πεδίο της μορφής

$$E_z(\rho, \phi, z) = \begin{cases} AJ_m(\kappa\rho) e^{jm\phi} e^{i\beta z}, & \rho \leq \alpha \\ CK_m(\gamma\rho) e^{jm\phi} e^{i\beta z}, & \rho > \alpha \end{cases}$$

- ⇒ Οι παράμετροι κ και γ συσχετίζονται με τη σταθερά διάδοσης β ως

$$\kappa = k_0^2 n_1^2 - \beta^2$$

$$\gamma = \beta^2 - k_0^2 n_2^2$$

Κυματική Περιγραφή Διάδοσης (II)

⇒ Όμοια για το μαγνητικό πεδίο

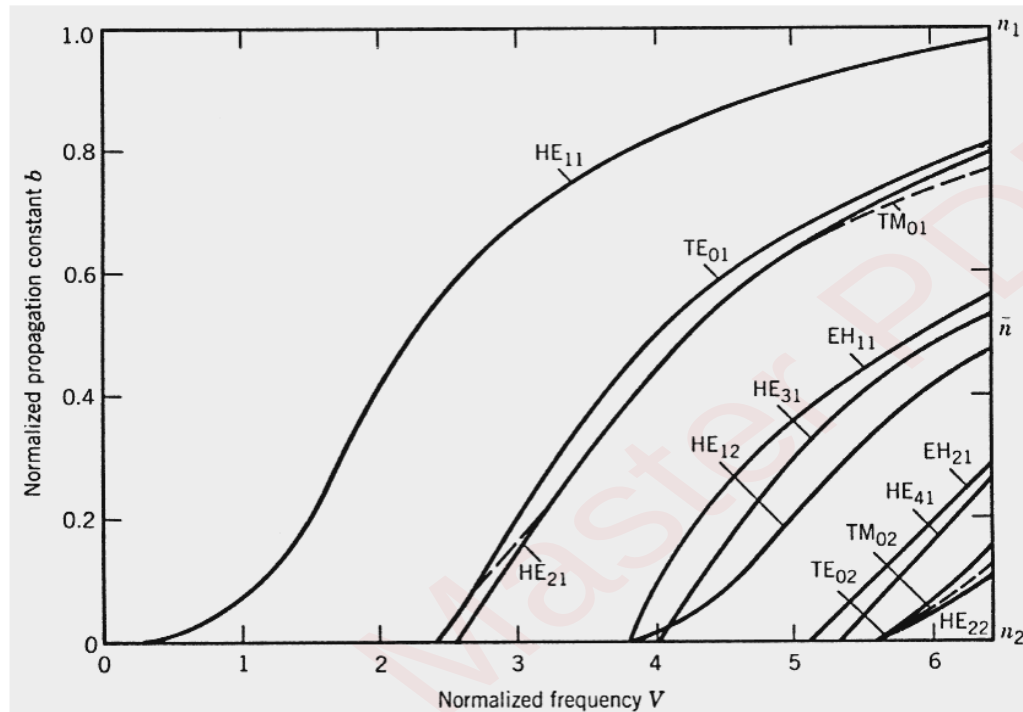
$$H_z(\rho, \phi, z) = \begin{cases} BJ_m(\kappa\rho) e^{jm\phi} e^{i\beta z}, & \rho \leq \alpha \\ DK_m(\gamma\rho) e^{jm\phi} e^{i\beta z}, & \rho > \alpha \end{cases}$$

⇒ Οι οριακές συνθήκες για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο στο όριο μανδύα-πυρήνα δίνουν τη σταθερά διάδοσης β

$$\left[\frac{J'_m(\kappa\alpha)}{\kappa J_m(\kappa\alpha)} + \frac{K'_m(\gamma\alpha)}{\kappa K_m(\gamma\alpha)} \right] \cdot \left[\frac{J'_m(\kappa\alpha)}{\kappa J_m(\kappa\alpha)} + \frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{K'_m(\gamma\alpha)}{\kappa K_m(\gamma\alpha)} \right] = \left[\frac{2m\beta(n_1 - n_2)}{\alpha\kappa^2\gamma^2} \right]^2$$

⇒ Για κάθε τιμή της παραμέτρου m προκύπτει πλήθος σταθερών διάδοσης (ρυθμών διάδοσης) β_{mn} .

Ρυθμοί Διάδοσης



⇒ Κανονικοποιημένη σταθερά διάδοσης

$$b = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2}, \quad \bar{n} = \frac{\beta}{k_0}$$

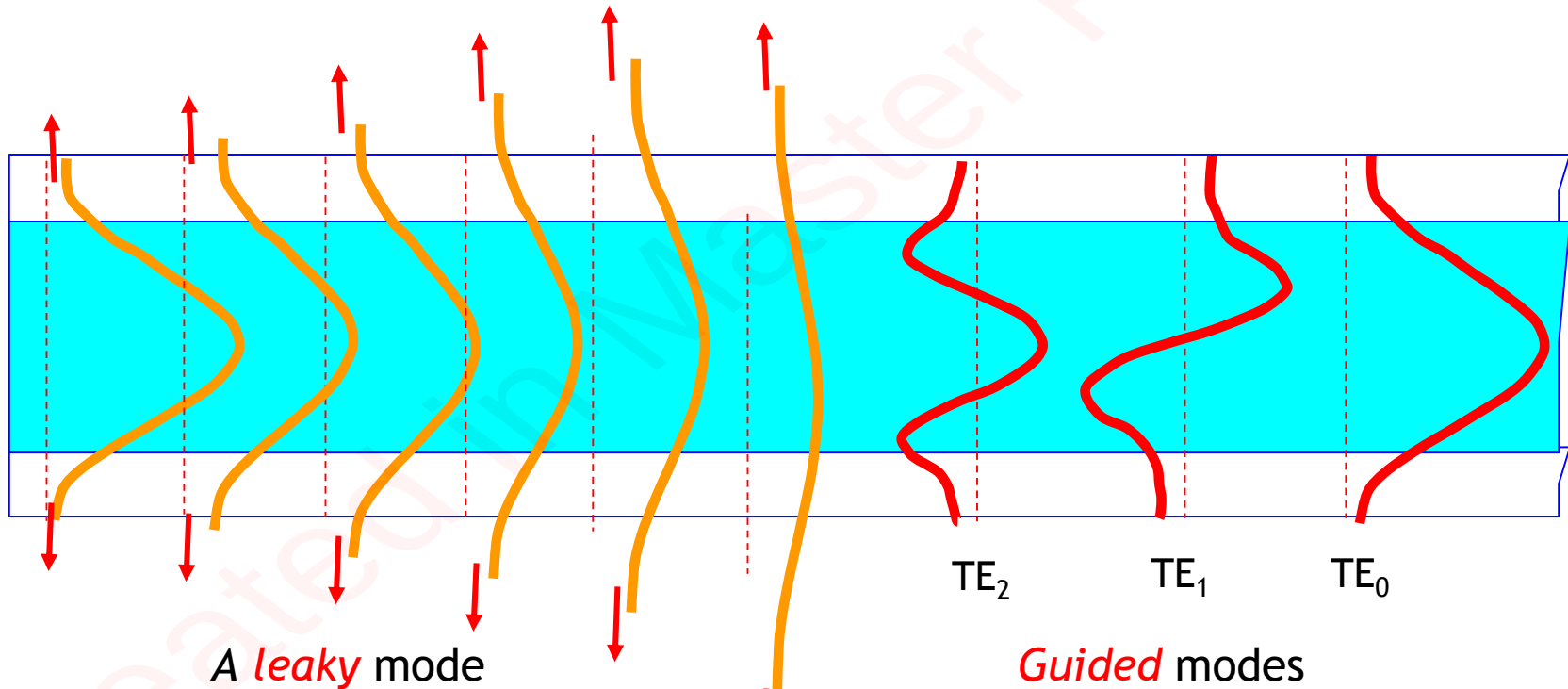
⇒ Κανονικοποιημένη συχνότητα

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Αναπαράσταση ρυθμών με κύματα

A finite number of *guided* modes

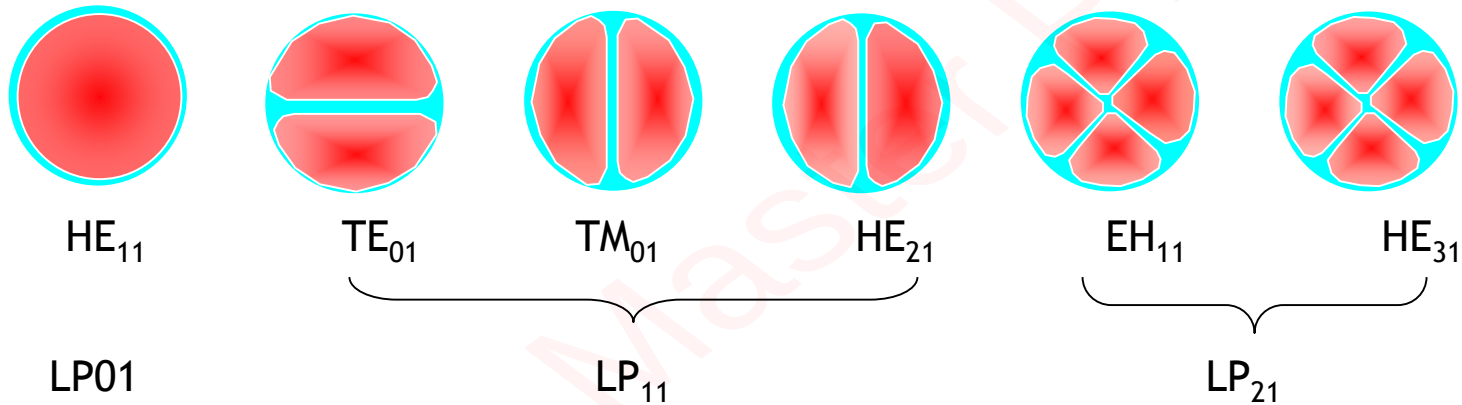
An infinite number of *radiation (leaky)* modes



Αναπαράσταση ρυθμών με κύματα

In any waveguide, **many** modes can form at once

Below are some guided modes of an optical fiber



Cross-sectional view of fiber core the intensity distribution

Different modes can propagate **simultaneously**

A **multimode** fiber.

Also **single mode** fiber.

Μονορυθμική Διάδοση

- ⇒ Οι μονορυθμικές ίνες υποστηρίζουν τη διάδοση μόνο του θεμελιώδους ρυθμού HE_{11}
- ⇒ Μονορυθμική διάδοση επιτυγχάνεται επιλέγοντας κανονικοποιημένη συχνότητα (πρακτικά διατομή πυρήνα ίνας) μικρότερη από

$$J_0(V) = 0 \Rightarrow V = 2.405$$

- ⇒ Π.χ. στο τηλεπικοινωνιακό παράθυρο 1.3-1.6 μm , και για $n_1=1.45$ και $\Delta=3 \times 10^{-3}$ προκύπτει διατομή πυρήνα $a=4 \mu\text{m}$ (συγκρίσιμη με το μήκος κύματος).
- ✓ Αποτέλεσμα: επιλέγοντας μικρό μέγεθος πυρήνα αναιρείται η χρονική διασπορά του οπτικού σήματος λόγω πολλαπλών ρυθμών διάδοσης.

Λοιπές Παράμετροι

- ⇒ Κανονικοποιημένος δείκτης διάθλασης $\bar{n} = n_2 + b(n_1 - n_2) \approx n_2(1 + b\Delta)$

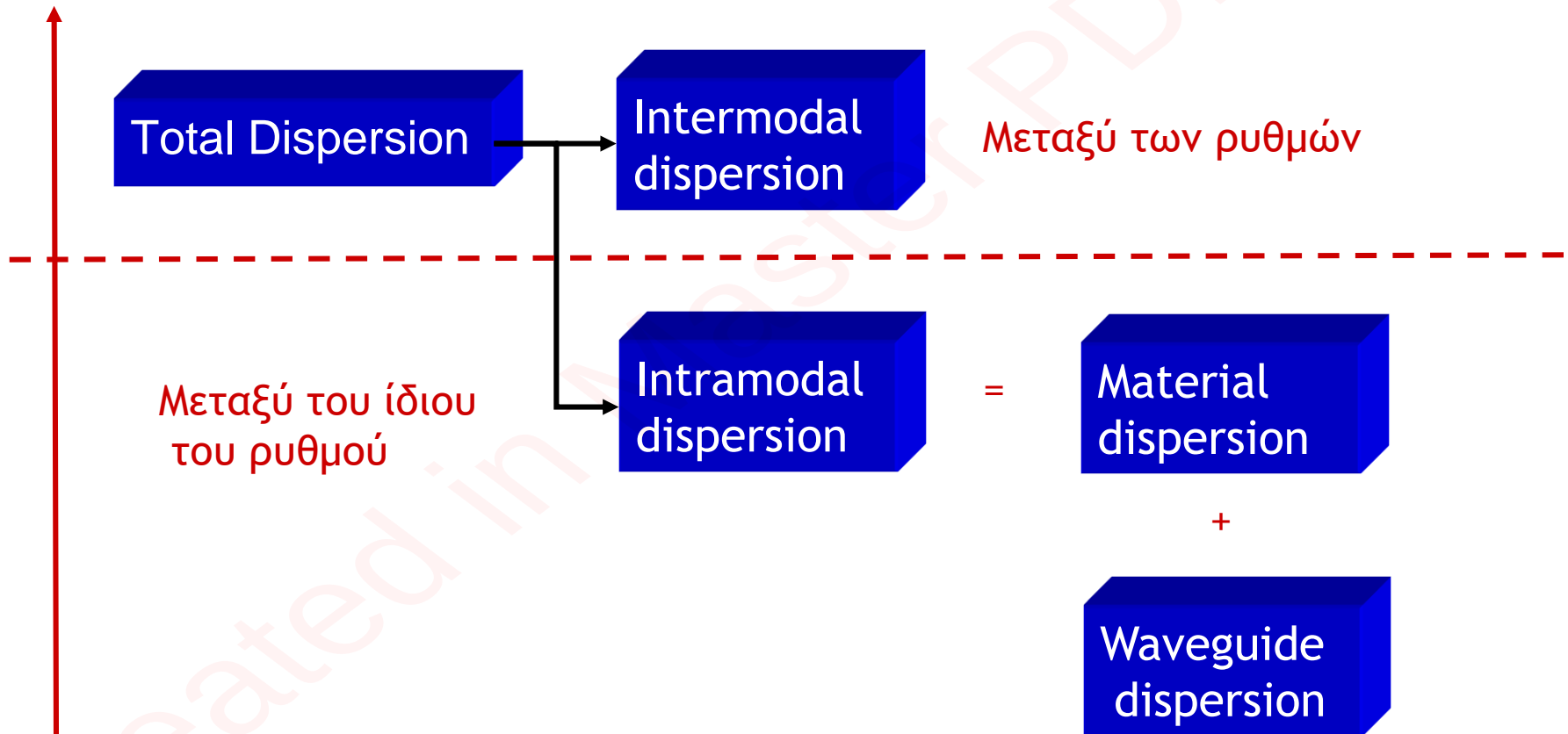
- ⇒ Κανονικοποιημένη σταθερά διάδοσης $b(V) = \left(1.1428 - 0.996 \frac{1}{V}\right)^2$

Διασπορά

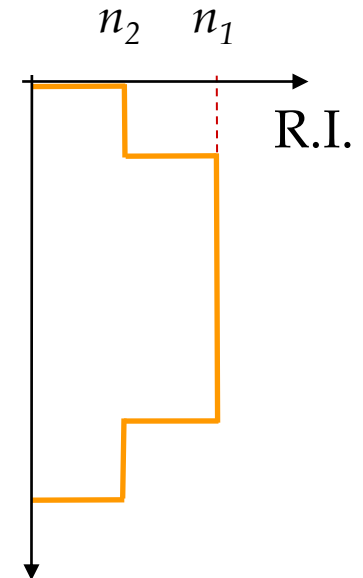
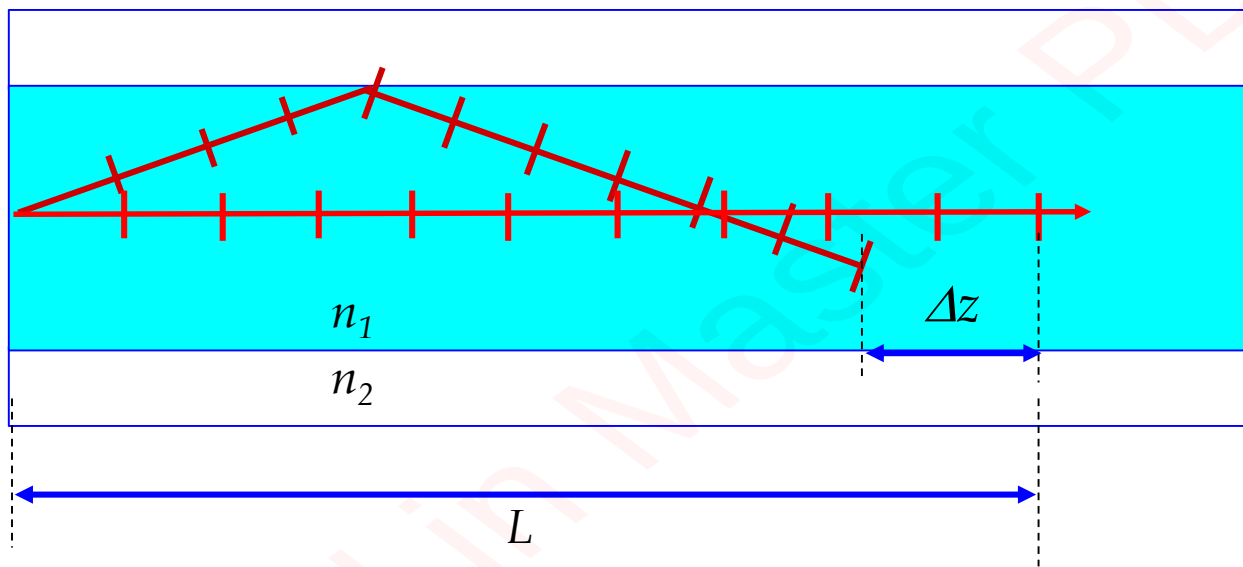


Φαινόμενα Διασποράς

Ισχύς Φαινομένου



Each mode experiences **different group velocity**



Minimum transit time

$$t_{min} = (L/c) \cdot n_1$$

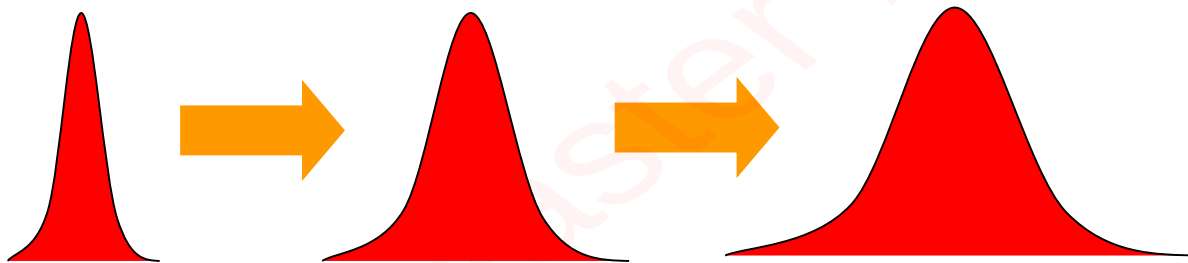
Maximum transit time

$$t_{max} = (L/c) \cdot (n_1^2/n_2)$$

Διασπορά τρόπων Διάδοσης

The delay difference or pulse spread in time:

$$\delta t_{mod} = t_{max} - t_{min} = (L/c)n_1(n_1/n_2 - 1) \cong (L/c)(NA^2/2n_1)$$

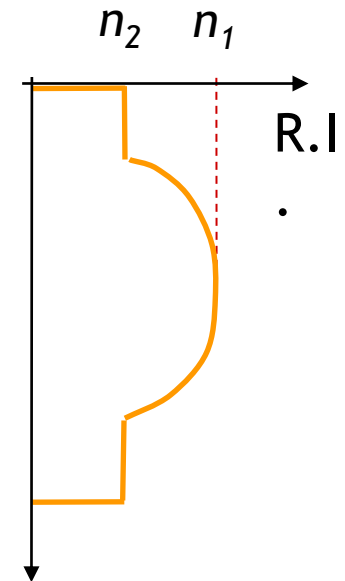
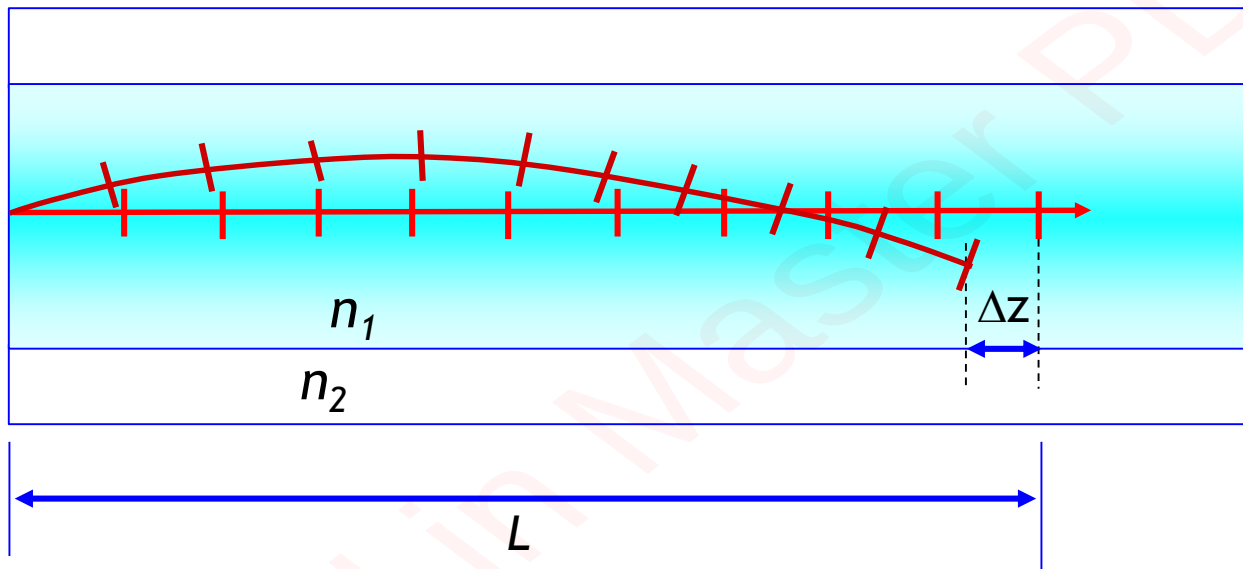


The rms pulse broadening per unit length due to intermodal dispersion (for a step index fiber):

$$\sigma_{mod} \cong \frac{(NA)^2}{4\sqrt{2}n_1c} \quad \text{ns/km}$$

Intermodal Dispersion

Can be reduced by using a **graded index profile**



Minimized using a **nearly parabolic index profile**

Χρωματική Διασπορά (I)

- ⇒ Διασπορά: η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης n από τη συχνότητα και της σταθεράς διάδοσης β από τα φυσικά χαρακτηριστικά του κυματοδηγού προκαλεί τη χρονική διαπλάτυνση των οπτικών παλμών που διαδίδονται σε οπτικές ίνες.
- ⇒ Η φασματική συνιστώσα οπτικού παλμού που αντιστοιχεί σε συχνότητα ω φτάνει στην έξοδο της ίνας μετά από χρόνο

$$T = \frac{L}{u_g}$$

- ⇒ u_g είναι η ταχύτητα ομάδας

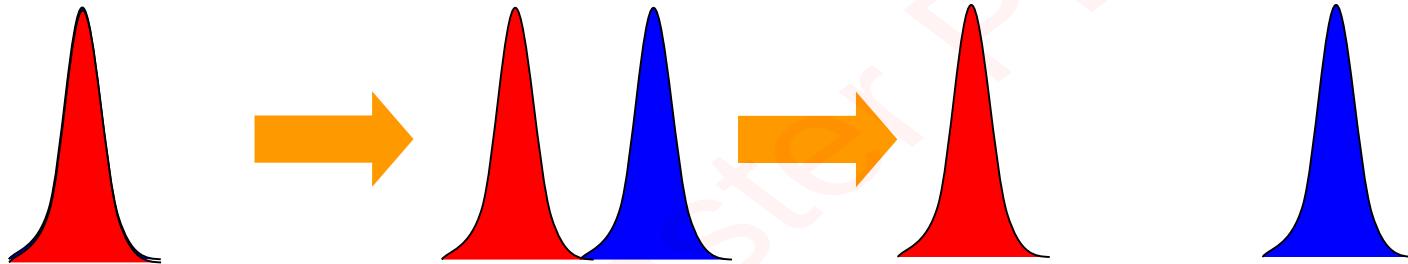
$$u_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1}$$

- ⇒ Αν το φασματικό εύρος του παλμού είναι $\Delta\omega$, τότε υφίσταται χρονική διαπλάτυνση

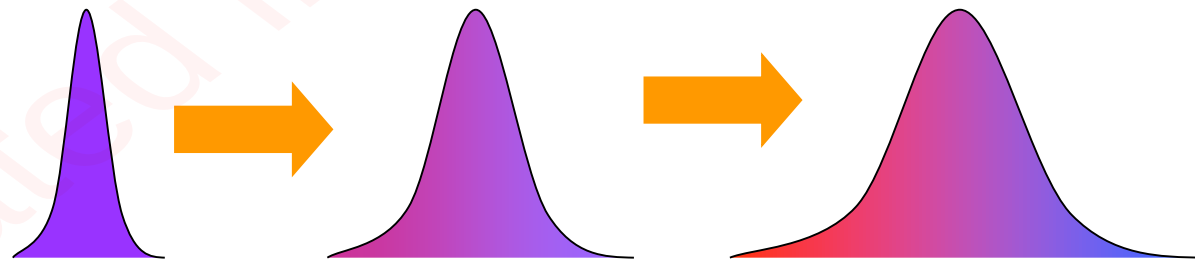
$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{u_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L \cdot \beta_2 \cdot \Delta\omega.$$

Χρωματική Διασπορά (II)

Discrete spectral components of a pulse travel at **different speeds** (e.g. in a multi-frequency laser)



Pulse **spreads out** (its width **increases**) in time (e.g. in a modulated single frequency laser)

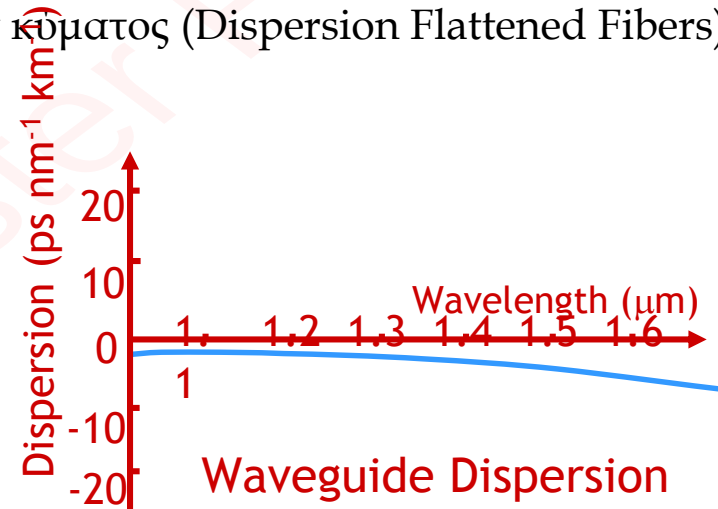
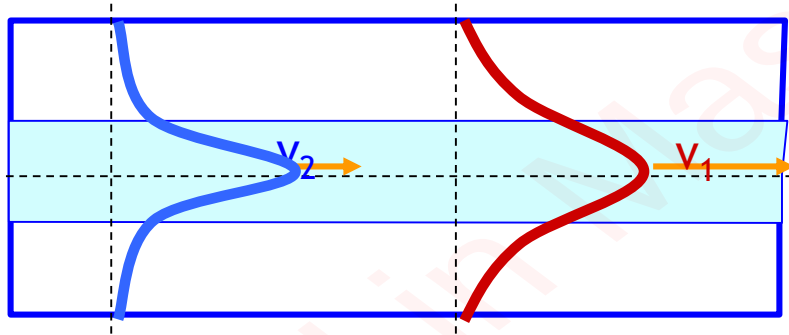


Χρωματική Διασπορά (III)

- ⇒ Ισοδύναμα $\Delta T = -L\beta_2 \frac{2\pi c}{\lambda^2} \Delta\lambda = -L \cdot D \cdot \Delta\lambda$,
- ⇒ Η παράμετρος β_2 (ps²/km) ονομάζεται παράμετρος διασποράς ταχύτητας ομάδας και η παράμετρος D (ps/nm.km) ονομάζεται παράμετρος διασποράς.
- ⇒ Αποδεικνύεται ότι η διασπορά D αποτελεί άθροισμα της διασποράς υλικού D_M (material dispersion) και της διασποράς κυματοδηγού D_W (waveguide dispersion).

Διασπορά Κυματοδηγού

- ⇒ Εξαρτάται από τη διάμετρο του πυρήνα a και η διαφορά μεταξύ των δεικτών διάθλασης Δ .
- ⇒ Παρέχει τη δυνατότητα σχεδίασης ινών με
 - ⇒ Μετατοπισμένο σημείο μηδενικής διασποράς λ_{ZD} (Dispersion Shifted Fibers).
 - ⇒ Μηδενική διασπορά σε εύρος ζώνης μηκών κύματος (Dispersion Flattened Fibers).



- Velocity depends on the **proportion of power in the core**
- At longer wavelengths, the wave is **less tightly confined**
- Therefore, on average, it sees a **lower refractive index**

Διασπορά Τρόπων Πόλωσης

- Οφείλεται σε ατέλειες του σχήματος του πυρήνα των οπτικών ινών, ο οποίος δεν είναι απόλυτα κυκλικός.
- ✖ Αποτέλεσμα: οι οπτικές ίνες εμφανίζουν διαφορετικές ταχύτητες ομάδας στους δύο άξονες x και y .
- ⇒ Η χρονική καθυστέρηση που εισάγεται στις δύο χωρικές συνιστώσες μπορεί να εκτιμηθεί ως

$$\Delta T = \left| \frac{L}{u_{gx}} - \frac{L}{u_{gy}} \right| = L |\beta_{1x} - \beta_{1y}|$$

- ⇒ Λόγω της στοχαστικής φύσης του φαινομένου, αυτό περιγράφεται από τη μέση τετραγωνική τιμή του

$$\sigma_T = \Delta\beta_1 \sqrt{hL} = D_{PMD} \sqrt{L}$$

- ⇒ Η παράμετρος D_{PMD} (ps/km^{1/2}) χαρακτηρίζει τη διασπορά τρόπων πόλωσης και λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 0.1 έως 2 ps/km^{1/2}.

Total Dispersion: Multimode Fibers

- Περιλαμβάνει τη διασπορά τρόπων (σ_c) και τη χρωματική διασπορά (σ_n)

$$\sigma_T = (\sigma_c^2 + \sigma_n^2)^{1/2} \text{ ns/km}$$

- Το εύρος του παλμού αυξάνει κατά σ_T ανά 1 km

Total Dispersion: Single Mode Fibers

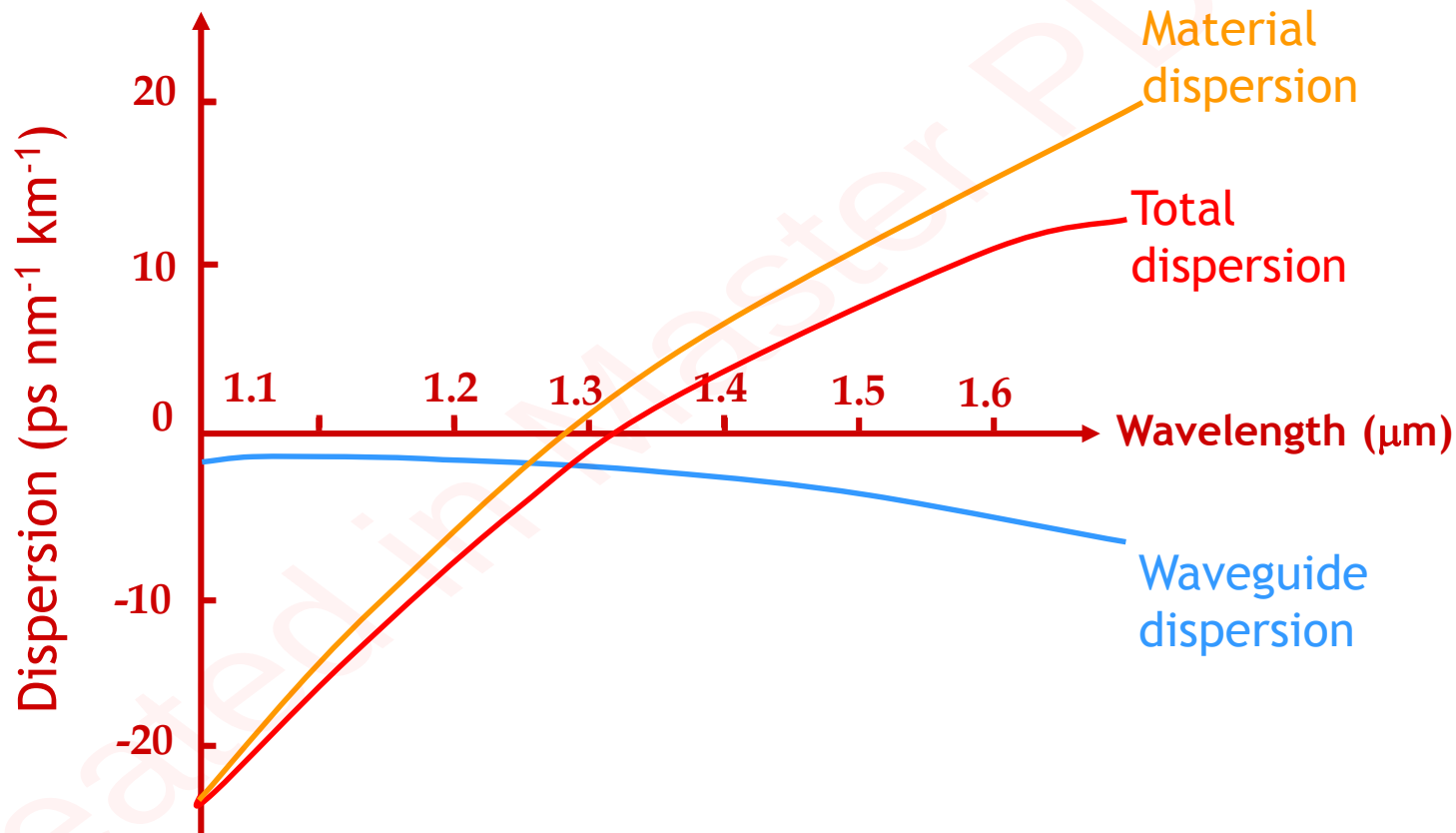
- Η χρωματική διασπορά μετριέται από τη παράμετρο της διασποράς D :

$$D = - \frac{2\pi}{c\lambda^2} \cdot \frac{d^2\beta}{dk^2} \quad \text{ps nm}^{-1}\text{km}^{-1}$$

- D is not normally calculated, but is **measured** and **quoted** as a characteristic of the fiber
- Ο παλμός θα διαπλατυνθεί κατά D ps για κάθε nm φασματικού εύρους (**spectral width**) σε κάθε χιλιόμετρο μετάδοσης.

Total Dispersion: Single Mode Fibers

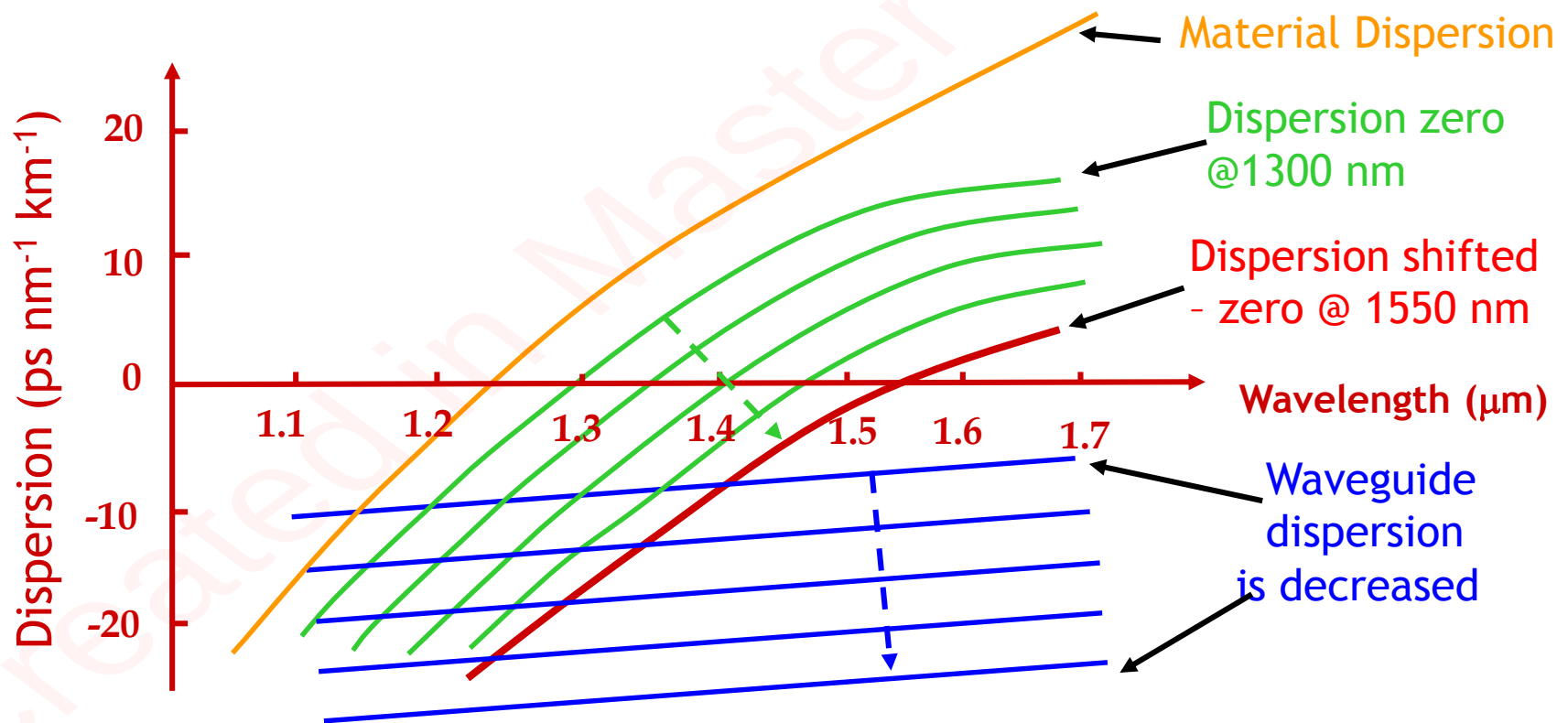
Combination of **material** and **waveguide** dispersion



Dispersion Modified Single Mode Fibers

Dispersion shifted fiber:

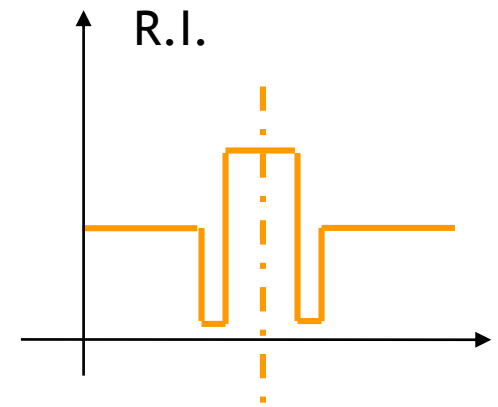
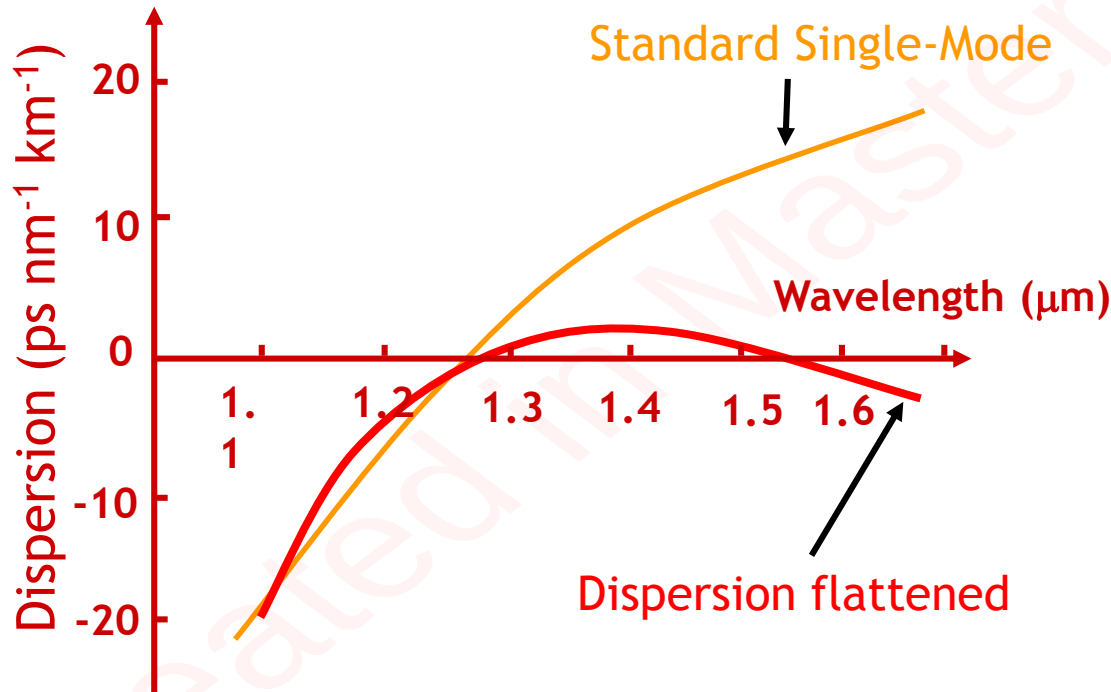
- By controlling the **core radius** and **refractive index**, it is possible to change the **wavelength of the dispersion zero**



Dispersion Modified Single Mode Fibers

Dispersion flattened fibers:

- The typical fiber with 'W' core structure

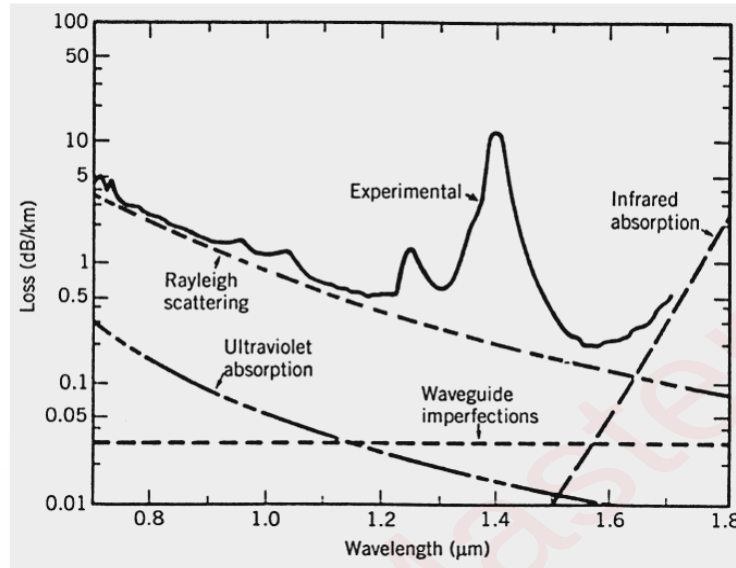


Refractive index profile of "W" fiber

Εξασθένιση



Εξασθένιση (I)



- Η εξασθένιση σε οπτικές ίνες περιγράφεται από τη σχέση

$$\frac{dP}{dz} = -aP \Rightarrow P_{out} = P_{in} \cdot e^{-aL}$$

- ⇒ Ο συντελεστής εξασθένισης εξαρτάται από την συχνότητα και παρουσιάζει ελάχιστο ίσο με 0.2 dB/km στην περιοχή των 1.55 μm.

Εξασθένιση (II)

Παράγοντες εξασθένισης

- ❑ Απορρόφηση υλικού
 - ⇒ Ενδογενής απορρόφηση: η πυριτία (SiO_2), η οποία αποτελεί το υλικό κατασκευής των οπτικών ινών, παρουσιάζει ζώνες απορρόφησης στο υπεριώδες ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$) και το υπέρυθρο ($\lambda > 7 \mu\text{m}$).
 - ⇒ Εξωγενής απορρόφηση: κατά την κατασκευή των ινών εισάγονται προσμίξεις από διάφορα στοιχεία οι οποίες απορροφούν την οπτική ακτινοβολία στην περιοχή των 0.6-1.6 μm (βασική πρόσμιξη είναι τα ιόντα υδροξυλίου OH^-).
- ❑ Σκέδαση Rayleigh (ανομοιομορφές υλικού): οφείλεται σε μεταβολές στην πυκνότητα της οπτικής ίνας που συμβαίνουν σε χωρική κλίμακα πολύ μικρότερη από μήκος κύματος λειτουργίας.
- ❑ Σκέδασης Mie (ανομοιομορφές κυματοδηγού) : οφείλεται σε μεταβολές του δείκτη διάθλασης σε χωρική κλίμακα πολύ μεγαλύτερη από μήκος κύματος λειτουργίας.

Μη-γραμμικά Φαινόμενα



Φαινόμενα Brillouin και Raman (I)

- Φωτόνια υψηλής συχνότητας (ενέργειας) αποδίδουν μέρος της ενέργειάς τους στις ταλαντώσεις πλέγματος, ενώ το υπόλοιπο της ενέργειας μετατρέπεται σε ακτινοβολία μικρότερου μήκους κύματος.
- ✘ Μέρος της ισχύος μετάδοσης του οπτικού σήματος χάνεται λόγω της μεταφοράς ενέργειας.

Φαινόμενο Brillouin

- ⇒ Έχει μικρό εύρος ζώνης (δεκάδες MHz) και λαμβάνει χώρα σε κατεύθυνση αντίθετη από την κατεύθυνση διάδοσης.
- ⇒ Ισχύ κατωφλίου P_{th} (η ισχύς μετάδοσης για την οποία η μισή ισχύς θα χαθεί λόγω του φαινομένου Brillouin)

$$P_{th} \approx \frac{21A_e}{g_B \cdot L_e}$$

- ⇒ Η παράμετρος g_B ονομάζεται σταθερά κέρδους Brillouin και ισούται με 4×10^{-11} m/W.

Φαινόμενα Brillouin και Raman (II)

Φαινόμενο Raman

- ⇒ Έχει σημαντικά μεγαλύτερο εύρος ζώνης (περίπου 10 THz) και επικρατεί στην ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση διάδοσης.
- ⇒ Ισχύ κατωφλίου P_{th} (η ισχύς μετάδοσης για την οποία η μισή ισχύς θα χαθεί λόγω του φαινομένου Raman)

$$P_{th} \approx \frac{16A_e}{g_R \cdot L_e}$$

- ⇒ Η παράμετρος g_R ονομάζεται σταθερά κέρδους Raman και ισούται με 6×10^{-14} m/W.

Ισχείς Κατωφλίου

- ⇒ A_e και L_e ισούνται με $50 \mu\text{m}^2$ και 20 km , αντίστοιχα, οπότε η ισχύς κατωφλίου Raman είναι περίπου 600 mW και η ισχύς κατωφλίου Brillouin είναι 1.3 mW .

Αυτοδιαμόρφωση και Ετεροδιαμόρφωση Φάσης

- Τα φαινόμενα της αυτοδιαμόρφωσης και ετεροδιαμόρφωσης φάσης οφείλονται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης της οπτικής ίνας από την οπτική ισχύ

$$n'_{1,2} = n_{1,2} + \bar{n}_2 \left(\frac{P}{A_e} \right)$$

- ⇒ Αποτέλεσμα: η σταθερά διάδοσης β εξαρτάται από την οπτική ισχύ

$$\beta' = \beta + \gamma P$$

- ⇒ Λόγω ετεροδιαμόρφωση φάσης το οπτικό σήμα αποκτά συνολική μη-γραμμική φάση

$$\phi_{NL}^j = \gamma L_e \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j}^N P_m \right)$$

- ✘ Η παραγόμενη φάση οδηγεί σε αύξηση του φασματικού εύρους των οπτικών παλμών και σημαντική παραμόρφωσή τους στο πεδίο του χρόνου λόγω χρωματικής διασποράς.

Μίξη Τεσσάρων Φωτονίων

□ Τρία ξεχωριστά πεδία σε διαφορετικά μήκη κύματος προκαλούν νέα οπτικά πεδία με πλάτη ανάλογα με το γινόμενο των πλατών τριών αρχικών πεδίων

⇒ Οι συχνότητες των νέων πεδίων υπολογίζονται ως

$$\omega_l = \omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$$

⇒ Ιδιαίτερο προβληματικό είναι το νέο πεδίο που δημιουργείται σε συχνότητα

$$\omega_l = \omega_i + \omega_j - \omega_k.$$

✘ Αποτέλεσμα: σημαντικό μέρος της ισχύος ενός οπτικού καναλιού μεταφέρεται σε γειτονικά, οπότε προκαλούνται σημαντικές απώλειες σήματος, αλλά και ενδοκαναλική διαφωνία.