

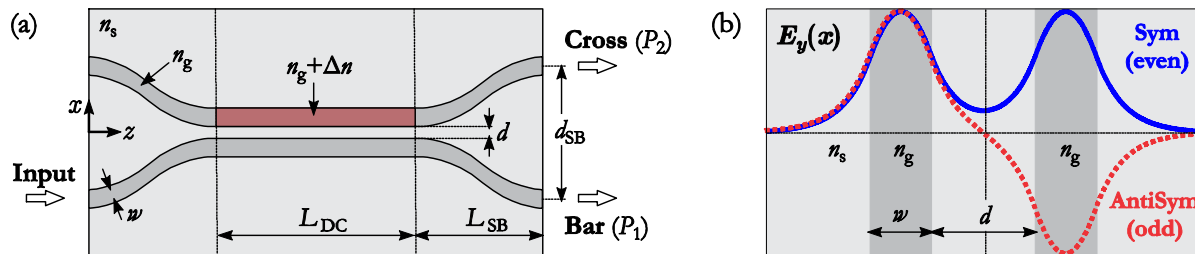
ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Προαιρετικά Θέματα 3^{ου} Κεφαλαίου

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΥΖΕΥΓΤΕΝΩΝ ΡΥΘΜΩΝ

3.1 Σχεδιασμός Οπτικού Διακόπτη 2x2 Αποσυγχρονιζόμενου Κατευθυντικού Ζεύκτη

Ένας κατευθυντικός ζεύκτης κυματοδηγών τεχνολογίας SOI (Silicon on Insulator) πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση ενός οπτικού διακόπτη 2x2, σύμφωνα με το Σχήμα 1(α). Η διάταξη υποστηρίζει τη διάδοση ρυθμών TE πόλωσης (ηλεκτρικό πεδίο κατά τον y -άξονα) και οι δείκτες διάθλασης για το στρώμα οδήγησης και το υπόστρωμα είναι $n_g = 3.2$ και $n_s = 1.45$, αντίστοιχα, στο μήκος κύματος λειτουργίας $\lambda = 1550 \text{ nm}$. Ο δείκτης διάθλασης ενός εκ των δύο κυματοδηγών του ζεύκτη (στην περιοχή σύζευξης) μπορεί να μεταβληθεί μέσω ήλεκτρο-οπτικού ή θερμο-οπτικού ελέγχου και να λάβει την τιμή $n_g + \Delta n$.



Σχήμα 1: (α) Κάτοψη ενός 2x2 διακόπτη αποσυγχρονιζόμενου κατευθυντικού ζεύκτη. (β) Ενδεικτικό εγγραψιο προφίλ του συμμετρικού και αντισυμμετρικού TE υπερρυθμού ενός ζεύκτη κυματοδηγών.

Για το σχεδιασμό του οπτικού διακόπτη έχετε στη διάθεση σας τις κατάλληλες συναρτήσεις **MATLAB** που υλοποιούν δύο εργαλεία φωτονικών υπολογισμών/προσομοίωσης και συγκεκριμένα:

- (i) **Mode Solver:** Εργαλείο για τον αριθμητικό υπολογισμό της φασικής σταθεράς διάδοσης και της πεδιακής κατανομής των ρυθμών (ή υπερρυθμών) επίπεδων κυματοδηγών πλάκας.
- (ii) **Μεθόδος Διάδοσης Δέσμης** (Beam Propagation Method, BPM): Εργαλείο που προσομοιώνει τη διάδοση μίας δέσμης κατά μήκος μίας φωτονικής διάταξης για γνωστό πεδίο στην είσοδο της. Η διάταξη μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διεύθυνση της διάδοσης.

Τα σχετικά m-files βρίσκονται στο e-THMMY («Υλικό Μαθήματος/Προσομοιώσεις») και συνοδεύονται από οδηγίες χρήσης και εκτενή σχολιασμό εντός των αρχείων. Διαβάστε προσεκτικά!

- (α) Οι κλάδοι του ζεύκτη είναι ισχυρά συζευγμένοι με αποτέλεσμα ο συνολικός «υπέρ-κυματοδηγός» να υποστηρίζει συμμετρικό και αντισυμμετρικό υπερρυθμό διάδοσης, με ενδεικτικό εγγραψιο προφίλ όπως στον Σχήμα 1(β). Αποδείξτε πως το μήκος σύζευξης του ζεύκτη μπορεί να υπολογιστεί ως

$$L_c = \frac{\lambda}{2 |\Delta n_{\text{eff}}|},$$

όπου $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{(S)} - n_{\text{eff}}^{(A)}$ είναι η διαφορά των ενεργών δεικτών διάθλασης των υπερρυθμών.

- (β) Για εύρος κυματοδηγών $w = 250 \text{ nm}$ και για διάκενο $d = 800 \rightarrow 20 \text{ nm}$ υπολογίστε [με χρήση του (i)] το μήκος σύζευξης L_c του ζεύκτη στα πλαίσια της θεωρίας συζευγμένων ρυθμών [Εξ. (3.17) και (3.26) των Σημειώσεων] και των υπερρυθμών σύμφωνα με το ερώτημα (α). Παρουσιάστε τις αντίστοιχες καμπύλες L_c vs d , όπως και τη σχετική διαφορά μεταξύ τους.

- (γ) Για $d = 420 \text{ nm}$ επιλέξτε το μικρότερο δυνατό μήκος του ζεύκτη L_{DC} ώστε ο 2×2 διακόπτης να βρίσκεται στην κατάσταση Cross. Θεωρούμε πως ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση Bar ή Cross όταν ο λόγος οδηγούμενης ισχύος μεταξύ των δύο θυρών εξόδου $10 \log_{10}(P_1 / P_2)$ είναι $> 20 \text{ dB}$ ή $< -20 \text{ dB}$, αντίστοιχα. Στην πράξη, οι ιδεατές Bar ή Cross καταστάσεις ($\pm \infty \text{ dB}$) δεν είναι σκόπιμο να προσδιοριστούν με ακρίβεια. Προκειμένου να αποσυζευχθούν οι κυματοδηγοί στην είσοδο και έξοδο του διακόπτη, τοποθετούνται κάμψεις τύπου-S (S-bends, SB) εκατέρωθεν της περιοχής σύζευξης, όπως στο Σχήμα 1(α). Οι κάμψεις τύπου-S έχουν μήκος $L_{\text{SB}} = 20 \mu\text{m}$ κατά τον z -άξονα διάδοσης και η εγκάρσια απόσταση των κέντρων των κυματοδηγών στην είσοδο/έξοδο του διακόπτη κατά τον x -άξονα είναι $d_{\text{SB}} = 4 \mu\text{m}$. Υπολογίστε [με χρήση του (ii)] το νέο μήκος του ζεύκτη L'_{DC} που στην πραγματικότητα απαιτείται λόγω της επιπλέον σύζευξης των S-κάμψεων, προκειμένου να έχουμε το διακόπτη στην Cross κατάσταση.
- (δ) Προκειμένου να αλλάξουμε την κατάσταση του 2×2 διακόπτη, μεταβάλλουμε τον δείκτη διάθλασης μόνο στον άνω κυματοδηγό κατά Δn , δηλαδή αποσυγχρονίζουμε τον ζεύκτη, περιορίζοντας έτσι το μέγιστο ποσοστό ισχύος που μπορεί να ανταλλαχθεί μεταξύ των κυματοδηγών. Εκτιμήστε [με χρήση του (ii)] την απαραίτητη μεταβολή Δn ώστε ο 2×2 διακόπτης να μεταβεί στην κατάσταση Bar, κρατώντας σταθερό το μήκος στην τιμή L'_{DC} που προσδιορίσατε στο ερώτημα (γ). Σημείωση: Η εκτίμηση θα γίνει μεταβάλλοντας το Δn με μικρά βήματα (π.χ. < 0.005) στο διάστημα $[0, 0.1]$, και ελέγχοντας το αποτέλεσμα της προσομοίωσης.
- (ε) Στον αποσυγχρονισμό οι υπερρυθμοί του ζεύκτη χάνουν τη συμμετρία τους. Στην περίπτωση αυτή, αντί του μήκους σύζευξης (coupling length) της σύγχρονης κατάστασης χρησιμοποιείται το *μήκος συμβολής* (beating length), που υπολογίζεται από τους ενεργούς δείκτες των υπερρυθμών ως $L_b = \lambda / |\Delta n_{\text{eff}}|$, και στον συγχρονισμό ισχύει $L_b \equiv 2L_c$. Στον αποσυγχρονισμό, ποια σχέση πρέπει να πληροί το L_b σε σχέση με το μήκος ζεύκτη για να έχουμε Bar κατάσταση; Πως συγκρίνεται ο υπολογισμός του απαιτούμενου Δn του ερωτήματος (δ) με αυτό που εκτιμάται από το πλαίσιο των υπερρυθμών [με χρήση του (i)] και αυτό που εκτιμάται στα πλαίσια της θεωρίας συζευγμένων ρυθμών [Εξ. (3.37) των Σημειώσεων, με χρήση του (i)]; Σημείωση: Για την εκτίμηση του Δn στα πλαίσια των υπερρυθμών και της θεωρία των συζευγμένων ρυθμών αξιοποιείτε την τιμή μήκους L_{DC} του ερωτήματος (γ), δηλαδή αγνοείτε την επίδραση των S-bends.
- (στ) Υποθέστε ότι η μεταβολή του δείκτη διάθλασης προέρχεται από το θερμο-οπτικό φαινόμενο, δηλαδή η αλλαγή στο δείκτη συνδέεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ΔT σύμφωνα με τη σχέση $\Delta n = \text{TOC} \times \Delta T$, όπου $\text{TOC} = 2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ο θερμο-οπτικός συντελεστής (Thermo-Optic Coefficient) του πυριτίου. Για κατασκευαστικούς λόγους η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή $\Delta T_{\text{max}} = 100 \text{ K}$. Ενόψει αυτού του περιορισμού, πως διαμορφώνεται ο σχεδιασμός σας, δηλαδή ποια θα πρέπει να είναι η επιλογή σας για το μήκος L_{DC} που εξασφαλίζει την Cross κατάσταση και το αντίστοιχο Δn (ή, ισοδύναμα, τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta T < \Delta T_{\text{max}}$) που εξασφαλίζει την Bar κατάσταση;
- (ζ) Για τις επιλογές του ερωτήματος (στ) απεικονίστε τον λόγο οδηγούμενης ισχύος μεταξύ των δύο θυρών εξόδου $10 \log_{10}(P_1 / P_2)$ (ή λόγο εξάλειψης, ER) στο φασματικό παράθυρο $1500 \div 1600 \text{ nm}$ [με χρήση του (ii)] και λαμβάνοντας υπόψη τα S-bends. Εκτιμήστε το εύρος ζώνης όπου εξασφαλίζεται $|\text{ER}| > 20 \text{ dB}$ και για τις δύο καταστάσεις του διακόπτη. Σημείωση: Η διέγερση εισόδου στο εργαλείο (ii) εξαρτάται επίσης από το μήκος κύματος.