



ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Μάθημα 4ο-5ο Οπτικά παθητικά στοιχεία – φίλτρα και οπτικές αλληλεπιδράσεις

Αρ. Τσίπουρας, Phd
Email: aris@di.uoa.gr

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1



Περιεχόμενα

- Η Φύση του φωτός
- Οπτικά φίλτρα
 - **Fabry Perrot**
 - φράγματος Bragg
 - Mach Zehnder - συμβολομετρικά
 - **Πολυστρωματικά Φίλτρα Παρεμβολής Thin Film Filters**
 - Φίλτρα με φράγματα AWG
 - Ακουστοοπτικά φίλτρα
- Οπτικοί μεταγωγείς - συζεύκτες
 - Μεταγωγείς χώρου
- Οπτικοί απομονωτές – κυκλοφορητές
- Οπτικές Αλληλεπιδράσεις

2

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Η φύση του φωτός I

- Το φως είναι κύμα (Maxwell 1864) με ταχύτητα

διάδοσης στο κενό:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}}$$

- Και σε άλλο μέσο:

$$u = \frac{c}{n} = f \lambda = f \frac{\lambda}{n} \quad \text{με } n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \text{ ο δείκτης διαθλασης του μέσου}$$

- Πόλωση
- Ανάκλαση
- Διάθλαση
- Συμβολή (πείραμα Young 1802)
- Περίθλαση

$$\vec{E} = E_0 \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi)$$

$$E_0^2 = \sum_i E_{0i}^2 + \sum_i \sum_j E_{0i} E_{0j} \cos(\varphi_i - \varphi_j)$$

3

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Η φύση του φωτός II

- Το φως είναι σωματίδια – Κβάντα (Einstein-Planck 1905)
- Η φωτεινή ενέργεια εκπέμπεται σε πολλαπλάσια μιας ελάχιστης ποσότητας ενεργείας που λέγεται κβάντο κι εξαρτάται από τη συχνότητα της ακτινοβολίας: $E = h f$,
- **Ορμή φωτονίου: $p = h/\lambda$**
- Οι δυο θεωρίες είναι συμπληρωματικές
- **Αλληλεπίδραση φως με φως, διάδοση: επικρατεί η κυματική φύση**
- **Αλληλεπίδραση φως με ύλη: επικρατεί η σωματιδιακή φύση**

4

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Παθητικά δρομικά στοιχεία οπτικών διατάξεων

- ✓ Σε ένα οπτικό ολοκληρωμένο κύκλωμα πρέπει να γίνεται:
 - ✓ **Σύνδεση ενεργών στοιχείων**
 - Δρομολόγηση μηκών κύματος
 - Μεταγωγή οπτικών σημάτων
 - φίλτράρισμα

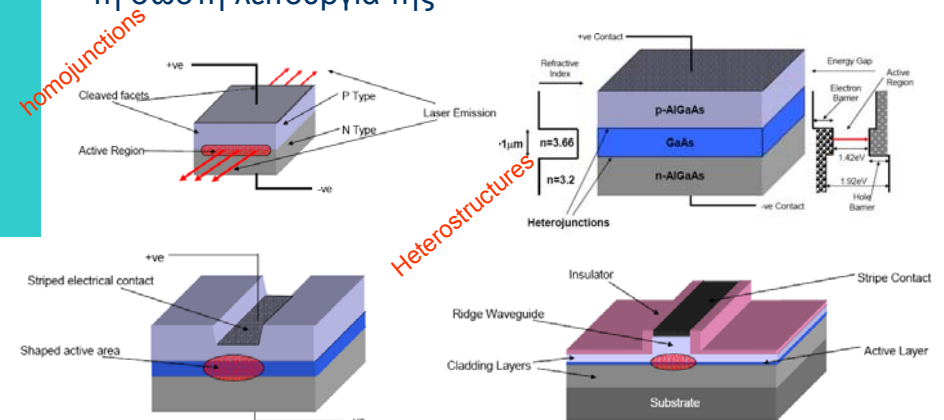
5

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Δομικά στοιχεία σύγχρονων οπτικών συστημάτων

- Σε όλες τις περιπτώσεις η σωστή σχεδίαση των κυματοδηγών που αποτελούν τη διάταξη και τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία της



6

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Οπτικά φίλτρα και μεταγωγείς

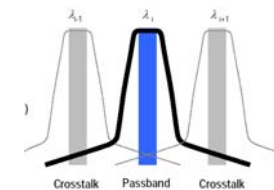
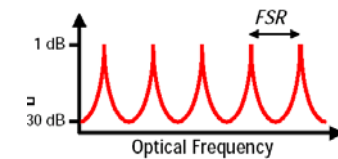
- Κάθε κόμβος του δικτύου θα πρέπει να συνδυάζει όλα τα μήκη κύματος σε ένα σήμα και να το οδηγεί σε μία οπτική ίνα (πολυπλεξία). Επίσης, κάθε κόμβος θα πρέπει να διαχωρίζει τα διάφορα μήκη κύματος τα οποία καταλήγουν σε αυτόν μέσω μίας οπτικής ίνας (αποπολυπλεξία)
 - Φράγματα περίθλασης
 - Φράγματα Bragg
 - Συμβολόμετρα Mach Zehnder
 - Φίλτρα Thin film
 - Φίλτρο Fabry-Perot
 - AWG –φίλτρα συστοιχίας κυματοδηγών

7

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Χαρακτηριστικές παράμετροι οπτικών φίλτρων

- Τα βασικά μεγέθη χαρακτηρισμού των φίλτρων είναι η *ελεύθερη φασματική περιοχή* (free spectral range – FSR) που αντιστοιχεί στην περιοχή συντονισμού του φίλτρου,
- το *πλήρες εύρος στο μισό μέγιστο κάθε κορυφής* (full width at half maximum – FWHM), δηλαδή το εύρος μισής ισχύος (-3dB) κάθε κορυφής και
- η *λεπτότητα* (Finesse – F). Το τελευταίο αυτό μέγεθος ισούται με το πηλίκο της FSR προς το FWHM και εκφράζει την οξύτητα του φίλτρου ως προς την περίοδο επανάληψης.



8

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Οπτικά φράγματα

- Ο όρος *φράγμα* χρησιμοποιείται για να περιγράψει κάθε διάταξη της οποίας η λειτουργία στηρίζεται στο φαινόμενο της συμβολής μεταξύ δύο ή περισσότερων οπτικών σημάτων που προέρχονται από την ίδια πηγή και που παρουσιάζουν διαφορά φάσης μεταξύ τους. Η διαφορά φάσης που παρουσιάζεται εξαρτάται από το μήκος κύματος λ , του οπτικού σήματος. Για τα μήκη κύματος που η διαφορά φάσης μεταξύ των οπτικών σημάτων ισούται με πολλαπλάσιο του 2π , τα σήματα συμβάλλουν θετικά και μεγιστοποιείται η ένταση του συνολικού οπτικού σήματος. Αντίθετα αν η διαφορά φάσης ισούται με περιττό πολλαπλάσιο του π , τότε τα σήματα συμβάλλουν καταστροφικά και η ένταση του συνολικού σήματος ελαχιστοποιείται. Επομένως η ένταση του οπτικού πεδίου εξαρτάται από το μήκος κύματος του και το φράγμα δρα σαν ένα οπτικό φίλτρο

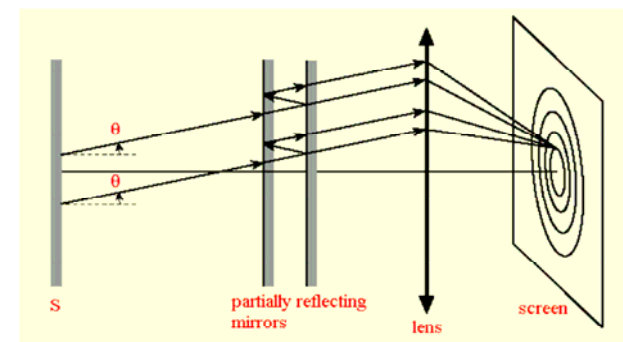
9

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Συντονισμένες κοιλότητες - Etalon

- Etalon: είναι μια συντονισμένη κοιλότητα που σχηματίζεται από δυο παράλληλα κάτοπτρα

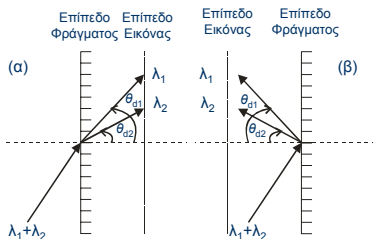


10

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Φράγματα περίθλασης

- Δύο είδη φραγμάτων περίθλασης :
 - φράγμα διέλευσης (transmission grating)
 - φράγμα ανάκλασης (reflection grating)

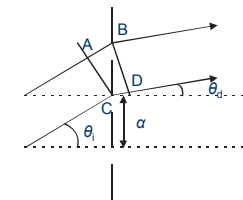


Φράγματα Περίθλασης: (α) Διέλευσης και (β) Ανάκλασης

$$\sin \theta = \frac{p\lambda}{D}$$

Εμφάνιση
ελαχίστων

Φράγματα περίθλασης



διαφορά φάσης $\Delta\varphi$ μεταξύ των κυμάτων που προέρχονται από δύο γειτονικές σχισμές θα είναι :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi na}{\lambda} (\sin \theta_i - \sin \theta_d)$$

Υπολογισμός της γωνίας θ_d κατά την οποία η ένταση του φωτεινού σήματος είναι μέγιστη

- Η ένταση του οπτικού σήματος λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν $\Delta\varphi = m2\pi$

$$na(\sin \theta_i - \sin \theta_d(\lambda)) = m\lambda$$



Φράγματα Bragg

- Εν γένει, κάθε περιοδική διαταραχή στο μέσο διάδοσης ονομάζεται *φράγμα Bragg*
 - Η περιοδική διαταραχή στο μέσο διάδοσης, συνήθως επιτυγχάνεται με μεταβολή του δείκτη διάθλασης του μέσου
 - Εξαιτίας της περιοδικής διαταραχής του μέσου, λαμβάνει χώρα σύζευξη μεταξύ των τρόπων διάδοσης του μέσου
 - Η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ δύο τρόπων μεγιστοποιείται αν ισχύει η συνθήκη Bragg:

$$|\beta_0 - \beta_1| = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

13

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



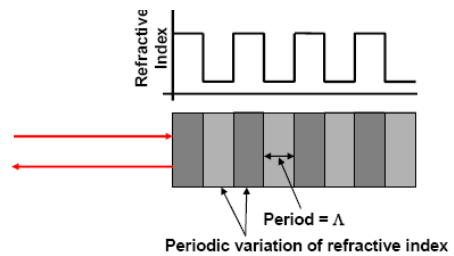
Φράγματα Bragg

- Στα φράγματα Bragg που χρησιμοποιούνται για πολυπλεξία και αποπολυπλεξία μήκους κύματος οι τρόποι στους οποίους λαμβάνει ανταλλαγή ενέργειας έχουν την ίδια σταθερά διάδοσης αλλά αντίθετη κατεύθυνση διάδοσης ($\beta_1 = -\beta_0$). Το μήκος κύματος λ_0 στο οποίο η ανταλλαγή ενέργειας μεγιστοποιείται υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το γεγονός ότι $\beta_0 = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda_0$
- Γύρω από το μήκος κύματος λ_0 το φως ανακλάται από το φράγμα επειδή η ισχύς από τον τρόπο που διαδίδεται στην κατεύθυνση +z μεταφέρεται στον τρόπο που διαδίδεται στην κατεύθυνση -z. Επομένως το φράγμα Bragg μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιλεγεί ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος $\lambda = \lambda_0$

14

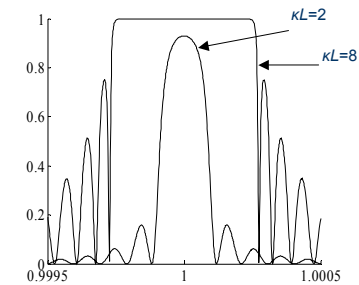
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Bragg Reflectors



- Portion of the light is reflected at each interface.
- Only for one wavelength can a coherent addition be performed.
- Wavelength satisfying the Bragg Condition, $\lambda_B: 2\Lambda n_{\text{eff}} = \lambda_B$
- n_{eff} is the effective index of the waveguide core.
- Very narrow bandwidths are possible.

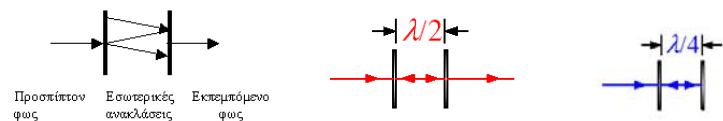
Φράγματα Bragg



Η συνάρτηση μεταφοράς ισχύος ενός ομοιογενούς φράγματος Bragg

- K σταθερά σύζευξης, L μήκος φράγματος

Συμβολόμετρα Fabry Perot



Όταν:

$$L = \frac{m\lambda}{2n} = \frac{mc}{2nf}$$

Σχεδόν όλο το φως λ περνάει στην έξοδο

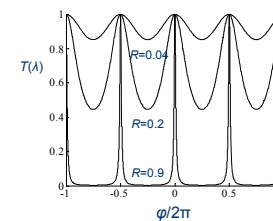
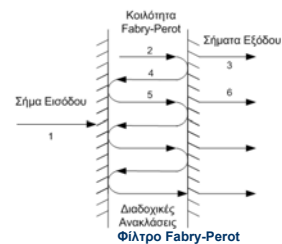
n ο δ.δ. Μέσα στην κοιλότητα

17

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Φίλτρα Fabry Perot I

- Η αρχή λειτουργίας των φίλτρων Fabry-Perot συνίσταται στην πολλαπλή διέλευση ενός οπτικού κύματος μέσα από μία κοιλότητα στα άκρα της οποίας υπάρχουν ανακλαστικές επιφάνειες
- Τα κύματα που εξέρχονται από την άλλη άκρη της διάταξης συμβάλλουν και η ένταση του μεταδιδόμενου κύματος εξαρτάται από το μήκος κύματος του οπτικού σήματος



Συνάρτηση Μεταφοράς Ισχύος ενός φίλτρου Fabry Perot με A=0

18

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Φίλτρα Fabry Perot II

• Filter parameters

• Response:

$$T_{eq} = \frac{I_o}{I_{in}} = T^2 \left| \frac{e^{jkL}}{1 - R^2 e^{j2kL}} \right|^2$$

$$\rightarrow T_{eq} = \frac{1}{1 + \left(\frac{4R}{(1-R)^2} \right) \sin^2(kL)}$$

• Max. @ $kL = q\pi \rightarrow FSR = C/2nL$

• FWHM @ $kL = q\pi + \theta \rightarrow T_{eq}(q\pi + \theta) = 1/2$

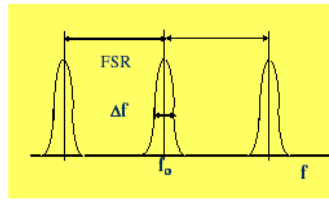
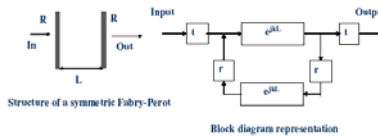
$$\rightarrow \Delta\nu = \frac{C}{2nL} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}$$

• Finesse $F = FSR/\Delta\nu$

$$\rightarrow F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

• Response

$$I_{eq} = I^2 \frac{e^{jkL}}{1 - R^2 e^{j2kL}}$$



Απόκριση Φίλτρων Fabry Perot

• Typical Lossless response:

• Max. $\rightarrow T_{max.} = 1$

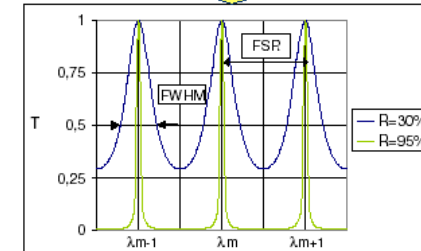
• Min. $\rightarrow T_{min} = \frac{(1-R)^2}{(1+R)^2}$

• FSR = $C/2nL$

$$FSR = \Delta\nu = \frac{C}{2n_{eff}L}$$

$$\Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_{eff}L}$$

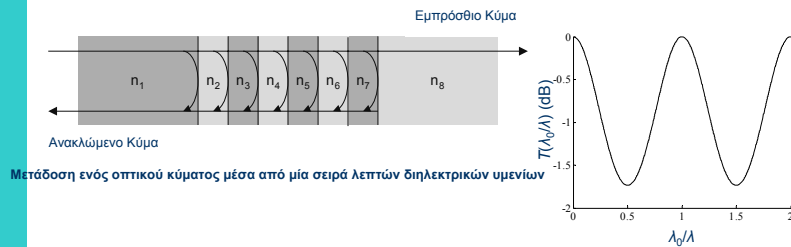
$$T_{eq} = \frac{1}{1 + \left(\frac{4R}{(1-R)^2} \right) \sin^2(kL)}$$





Φίλτρα λεπτών υμενίων –Thin films

- Τα φίλτρα πολλαπλών λεπτών διηλεκτρικών υμενίων (multilayer thin film filters) βασίζονται στις ιδιότητες της ανάκλασης του φωτός από διαδοχικά τοποθετημένα στρώματα διηλεκτρικού υλικού
- Καθώς το οπτικό κύμα διέρχεται δια μέσου των διηλεκτρικών στρωμάτων ένα τμήμα της οπτικής ισχύος ανακλάται στις επαφές μεταξύ διηλεκτρικών στρωμάτων ενώ ένα άλλο τμήμα συνεχίζει να διαδίδεται προς τα θετικά z
- Το ποσοστό ισχύος που ανακλάται εξαρτάται από το μήκος κύματος του οπτικού σήματος και επομένως η διάταξη λειτουργεί ως οπτικό φίλτρο



Μετάδοση ενός οπτικού κύματος μέσα από μία σειρά λεπτών διηλεκτρικών υμενίων

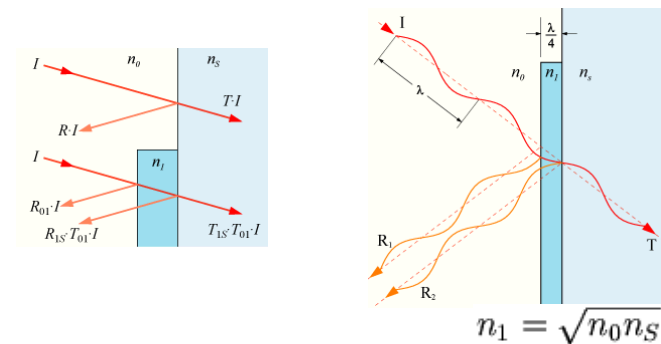
Συνάρτηση μεταφοράς ισχύος του διαδιδόμενου κύματος μέσω τριών διηλεκτρικών στρωμάτων με δείκτες διάθλασης $n_1=n_3=1.47$ και $n_2=2.3$. Το μεσαίο διηλεκτρικό στρώμα έχει πάχος $l=\lambda_0/2n_2$.

21

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Anti reflection coatings



- $T_{01} = 1 - R_{01}$ και $T_{1s} = 1 - R_{1s}$
- The use of an intermediate layer to form an antireflection coating can be thought of as analogous to the technique of impedance matching of electrical signals

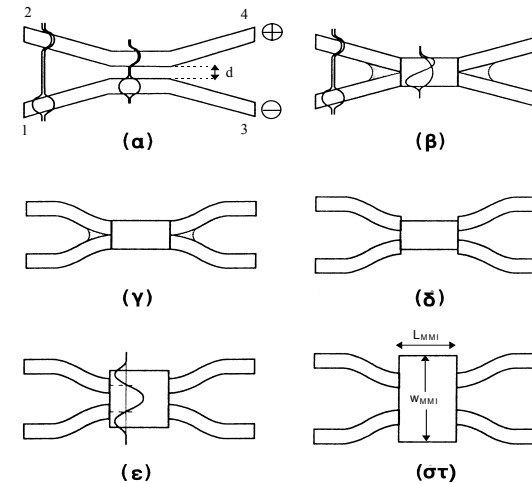
22

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΟΠΤΙΚΟΪ ΣΥΖΕΥΚΤΕΣ

- Ο κατευθυντικός συζεύκτης αποτελεί μια πολύ ευέλικτη διάταξη. Χρησιμοποιείται σαν διαιρέτης οπτικής ισχύος, σαν φίλτρο μηκών κύματος, σαν επιλογέας ή και μετατροπέας καταστάσεων πόλωσης και σαν μεταγωγός για τη δρομολόγηση του οπτικού σήματος
- Στην συνήθη μορφή του, ο κατευθυντικός συζεύκτης αποτελείται από ένα ζεύγος παράλληλων, όμοιων, μονότροπων κυματοδηγών, σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους.
- Η οπτική ισχύς που εισάγεται στον ένα κυματοδηγό μεταφέρεται τελικά στον άλλο, σαν αποτέλεσμα της επικάλυψης των “αποσβενύμενων” πεδίων των τρόπων διάδοσης των δύο κυματοδηγών.

ΟΠΤΙΚΟΪ ΣΥΖΕΥΚΤΕΣ



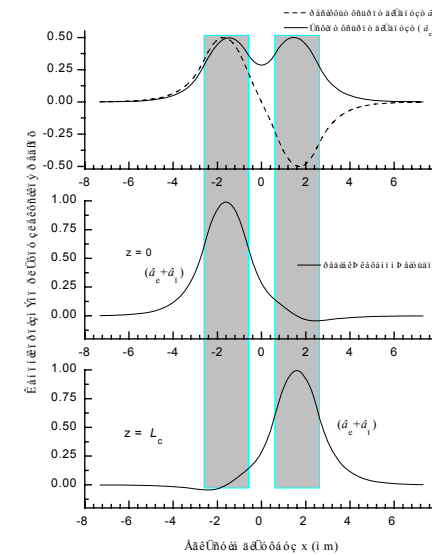
ΟΠΤΙΚΟΙ ΣΥΖΕΥΚΤΕΣ

- Η λειτουργία των διατάξεων αυτών, περιγράφεται προσεγγιστικά με τη βοήθεια του μοντέλου των υπερτρόπων (*supermodes*). Θεωρώντας ότι οι κυματοδηγοί του συζεύκτη είναι μονότροποι, ο θεμελιώδης ή μηδενικής τάξης υπερτρόπος του συστήματος των δύο κυματοδηγών, προσεγγίζεται από το άθροισμα των πεδίων των αδιάταρακτων τρόπων διάδοσης του κάθε κυματοδηγού, ενώ ο υπερτρόπος πρώτης τάξης από τη διαφορά τους
- Οι δύο αυτοί υπερτρόποι παρουσιάζουν άρτια και περιπτή συμμετρία ως προς τη διεύθυνση διάδοσης z και έχουν σταθερές διάδοσης β_e και β_o αντίστοιχα
- Η συμβολή τους σε κάθε σημείο z περιγράφει τη διάδοση κατά μήκος του συζεύκτη και είναι προφανώς συνάρτηση της διαφοράς φάσης τους $\Delta\phi = (\beta_e - \beta_o)z$. Ολική μεταφορά της οπτικής ισχύος από τον ένα κυματοδηγό στον άλλο, έχουμε στο μήκος L_c για το οποίο ισχύει:
 $(\beta_e - \beta_o) L_c = \pi$

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o} = \frac{\pi}{2\kappa}$$

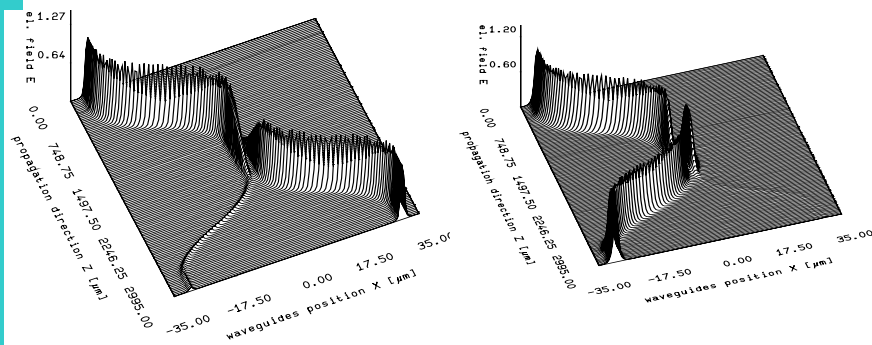
L_c το μήκος σύζευξης, κ η σταθερά σύζευξης των κυματοδηγών

ΟΠΤΙΚΟΙ ΣΥΖΕΥΚΤΕΣ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΟΠΤΙΚΟΙ ΣΥΖΕΥΚΤΕΣ



$\lambda=1.3\mu\text{m}$

$\lambda=1.53\mu\text{m}$

27

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Μήτρα σκέδασης συζεύκτη

- Έστω \mathbf{E}_{in} και \mathbf{E}_{out} τα πλάτη των ηλ. πεδίων στη είσοδο και την έξοδο του συζεύκτη με λόγο διαχωρισμού a :

$$\mathbf{E}_{out} = \mathbf{S}\mathbf{E}_{in} \quad \mu\epsilon \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} \sqrt{1-a} & j\sqrt{a} \\ j\sqrt{a} & \sqrt{1-a} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{1out} = P_{1in} \sin^2\left(\frac{\pi L}{L_c}\right) \quad \kappa\alpha\iota \quad \mathbf{P}_{2out} = P_{1in} \cos^2\left(\frac{\pi L}{L_c}\right)$$

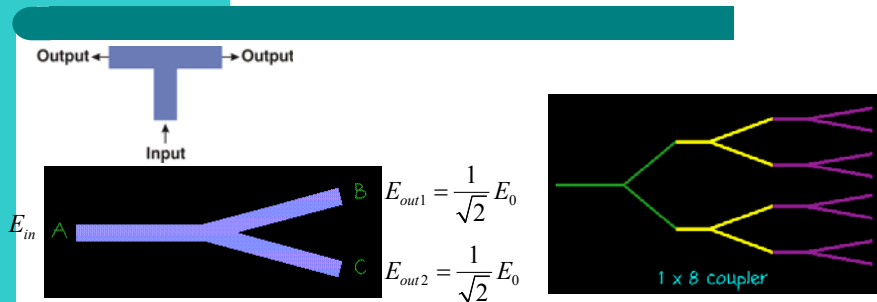
$$\epsilon\nu\acute{o} \quad \alpha = \mathbf{P}_{1out} / \mathbf{P}_{2out}$$

28

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Y Splitters



- An interesting, and unexpected, property of splitters is that they are symmetrical. For instance, if the same coupler injected $50 \mu W$ into the 10% output leg, only $5 \mu W$ would reach the common port

$$E_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} E_2$$

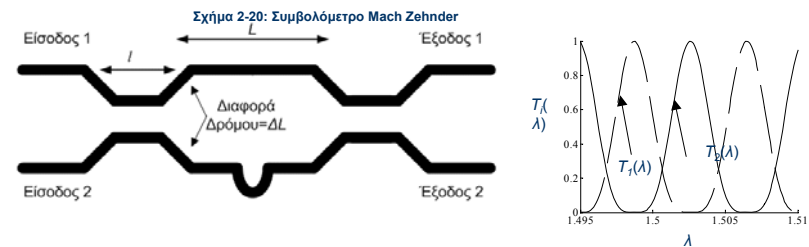
29

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Συμβολόμετρα Mach Zehnder

- Στο *συμβολόμετρο Mach-Zehnder* το οπτικό σήμα συμβάλει με μία καθυστερημένη έκδοση του εαυτού του. Όπως και στο φράγμα περίθλασης, η ένταση του πεδίου συμβολής εξαρτάται από το μήκος κύματος. Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder κατασκευάζεται συνήθως σε ολοκληρωμένη μορφή, χρησιμοποιώντας τεχνικές ολοκληρωμένης οπτικής
- Συνίσταται σε δύο συζεύκτες, ένας εκ των οποίων διαμοιράζει την οπτική ισχύ μεταξύ δύο οπτικών δρόμων με διαφορετικό μήκος



30

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Συμβολόμετρα Mach Zehnder

Unbalanced Interferometer

$$L_1=L_2$$

Optical filter

$$L_{av}=(L_1+L_2)/2$$

$$\Delta L=L_1 - L_2$$



$$E_{op} = \frac{E_{in}}{2} e^{-j\beta L_1} [1 + e^{j\beta(L_1-L_2)}] = E_{in} e^{-j\beta L_{av}} \cos(\beta \Delta L)$$

$$P_{out} = \frac{E_{op}^2}{2} (1 + \cos \omega \Delta t_g) = P_{in} \cos^2 \left(2\pi \frac{n_{eff} \Delta L}{\lambda} \right)$$

Συμβολόμετρα Mach Zehnder

- Periodic filter response

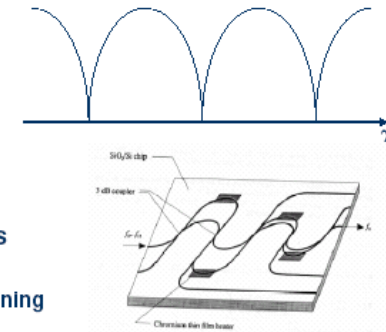
$$I_{op} = I_{in} \cos^2 \left(2\pi \frac{n_{eff} \Delta L}{\lambda} \right)$$

$$\Delta v = C/\Delta L n_{eff}$$

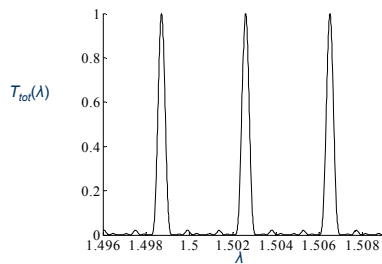
- $\Delta \lambda = \lambda^2 / n_{eff} \Delta L$
- For max. $I_{out} = I_{in}$
- For min. $I_{out} = 0$

- Cascaded MZ interferometers

- Add/Drop Filter
- Heaters could be used for tuning



Συμβολόμετρο Mach Zehnder πολλαπλών τμημάτων



33

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΣΙΩΝ

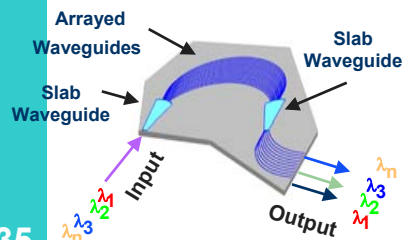
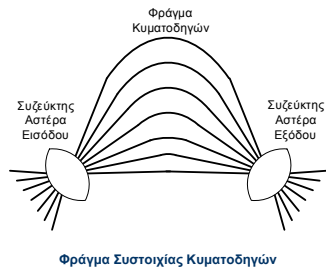
Φράγμα συστοιχίας κυματοδηγών AWG

- Οι AWG κατασκευάζονται πάνω σε υποστρώματα πυριτίου ή ημιαγωγικού υλικού InP και χρησιμοποιούνται συχνά στα δίκτυα WDM ως πολυπλέκτες, αποπολυπλέκτες και δρομολογητές μήκους κύματος
- Ένας ADM μπορεί να κατασκευαστεί ολοκληρώνοντας ένα AWG με ημιαγωγικούς ενισχυτές στο ίδιο υπόστρωμα

34

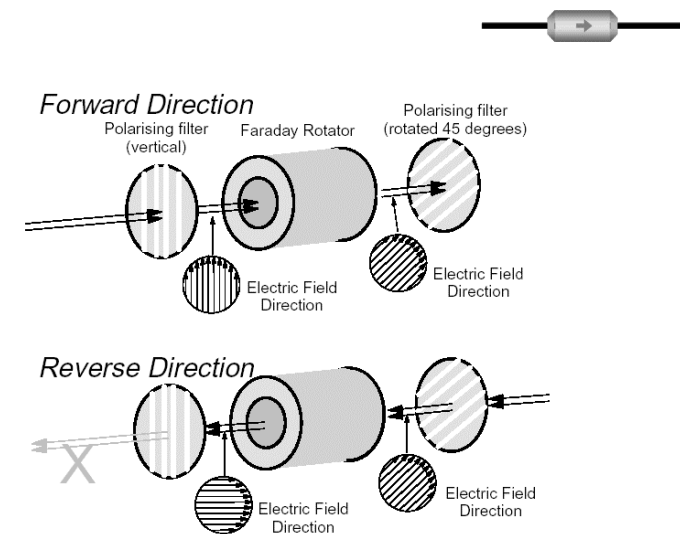
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΣΙΩΝ

AWG



- Μία συστοιχία κυματοδηγών με διαφορετικά μήκη δρόμου ως οπτικό φίλτρο, κατά παρόμοιο τρόπο με το φράγμα περίθλασης.
- Το WDM σήμα στους κυματοδηγούς εισόδου εισέρχεται στο συζεύκτη αστέρα εισόδου που αποτελείται από έναν επίπεδο διηλεκτρικό κυματοδηγό
- Στο εσωτερικό του συζεύκτη αστέρα η οπτική δέσμη αρχίζει να διευρύνεται και προσπίπτει στη συστοιχία των κυματοδηγών που αποτελούν το φράγμα.
- Το μήκος του κάθε κυματοδηγού διαφέρει κατά μία σταθερή ποσότητα ΔL από το μήκος του γειτονικού του κυματοδηγού.
- Τα οπτικά κύματα που διαδίδονται μέσα στους κυματοδηγούς της συστοιχίας φτάνουν στο συζεύκτη αστέρα εξόδου, με μία διαφορά φάσης που εξαρτάται και από το μήκος κύματος
- Ο συζεύκτης εξόδου εστιάζει την οπτική δέσμη στους κυματοδηγούς εξόδου ανάλογα με τη διαφορά φάσης που έχουν μεταξύ τους τα οπτικά κύματα και η οποία είναι συνάρτηση του μήκους κύματος
- Η εστίαση είναι διαφορετική για κάθε συνιστώσα του WDM σήματος, με αποτέλεσμα οι διάφορες συνιστώσες να διαχωρίζονται στην έξοδο της διάταξης

Οπτικοί απομονωτές



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Οπτικοί Κυκλοφορητές

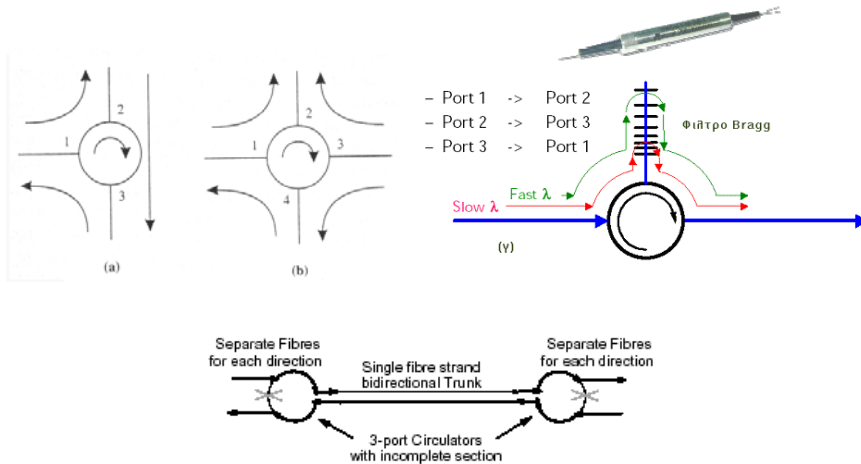


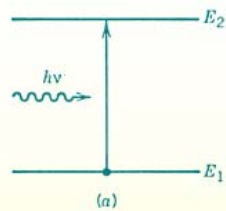
Figure 153. Multiplexing Bidirectional Traffic onto a Single Fibre Strand. Asymmetric three-port circulators are used. The inoperative segment of each circulator is represented by a dashed line.

Οπτικές μεταπτώσεις I

- Όταν ένα ηλεκτρόνιο ενός ατόμου υφίσταται μεταβάσεις μεταξύ δυο ενεργειακών επιπέδων απορροφά ή εκπέμπει ένα φωτόνιο $v = \Delta E/h$
- Θεωρούμε τις μεταβάσεις που μπορούν να συμβούν σε ένα υποθετικό σύστημα δυο επιπέδων E_1 και E_2
- Σημειώνεται ότι οι παρακάτω διαδικασίες δεν αφορούν φωτόνιας μια μόνο συγκεκριμένης συχνότητας αλλά περιοχής συχνοτήτων
- Αυτή η κατανομή συχνοτήτων περιγράφεται από το εύρος γραμμής $g(v)$

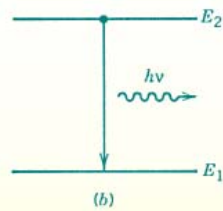
Οπτικές μεταπτώσεις I

ΑΠΟΡΟΦΗΣΗ



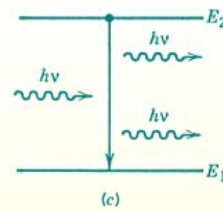
(a)

ΑΥΘΟΡΜΗΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗ



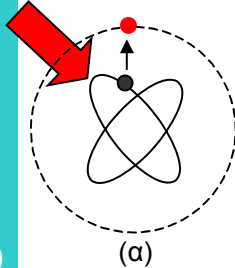
(b)

ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΕΚΠΟΜΠΗ
(ΕΝΙΣΧΥΣΗ-ΔΡΑΣΗ LASER)



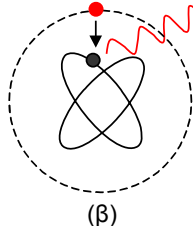
(c)

Ενέργεια



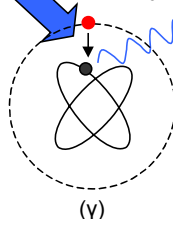
(α)

Φωτεινή
ακτινοβολία



(β)

Ενέργεια



(γ)

Ρυθμός απορρόφησης και εκπομπής

- Έστω N_1 και N_2 οι ατομικές πυκνότητες στα ενεργειακά επίπεδα E_1 και E_2
- Έστω $\rho(\nu)$ η πυκνότητα ενέργειας των φωτονίων σε συχνότητα ν . [$\rho(\nu) = N_{ph} h\nu$]

$$\bullet R_{\text{spont}} = AN_2, \quad R_{\text{stim}} = B_2N_2\rho \quad \text{και} \quad R_{\text{abs}} = B_1N_1\rho$$

- Σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας η πυκνότητα των ατόμων ακολουθεί κατανομή Boltzmann:

$$N_2/N_1 = \exp(-E_g/kT) = \exp(-h\nu/kT)$$

Και

$$\bullet R_{\text{spont}} + R_{\text{stim}} = R_{\text{abs}} \quad \text{ή} \quad AN_2 + B_2N_2\rho = B_1N_1\rho$$

39

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

40

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



- Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις:

$$\rho = \frac{A/B_2}{(B_1/B_2)\exp(h\nu/kT) - 1}$$

- Η ρ πρέπει να ταυτίζεται με την πυκνότητα εκπομπής του μέλανος σώματος:

$$\rho = \frac{8\pi h\nu^3 / c^3}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

- Από όπου προκύπτουν:

41



Σχέσεις Einstein

$$A = B_2 8\pi h\nu^3 / c^3 \quad \text{και} \quad B_1 = B_2$$

- c η ταχύτητα του φωτός στο μέσο [$c=c_0/n$, n ο δ.δ.]

Συμπεράσματα:

- $R_{\text{spon}} > R_{\text{stim}}$ και R_{abs} μόνο όταν $kT > h\nu$ (θερμικές πηγές)
- Για ακτινοβολία κοντά στο υπέρυθρο ($h\nu \sim 1\text{eV}$) σε συνθήκες ισορροπίας και σε θερμοκρασία δωματίου ($kT \sim 25\text{meV}$):

$$R_{\text{stim}} / R_{\text{spon}} = [\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1} \ll 1$$

42



Απορρόφηση ακτινοβολίας

- Έστω μονοχρωματική δέσμη μοναδιαίας διατομής και έντασης I που διέρχεται από το υποθετικό υλικό (E_1, E_2). Η ένταση συναρτήσει της απόστασης δίνεται από την:

$$I = I_0 \exp(-ax)$$

- Ο ρυθμός απώλειας φωτονίων ανά μονάδα όγκου από τη δέσμη όταν αυτή διέλθει από στοιχείο όγκου Δx και μοναδιαίας διατομής είναι:

$$-\frac{dN_v}{dt} = (N_1 - N_2) \rho B$$

- Επειδή $I = \rho c_0/n$ (n ο δ.δ. του μέσου) προκύπτει:

$$a = (N_1 - N_2) \frac{Bh\nu}{c/n}$$

43

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Αντιστροφή πληθυσμών

- Επομένως αν επιτευχθεί $N_2 > N_1$ (αντιστροφή πληθυσμών) με προσφορά ενέργειας (άντληση) τότε ο συντελεστής απορρόφησης γίνεται αρνητικός και έχουμε ενίσχυση της δέσμης

$$I = I_0 \exp(kx) \text{ με } k = -a > 0$$

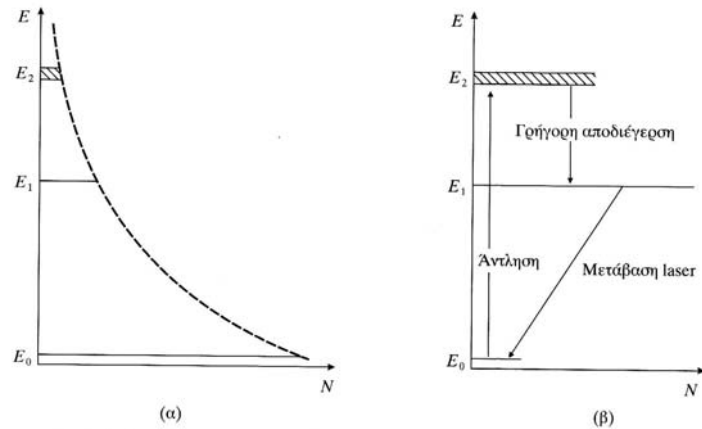
- Ωστόσο σε ένα σύστημα δυο επιπέδων το καλύτερο που θα μπορούσε να επιτευχθεί είναι $N_1 = N_2$
- Συνεπώς στα ατομικά συστήματα, αντιστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας υλικά με 3 ή 4 ενεργειακά επίπεδα

44

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Δημιουργία αντιστροφής πληθυσμών



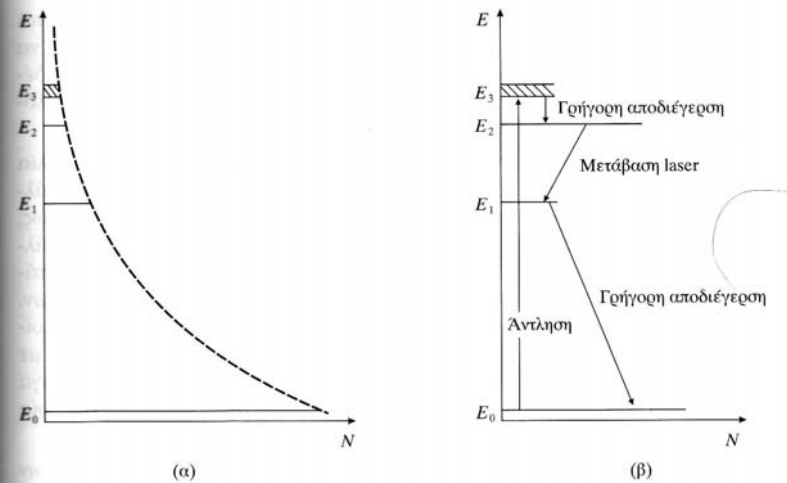
ΕΙΚ. 5.5 Πληθυσμός των ενεργειακών επιπέδων κατά την άντληση σ' ένα σύστημα τριών επιπέδων: (α) κατανομή Boltzmann πριν από την άντληση και (β) κατανομή μετά την άντληση και σχετικές μετακινήσεις πληθυσμών.

45

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Δημιουργία αντιστροφής πληθυσμών



ΕΙΚ. 5.6 Πληθυσμοί των ενεργειακών επιπέδων σ' ένα σύστημα τεσσάρων επιπέδων: (α) πριν από την άντληση και (β) μετά την άντληση.

46

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Οπτικές μεταπτώσεις

- Αν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συχνότητα $f > E_g/h$ προσπέσει στο υλικό επικρατεί ο μηχανισμός της απορρόφησης.
- Αν με οπτική ή ηλεκτρική διέγερση (άντληση) δημιουργηθεί κατάσταση αναστροφής πληθυσμών ($N_a > N_s$), ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής γίνεται μεγαλύτερος από το ρυθμό της απορρόφησης και της αυθόρμητης εκπομπής.
- Τα παραγόμενα φωτόνια προκαλούν την έναρξη μιας αλυσιδωτής σειράς επανασυνδέσεων που έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή φωτεινής ακτινοβολίας μεγάλης ισχύος που προστίθεται στην αρχική διέγερση
- Αυτή είναι ουσιαστικά μια διαδικασία οπτικής ενίσχυσης και αποτελεί τη **δράση LASER**
- **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** Ενίσχυση Φωτός με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας

47

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Οπτικές μεταπτώσεις σε ημιαγωγούς I

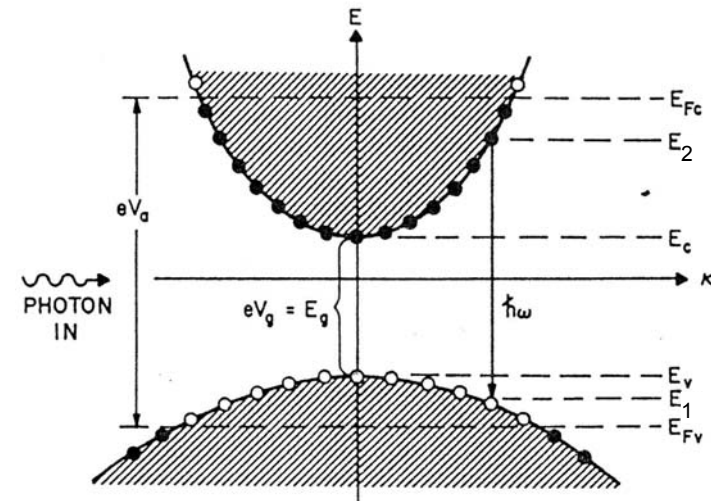


Fig. 5.9. Filled (solid) and vacant (open) valence and conduction band states at electron energies E and momenta κ . The quasi-Fermi levels are E_{Fc} and E_{Fv} [5.1]

48

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Οπτικές μεταπτώσεις σε ημιαγωγούς II

- Η πιθανότητα κατάληψης από e, ενεργειακού επιπέδου E_2 στη ΖΑ και E_1 στη ΖΣ δίνεται:

$$F_c(E_2) = \frac{1}{\exp[(E_2 - E_{Fc})/kT] + 1} \quad F_v(E_1) = \frac{1}{\exp[(E_1 - E_{Fv})/kT] + 1}$$

- Αυθόρμητη εκπομπή συμβαίνει όταν υπάρχουν e στην E_2 και h στην E_1
- Ο ρυθμός αυθόρμητης εκπομπής σε μια συχνότητα ν , λαμβάνεται αθροίζοντας όλες τις πιθανές μεταπτώσεις μεταξύ των δυο ζωνών έτσι ώστε $E_2 - E_1 = h\nu$

49

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Οπτικές μεταπτώσεις σε ημιαγωγούς III

$$R_{spont}(\nu) = \int_{E_c}^{\infty} A(E_1, E_2) F_c(E_2) [1 - F_v(E_1)] Z_{cv}(\nu) dE_2$$

$$Z_{cv} = \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (h\nu - E_g)^{1/2} \quad m_r \text{ η ανηγμένη μάζα e-h}$$

$$R_{stim}(\nu) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) F_c(E_2) [1 - F_v(E_1)] Z_{cv}(\nu) \rho(\nu) dE_2$$

$$R_{abs}(\nu) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) F_c(E_1) [1 - F_v(E_2)] Z_{cv}(\nu) \rho(\nu) dE_2$$

- Όταν έχουμε Αναστροφή πληθυσμών: $R_{stim} > R_{abs}$



$$F_c(E_2) > F_v(E_1)$$



$$E_{Fc} - E_{Fv} > E_2 - E_1 > E_g \quad \text{ή} \quad eV_g > h\nu > eV_a$$

50

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Οπτικές μεταπτώσεις σε ημιαγωγούς III

- Οι παραπάνω μηχανισμοί δεν ενεργοποιούνται σε θερμοκρασία δωματίου σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας. Επομένως είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας
- Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή σε μια ομοιοεπαφή p-n, διαφοράς δυναμικού κατά την *ορθή φορά*, δηλαδή ο θετικός ακροδέκτης συνδέεται στην περιοχή τύπου p και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου n
- Καθώς μεγάλος αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων κινείται υπό την επίδραση του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, επανασυνδέεται με ελεύθερες οπές και η επαφή ακτινοβολεί

51

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Παραγωγή φωτός

□ Δεν έχουν όλα τα ημιαγωγικά υλικά τη δυνατότητα παραγωγής φωτός

□ Άμεσο - έμμεσο ενεργειακό χάσμα

□ επανασύνδεση σε traps και defects του πλέγματος

□ Επανασύνδεση Auger

□ Οι συνήθεις ημιαγωγοί των συμβατικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων πυρίτιο και γερμάνιο δεν είναι κατάλληλοι για φωτοπηγές, αφού η επανασύνδεση σε αυτούς στο μεγαλύτερο ποσοστό της συνοδεύεται από παραγωγή θερμότητας

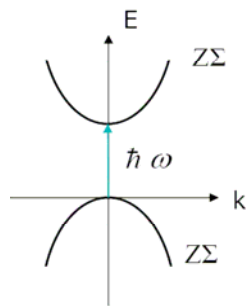
□ Όταν η επανασύνδεση συνοδεύεται από ακτινοβολία, το μήκος κύματος εξαρτάται από το υλικό και συγκεκριμένα από την ενέργεια χάσματος σύμφωνα με τη σχέση $\lambda \approx hc/E_g$

52

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

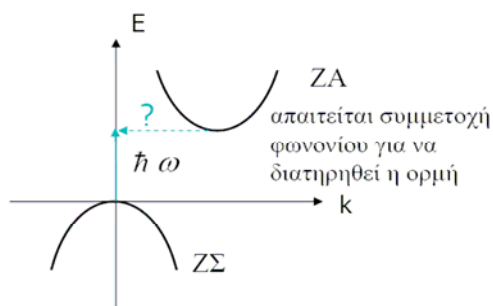
Διατήρηση Ενέργειας & Ορμής

Άμεσο ενεργειακό χάσμα



Ισχυρή αλληλεπίδραση
ύλης-φωτός

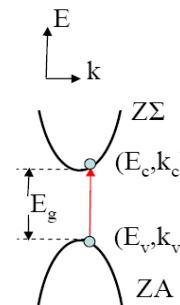
Έμμεσο ενεργειακό χάσμα



Ασθενής αλληλεπίδραση
ύλης-φωτός

Απορρόφηση κοντά στο E_g

Στις μεταβάσεις το ολικό κυματόνισμα του συστήματος διατηρείται.



- Άμεσο ενεργειακό χάσμα
π.χ. InSb

-κατακόρυφες μεταβάσεις δυνατές
κοντά στο E_g

$$k_c \approx k_v$$

-μεταβάσεις χωρίς συμμετοχή φωνονίου

$$E_{\text{photon}} = E_g$$

$$k_{\text{photon}} = k_c - k_v (\approx 0)$$

Τα ανωτέρω ισχύουν για λ στο $[0.5-2\mu\text{m}]$ δεδομένου ότι οι σταθερές του κρυσταλλικού πλέγματος είναι της τάξης του 10^{-10}m (αφού $k_{\text{photon}} \ll k_{c,v}$)

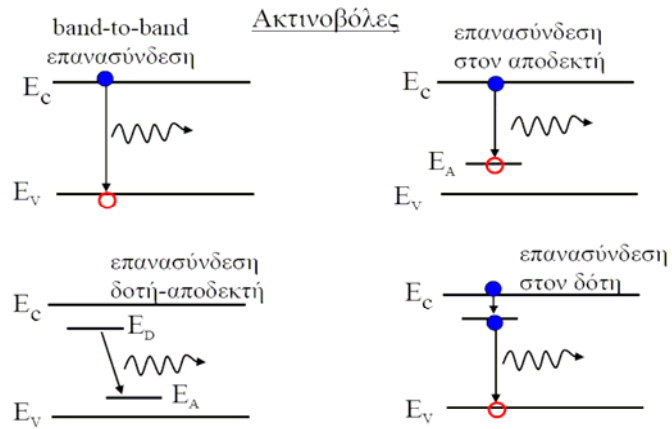
53

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

54

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

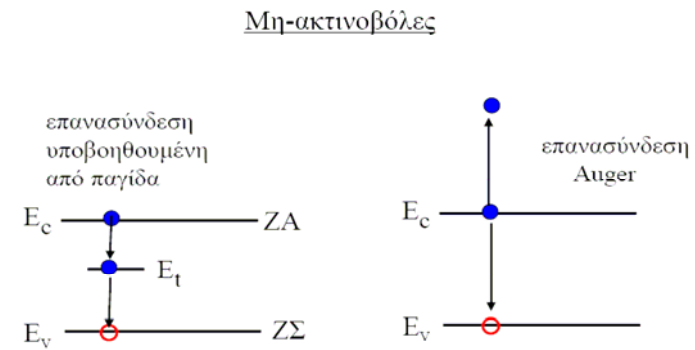
Ακτινοβόλες – μη ακτινοβόλες επανασυνδέσεις I



55

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Ακτινοβόλες – μη ακτινοβόλες επανασυνδέσεις II



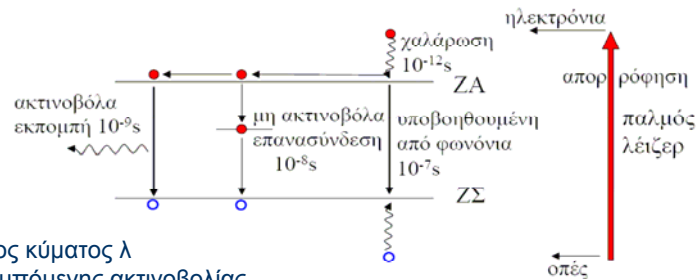
φαινόμενο Auger: ένας τρίτος φορέας απορροφά ως κινητική την ενέργεια που εκλύεται από την επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής. Η μη ακτινοβολούσα επανασύνδεση δημιουργεί θερμότητα και γι' αυτό το λόγο είναι μη επιθυμητή.

56

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΣΥΝΕΠΩΣ

- ακτινοβόλες διαδικασίες → εκπομπή φωτός
- μη-ακτινοβόλες διαδικασίες → χωρίς εκπομπή φωτονίου
χαλάρωση με εκπομπή φωνονίων



Μήκος κύματος λ
εκπεμπόμενης ακτινοβολίας

$$hc / \lambda = E_g$$

$$hc / \lambda = E_g \pm E_{phonon} \quad E_{phonon} \sim 0.01 eV$$

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

57

Κβαντική απόδοση

- Σε μια επαφή έχουμε εν γένει ακτινοβόλες αλλά και μη ακτινοβόλες επανασυνδέσεις
- Εσωτερική κβαντική απόδοση:

$$n_{int} = \frac{R_{rr}}{R_{tot}} = \frac{R_{rr}}{R_{rr} + R_{nr}}$$

- R_{rr} : ρυθμός ακτινοβόλων επανασυνδέσεων = N/τ_{rr}
με τ_{rr} ο χρόνος επανασύνδεσης και N η συγκέντρωση φορέων
- R_{nr} : ρυθμός μη ακτινοβόλων επανασυνδέσεων = N/τ_{nr}
με τ_{nr} ο χρόνος επανασύνδεσης και N η συγκέντρωση φορέων

$$n_{int} = \frac{\tau_{rr}}{\tau_{rr} + \tau_{nr}}$$

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

58



Χρόνος ζωής φορέων τ_c

- Συνήθως χρησιμοποιούμε το μέγεθος τ_c , ολικό χρόνο επανασύνδεσης των φορέων με απουσία εξαναγκασμένων επανασυνδέσεων, δηλαδή:

$$R_{\text{spon}} + R_{\text{nr}} = N/\tau_c$$

R_{spon} ρυθμός αυθόρμητων επανασυνδέσεων

R_{nr} ρυθμός μη ακτινοβόλων επανασυνδέσεων

N συγκέντρωση φορέων

- Στη γενική περίπτωση:

$$- R_{\text{spon}} + R_{\text{nr}} = A_{\text{nr}} N + B N^2 + C N^2$$

Δηλαδή ο χρόνος ζωής των φορέων εν γένει εξαρτάται από τη συγκέντρωσή τους

59



Εκπομπή φωτός –εύρος γραμμής εκπομπής

- (1) Για αποτελεσματική εκπομπή φωτός απαιτούνται μεταβάσεις χωρίς συμμετοχή φωνονίων
 \Rightarrow ημιαγωγοί με άμεσο ενεργειακό χάσμα
- (2) Οι μη-ακτινοβόλες διαδικασίες περιορίζουν δραστικά την εκπομπή από ημιαγωγούς με έμμεσο ενεργειακό χάσμα

Τα e στη ΖΑ ενός ημιαγωγού με ενέργειες μεταξύ E και $E+dE$ είναι:

$$n(E) = \frac{(2m_r^*)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (h\nu - E_g)^{1/2} \exp\left(-\frac{h\nu - E_g}{kT}\right)$$

Το \max της $n(E)$ λαμβάνεται για $h\nu = E_g + kT/2$ με FWHM περίπου $2kT$

Υποθέτοντας αμεσες μεταβάσεις από ζώνη σε ζώνη, περιμένουμε μια σειρά από συχνότητες εκπομπής με εύρος $\Delta\nu \sim 2kT/h$

Τυπικές τιμές: $\Delta\nu \sim 11\text{THz}$ [@25oC]

Για $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ αυτό ισοδυναμεί με $\Delta\lambda = 50\text{nm}$

60

Υλικά οπτικοηλεκτρονικής για τηλεπικοινωνίες

$$\lambda = \frac{h c}{\epsilon_{ph}} = \frac{1.24}{\epsilon_{ph} (eV)}$$

Where: λ = Wavelength in microns

h = Plancks constant = $6.63 \times 10^{-34} = 4.14 \times 10^{-15} eV.s$

c = Speed of light = $3 \times 10^8 metres.sec$

ϵ_{ph} = Photon energy in eV

Table 1. Bandgap Energy and Possible Wavelength Ranges in Various Materials

Material	Formula	Wavelength Range λ (μm)	Bandgap Energy W_g (eV)
Indium Phosphide	InP	0.92	1.35
Indium Arsenide	InAs	3.6	0.34
Gallium Phosphide	GaP	0.55	2.24
Gallium Arsenide	GaAs	0.87	1.42
Aluminium Arsenide	AlAs	0.59	2.09
Gallium Indium Phosphide	GalnP	0.64-0.68	1.82-1.94
Aluminium Gallium Arsenide	AlGaAs	0.8-0.9	1.4-1.55
Indium Gallium Arsenide	InGaAs	1.0-1.3	0.95-1.24
Indium Gallium Arsenide Phosphide	InGaAsP	0.9-1.7	0.73-1.35

61

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Υλικά της ολοκληρωμένης οπτικοηλεκτρονικής

- Η επιλογή του υλικού αλλά και της τεχνικής που θα εφαρμοστεί στην κατασκευή ενός υβριδικού ή μονολιθικού ΟΙΣ, εξαρτάται από τη λειτουργία, το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος και τις απαιτούμενες επιδόσεις της διάταξης

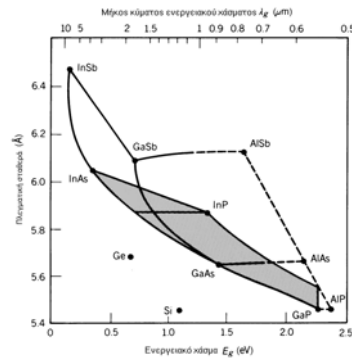
	Ποιός/ δέκτης	παθητικά στοιχεία	μήκος κύματος (μm)	απώλειες σύνδεσης με οπτική ίνα (dB)	απώλειες κυματοδηγού (dB/cm)	Θερμική ευαισθησία του $\delta \delta. dn/dT$ ($10^{-4} / ^\circ K$)	Πολωτική ευαισθησία $[n_{TE}, n_{TM}]$ (10^{-2})	Διάμετρος υποστρωματικού δίσκου (wafer) (cm)
InGaAsP/ InP	•	•	1.3/1.5	>2	2	2	0.1-10	5-8
GaAlAs/ GaAs	•	•	1.3/1.5	>2	2	4	2-10	8
Άμορφο SiO_2 (Γυαλί)		•	1.3/1.5	0.4	<0.1	<0.1	0.1-0.5	>10
LiNbO ₃		•	1.3/1.5	<1	<0.3	<0.1	400	8
πολυμερή		•	< 1.1	<0.5	0.1-0.5	1-3	2-50	>20

62

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Ημιαγωγικά υλικά - Ομάδα III-V

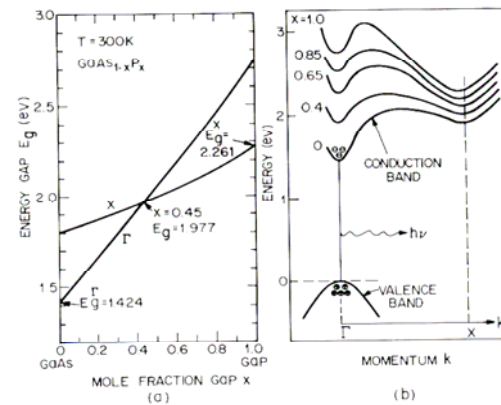
- Οι σύνθετοι ημιαγωγοί III-V προκύπτουν από συνδυασμούς των στοιχείων της ομάδας III (δηλαδή Al, Ga, In) με τα στοιχεία της ομάδας V (δηλαδή P, As, Sb). Τα υλικά αυτά και κυρίως το GaAs, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φωτο-φωρατών και φωτοπηγών (LED, Laser)
- Σύνθετοι τριαδικοί ημιαγωγοί που προκύπτουν από δύο στοιχεία της ομάδας III και ένα της ομάδας V παρουσιάζουν ιδιότητες, που εξαρτώνται από την ποσοστιαία σύσταση των προσμίξεων ($Al_xGa_{1-x}As/GaAs$)
- Σύνθετοι ημιαγωγοί προκύπτουν ακόμη συνδυάζοντας δύο στοιχεία της ομάδας III και δύο της ομάδας V. Οι τετραδικοί αυτοί ημιαγωγοί παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τη σύνθεση υλικών με επιθυμητές ιδιότητες σε σχέση με τα τριαδικά, λόγω του επιπλέον βαθμού ελευθερίας. Ο πλέον χρησιμοποιούμενος τετραδικός ημιαγωγός είναι το $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$



Οι τριαδικοί σύνθετοι ημιαγωγοί σχηματίζονται με κίνηση κατά μήκος της γραμμής που συνδέει τα δύο σημεία που αναπαριστούν τις δυαδικές συνθέσεις. Ένας σύνθετος τετραδικός ημιαγωγός παριστάνεται από ένα σημείο που ανήκει στην επιφάνεια που ορίζεται από τα τέσσερα δυαδικά συστατικά του. Η γραμμοσκιασμένη επιφάνεια παριστάνει τις συνθέσεις του $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$

Εκπομπή σε συγκεκριμένο λ

- GaAs $E_g = 1.42\text{eV}$ 873 nm δεν είναι ορατό
- Μπορούμε να φτιάξουμε κρύματα όπως $GaAs_{1-x}P_x$



Η αλλαγή συγκεντρώσεων μπορεί να επιφέρει αλλαγή από άμεσο σε έμμεσο ενεργειακό χάσμα



Ιδιότητες των υλικών I

- Γενικά οι ιδιότητες του τετραδικού υλικού ($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$) προσεγγίζονται χρησιμο-ποιώντας τον κανόνα του Vegard, σύμφωνα με τον οποίο οι ιδιότητες αυτές καθορίζονται από το ποσοστό των δυαδικών συστατικών του. Παράμετροι όπως η σταθερά πλέγματος, η ενέργεια χάσματος και οι μάζες ηλεκτρονίων και οπών μπορούν να εκτιμηθούν από τα δυαδικά συστατικά GaAs, GaP, InAs, και InP σύμφωνα με τη σχέση [Nahory 1978]:
 - $B(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}) = xyB(\text{GaAs}) + x(1-y)B(\text{GaP}) + y(1-x)B(\text{InAs}) + (1-x)(1-y)B(\text{InP})$
- όπου η μεταβλητή B αναπαριστά τη σταθερά πλέγματος a , την ενέργεια χάσματος E_g ή τη μάζα m_e , m_{ih} , και m_{hh}

65

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Ιδιότητες των υλικών II

$$n^2 = 1 + \frac{E_d}{E_o} + \frac{E_d \cdot (\hbar\omega)^2}{E_o^3} + \frac{E_d \cdot (\hbar\omega)^4}{2E_o^3(E_o^2 - E_g^2)} \ln \frac{2E_o^2 - E_g^2 - (\hbar\omega)^2}{E_g^2 - (\hbar\omega)^2}$$

- $E_g = 1.35 - 0.72y + 0.12y^2$ με $E_g = 1.24/\lambda_g$,
- $E_o = 3.391 - 1.652y + 0.863y^2 - 0.123y^3$ η ενέργεια ταλάντωσης,
- $E_d = 28.91 - 9.278y + 5.626y^2$ η ενέργεια διασποράς, h η σταθερά του Planck

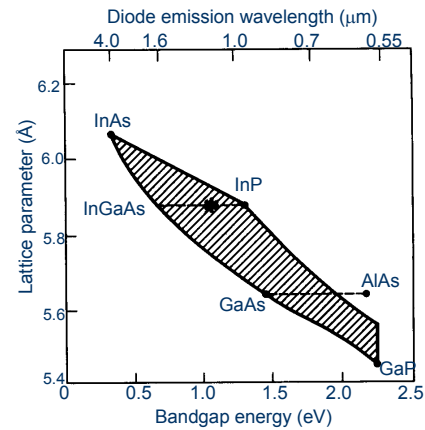
66

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



III-V semiconductors – Υπόστρωμα

- το Υπόστρωμα στις ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ διατάξεις είναι:
 - Κράμα δυο στοιχείων
 - GaAs ή InP. Ετσι:
- GaAs-based lasers:
 $\lambda = 700 - 900 \text{ nm}$
 - Optical recording (CD)
 - Short-distance optical communication
- InP-based lasers:
 $\lambda = 900 - 1650 \text{ nm}$
 - Long-distance optical communication



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ