



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας

Ενότητα 1: Οπτικές ίνες

Βλάχος Κυριάκος

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής

Σκοποί ενότητας

- Ο σκοπός της ενότητας είναι η εξοικείωση του σπουδαστή με την κυματοδήγηση, τη διασπορά, την εξασθένιση και τα μη γραμμικά φαινόμενα



Περιεχόμενα ενότητας

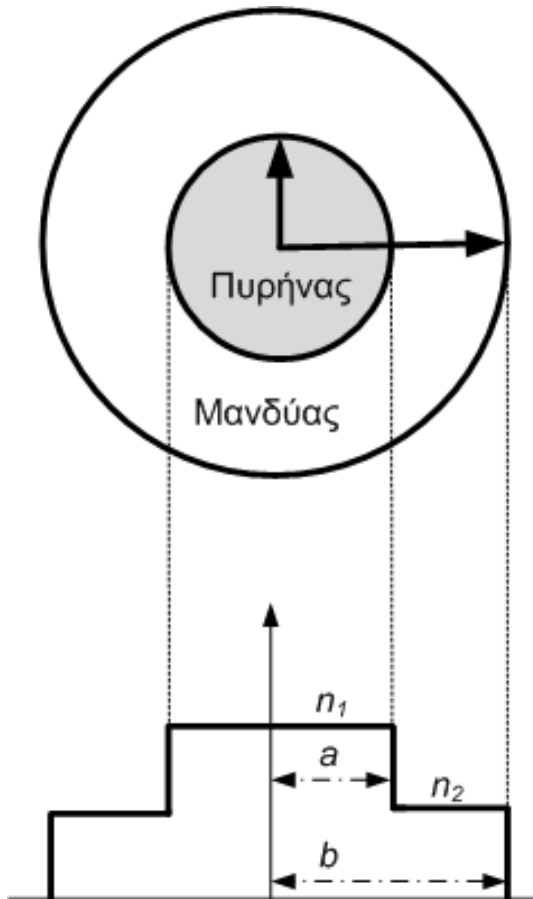
- Κυματοδηγήση
- Διασπορά
- Εξασθένιση
- Μη γραμμικά φαινόμενα



Οπτικές ίνες

Κυματοδήγηση

Οπτική Ίνα Βηματικού Δείκτη Διάθλασης



Πυρήνας

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

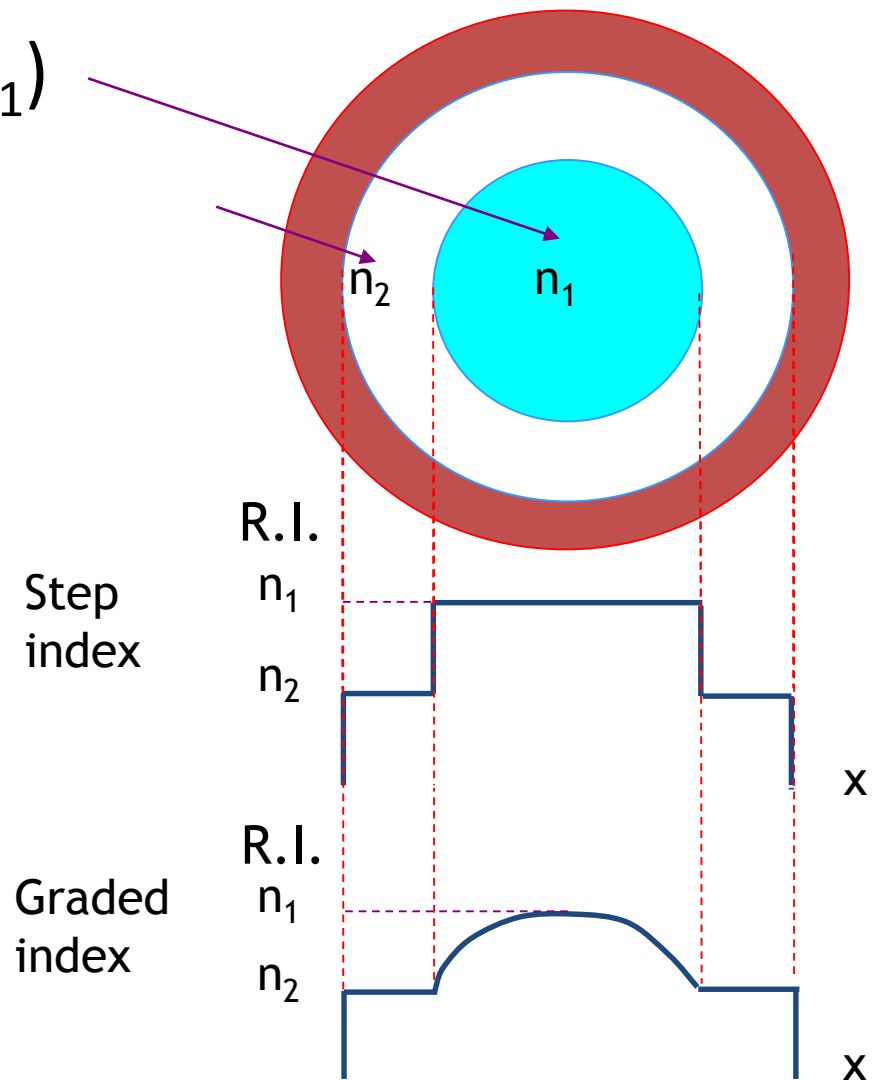
Μανδύας

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

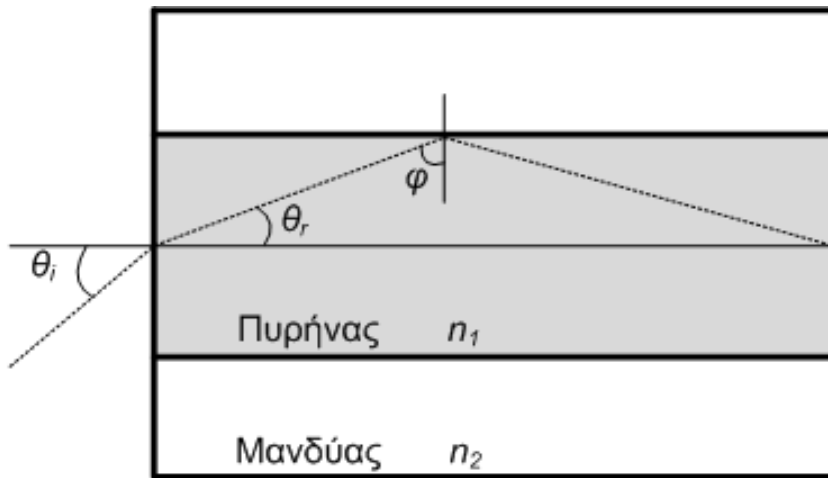
Οπτική Ίνα Βαθμιαίου Δείκτη Διάθλασης

■ 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?



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

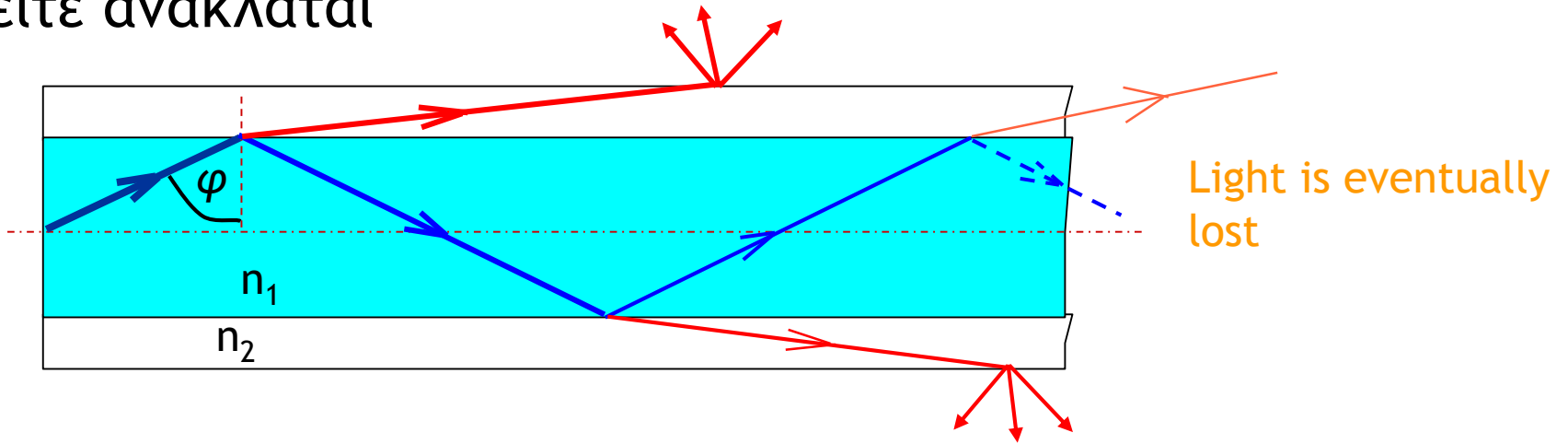
$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r$$

- ⇒ Οι ακτίνες ανακλούνται στο όριο μανδύα-πυρήνα όταν

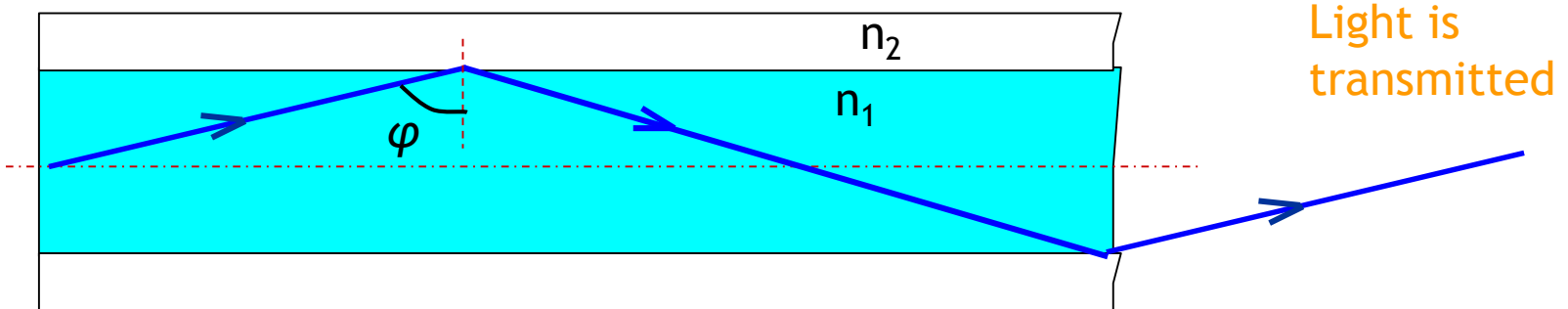
$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Προσέγγιση Γεωμετρικής Οπτικής (I)

Εάν $\varphi <$ κρίσιμη γωνία 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

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

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

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

⇒ Κανονικοποιημένη συχνότητα

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



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

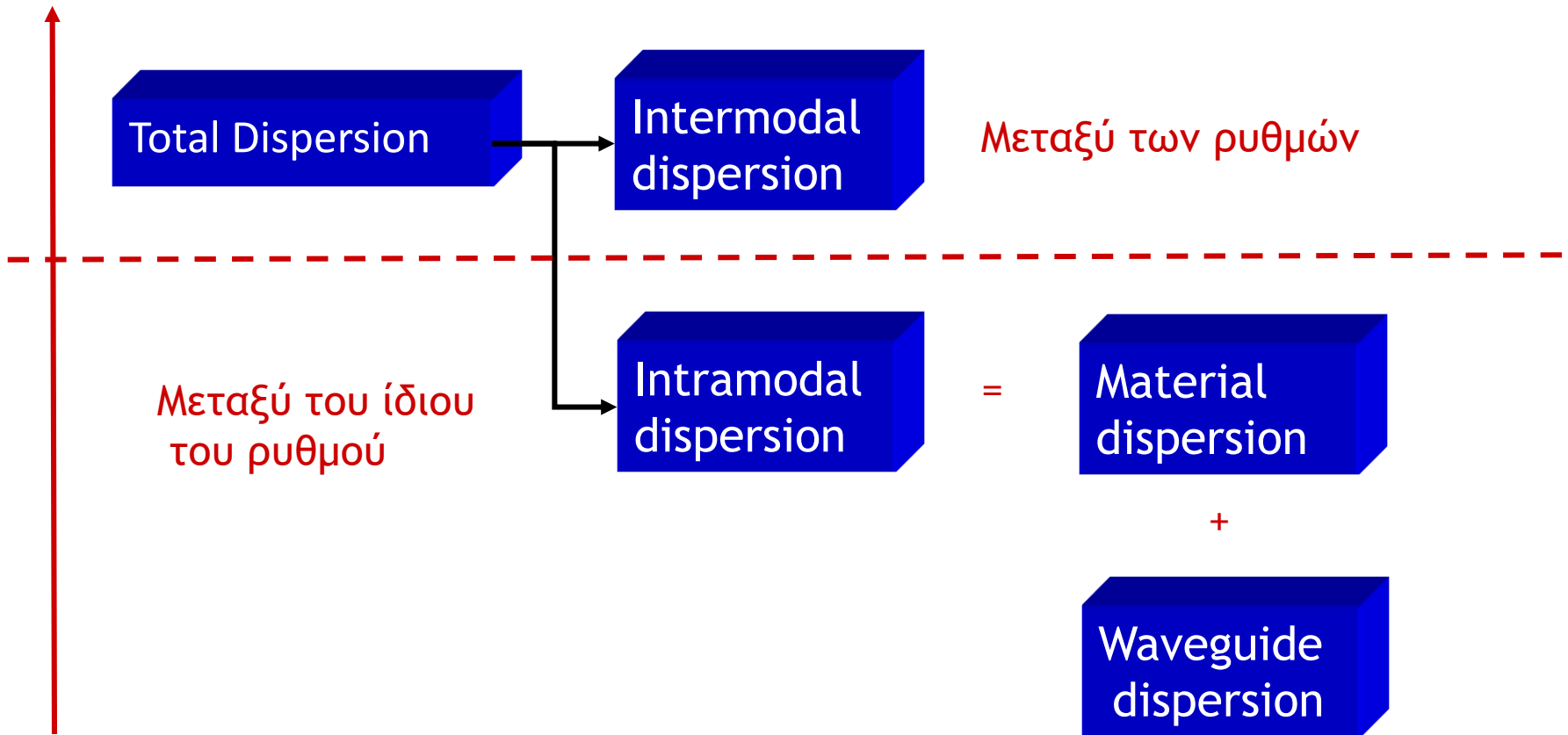
- ⇒ Κανονικοποιημένος δείκτης διάθλασης $\bar{n} = n_2 + b(n_1 - n_2) \approx n_2(1 + b\Delta)$
- ⇒ Κανονικοποιημένη σταθερά διάδοσης $b(V) = \left(1.1428 - 0.996/V\right)^2$



Διασπορά

Φαινόμενα Διασποράς

Ισχύς Φαινομένου



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 (III)

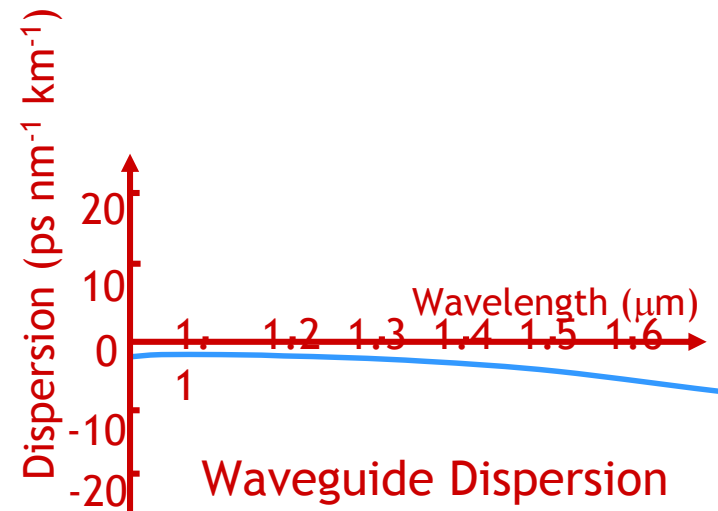
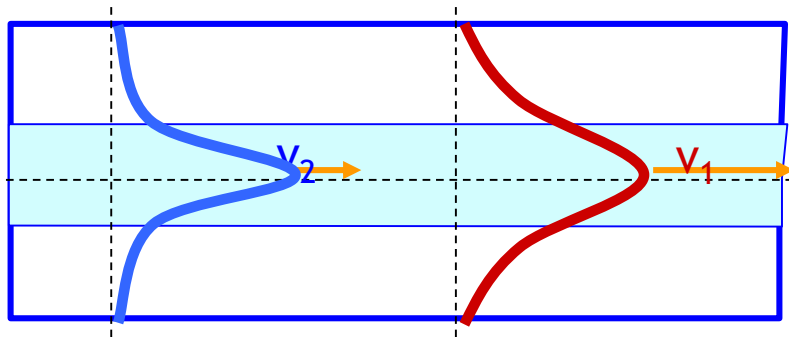
⇒ Ισοδύναμα
$$\Delta T = -L\beta_2 \frac{2\pi c}{\lambda^2} \Delta\lambda = -L \cdot D \cdot \Delta\lambda,$$

- ⇒ 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).



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

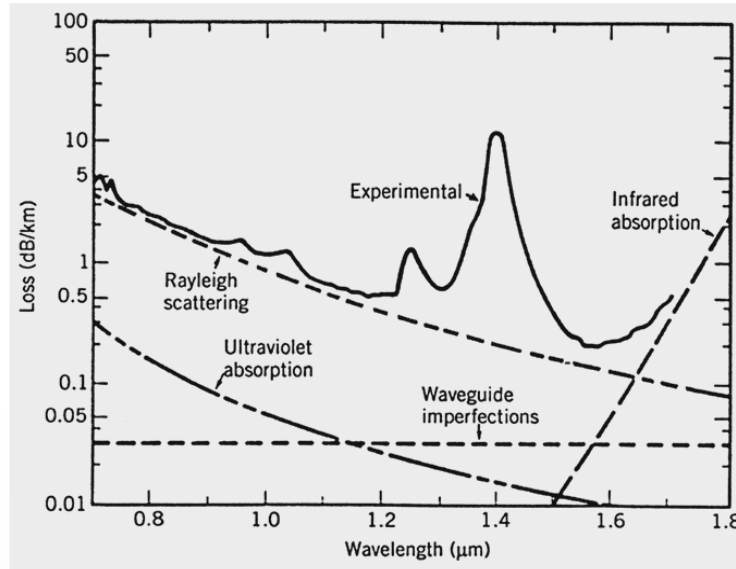
$$\sigma_T = \Delta\beta_1 \sqrt{hL} = D_{PMD} \sqrt{L}$$

- ⇒ 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}.



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 $0.6\text{-}1.6 \mu\text{m}$ (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.



Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Βλάχος Κυριάκος, «Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας. Οπτικές ίνες». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Όλα τα σχήματα έχουν δημιουργηθεί από τον κ. Βλάχο Κυριάκο, εκτός αν αναγράφεται διαφορετικά. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://eclass.upatras.gr/courses/CEID1108/index.php>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

