



Appunti universitari
Tesi di laurea
Cartoleria e cancelleria
Stampa file e fotocopie
Print on demand
Rilegature

NUMERO: 2156A

ANNO: 2017

A P P U N T I

STUDENTE: Preatto Stefania

MATERIA: Optoelettronica - Prof. Giovannini

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

OPTOELETTRONICA

FOTONICA = SCIENZA CHE STUDIA LA GENERAZIONE DELLA LUCE, RIVELAZIONE, PROCESSING

→ STUDIA LA LUCE E COME APPLICARLA NEI VARI PROCESSI
 ex: fibre ottiche, compo medicos, industriale.

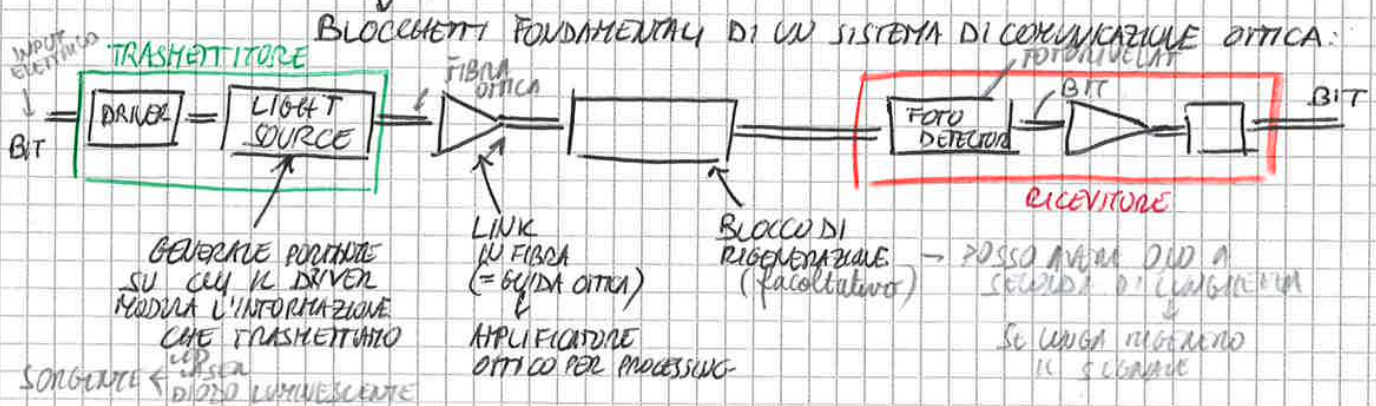
OPTOELETTRONICA → SOTTOSISTEME DELLA FOTONICA, STUDIA LE APPLICAZIONI DEI DISPOSITIVI A SEMICONDUCTORE (OLTRE AL SEGNALE ELETTRICO POSSONO MODULARE ANCHE UN SEGNALE LUMINOSO)

700/400 nm PER IL VISIBILE → SI USA NEL VICINO INFRAROSSO

LA FOTONICA SI OCCUPA DI DISPOSITIVI ANCHE NEL CAMPO DELL'INFRAROSSO E DELL'UV

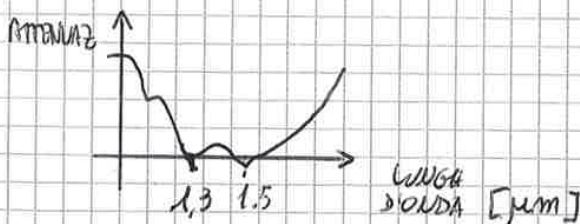
APPLICAZIONI

- COMUNICAZIONI OTTICHE → USO COME PORTANTE LA LUCE



PERCHÉ? FONDAMENTALE PER LE LUNGHE DISTANZE:

- PER SFRUTTARE MEGLIO LA BANDA
- PERCHÉ L'ATTENUAZIONE DEL SEGNALE CON FIBRE OTTICHE È $\sim \left(\frac{dB}{km}\right) \rightarrow$ POCO



C'È UN MINIMO DI ATTENUAZIONE DELLA FIBRA OTTICA

1.3 µm 2° FINESTRA
 1.55 µm 3° FINESTRA

LA SORGENTE DOVRA' GENERARE UN SEGNALE LUMINOSO A QUELLE FREQUENZE → C'È MINORI ATTENUAZIONE

IL CAVO COMASSIAME ATTENUEREBBE DECESSAMENTE DI + → VANNO BENE PER LE BREVI DISTANZE (ES: COMUNICAZIONI IN UN CHIP O IN UNA BOARD)

LA BANDA DI CUI HO BISOGNO PERÒ È SEMPRE PIÙ GRANDE

ANCHE NEL DOMINIO DELLA BREVE DISTANZA SI STA VALUTANDO L'UTILIZZO DELLA FIBRA OTTICA

PER AVERE BIT/RATE + GRANDE NON È VERO CHE FIBRA È PIÙ VELOCE → STESSA \sim MA CAMPIONA MICRO

03/10/16

LESSON A1 - MOTIVATIONS AND PRINCIPLES

FIBRA OTTICA = È UNA "GUIDA" PER LA LUCE
 (es: -cavi sottomarini tra i continenti)
 - gastroscopio

INTERCONNESSIONI OTTICHE

QUANDO DOBBIAMO CONNETTERE $\left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ CHIP} \\ 2 \text{ BOARD} \end{array} \right.$
 BASSA PERDITA LUNGO IL CAMMINO

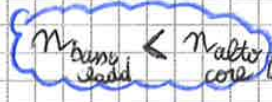
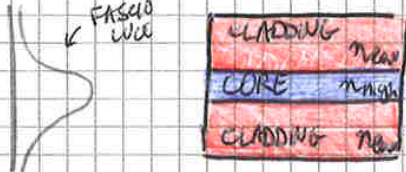
ESSENZIALI PER I DISPOSITIVI LASER A SEMICONDUCTORE DEVONO GENERARE UN CAMPO LUMINOSO CONFINATO

NEL CIRCUITO FOTONICO INTEGRATO → LA LUCE DEVE ESSERE ELABORATA CON PROCESSING, ETC... → GUIDANO / SWITCHANO / FANNO UN ROUTING
 perché fibra ottica è più flessibile

PERCHÉ? FIBRA OTTICA DEVE CONFOGHIARE IL FASCIO PER POTERLA TRASMETTERE → SFRUTTO IL SALTO DI INDICE DI RIREFRIZIONE DIVERSI

GUIDA UNIDIMENSIONALE → SLAB WAVEGUIDE

1D



PER L'INDICE DI RIREFRIZIONE DIVERSI

→ DIREZIONE DI PROPAGAZIONE

DEVO PERÒ AVERE UN CAMPO CONFINATO ANCHE NELL'ALTRA DIMENSIONE.

GUIDE BIDIMENSIONALI → GUIDE PLANARI

2D

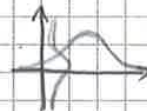


CHANNEL/PHOTONIC WIRE BURIED GUIDE

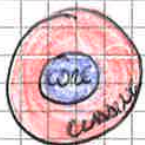


RIB/RIDGE WAVEGUIDE

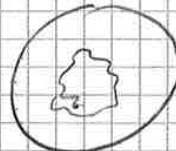
CAMPO CONFINATO IN DIREZIONE LONGITUDINALE E TRASVERSA



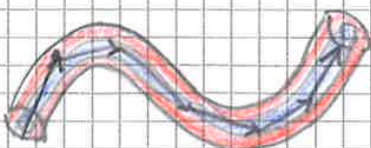
GUIDE CHE SI TROVANO IN TUTTI O QUASI I DISPOSITIVI A SEMICONDUCTORE



PRINCIPIO DELLA CONFINAZIONE FIBRA STEP-INDEX → SALTO DI INDICE



STRUTTURA DI PRINCIPIO DI UNA FIBRA OTTICA
 ↓
 GRADIED-INDEX
 ↓
 IL SALTO ANCHE GRADITAMENTE (layer a semicond. dispositivi ottici)



IL CARVO SPERIMENTA UNA VARIAZIONE DI FASE. (NON SI ATTENUA PERCHÉ HO IMPOSTO NO ATTENUAZIONI)

$\omega = 2\pi f$ $\lambda = 1,55 \mu m$

$f = \frac{c}{\lambda}$ (ATTENUASSE β SAREBBE UN NUMERO COMPLESSO)

$f = 1.93 \text{ THz}$

CALCOLO: SI SOSTITUISCONO NELLE EQUAZIONI DI MAXWELL

TE $\rightarrow E_x = 0$ $E_z = 0$ $H_y = 0$

$$\left\{ \begin{aligned} -j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j\omega \epsilon_0 \eta^2 E_y \quad (1) \\ j\beta E_y &= -j\omega \mu_0 H_x \quad (2) \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -j\omega \mu_0 H_z \quad (3) \end{aligned} \right.$$

COMPONENTI DI H PUO' ESSERE OTTENUTO IN TERMINI DI E_y

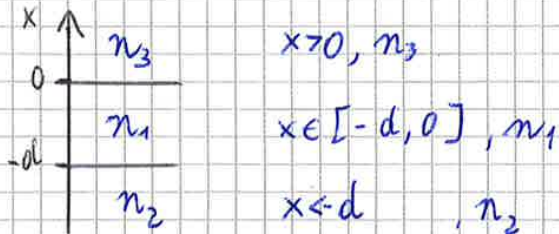
CON SOSTITUZIONI (2) E (3) IN (1)

TROVO L'EQUAZIONE D'ONDA:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (m^2 k^2 - \beta^2) E_y = 0$$
 con $k^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2$

EQUAZIONE 1D SOLUZIONE PREVEDE MODI TE.

η \rightarrow È L'INDICE DI RIFRAZIONE EFFICACE NELLE VARIE SEZIONI
 η_x FUNZIONE DI X

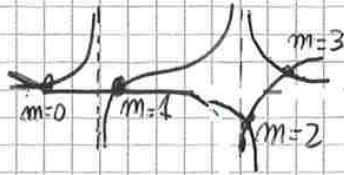


ASSOMIGLIA ALL'EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER PER UN e^- CHE SI TROVA IN UNA BUCCA DI POTENZIALE

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x)] \psi(x)$$
 [con $\psi(x)$ = FUNZIONI D'ONDA]

\rightarrow AL POSTO DI e^- CONFINATO IN BUCCA HO IL CAMPO CONFINATO IN GUIDA

DEVO TROVARE UNA SOLUZIONE GRAFICA → TROVO DELLE INTERSEZIONI



⇒ PROBLEMA: STIAMO CERCANDO DELLE SOLUZIONI CON δ REALE, PER CUI

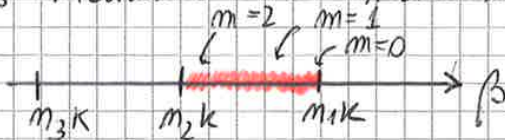
$$\delta = \sqrt{\beta^2 - k^2 m_3^2} \rightarrow \beta > m_3 k$$

⇒ INOLTRE γ DEVE ESSERE REALE PER FAR SÌ CHE FUORI DAL CORE IL CAMPO SIA EVANESCENTE

$$\beta > m_2 k$$

⇒ k_x REALE → $\beta < m_1 k$

3 RICHIESTE PER AVERE IL MODO CHE VOGLIAMO:



$$\text{MAX } \beta \rightarrow \text{MINIMO DI } k_x \Rightarrow 0 < k_x d < \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{m_1^2 - m_2^2}$$

$$\left(\text{DATO CHE } k_x = \sqrt{m_1^2 k^2 - \beta^2} \right)$$

CERCHIAMO TUTTE LE INTERSEZIONI DELLE 2 CURVE TRA ϕ E $\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{m_1^2 - m_2^2}$

$$\text{MAX}(k_x d) = \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{m_1^2 - m_2^2} = \frac{\omega}{c} d \sqrt{m_1^2 - m_2^2} = V$$

→ SE VOGLIO AVERE TANTI MODI SCEGLIERO UNO SPESSORE $>$
SE VOGLIO AVERE UN SOLO MODO → GUIDA SOTTILE ($< \frac{\pi}{2}$)

$m=0$
 $k_x = \text{PICCOLO}$

ANDAMENTO
SINCE A
COS E SIM

$m=1$

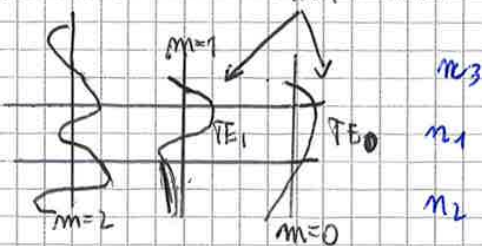


$m=2$



LIVELLO ENERGETICO
PIU' BASSO

MODI GUIDATI



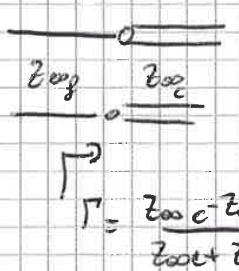
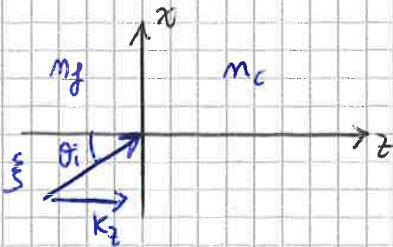
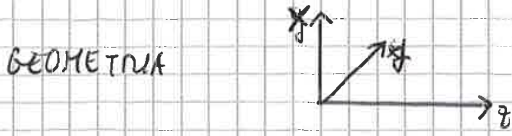
ACCETTO COME
SOLUZIONI

SE PRENDO UN MODO CHE STA
FUORI NON E PIU' UN
ESPONEENZIALE DECRESCENTE
NEL SUBSTRATO

È UN CAMPO CHE SI IRRADIA
NEL SUBSTRATO

ANALISI DELLA GUIDA OTTICA CON FORMALISMO DELLE LINEE DI TRASMISSIONE 04/30/16

$m_3 = m_c$	CLADDING → COPERTURA
$m_1 = m_f$	⇒ SILICIO CRISTALLINO ad esempio
$m_2 = m_s$	= OSSIDO SEPOLTO → SUBSTRATO



perché il fascio rimane nel core

COSA SUCCEDERÀ QUANDO ABBIAMO UN'ONDA PIANA INCIDENTE SU QUESTA INTERFACCIA:

$$k_{zi} = \sqrt{k_0^2 m_i^2 - \xi^2}$$

$$\xi = k_0 m_f \sin \theta_i$$

IL CAMPO ELETTRICO È LA SUA DIREZIONE DELL'ONDA PIANA

$$E(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-j\xi x} \hat{y}$$

T.E. $Z_{0i} = \frac{\omega \mu}{k_{zi}}$

IMPEDENZE CARATTERISTICHE: $\Gamma = \frac{k_{zf} - k_{zc}}{k_{zf} + k_{zc}}$

k_{zf}, k_{zc} SONO LE COSTANTI DI PROPAGAZIONE DELL'ONDA PIANA NOI VOGLIAMO IN FUNZIONE DI INDICE DI RIFRAZIONE

$$\Gamma = \frac{m_f \cos \theta_i - \sqrt{m_c^2 - m_f^2 \sin^2 \theta_i}}{m_f \cos \theta_i + \sqrt{m_c^2 - m_f^2 \sin^2 \theta_i}}$$

RIFLETTIVITÀ

COSA SUCCEDERÀ SE SOTTO RADICE HO UN NUMERO NEGATIVO?

CASO PARTICOLARE:

$\theta_i > \arcsin\left(\frac{m_c}{m_f}\right) = \theta_c$ $\theta_{critico}$

$$\Rightarrow \Gamma = \frac{m_f \cos \theta_i + j \sqrt{m_f^2 \sin^2 \theta_i - m_c^2}}{m_f \cos \theta_i - j \sqrt{m_f^2 \sin^2 \theta_i - m_c^2}}$$

(più in là $\Gamma \rightarrow R$)

! TUTTA L'ONDA VIENE RIFLESSA: $\Gamma = 1$

FORMULA DI SWELL PER IL COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE (RIFLETTIVITÀ)

es: INCIDENZA θ_i perpendicolare all'interfaccia $\theta_i = 0$ → refl $\frac{m_f - m_c}{m_f + m_c} = R$

QUANDO $\theta_i > \theta_c$ → SOTTO RADICE → numero complesso
 → $|\Gamma| = 1$ **RIFLESSIONE TOTALE**
 LA FASE DI Γ È $\angle \Gamma = 2 \arctan\left(\frac{\sqrt{m_f^2 \sin^2 \theta_i - m_c^2}}{m_f \cos \theta_i}\right)$

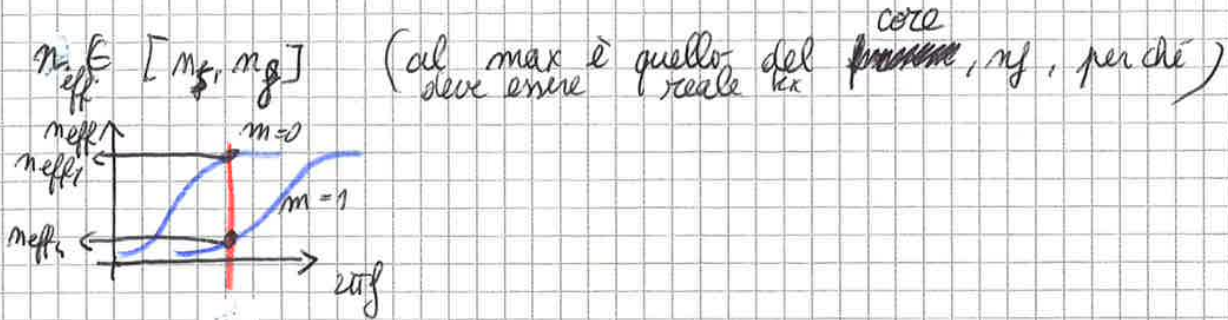
CALCOLO

$$2 \omega \sqrt{\epsilon_0} \sqrt{n_{eff}^2 - n_s^2} + 2 \omega \sqrt{\epsilon_0} \sqrt{n_{eff}^2 - n_c^2} = 2 k_0 \sqrt{n_g^2 - n_{eff}^2}$$

L'INCOGNITA È n_{eff}

TROVO k_x DEL MODO $m=0$

SOSTITUISCO $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow$ POSSO SCRIVERE LA FUNZIONE $\lambda(n_{eff})$



ORA CERCO LA PULSAZIONE CHE CORRISPONDE A λ E TROVO I n_{eff} CORRISPONDENTI AI MODI GUARDANDO LE INTERSEZIONI

SENZA PERDITE IL CAMPO SI PROPAGHERÀ COME $e^{-\beta z}$ COME IL PROFILO ALL'INTERNO DELLA GUIDA? QUANTO È LA DIFFERENZA DI FASE?

$m=0$ DICE CHE L'INDICE È IN FUNZIONE DI ω ANCHE β È IN FUNZIONE DI ω

$n_{eff} \rightarrow$ VARIA CON ω

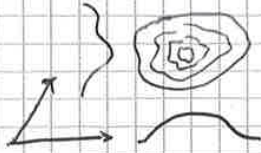
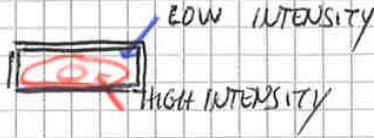
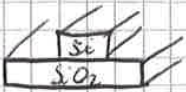
$\beta \rightarrow$ VARIA MA NON LINEARMENTE CON ω !

LA GUIDA È UNA GUIDA DISPERSIVA.

06/10/15

MODO DEL PROFILO DEL CAMPO ELETTRICO IN UNA GUIDA 2D

GUIDA RIB 2D



← ALTERNATIVAMENTE PRESENTO IL PROFILO DEL CAMPO ELETTRICO CON LE CURVE DI LIVELLO

DAL PRODOTTO DEL CAMPO LUNGO x E LUNGO y OTTIENGO IL PROFILO BIDIMENSIONALE

LEZIONE A2 - ESEMPI DI GUIDE E PARAMETRI

MODO DI UNA GUIDA = SOLUZIONE DELL'EQZ DI MAXWELL CHE DESCRIVE UN CAMPO CHE SI MANTIENE UGUALE PROPAGANDOSI LUNGO LA GUIDA

↓ CAMBIA LA FASE MA NON IL MODULO (DATO CHE ABBIAMO IPOTIZZATO: LOSS LESS)

MODI → SONO UN INSIEME ORTOGONALE → PERMETTONO DI DESCRIVERE UN QUALSIASI CAMPO IN MODO UNIVOCO

POTENZA TRASPORTATA DAL MODO

$$I_v = \vec{S}_v \cdot \hat{z}$$

INTENSITA' DELLA GUIDA

$$P_{TE} = \frac{2\beta}{\omega\mu_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_y|^2 dx dy$$

VA COME IL MODULO DEL CAMPO ELETTRICO E_y AL QUADRATO

$$P_{TM} = \frac{2\beta}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\epsilon(x,y)} |H_z|^2 dx dy$$

VA COME IL MODULO DEL CAMPO MAGNETICO SU z AL QUADRATO

FATTORE DI CONFINAMENTO OTTICO Γ

(IL COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE LO) CHIAMATO γ

IDEALMENTE VOUREMO AVERE $\Gamma = 1$

↓ VANTAGGIO QUANTITATIVO DI POTENZA IN CORE RISPETTO ALLA POTENZA TOTALE

$$\Gamma_{TE} = \frac{\text{POWER CORE}}{\text{POWER TOTAL}} = \frac{\int_{-d_1}^{d_2} |E_y(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_y(x)|^2 dx}$$

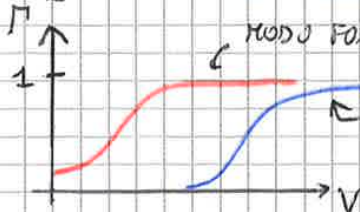
← NEL CASO DELLO SLAB INTEGRALO SULLO SPESSORE DEL CORE

OBIETTIVO: $\Gamma_{TE} = 1$

SE FISSIAMO

gli INDICI DI RIERAZIONE n_1, n_2

→ V È PROPORZIONALE ALLO SPESSORE DELLA GUIDA



← MODO FONDAMENTALE → È SEMPRE QUELLO PIÙ CONFINATO NELLA GUIDA

← MODO SUPERIORE → MENO GUIDATO

! ↓ PIÙ UNA GUIDA È SPESSA PIÙ ABBIAMO MODI

STRIP (SILICON) WAVEGUIDE

3.5 - 1.45 come
SAZIO DI INDICE

FORTE CONTRASTO DI
INDICE E COPERTURA BENE

$$V = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

(POSSO AVERE ANCHE UN STRATO
DI SILICIO SOTTILE e COMPATIBILE
CON TECH CMOS (x 10 nm))

LASER WAVEGUIDE

LASER A SEMICONDUCTORE

SAZIO DI INDICE È MOLTO
PIÙ BASSO!

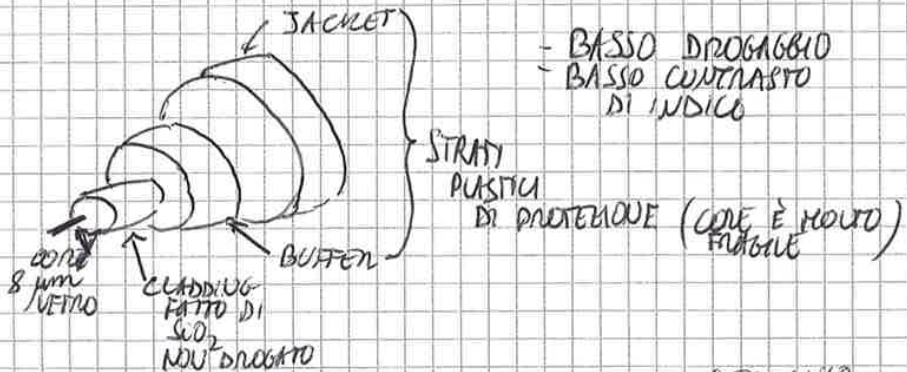
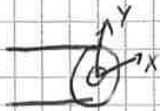
perché $n_1 = 3.15$
 $n_2 = 3.5$

VANTAGGI DAL PUNTO DI VISTA TECNOLOGICO

- SILICIO → È TRASPARENTE A BASSISSIME PERDITE } ALCI A CHE USO IN TELECOMUNICAZIONI
- POSSO FARE GEOMETRIE ANCHE COMPLICATE: ANCHE CURVE
 HO POCHE PERDITE QUANDO LA GUIDA CURVA
 GEOMETRIE COMPLICATE PER OCCUPARE POCO SPAZIO
 (lab → analisi dei modi delle 2 strutture)

FIBRA OTTICA

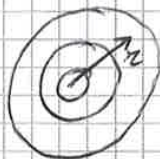
SiO₂ (SILICIO)



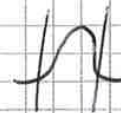
CORE → È LA PARTE DROGATA DELLA FIBRA → DROGATO CON GERMANIO
 A_n = 0.005 È UNA GUIDA A BASSO CONTRASTO DI INDICE

PROFILO DI INTENSITÀ NEL MODO FONDAMENTALE

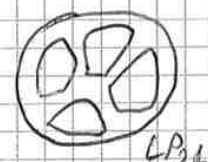
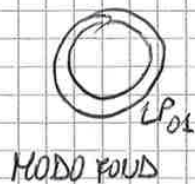
$$E_z(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi w_p^2}} e^{-r^2/w_p^2}$$



profilo simile ad una gaussiana

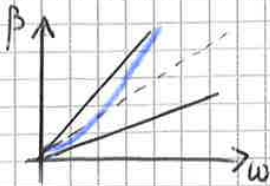


MODI SUPERIORI → PROFILI DI INTENSITÀ



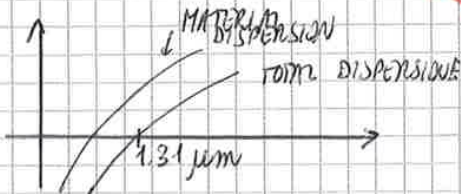
DISPERSIONE (\neq DISTORSIONE)

LA COSTANTE DI PROPAGAZIONE β IN FUNZIONE DI ω NON È UNA RETTA MA, PER COME SONO FATTE LE GUIDE



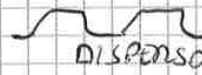
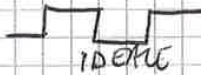
PARLIAMO DI DISPERSIONE QUANDO β NON È FUNZIONE LINEARE ~~IN~~ DI ω
 PER QUANTIFICARE QUANTO UNA GUIDA È DISPERSIVA:

$$D_\beta = c\omega \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = \lambda^2 \frac{d^2n_p}{d\lambda^2}$$



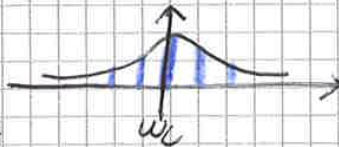
LA DISPERSIONE HA UNO ϕ ATTORNO A 1.31 μm

DATO CHE LA MIA INFORMAZIONE SONO DEI BIT



STO MANDANDO UN IMPULSO IN UNA GUIDA DISPERSIVA

$$\omega_c = \frac{2\pi}{T_c}$$



SE LA MIA GUIDA È DISPERSIVA TROVO UN SEGNALE FATTO CON OGNI COMPONENTE DELL'IMPULSO

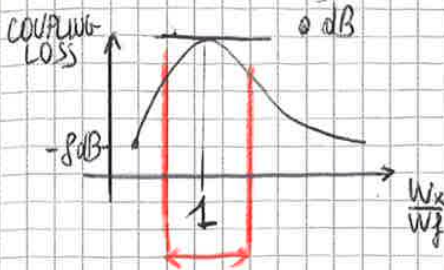
VERRÀ TRASMESSA CON UNA VELOCITÀ DIVERSA \rightarrow ARRIVA DISTORTO ANCHE PERCHÉ NON RIESCO PIÙ A RICOSTRUIRE CORRETTAMENTE L'IMMAGINE

DISPERSIONE
 \downarrow
 PARAMETRO FISICO

\neq

DISTORSIONE

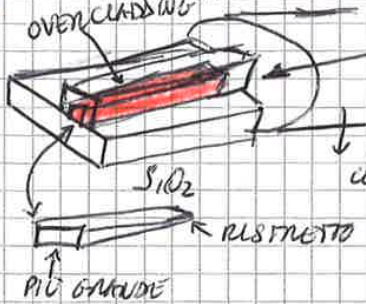
"RISULTATO" CHE PUÒ ESSERE DOVUTO A DIVERSE CAUSE
 IMPULSO DIVENSO DA COME ERA PARTITO



PERDITE ACCETTABILI

QUANDO I 2 SPOT SIZE SONO MOLTO SIMILI → SI HA UNA PERDITA DI 0 dB

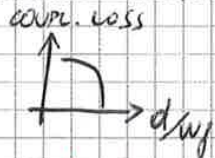
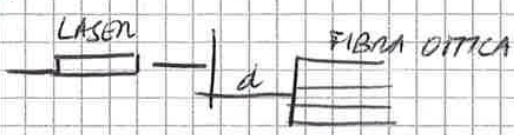
! SI ACCETTANO PERDITE DI ~ 3dB (A VOLTE RICHIESTE PIÙ STRINGENTI)



RESTRINGO LA LUNGHEZZA DELLA GUIDA PER DIMINUIRE IL COUPLAMENTO

POTREI AVERE BASSISSIME EFFICIENZE DI ACCOPPIAMENTO

⇒! DISALLINEAMENTI LATERALI CAUSANO ANCHE PERDITE DI ACCOPPIAMENTO



PARLANO DI TOLLERANZE SOTTO IL μm

LEZIONE A3 - INTERCONNESSIONI OTTICHE

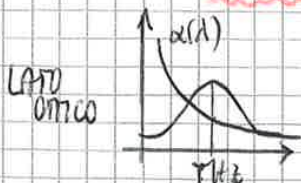
INTERCONNESSIONI OTTICHE → PERCHÉ? QUANDO USIAMO LA LUCE PER INTERCONNESSIONI A BREVE DISTANZA
 IDEA → DATO CHE LE COMUNICAZIONI OTTICHE HANNO PRESTAZIONI OTTIME PER LE LUNGHE DISTANZE → LE USIAMO ANCHE PER LA BREVE DISTANZA

es: tra i computer, tra le board

PROBLEMA: PER LA LUNGA DISTANZA L'OTTICA È DI GRAN LUNGA PIÙ VANTAGGIOSA
 SULLE BOARD QUELLO CHE DOMINA IL MERCATO SONO DELLE CONNESSIONI DI TIPO ELETTRICO

COME DISCRIMINO? LATO OTTICO → DEVO MODULARE LA PORTATA OTTICA PER INSERIRE L'INFORMATICA
 → ELETTRICO → NON HO PORTANTI

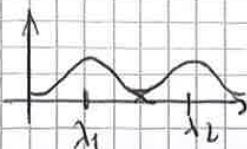
PUNTO CHIAVE: CON UN'INTERCONNESSIONE ELETTRICA MAN MANO CHE LA FREQUENZA AUMENTA → AUMENTANO LE PERDITE



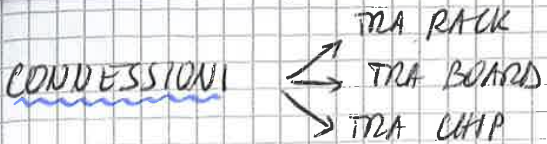
LATO ELETTRICO: OGNI PIN È UN FILO

> # CANALI ⇒ > # PISTE DI INECC. RECUP. PROBLEMA DEL COUPLING

LATO OTTICO → NO PROBLEM! ALL'INTERNO DI GUIDA OTTICA POSSO TRASMETTERE PIÙ CANALI INSIEME A DIVERSE LUNGHEZZE D'ONDA!

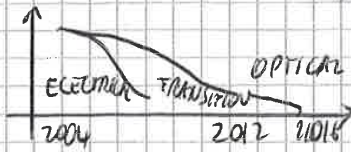


+ CANALI DIVERSI IN STESSA GUIDA NON SI PARLANO



(DA REALIZZARE IN FUTURO → INTERNO AL CHIP)

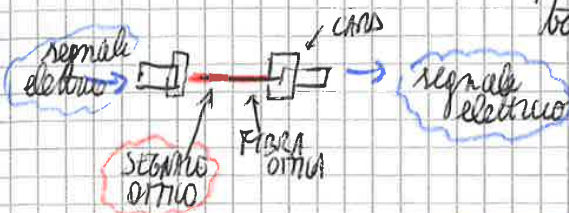
TIME DIAGRAM



PARAMETRI CHIAVE: VELOCITA' E DISTANZA

CONNESSIONI RACK TO RACK

ACTIVE OPTICAL CABLE → per chi installa non c'è differenza tra cavo ottico & elettrico



CONNESSIONI BOARD TO BOARD (FOTONICA IN BOARD) → BLOCCHI SEPARATI



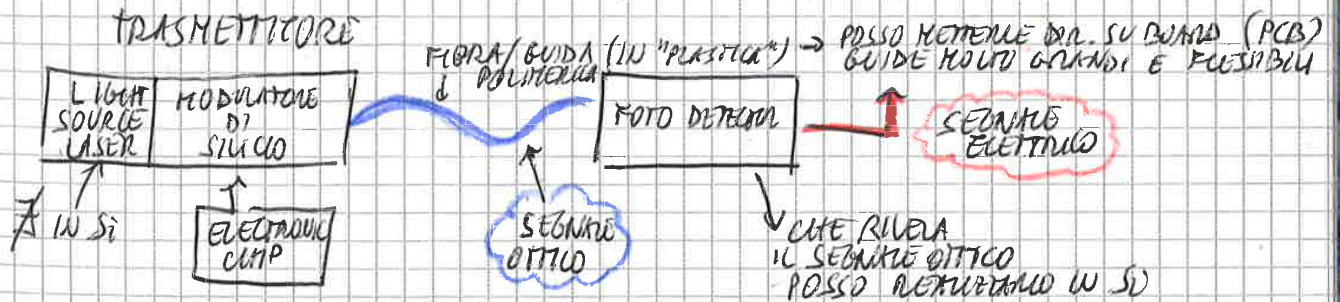
OPTICAL TRANSCIVER → I PIEDINI SI APPOGGIANO SULLA BASE DEL PROCESSORE

↓ SI CERCA DI AVVICINARE LA PARTE OTTICA SEMPRE PIÙ A QUELLA ELETTRICA

CONNESSIONI CHIP TO CHIP

- 1) CHIP FOTONICO IN SILICIO
- 2) CONNESSIONI PIÙ FLESSIBILI RISPETTO A FIBRE OTTICHE

per fare = SILICON PHOTONICS / GUIDE OTTICHE POLIMERICHE



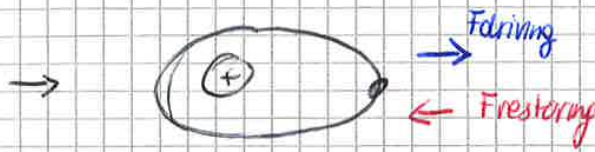
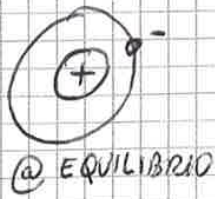
PRO & CONTRO

- ✓ Si → TRASPARENTE IN ZONE 1.3; 1.6 μm
- ✓ COMPATIBILITÀ CMOS
- ✓ LOW COST
- ✓ POSSO REALIZZARNE PICCOLE + ALTO CONTRASTO DI INDICE

- X NON POSSO USARE COME FOTORELATTORE
 - X DIFFICILE REALIZZARE MODULATORI COMPATTI
 - X NON POSSO A GENERARE WCE / EMISSIONE FOTONICA
- } QUESTA TECNOLOGIA DIFFICILMENTE IMPLEMENTABILE LOW COST

MODELLO CLASSICO DI OSCILLATORE ELETTRONICO

DATA LA CONDIZIONE DI EQUILIBRIO: NUCLEO CARICO \oplus INTORNO A CUI ORBITA e^-



APPLICANDO UN CAMPO ELETTRICO \rightarrow INDUCE LO SPOSTAMENTO DI ELETTRONE

$$F_{driving} = -e E_x(t)$$

CARICA e^- CAMPO ELETTRICO APPLICATO (CASO 1D)

MA e^- È FUORI EQUILIBRIO \rightarrow È RIATTRATTO DAL NUCLEO DA FORZA CHE VUOLE RIPORTARE IL SISTEMA ALL'EQUILIBRIO

$$F_{rest} = -kx(t)$$

\Rightarrow IL SISTEMA È L'EQUIVALENTE DEL SISTEMA MASSA-MOLLA

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{driving} + F_{restoring} = -kx(t) - eE_x(t)$$

QUAL È L'OSCILLAZIONE LIBERA DEL SISTEMA? (RIMOSSO IL CAMPO ELETTRICO)

LA MASSA OSCILLA AVANTI E INDIETRO A PULSAZIONE $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$

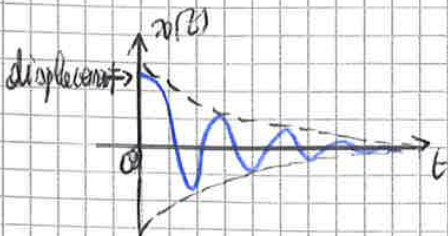
$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \frac{k}{m} x(t) = 0$$

MA L'OSCILLAZIONE NON DURA PER SEMPRE! CI SONO FORZE D'ATTRITO CHE SMOZZANO E PORTANO IL SISTEMA ALL'EQUILIBRIO

DEVO AGGIUNGERE IL TERMINE DI DAMPING

$$(1) \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x(t) = -\frac{e}{m} E_x(t)$$

HO APPLICATO $E \rightarrow$ SE @ $t=0$ RIMUOVO LA FORZANTE $\rightarrow x(t)$ RILASSA NELLA SUA POSIZIONE DI EQUILIBRIO MA CON UN'OSCILLAZIONE DI QUESTO TIPO



$$x(t) = x(0) e^{-\frac{\gamma}{2}t} e^{+j\omega_1 t}$$

ω_1 = FREQUENZA DI RISONANZA

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2} \approx \omega_0$$

γ : COEFFICIENTE DI SMORZAMENTO

RILASSA CON OSCILLAZIONI SMORZATE

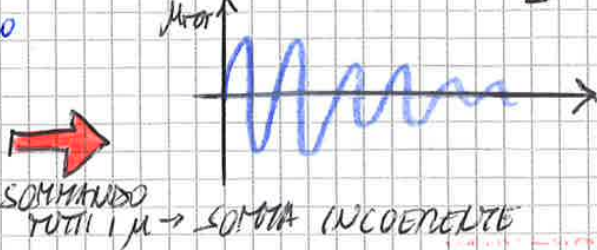
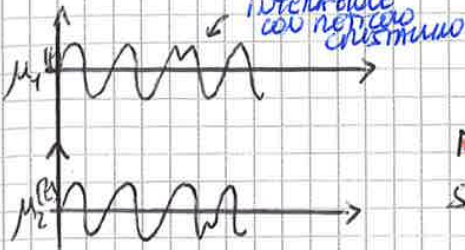
È IMPOSSIBILE CHE OSCILLINO TUTTI IN FASE = (A SISTEMA COSI)

- COL TEMPO LE MOLE OSCILLANO A FREQUENZA DIVERSA ALLA IESIMA LUNA → COL TEMPO SI PERDE IL SINCRONISMO DI FASE

- È INTERAGISCE CON FOTONI ED È SOTTOPOSTO A MECCANISMI DI COLLEZIONE

DEPHASING

ALL'INIZIO TUTTI I FOTONI OSCILLANO IN FASE POI...!



SMORZAMENTO DI INTENSITÀ OSCILLAZIONE

POLARIZZAZIONE MACROSCOPICA = $\mu_{tot} = \mu_0 e^{-\left[-\delta/2 + \frac{1}{T_2}\right](t-t_0) + j\omega_0(t-t_0) + j\phi_0}$

DOVUTO A SMORZAMENTO DI FASE

$\gamma > T \Rightarrow T_2$ DIMINUISCE → DOMINA RISPETTO AL RESTO

↓
DATO CHE LA POLARIZZAZIONE VA COME μ

(2) $\frac{d^2 p_x(t)}{dt^2} + (\gamma + 2/T_2) \frac{dp_x(t)}{dt} + \omega_a^2 p_x(t) = \frac{Ne^2}{m} E_x(t)$

POLARIZZAZIONE → VA IN EQUAZIONE DI MAXWELL

$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{P}(\vec{r}, t)$

$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \vec{H}(\vec{r}, t) + \mu_0 \vec{M}(\vec{r}, t)$

FACCIO I CONTI PER VEDERE COME IL SISTEMA RISPONDE AL CAMPO ELETTRICO

$E_x(t)$: CAMPO ELETTRICO LUNGO X

$E_x(t) = \text{Re} \{ \tilde{E}_x e^{j\omega t} \} = \frac{1}{2} [\tilde{E}_x e^{j\omega t} - \tilde{E}_x^* e^{-j\omega t}]$
(ω = frequenza del campo elettrico applicato)

↓ LA RISPOSTA DEL MATERIALE

$P_x(t) = \frac{1}{2} [\tilde{P}_x e^{j\omega t} - \tilde{P}_x^* e^{-j\omega t}]$ → DATO E_x COS'È LA RISPOSTA E DA COSA DIPENDE? QUANTIFICO P_x

APPLICO FACCIO $E_x(t) = \tilde{E}_x e^{j\omega t}$ LE DERIVATE (O LE TRASFORMATE DI FOURIER) E SOSTITUISCO IN (2)

$e^{j\omega t} [-\omega^2 \tilde{P}_x + (\gamma + 2/T_2) j\omega \tilde{P}_x + \omega_a^2 \tilde{P}_x] = \frac{Ne^2}{m} \tilde{E}_x e^{j\omega t}$

OTTENGO $\tilde{P}_x(\omega) = \frac{Ne^2}{m} \frac{\tilde{E}_x}{\omega_a^2 - \omega^2 + j\omega(\gamma + 2/T_2)}$

RISPOSTA DIMENSA IN BASE A PULSABIONE NOTA PER ECCLITARE IL MEDIO

SE APPLICO UN CAMPO ELETTRICO VICINO A $\omega_0 \rightarrow$ QUESTO SUBISCE UNA ROTAZIONE DI FASE NULLA SE ECCITAZIONE A ω_0

IL CAMPO ELETTRICO SUBISCE ASSORBIMENTO / AMPLIFICAZIONE IN BASE AL SEGNO DI χ''

DIPENDE DA QUANTI DI POLI POSSONO $\left\{ \begin{array}{l} \text{PRENDERE} \\ \text{CEDERE} \end{array} \right\}$ ENERGIA DA $E^0 \rightarrow$ MATERIALE \rightarrow ASSORBIMENTO

TRASFERIMENTO DI ENERGIA $\left\{ \begin{array}{l} \uparrow \\ \downarrow \end{array} \right\}$ DA MATERIALE $\rightarrow E^0 \rightarrow$ AMPLIFICAZIONE

DEVO QUANTIFICARE QUESTO TRASFERIMENTO DI ENERGIA ($N = \# e^0$ che possono ricevere energia)

SUPPONGO \rightarrow SISTEMA IN EQUILIBRIO

\rightarrow UN PO' DI e^0 IN STATO $E_2 \rightarrow$ PASSANDO IN E_1 RESTITUISCONO ENERGIA AL SISTEMA

Nota SEGNO DI $\chi'' \rightarrow$ DIPENDE DA $\# e^0$ IN $\begin{matrix} \uparrow E_1 \\ \downarrow E_2 \end{matrix}$ ovvero da N

$\hookrightarrow \chi'' < 0$ ASSORBIMENTO \rightarrow TERME DI PERDITA

$\chi'' > 0$ AMPLIFICAZIONE \rightarrow RESTITUISCO ENERGIA A E^0 13/10/16

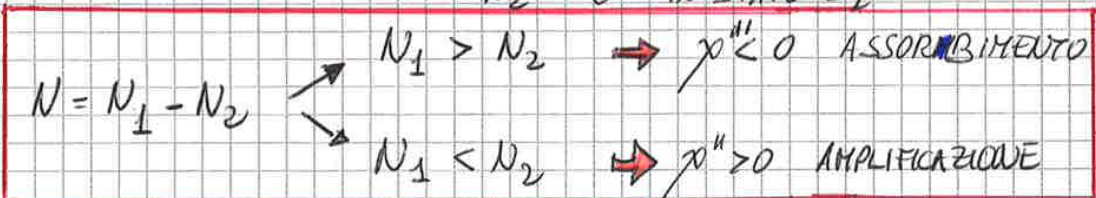
N_2 — 0 — E_2

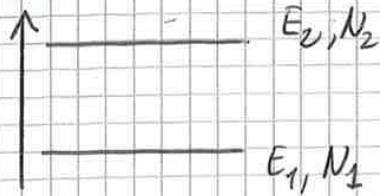
N_1 — ● — E_1

χ'' DIPENDE DA $N =$ DENSITA' DI DIPOLI PER UNITA' DI VOLUME

GENERALIZZANDO $\rightarrow N_1 \rightarrow e^0$ IN STATO E_1

$\rightarrow N_2 \rightarrow e^0$ IN STATO E_2





ENERGIA TOTALE

$$U_a(t) = N_2 E_2 + N_1 E_1$$

con $N_2 = \# e^-$ su LIVELLO E_2
 N_1 E_1

$$N_2 + N_1 = N_{TOT}$$

COSTANTE CHE NON CAMBIA

- $U_a(t) \uparrow \rightarrow$ per aumentarla devo far crescere E_2
 $N_2 \downarrow$ QUINDI $N_1 \uparrow$ perché somma costante



ASSORBIMENTO

- $U_a(t) \downarrow \rightarrow$ per diminuirlo devo far crescere E_2
 $N_2 \uparrow$ QUINDI $N_1 \downarrow$



EMISSIONE STIMOLATA

SCRIVO L'ESPRESSIONE DELLA POTENZA IN FUNZIONE DI X

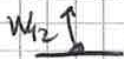
$\frac{dU_a}{dt} \rightarrow$ DIPENDE DA SOMMA DI \rightarrow 1 TERMINE DIPENDENTE DA N_1
 \rightarrow 1 TERMINE DIPENDENTE DA N_2

SUPPONGO $\vec{E} @ \omega = \omega_a \rightarrow$ PER CUI $E_2 - E_1 = \hbar \omega_a$

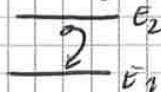
$$\frac{dU_a}{dt} = \left(\frac{3}{8\pi^2} \frac{\gamma}{\hbar \omega_a} \frac{1}{\hbar} \hbar \omega_a |\tilde{E}_x|^2 \right) (N_1 - N_2)$$

$$\frac{dU_a}{dt} = W_{12} \hbar \omega_a N_1 - W_{21} \hbar \omega_a N_2$$

ENERGIA CHE PRENDE
 IL FOTONE \rightarrow DA LA
 PROBABILITÀ DI PASSAGGIO
 DA E_1 A E_2



ENERGIA per cui
 ELETTRONI PASSANO
 DA E_2 A E_1



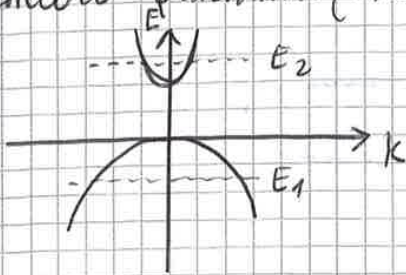
@ EQUILIBRIO $W_{12} = W_{21}$

DIPENDE DA INTENSITÀ DI LUCE
 INCIDENTE

CALCOLO DI GUARDANDO E ASSORBIMENTO IN UN SEMICONDUCTORE

CALCOLO QUANTITATIVO (NON CI INTERESSANO LE COSTANTI)

DIAGRAMMA DI DISPERSIONE



GAP DIRETTO

LA FUNZIONE D'ONDA DI UN ELETTRONE È

$$\psi(r) = e^{-jkr - \alpha r}$$

E IL SUO QUADRATO $|\psi|^2 = |e^{-jkr - \alpha r}|^2$

CI DA LA PROBABILITÀ DI TROVARE L'ELETTRONE NEL PUNTO r

È UGUALE IN OGNI PUNTO DEL MATERIALE

MA CHE CAMBIA È L'ENERGIA, CHE DIPENDE DA k

DA LA m_{eff} = MASSA EQUIVALENTE DI UN ELETTRONE NEL CRISTALLO
 DIPENDE DA COME È FATTO IL CRISTALLO (COME SONO GLI ATOMI E COM'È LA STRUTTURA CRISTALLINA)

GLI ELETTRONI IN BV SONO PIÙ LEGATI → quindi CURVATURA PIÙ LASSA
 E HANNO $m_{eff} >$ DI QUELLA DI UN ELETTRONE

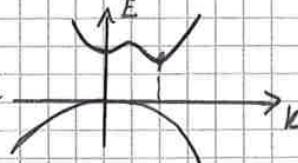
A GAP DIRETTO



MAX DI BV È ALLINEATO CON MIN DI BC

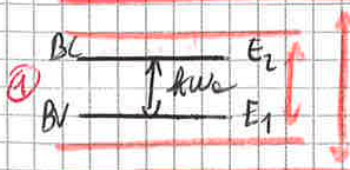
SEMICONDUCTORE

A GAP INDIRETTO



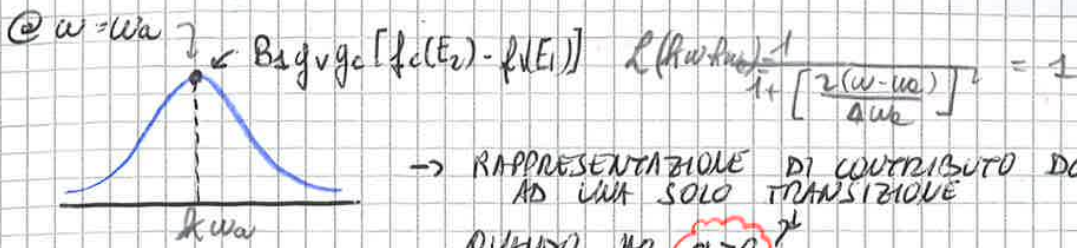
MAX BV NON È ALLINEATO CON MIN BC

NOI GUARDIAMO I SEMICONDUCTORI A GAP DIRETTO
 FISSO UN LIVELLO E_1 IN BV E E_2 IN BC



MA TANTE ENERGIE IN BV E BC → ORA DEVO ADATTARE IL MODELLO AL MODELLO DEL SEMICONDUCTORE

17/10/16



→ RAPPRESENTAZIONE DI CONTRIBUTO DOWTO AD UNA SOLO TRANSIZIONE

QUANDO HO $g > 0$?

B_{12} → COSTANTE

$g_v g_c$ → NUMERO POSITIVO

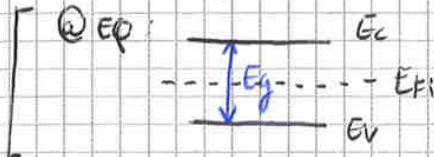
CONDIZIONE: $f_c(E_2) > f_v(E_1)$

Probabilità di avere e^- in E_2 > Probabilità di avere e^- in E_1

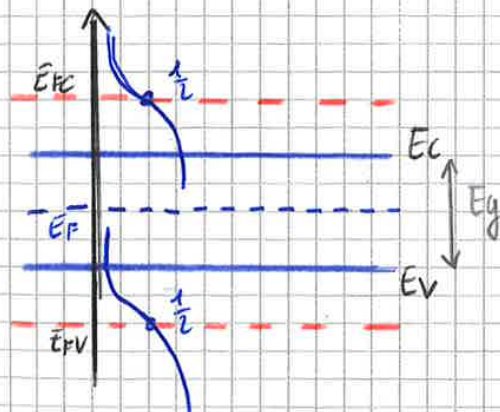
EMISSIONE STIMOLATA

QUANDO SI VERIFICA: $g > 0$?

NON ALL'EQUILIBRIO:



E_F → STA IN MEZZO
NON È UNA CONDIZIONE CHE DÀ GUADAGNO



E_{FC}
 E_{FV} } QUASI LIVELLI DI FERMI

LA PROBABILITÀ DI TROVARE e^- È ESPRESSA DA FUNZIONI DI FERMI

$$f_c(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_{FC}}{kT}}}$$

$$f_v(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_{FV}}{kT}}}$$

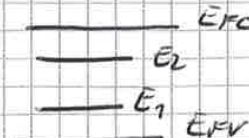
FUNZIONI DI FERMI PER TROVARE e^- IN BC E BV

$g > 0$ → SE $f_v < f_c$ → $\frac{E_2 - E_{FC}}{kT} < \frac{E_1 - E_{FV}}{kT}$

$f_v(E_1) = 1 - f_v(E_1)$

$E_{FC} - E_{FV} > E_2 - E_1$

FISSATA UNA TRANSIZIONE HO $g > 0$ SOLO SE:



IN PRATICA QUANTO VALE IL PICCO?



SPESSE L'ALLARGAMENTO PRENDE IL NOME DI ALLARGAMENTO OMOGENEO DELLA LINEA DI EMISSIONE

PER VIA DEL DEPLACING DOWTO ALLA POLARIZZAZIONE P' LO SPILLO SI SPANCI

MA SE SONO AD UN GENERICO ω → COMUNQUE e^- SI PRENDE ENERGIA

GRAFICI DI SPETTRO DI GUADAGNO: PARTENDO DA CASO IN CUI NON HO INVERSIONE NEL CASO IN CUI HO SEPARATO I LIVELLI DI FERMI

CASO ①

$$f_c^e(E_2) = 0$$

$$f_v^h(E_1) = 0$$

BC vuota di e^-

BV piena di e^-

SOLO ENERGIA TERMICA PUÒ TRANSDARE e^- IN BC

IN E_g NON HO STATI DISPONIBILI

$$g = 0$$

IN PUNTO $f_c^e = 0, f_v^h = 0$

$$[0 + 0 - 1] = -1$$

CONSIDERANDO

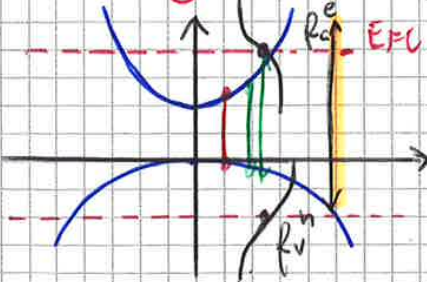
IL PICCO DIPENDE DALLA DENSITÀ DEGLI STATI

LA DENSITÀ DEGLI STATI CRESCE CON LA RADICE DELL'ENERGIA

SPETTRO DI ASSORBIMENTO → È LO SPETTRO DI GUADAGNO TOTALE CHE VA COME L'ENERGIA (VA COME BULLE)

CASO ②

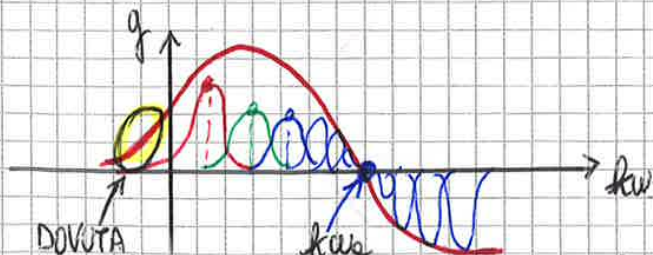
→ SUPPONGO DI ESSERE USCITA DA CONDIZIONE DI EQUILIBRIO



$f_c^e \neq 0$
 $f_v^e \neq 0$ } A SECONDA DI DOVE VALUTO LA FUNZIONE HO UN DIVERSO GUADAGNO

→ RICOMBINAZIONI CON k_{av} SOTTO LA DISTANZA DEI QUALI LIVELLI DI FERMI
 $[f_c^e + f_v^h - 1] = [> 0]$

la funzione di Fermi di e^- ed e^+ diminuisce



DOVUTA AL FATTO CHE LE CORRENTE VICINO A E_1 Danno un po' di contributo

$$E_{fc} - E_{fv} \rightarrow f_c^e = f_v^e = \frac{1}{2} \rightarrow \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - 1 \right] = 0$$

SOMMANDO TUTTI I CONTRIBUTI → SI OTTIENE ANDAMENTO COMPLESSIVO

AMPLIFICAZIONE DELLA LUCE

CONTRIBUTI FUORI DAI LIVELLI DI FERMI

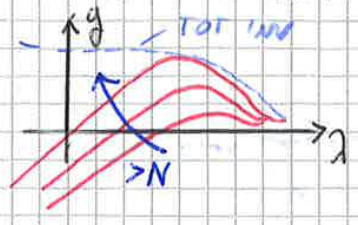
$$\left. \begin{matrix} f_c \rightarrow \frac{1}{2} \rightarrow 0 \\ f_v \rightarrow \frac{1}{2} \rightarrow 0 \end{matrix} \right\} [< 0]$$

18/10/16

AL CRESCERE DI SEPARAZIONE TRA LIVELLI DI FERMI → CRESCONO N, P (=DENSITÀ DI PORTATORI)

SI RIPORTA LO SPETTRO DI GUADAGNO IN FUNZIONE DELLA DENSITÀ DI PORTATORI

MAN MANO CHE ACCUMULO PORTATORI → IL GUADAGNO CRESCE

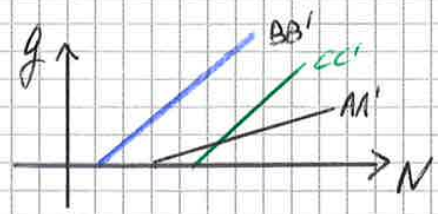
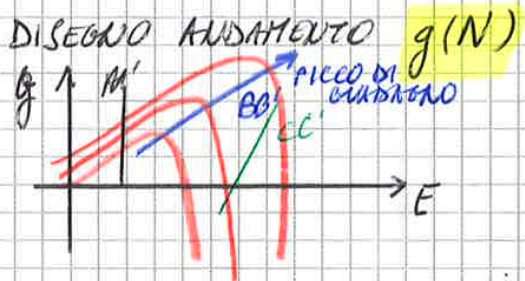


SE PARLO DI λ
IL GRAFICO È RIBALTATO RISPETTO ALL'ENERGIA IN QUANTO

$$E = h\omega = h2\pi f = h2\pi \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{2\pi hc}{E}$$

PIÙ CRESCE N
PIÙ λ È BASSA



PICCO DI g → CRESCE LINERAMENTE CON N

- PER FOTONI INCIDENTI @ $E <$ PICCO DI GUADAGNO (AA')
- PER FOTONI INCIDENTI A DESTRA DEL PICCO IL GUADAGNO CRESCE DI PIÙ DI QUELLI A SX

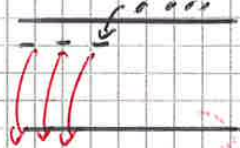
⇒ UTILE QUANDO PARLIAMO DI LASER A SEMICONDUCTORE
È IMPORTANTE IL GUADAGNO DIFFERENZIALE → CIOÈ QUANTO VARIA IL GUADAGNO IN FUNZIONE DEL NUMERO DI PORTATORI

SPETTRO DI EMISSIONE SPONTANEA



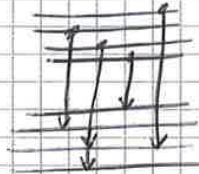
POSSO AVER ACCUMULATO e^- IN BANCA DI CONDUZIONE
 E DATO ENERGIA IN QUALCHE MODO
 ANCHE SE NON C'E' CAMPO ELETTRICO INCIDENTE
 e^- RICALDANO IN BV \rightarrow RICOMBINAZIONE PU' ESSERE
 RADIATIVA CON EMISSIONE DI FOTONI
 EMISSIONE SPONTANEA PERCHE' NON
 INDOTTA DA SEGNALE OTTICO INCIDENTE

CI SONO RICOMBINAZIONI NON RADIATIVE \rightarrow RICOMBINAZIONE ATTRAVERSO
 LIVELLI TRAPPOLA



ENERGIA PIU' SCIATA \rightarrow NO
 DATA IN FOTONI EMISSIONE
 FOTONI

EMISSIONE SPONTANEA \rightarrow TUTTI LIVELLI IN BC, BV



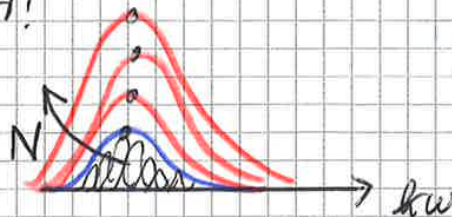
SPETTRO DI EMISSIONE \rightarrow SI OTTIENE DA SOMMA DI TUTTE LE
 RICOMBINAZIONI
 (per guadagno)

$$R_{sp}(\hbar\omega) \sim \int_{E_g}^{\infty} A_{21} g_c f_c^e \cdot f_v^h \cdot L(\hbar\omega - \hbar\omega_{cv}) d(\hbar\omega_{cv})$$

LA PROBABILITA' CHE UNA RICOMBINAZIONE AVVENGA
 DIPENDE DALLA PROBABILITA' DI AVERE $\rightarrow e^-$ IN BC f_c^e
 e^- IN BV f_v^h
 $f_c^e \cdot f_v^h$

DIPENDE NON SOLO DA PROBABILITA' DI e^- MA ANCHE
 DALLA DENSITA' DI STATI!

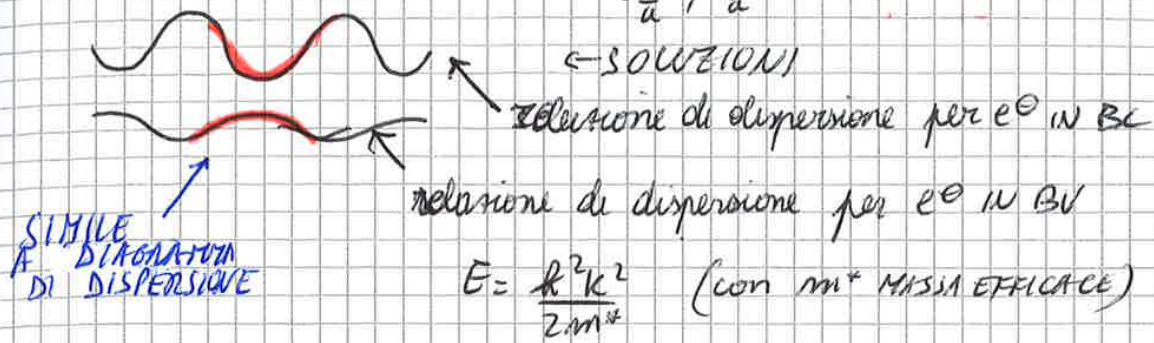
GRAFICO QUALITATIVO
 PICCO CRESCE AL
 CRESCERE DI N



\propto LORENTZIANA DIPENDE DA $g_c \cdot f_c^e \cdot f_v^h$ \rightarrow SEMPRE
 POSITIVA
 PERCHE' SONO
 SEMPRE > 0

EMISSIONE ~~SPONTANEA~~ ^{SPONTANEA} \rightarrow A BASE DI FUNZIONAMENTO
 DEI LED

⇒ PER EFFETTO DI ACCOPPIAMENTO → SINGOLO LIVELLO SI SPLITTA
CON PERIODI $\frac{a}{2}$

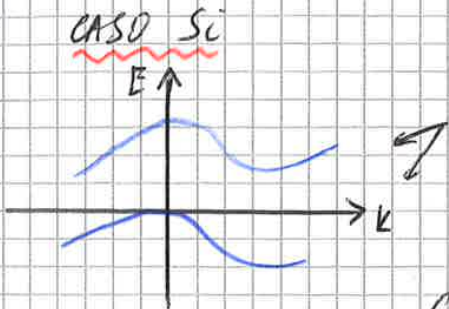


SEMICONDUCTORI PER OPTOELETTRONICA

(IN REALTÀ RETICOLI CRISTALLINI SONO 3D)

Si → HA STRUTTURA → DEL DIAMANTE (Si, C, Ge)

$GeAs, InP, SiC$ → STRUTTURA ZINCBLEND



ENERGIA e^0 DIVERSA DA e^0
PERCHÉ Si È A GAP INDIRETTO
(dato che $\min(BV) \neq \max(BV)$)

e^0 STANNO A ENERGIA BASSA

CONSEGUENZA TRAGICA → CAMBIA k

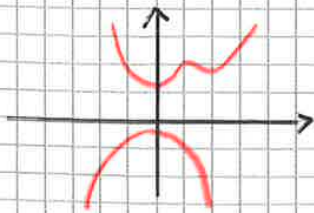
NON POSSO AVERE \leftarrow ASSORBIMENTO
EMISSIONE STIMOLATA

! NON POSSO USARE Si IN OPTOELETTRONICA!

PER PROPRIETÀ INTRINSECA NON È BUONO PER FARE LASER

Si < ^{GUIDA} CAMP ELETTRONICA

MA NON PUÒ FARE LA Sorgente → DEVO PASSARE A MATERIALI A GAP DIRETTO



$GeAs$ = ARSENURO DI GALLIO

→ CON MATERIALI COMPOSTI DI GRUPPI 3^2

InP

(4° COL = $C, Si, Ge \dots$)

$GeAs, InP$ → più usati in emissione vicino infrarosso

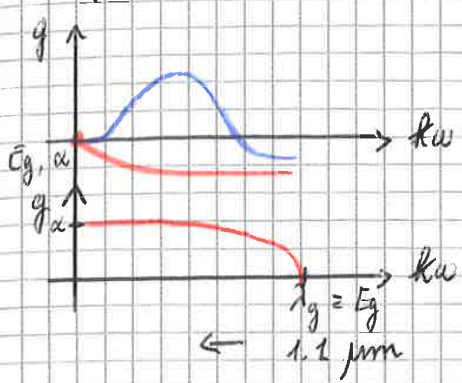
20/10/16

SPETTRO DI ASSORBIMENTO DEL SILICIO

$$\left. \begin{aligned} f_c^e &= \emptyset \\ f_v^h &= \emptyset \end{aligned} \right\} \text{TUTTI GLI } e^{\ominus} \text{ IN BV} \rightarrow \text{MATERIALE CHE ASSORBE PARAHENTEMENTE}$$

ASSORBE IL SEGNALE OTTICO DA LUNGHEZZA D'ONDA DI 1.1 μm IN GIÙ

TRASAPARENTE ALE LUNGHEZZE D'ONDA DI EMISSIONI OTTICHE!



Ge (GERMANIO) \rightarrow E_g PIÙ PICCOLO \rightarrow ASSORBE λ PIÙ GRANDI: 1.8 μm IN GIÙ

LEGA $\text{InAs} + \text{GaAs}$ \rightarrow COMPOSTO TERZIARIO $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ CON UN ASSORBIMENTO PIÙ ALTO

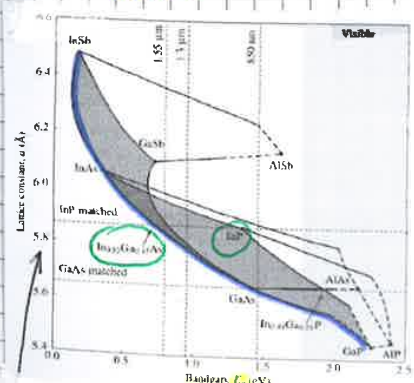
D = DIRECT GAP
I = INDIRECT GAP (SI) \rightarrow NON UTILIZZABILI PER GENERAZIONE DI FOTONI

GaAs \rightarrow GAP DIRETTO \rightarrow SE INDUCO INVERSIONE DI POPOLAZIONE POSSO ANCHE OTTENERE GUIDABNO

A 1.5 μm DEVO TROVARE COMPOSTI CHE COPRANO LA FINESTRA (IN GAP (D))

SE HO BISOGNO DI UNA SORGENTE NEL VISIBILE \rightarrow USO I NITRURI \rightarrow CIOÈ I COMPOSTI CON L'AZOTO (CHE COPRONO LO SPETTRO VISIBILE)

GRAF 1

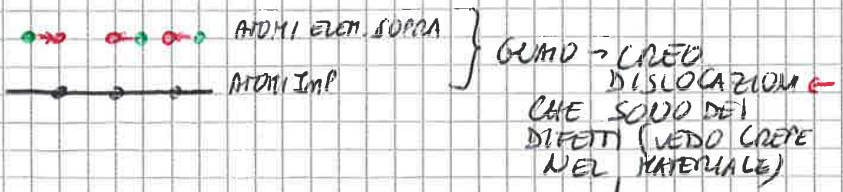


DATA DA CARATTERISTICHE FISICHE DEL COMPOSTO

SE InAs E VOGLIO COSTRUIRE IL COMPOSTO TERZIARIO CON GaAs \Rightarrow LEGA InGaAs

COMPOSTI QUATERNARI \rightarrow HANNO PROPRIETÀ CHE STANNO IN LINEE TRAVEGGHIANTE

SI InP \rightarrow VOGLIO CRESCERE UN MATERIALE A E_g PIÙ BASSO DEVO AVERE UNA COSTANTE RETICOLARE SIMILE (LATTICE CONSTANT)



SONO CENTRI TRAPPOLA PER I PORTATORI \rightarrow TRUCC RICOMBINAZIONE NON RADIATIVA

COSTANTE RETICOLARE (PRESSO DI RIPARTIZIONE DEL RETICULO CRISTALLINO)

PER CRESCERE UNO STRATO SOPRA DEVO AVERE MATCHING DELLA COSTANTE RETICOLARE ($\text{InGaAs} - \text{InP}$)

MA È UNA SOLUZIONE SPECIALE → FATTA CON MATERIALI CON $E_g \neq$
 IN MODO DA REALIZZARE LA GUIDA

È UNA **ETEROSTRUTTURA** (perché realizzo delle giunzioni con $E_g \neq$)

(USATA IN OPTOELETTRONICA E MICROONDE)

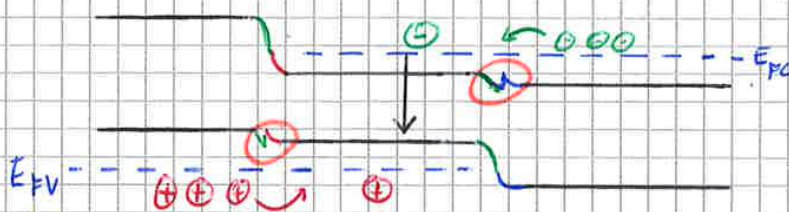
NE DISEGNO IL DIAGRAMMA A BANDE QUALITATIVO @EQ.



e^- VANNO A ENERGIA PIÙ BASSA DOVE ACCUMULO ENERGIA POSITIVA (L) MENTRE NASCE BARRIERA (V) PER RISPETTARE L'EQUILIBRIO

HO ACCUMULATO e^- MA DEVO RIMETTERMI NEL POSTO GIUSTO → POLARIZZAZIONE DIRETTA

↓
 COSÌ RIDUCO LA BARRIERA DI POTENZIALE



e^- } DIFFUSIONE PIÙ FACILMENTE PERCHÉ NON C'È PIÙ BARRIERA CHE BLOCCA

HO REGIONE DI ACCUMULO DI $\left(\begin{matrix} e^- \text{ in BC} \\ e^- \text{ in BV} \end{matrix} \right)$ INVERSIONE DI POPOLAZIONE

(QUASI LIVELLI DI FERMI)
 ↓
 EMISSIONE DI FOTONI

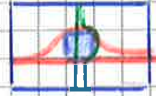
⇒ ORA DIODO HA INTEGRATA LA GUIDA OTTICA ATTIVA

↗ z → DIREZIONE DI PROPAGAZIONE LUNGO LA GUIDA

$$\beta_r = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{eff} + \Gamma \Delta n)$$

MA HO INIETTRATO I → INVERSIONE DI POPOLAZIONE → EMISSIONE STIMOLATA ($\frac{\lambda'}{\lambda} \rightarrow n$)

INDICE VARIAZIONI DI n



Δn → VARIAZIONE DI INDICE DI RIFRAZIONE

IL CAMPO PENDE UN POCO DAL CORE → $\Gamma \Delta n$

Γ = FATTORE DI CONFINAMENTO

→ PESA Δn E DICE LA FRAZIONE DI CAMPO CHE STA DENTRO AL CORE

A VARIAZIONE DI n_{eff} (VISTA DAL CAMPO) SI AGGIUNGE n_{eff} DELLA GUIDA

$\beta_i = ?$ E varia come $e^{-\beta_i z} = e^{-\beta_r z} e^{\beta_i z}$

VARIAZIONE DI FASE

VARIAZIONE DI AMPIEZZA

Poloni in guida attiva → $g \rightarrow N_p(z) = N_p(0) e^{g z}$

VA $\Rightarrow |E(x,y,z)|^2 \Rightarrow e^{\frac{g}{2} z}$ attenuazione pari alla metà

campo che si propaga in guida

Il campo → quando si propaga non vede solo la guida
vede g guadagno del materiale → ma non tutto solo una porzione

$\beta_i = \frac{\Gamma g}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_i$ guadagno medio (guadagno che vede il mezzo perde dipende dal fattore di confinamento)

VARIAZIONE DI n IMMAGINARIA

$\Delta n_i = \frac{\lambda \Gamma g}{2g\pi} \Rightarrow$ INDICE DI RIFRAZIONE IMMAGINARIO $\Delta n_i = \frac{\lambda}{2\pi} \alpha$

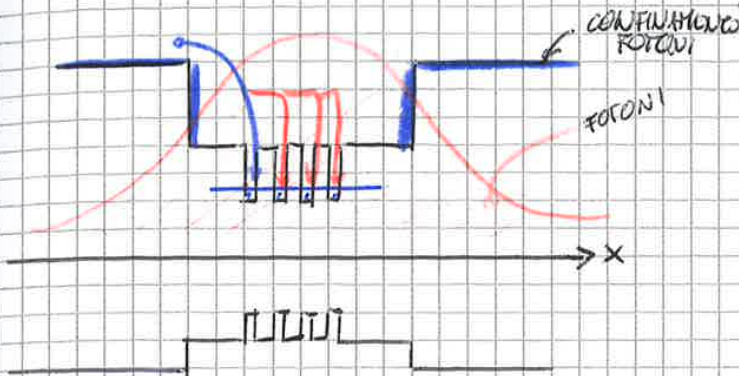
DA ASSORBIMENTO NORMALIZZATO

$$\beta_r = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{eff} + \Gamma \Delta n)$$

24/10/16

MATERIALI A DIMENSIONALITÀ RIDOTTA → SCOPO: CONFIGURARE I PORTATORI IN UNA DIREZIONE

IN GUIDA ATTIVA → MULTIPLE QUANTUM WELL (BU ALTA DIFFICILI PERCHÉ DOLCI) (FARE FILI CIRCONDATI DA BARRIERA)

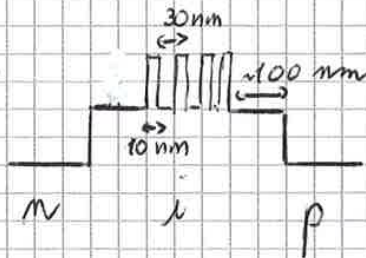


IN LAYER (N nm) STANNO INTRAPPOLATI I PORTATORI
↓
OCCUPANO UNA REGIONE PIÙ PICCOLA

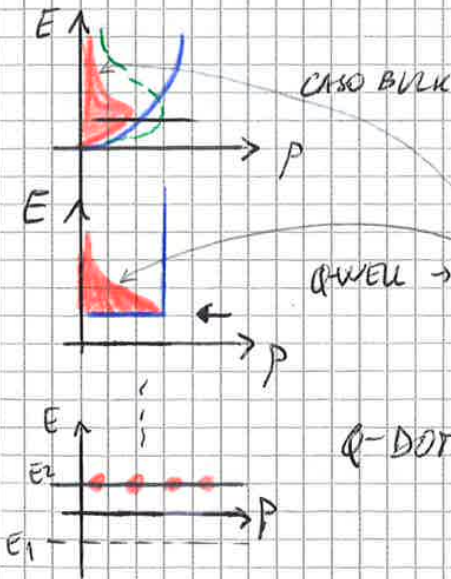
↓
DIFFONDONO NELLA BARRIERA E POI TUTTI INTRAPPOLATI NEGLI STATI CONFINATI

CONSIDERANDO GLI INDICI DI RIREFRAZIONE: $n \rightarrow$

LA MIA VERA GUIDA È FATTA COST → IL PROBLEMA È CALCOLE IL MODO CONVENIATO PER LA GUIDA



← IN MEDIA QUESTA VARIAZIONE DI n NON È COSÌ SIGNIFICATIVA (MA IN SITUAZ. NON SI VANTA!)



QWELL → HO MA CONTRIBUTI ANCHE DA SOPRA MA A ME INTERESSANO SOLO ←

Q-DOTS → HO RISULTATO UN SISTEMA DI ATOMI ARTIFICIALI HO CONTRIBUTI DOVE VOGLIO IN REALTÀ NON È COSÌ PERCHÉ C'È DISPERSIONE (ALLARGAMENTI NON OMOGENEI)

SE C'È MAGGIORE INIEZIONE → CRESCE IL GUADAGNO A PARITÀ DI δ DI PORTATORI → ! PIÙ AUMENTO IL CONFINAMENTO
↓
MIGLIORE È IL GUADAGNO DIFFERENZIALE

Faccio un calcolo quantitativo.

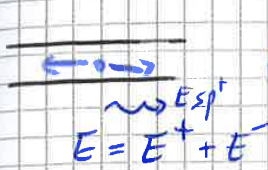
In una certa sezione z accoppio una certa quantità di fotoni

in z sto generando un campo elettrico TE

proporzionale a $\sqrt{\beta_{sp} \tau_{sp}(k\omega, z)}$

intensità di fotoni accoppiati in modo guidato

intensità del campo elettrico



Mi aspetto un contributo $\left\{ \begin{array}{l} \text{progressivo} \\ \text{regressivo} \end{array} \right.$

intensità di campo elettrico progressivo

$$E_{sp}^+(z) = \sqrt{\frac{\beta_{sp} \tau_{sp}(k\omega, z)}{z}}$$

$e^{j\phi}$

$\frac{1}{z}$ fotoni che vanno in direzione progressiva

fenomeno random di emissione spontanea

$$E_{sp}^-(z) = \sqrt{\frac{\beta_{sp} \tau_{sp}}{z}} e^{j\phi} \quad (\text{ha altre fasi})$$

Per calcolare il campo in uscita della guida

[cfr propagazione guidata]

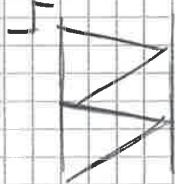


Diagramma a traliccio

il campo si propaga con costante di propagazione $\beta = \beta_r + j\beta_i$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} + j \left(\frac{\Gamma_g}{2} - \frac{\alpha_{i, \text{eff}}}{2} \right)$$

guida non perfetta, ho perdita di fotoni

guadagno netto

Ma $P_{out}(\omega)$ è dovuto all'effetto di un solo punto
 ma lungo tutta la guida attiva
 avviene l'emissione stimolata
 integro su tutta la guida attiva

$$P_{out}(\omega) = \int_0^L (|E_{out,sp}|^2 + |E_{out,sp}|^2) dz$$

facendo i conti (integrali di esponenziali)

$$P_{out} = \frac{P_{sp} \pi \epsilon_0}{2} \frac{|t_{12}|^2 (e^{g_{net}L} - 1) [1 + |r_{12}| e^{g_{net}L}]}{g_{net} |1 - r_{12} r_{21} e^{g_{net}L} e^{-2\beta L}|^2}$$

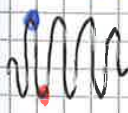
NON dipende da βz ma solo dal guadagno netto!

RICORDATI

con $g_{net} = \left(\frac{\Gamma_g}{2} - \frac{\langle \alpha_i \rangle}{2} \right)$
 guadagno modale - perdite modali

Quindi a cosa sono dovuti (per una certa L) massimi e minimi?
 c'è un **termine risoanante** dovuto all'esponenziale complesso

è il termine che salta fuori ogni volta che faccio un giro della guida (cio' a cui converge la serie geometrica)
 Supponendo il numeratore costante per la βg



denominatore minimo $\rightarrow e^{-2\beta L} > 0$
 (perché $e^{g_{net}L} > 0$ sempre)
 $2\beta L = 2m\pi$

denominatore massimo $\rightarrow e^{-2\beta L} < 0$
 SOLO A CERTE LUNGHEZZE D'ONDA
 $2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} L = 2\pi m$

MODI LONGITUDINALI DELLA CAVITÀ

$$\lambda_m = \frac{2n_{eff}L}{m}$$

λ per cui facendo un giro intero ritorno alla fase da cui ero partita! (Interferenza costruttiva)
 fare multiplo intero di 2π

LEZIONE CL - INTRODUZIONE A LEDs E DIODI LASER

25/10/16

DIODI = EMETTITORI DI LUCE $\left\{ \begin{array}{l} \text{COERENTE} \rightarrow \text{LASER} \\ \text{INCOERENTE} \rightarrow \text{LED} \end{array} \right.$

LED \rightarrow CATODO ANODO } CONNESSI A LATI P DELLA GIUNZIONE
 CON EMISSIONE SPONTANEA REALIZZANO UNA SORGENTE DI LUCE \rightarrow FOTONI EMESSI IN OGNI DIREZIONE

RADIAZIONE INCOERENTE PERCHÉ NON HO CONTROLLO SU λ DI FOTONI EMESSI (SU TUTTO INTERVALLO DI λ)

EMITTONO CON UNO SPETTRO A BANDA LARGA \rightarrow EMISSIONE = EMISSIONE DIFFUSA

\rightarrow APPLICAZIONI IN ILLUMINOTECNICA CONSUMANO A BASSA ENERGIA
 SI USANO PER TRASMISSIONE A BASSO COSTO < VELOCITÀ

LASER \rightarrow = EMETTITORE DI LUCE COERENTE
 \rightarrow CAVITÀ CHE PERMETTE DI REALIZZARE UNA PARTICOLARE λ E LA FASE DEI FOTONI EMESSI RIMANE LA STESSA

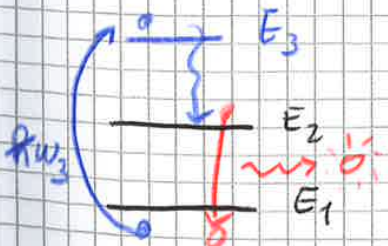
TANTISSIMI TIPI DI LASER $\left\{ \begin{array}{l} \text{SOLIDO} \\ \text{LIQUIDO} \\ \text{GAS} \\ \text{FIBRA} \dots \end{array} \right.$
 (NOI CI OCCUPIAMO DI DIODI LASER)

LASER A STATO SOLIDO \rightarrow PER FARLO PER PRIMA COSA HO BISOGNO DI UN MEZZO CHE GUADAGNA E IN LUI DEVE ESSERE INVERSIONE DI POPOLAZIONE E DEVO CHIUDERE IL MEZZO

DI VARI TIPI IN BASE AL TIPO DI LASER STATO SOLIDO \rightarrow MEZZO DI GUADAGNO = CRISTALLO VETRO } CHIUSO TRA 2 SPECCHI

DROGANDO IL VETRO (DROGANTE PASSA DEI LIVELLI ENERGETICI)

POMPAGGIO DI TIPO OTTICO \rightarrow ILLUMINO IL CRISTALLO A UNA CERTA λ



(GARANZIA INVERSIONE DI POPOLAZIONE) ECCEZIONI SALGONO A LIVELLO 3 DA CUI RILASCIANO SENZA EMISSIONE DI FOTONI E⁻ SI RICOMBINANO CON e⁺ ORIGINANDO FOTONI

PER REALIZZARE IL LASER \rightarrow HO BISOGNO DI LASER DI POMPA, CHE POMPA LASER ALLO STATO SOLIDO

DIODO LASER È IL LASER DI POMPA



- LASER A SEMICONDUZIONE \rightarrow DIFFICILI DA REALIZZARE NEL VISIBILE
- LASER IN FIBRA

- LASER A GAS (eg HeNe) \rightarrow EMETTE NELL'INFRAROSSO
 \rightarrow POMPATO DA SCARICA ELETTRICA
 \rightarrow USATO PER IL TESTING DI COMPONENTI OTTICI

LEZIONE 02 - APPROCCIO FENOMENOLOGICO A LED E DIODI LASER

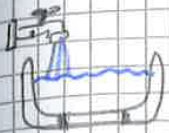
APPROCCIO FENOMENOLOGICO → SCRIVO EQUAZIONI SEMPLICI PER CAPIRE IL FUNZIONAMENTO



GENERAZIONE DI PORTATORI (e⁻)
 POI EMISSIONE SPONTANEA (senza c. el.)

FENOMENO DI PERDITA

H0 = INIEZIONE DI PORTATORI
 PERDITE



VASCA = REGIONE ATTIVA → APPLICHO V (apero la valvola)

RIEMPO LA REGIONE ATTIVA MA POSSO PERDERE PORTATORI
 PRIMA CHE ENTRINO (lifetime di portatori)
 SE μ È TROPPO BASSA GLI e⁻ SE NE VANNO

SE REGIONE ATTIVA INVECE DI PERDITA
 EMISSIONE SPONTANEA
 RICOMBINAZIONI NON RADIOATTIVE
 e⁻ TORNANO IN BV SENZA EMISSIONE DI FOTONI

EQUAZIONE DI BILANCIO

$$\frac{dN}{dt} = g_{gen} - R_{rec}$$

TASSO DI GENERAZIONE
 (TASSO CON CUI CI BUTTO DENTRO e⁻)
 A I CHE INIETTO

$$g_{gen} = \frac{\eta_i \cdot I}{qV}$$

η_i = EFFICIENZA D'INIEZIONE (QUANTICA) INTERNA

QUANTA H₂O FINISCE IN VASCA

TASSO DI RICOMBINAZIONE
 (TASSO CON CUI CI PERDO)

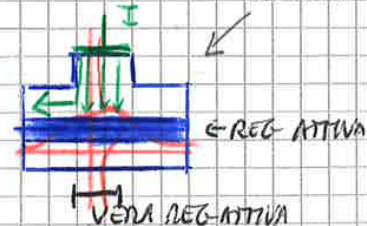
$$R_{rec} = R_{sp} + R_{nr} + R_r + R_{st}$$

DOVUTO A EMISS. SPONTANEA

RICOMBINAZ. NON RADIOATTIVA

LEGHIA η_i POSSO PERDERE e⁻/e⁻ PRIMA DI RECOMB.

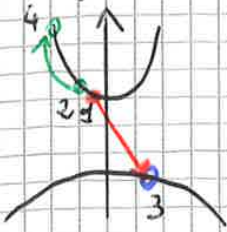
EMISS. STR. LUM.



IO VORREI TUTTE LE CARICHE IN REGIONE ATTIVA MA NON È DETTO CHE FINISCAO TUTTE L

PARAMETRO C

→ NON ELIMINABILE
 → RICOMBINAZIONE PER IL PROCESSO DI TIPO AUGER



EMISSIONE SPONTANEA

e⁻ SI RICOMBINA CON LACUNA

IL MIO e⁻ (1) SI RICOMBINA CON LACUNA (3)
 IN BV E L'ENERGIA LIBERATA
 DA RICOMBINAZIONE È TRASFERITA A
 e⁻ IN (2) CHE SALTA IN (4)

ENERGIA LIBERATA → ASSORBITA DA e⁻ CHE
 SALE A LIVELLO 4 (= LIVELLO INSTABILE)

e⁻ SI È PERSO → NO FOTONI → RICOMBINAZIONE NON RADIATIVA

PROCESSO DI CARRIER-CARRIER SCATTERING

QUAL È LA PROBABILITÀ CHE AVVENGA?

$$P_{1 \rightarrow 3} = f_{c1} \cdot f_{c2} \cdot (1 - f_{v3}) \cdot (1 - f_{c4})$$

e⁻ IN BC e⁻ IN BC POSTO LIBERO IN BV POSTO LIBERO IN BC

$$P_{1 \rightarrow 3} = \frac{e^{-(\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3)/kT}}{N_c \cdot N_v} \cdot N_p$$

DIPENDE DA DENSITÀ DI PORTATORI

PARAMETRO B

→ IN TASSO DI EMISSIONE SPONTANEA PER UNO CARICA PER EMISSIONE DI FOTONI

SPETTRO DI EMISSIONE SPONTANEA

$$R_{sp}(\hbar\omega) \approx \int_{e_g}^{\infty} A_{21} g_e f_e f_v e^{\hbar\omega} L(\hbar\omega - \hbar\omega_e) d(\hbar\omega_e)$$

$$R_{spTOT} = \int R_{sp}(\hbar\omega) d(\hbar\omega) = B N^2$$

DIPENDE DA A₂₁ (coeff di Einstein)

(MODULO QUANTITATIVO)

EFFICIENZA RADIATIVA

$$\eta = \frac{R_{sp}}{R_{sp} + R_{nr} + R_e}$$

RAPPORTO < RATE EMT. SPONT / RATE RICOMBINAZ. TOTALE

SITUAZIONE IDEALE: $\eta = 1$ MA NON È POSSIBILE!

07/11/16

APPROCCIO FENOMENOLOGICO → PARAMETRI CHE VALUTO

SPETTRO DI EMISSIONE
(COMPONENTI DI SPETTRO OTTICO)
λ DI LUCE EMESSA

P_{OUT} VS I



DIODO GIUNZIONE p-n
NE VALUTO LA TENSIONE

- COME VA LA POTENZA IN FUNZIONE DI I?

$$P = \eta_e \eta_i \eta_r \left(\frac{I}{q} \right) h\nu \rightarrow \text{ENERGIA}$$

TASSO CON CUI INIERTO e⁻ E e⁺

TASSO CON CUI, SE TUTTE LE CARICHE NEGATIVE SI RICOMBINASSERO CON e⁺, AVREI POTENZA P

MA IO HO SOLO UNA FRAZIONE DI CARICHE

η_r = FRAZIONE DI COPPIE e⁻-e⁺ CHE SI RICOMBINANO IN MODO RADIATIVO

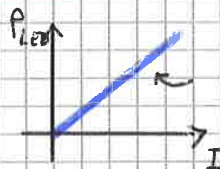
η_i = FRAZIONE DI CARICHE CHE VA IN REGIONE OTTICA (ALTRE PERSE PER LICKAGE)

η_e = FRAZIONE DI FOTONI CHE EMESSI PER EMISSIONE SPONTANEA SONO RACCOLTI DALL'ESTERNO (A PARTE PUO' ESSERE PERSA PER ASSORBIMENTI IN ALTRI SITI)

$$P_{LED} = \eta_{ex} \frac{h\nu}{q} I$$

CON η_{ex} EFFICIENZA EXTERNAL QUANTUM EFFICIENCY

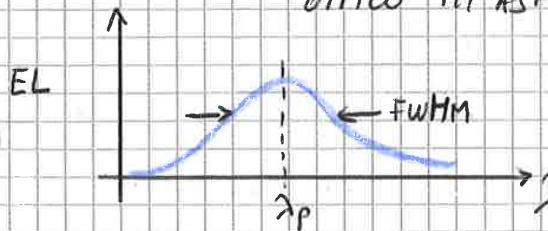
P HA LA SEGUENTE CARATTERISTICA →



NOTTA LA SU Pendenza È DATA DA η_{ex}

- SPETTRO DI EMISSIONE DI LED → COLLEGANDOLO A ANALIZZATORE DI SPETTRO OTTICO MI ASPETTO

SPETTRO DI ELETTROLUMINESCENZA (PERCHÉ LED ILLUMINATO) ELETTRICAMENTE



EMISSE A LARGA BANDA CON UN CERTO VALORE DI λ_p LARGHEZZA

[SE ILLUMINASSI IL MATERIALE OTTICAMENTE → SPETTRO DI FOTOLUMINESCENZA]

HA QUESTA CARATTERISTICA PERCHÉ DIODO:



DA RICOMBINAZIONE e⁻ e⁺

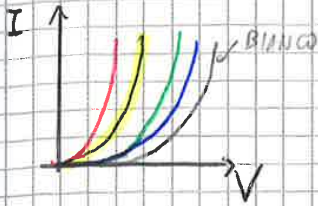
• FOTONE EMESSO HA UN'ENERGIA PARI AL SALTO hν

EMISSIONE INCOERENTE → FOTONE HA FASE ≠ DA FOTONE EMESSO @ Istante SUCCESSIVO

SPOSTANDOCI VERSO IL BLU NON POSSO PIÙ USARE MATERIALI DI GRUPPO 3-5
MA DEVO CAMBIARE MATERIALE

USO
NITRURI = COMPOSTI CON L'AZOTO (vedi slides) 33

COPRITO A DI VERDE/BLU/VIOLETTO
(ULTIMI ARRIVATI IN REALIZZAZIONE DEI LED)



DIVERSE CARATTERISTICHE PERCHÉ CAMBIA V_f = TENSIONE DI SOGLIA, CHE DIPENDE DAL MATERIALE

COME FACIO A FARE BIANCO? SEGNALE CHE HA TUTTE λ

3 DIODI OPPURE PRENDO UN DIODO CHE EMETTE NEL BLU CHE TURBA IL FOSFORO IL QUALE HA FLUORESCENZA INTORNO AL GIALLO

IL COLORE È IL BIANCO

SVOLTA SIGNIFICATIVA → EMISSIONE NEL BLU (NOBEL) → TECNOLOGIA ABILITANTE DI ILLUMINOTE CIVILE

DIODO NEL BLU ← A BASSO CONSUMO
REALIZZATO CON NITRURI
COPERTO DA FOSFORO

EMISSIONE NEL BLU POMPA IL FOSFORO E DA VIA ALLA FLUORESCENZA O A FLUORO LUMINESCENZA (λ PIÙ ALTE)

STRUTTURA

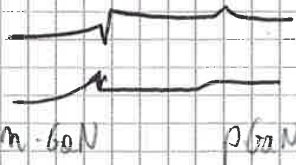
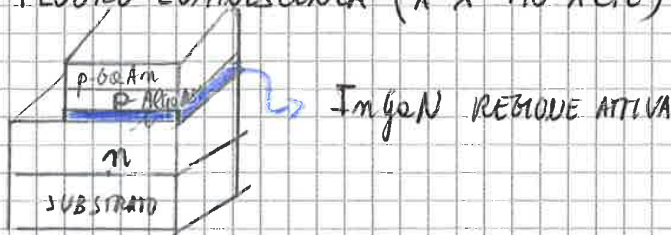


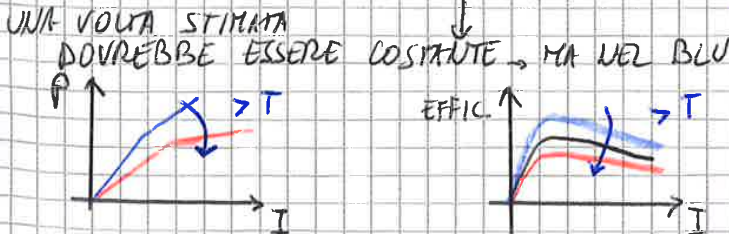
DIAGRAMMA A BANDE IN POLARIZZAZIONE DIRETTA

! PROBLEMA : PENDO IN EFFICIENZA MAN MANO CHE CRESCO CON LA CORRENTE

η

$$\text{EFFICIENZA} = \frac{P_{\text{out ottica}}}{(VI)}$$

POTENZA IN INGRESSO PER ALIMENTAZIONE AL DIODO
 η EFFICIENZA DIMINUISCE



$$\text{② } \uparrow T \Rightarrow \downarrow \text{ POTENZA}$$

INOLTRE UNA PERDITA DI EFFICIENZA C'È SEMPRE (INDIPENDENTEMENTE DA T)

PROBLEMA DI EFFICIENCY DROOP

PROBLEMA ODIERNO → CAPIRE FENOMENI PRIMI CHE CAUSANO LA PERDITA DI EFFICIENZA (UNO DEI PIÙ SIGNIFICATIVI SEMBRA CHE SIA EFFETTO AUGER)

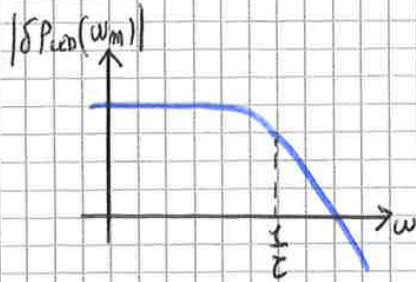
Power \propto Rsp

SOSTITUISCO $N(t) = N_0 + \delta N e^{j\omega_m t}$

$$R_{sp} = BN^2 = B(N_0 + \delta N e^{j\omega_m t})^2 =$$

$$= \underbrace{BN_0^2}_{\text{PUNTO DI LAVORO}} + \underbrace{B\delta N^2 e^{2j\omega_m t}}_{\text{trascuro perché è ANALISI DI PICCOLO SEGNALE (TRASCURABILE)}} + \underbrace{2BN_0\delta N e^{j\omega_m t}}_{\text{Rsp a } \delta N}$$

$P_{LED} \propto 2BN_0\delta N e^{j\omega_m t}$



RISPOSTA DEL 1° ORDINE

@ $\frac{1}{\tau}$ HA UN POLO

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

$$H(\omega) = \frac{1}{j\omega + \frac{1}{\tau}}$$

BANDA A -3dB \sim 100 MHz \rightarrow POSSO USARE LED MA LA BANDA DI MODULAZIONE È LIMITATA A 100 MHz

RICOMBINAZIONE \rightarrow DIPENDE DA RICOMBINAZIONE $\left. \begin{array}{l} \rightarrow \text{SPONTANEA} \\ \rightarrow \text{NON RADIATIVA} \end{array} \right\}$ SEMPRE IN ORDINE DEL ns

IL DIAGRAMMA A OCCHIO \rightarrow DEGRADA ALLA V DI TRASMISSIONE

@ BIT RATE ELEVATO OCCHIO SI CHIUDE

BIT RATE \rightarrow LIMITATO A 125 Mbit/s

NON POSSO USARLO @ GHz \Rightarrow DEVO PASSARE AL LASER

$P_{out} \propto R_{sp}$

SOSTITUISCO $N(t) = N_0 + \delta N e^{j\omega_m t}$

$$R_{sp} = BN^2 = B(N_0 + \delta N e^{j\omega_m t})^2 =$$

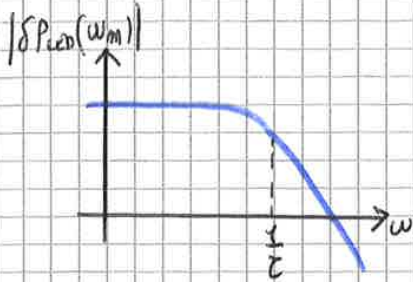
$$= \underbrace{BN_0^2}_{\text{PUNTO DI LAVORO}} + \underbrace{B\delta N^2 e^{2j\omega_m t}}_{\text{trascurare perché è ANALISI DI PICCOLO SEGNALE (TRASCURABILE)}} + \underbrace{2BN_0\delta N e^{j\omega_m t}}_{\text{Rsp a } \delta N}$$

PUNTO DI LAVORO

trascurare perché è ANALISI DI PICCOLO SEGNALE (TRASCURABILE)

Rsp a δN

$P_{LED} \approx 2BN_0\delta N e^{j\omega_m t}$



RISPOSTA DEL 1° ORDINE
 @ $\frac{1}{\tau}$ HA UN POLO

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

$$H(\omega) = \frac{1}{j\omega + \frac{1}{\tau}}$$

BANDA A -3dB ~ 100 MHz \rightarrow POSSO USARE LED MA LA BANDA DI MODULAZIONE È LIMITATA A 100 MHz

RICOMBINAZIONE \rightarrow DIPENDE DA RICOMBINAZIONE $\left. \begin{array}{l} \rightarrow \text{SPONTANEA} \\ \rightarrow \text{NON RADIOATTIVA} \end{array} \right\}$ SEMPRE IN ORDINE DEL ns

IL DIAGRAMMA A OCCHIO \rightarrow DEGRADA MUX DI TRASMISSIONE

@ BIT RATE ELEVATO OCCHIO SI CHIUDE

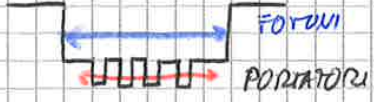
BIT RATE \rightarrow LIMITATO A 125 Mbit/s

NON POSSO USARLO @ GHz \Rightarrow DEVO PASSARE AL LASER

EDGE. EMITTERS

→ STRUTTURA PIÙ SEMPLICE DA ANALIZZARE
 → GUIDA DI TIPO RIDGE, REGIONE ATTIVA → MULTIQUANTUM WELL

08/11/16



REGIONE OCCUPATA DA PORTATORI

REGIONE OCCUPATA DA FOTONI



EMISSIONE CHE VIENE DALLA TESTA

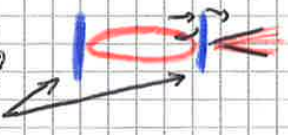
LO SPECCHIO È DATO DA FACCETTE TAGLIATE

LASER DI FABRY-PEROT

STRUTTURA PIÙ SEMPLICE DA REALIZZARE

! OGNI LASER PER FUNZIONARE DEVE ESSERE UN RISONATORE

2 SPECCHI CHE CONTENGONO MATERIALE ATTIVO

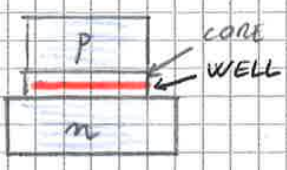


LA LUCE DEVE ESSERE INTRAPPOLATA NEI 2 SPECCHI
 LUCE INCIDENTE DEVE ESSERE → IN PARTE RIFLESSA (30%)
 → IN PARTE TRASMESSA (70%)

PER REALIZZARE LA FACCETTA → UN METODO È TAGLIARE IL SEMICONDUCTORE ALLE FACCETTE

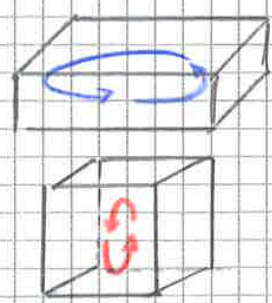
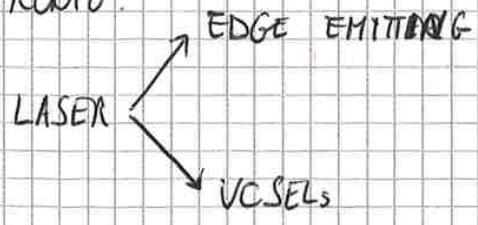
LE FACCETTE SONO CLIVATE → CALCOLO LO SPETTRO IN USCITA

VCSEL → STRUTTURA A EMISSIONE VERTICALE



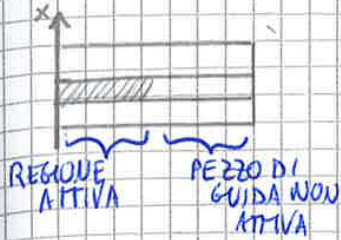
REALIZZO LA CAVITÀ DENUNCIANDO STRATI CHE CI CREANO UN RIFLETTORE DISTRIBUITO

CONFRONTO:

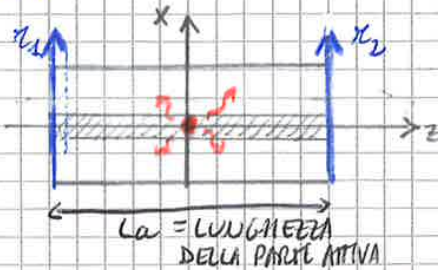


PROPAGAZIONE DI FOTONI

COME FUNZIONA UN LASER? UN LASER È INDETTITO UN OSCILLATORE



NOI SUPPONIAMO CHE GUIDA NON ATTIVA NON CI SIA MA LAVORIAMO CON UN QUESTO OSCILLATORE



LA GUIDA HA ∇ MODO GUIDATO FONDAMENTALE

$$E_{TE} = E_0(x,y) \hat{y} e^{j\omega t} e^{-j\beta z}$$

$$\text{con } \tilde{\beta} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} + \frac{j}{2} (T_g - \langle \alpha_i \rangle)$$

PERDITE INTRINSICHE CHE

SUPPONGO INVERSIONE DI POPOLAZIONE \rightarrow EMISSIONE SPONTANEA

FOTONI (IRRADIAZI) IN OGNI DIREZIONE

1 PARTE SI ACCOPPIA COL MODO GUIDATO TE

IL CAMPO ELETTRICO SI RIFLETTE

(esercizio modello Haken - Pauli)

COSA SUCCEDÈ PER AVERE UNA CONDIZIONE DI ROUNDTRIP = 1

VARIAZIONE DI ROUNDTRIP

COÈ DOPO UN GIRO IL FOTONE RITORNA NEL PUNTO DA CUI ERA PARTITO

$$r_2 e^{-j\tilde{\beta}L_a} r_1 e^{-j\tilde{\beta}L_a} = 1$$

CONDIZIONE DI BARKHAUSEN

\rightarrow GUADAGNO IN ANELLO = 1

PER FARE OSCILLATORE \rightarrow SERVE RUMORE \rightarrow RUMORE!

EMISSIONE SPONTANEA È IL RUMORE!

RUMORE BIANCO CHE GENERA TUTTE LE POSSIBILI λ

INFATTI L'EMISSIONE SPONTANEA È UN FENOMENO A LARGA BANDE

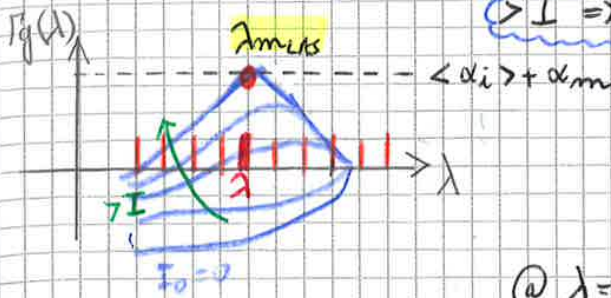
DI TUTTI I FOTONI VINCOLO QUELLO PER CUI LA CONDIZIONE DI ROUNDTRIP È = 1

\downarrow
C'È UNA SOLA λ CHE SODDISFA LA CONDIZIONE DI BARKHAUSEN

DOPO CHE HO RAGGIUNTO LA CONDIZIONE DI LASERAMENTO \rightarrow

LA CORRENTE CHE PUMPO MI DA FOTONI

DI TUTTI I FOTONI REALIZZATI PER EMISSIONE SPONTANEA
 IL GUADAGNO VARIA AL VARIARE DELLA CORRENTE



$\rightarrow I \Rightarrow \rightarrow$ GUADAGNO

CRESCIE FINO A CHE IL MASSIMO NON ARRIVA A TOCCARE IL GUADAGNO DI SOGLIA
 CIOÈ IL GUADAGNO MODALE COMPENSA LE PERDITE

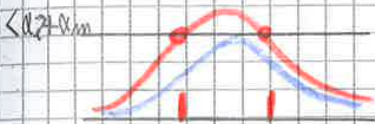
@ $\lambda = \lambda_{mLAS}$ → FOTONE CHE VEDE IL GUADAGNO CHE COMPENSA LE PERDITE

UNICO PER UN SODDISFATTE LE CONDIZIONI DI BARKHAUSEN

LA λ DEL PICCO SARÀ LA λ LASERANTE → DA TUTTO LO SPETTRO TIRO FUORI SOLO UNA λ D'ORDA

QUANDO ARRIVA A PICCO → CORRENTE NON SI TRASFORMA PIÙ IN PORTATORI MA IN FOTONI PER EMISSIONE STIMOLATA

È UN LASER



DA LÌ IN SU AUMENTANDO LA CORRENTE TUTTI I PORTATORI GENERATI DIVENTANO FOTONI CHE EMETTO PER EMISSIONE SPONTANEA STIMOLATA

PORTATORI

Esercizio

① $\lambda_a = 500 \mu m$ $n_{eff} = 3.3$
 calcola m t.c. $\lambda_m = 1.55 \mu m$
 $m = \left\lceil \frac{2 n_{eff} \lambda_a}{\lambda_m} \right\rceil = 2200$ (INTERO)

② Calcola la separazione in λ tra due modi longitudinali adiacenti

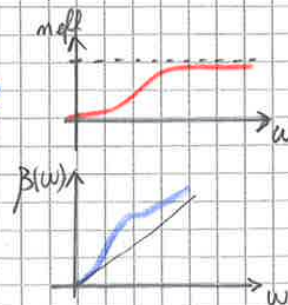
$\lambda_m - \lambda_{m+1}$
 Tengo conto che la guida è dispersiva cioè che $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}(\lambda)$ (DIPENDE DA λ)

(1) $2\beta(\omega_m) L_a - 2\beta(\omega_{m+1}) L_a = 2\pi$ (PER DEFINIZIONE)

CONDIZ DI ROUNDRIP AL MODO m

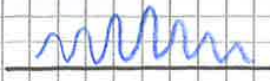
CONDIZIONE DI ROUNDRIP AL MODO m+1

$\beta(\omega) \Rightarrow \beta = \frac{\omega}{c} n_{eff}$

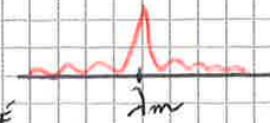


14/11/16

LASER
 ↳ SOTTOSOGLIA → SPETTRO:
 ↳ SOPRASOGLIA → SPETTRO:



UNICO MODO LONGITUDINALE
 EMETTE UNA SINGOLA
 EMETTITORE COERENTE PERCHÉ
 FOTONI EMESSI MANTENGONO
 L'INCIDENZA DI FASE



SPETTRO DI EMISSIONE IN UN SOLO MODO MENTRE TUTTI
 GLI ALTRI MODI NON RAGGIUNGONO LA SOGLIA

SCRIVO MODELLO DI EQUAZIONI DI BILANCIO VALIDO PER IL LASER

$$\frac{dN}{dt} = G_{gen} - R_{rec}$$

EQ3 DI BILANCIO

DENSITÀ DI PORTATORI → TASSO DI GENERAZIONE
 TASSO DI RICOMBINAZIONE

$$R_{rec} = (AN + CN^3) + R_{SE}$$

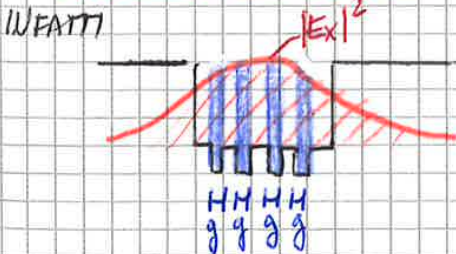
PERCHÉ QUANDO PASSIAMO SOPRASOGLIA DIVENTA IMPORTANTE

TASSO DI EMISSIONE STIMOLATA PER UNITÀ DI VOLUME (! FOTONI E PORTATORI OCCUPANO 2 REGIONI DIVERSE!)

$$R'_{st} = \Gamma_0 g N_p$$

DA DEFINIZIONE DI GUADAGNO

FATTORE DI CONFINAMENTO → PERCHÉ FOTONI N_p VEDONO SOLO UNA FRAZIONE Γ



VEDE MATERIALI CON GUADAGNO g

IN V_p GENERO FOTONI PER EMISSIONE STIMOLATA
 IN TOTALE GENEREREMO

TASSO CON CUI GENERO FOTONI R'_{st}

TOT FOTONI / UNITÀ DI TEMPO

$$R_{st, TOT} = R'_{st} V_p = R_{rec, st, TOT}$$

SE GENERO TUTTI I FOTONI PER UNITÀ DI TEMPO E VOLUME AL TASSO CON CUI PERDO FOTONI IN REG. ATTIVA

PER METTERLO IN EQ2 DI BILANCIO DEVO CONSIDERARE V DEI PORTATORI ($\neq V_p$)

$$-R_{st} = \frac{-R_{st, TOT}}{V_{portatori}} = -\frac{\Gamma_0 g N_p V_p}{V} = -\Gamma_0 g N_p$$

CON $\Gamma = \frac{V_p}{V}$

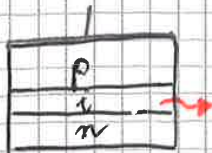
IO PARLO DI TASSI PER UNITÀ DI VOLUME E CONSIDERO OGGETTI CON VOLUMI \neq

PERDITA TASSO DI EMISSIONE STIMOLATA PER UNITÀ DI VOLUME

$$R_{SE} = \Gamma_0 g N_p$$

TASSO CON CUI PERDO PORTATORI PER VIA DELL'EMISSIONE STIMOLATA

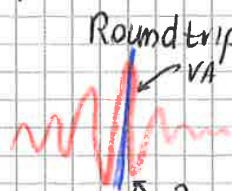
CALCOLO LO SPETTRO DEI FOTONI CHE ESCONO



$$\frac{1}{1 - r_1 r_2 e^{-2j\beta_0 L} e^{(\Gamma_g - \alpha_i)L}}$$

MODELLO DI HAKKI-PAOLI

@ $\lambda_m \rightarrow r_1 r_2 e^{-2j\beta_0 L} e^{(\Gamma_g - \alpha_i)L} = 1$



Roundtrip = 1

VA IDEALMENTE A INFINITO →

È LO SPETTRO, CIOÈ LA DENSITÀ DI POTENZA PER UNITÀ DI λ

λ_m = LUNGHEZZA D'ONDA LASERANTE

OTTEGUO LE EQUAZIONI DI BILANCIO

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta I}{qV} - \frac{N}{\tau} - v_g g N_p$$

$$\frac{dN_p}{dt} = \Gamma v_g g N_p + \Gamma \beta_{sp} R_{sp} - \frac{N_p}{\tau_p}$$

VARIAZIONE DI PORTATORI

VARIAZIONE DI FOTONI @ λ_m

ALTRO PARAMETRO CHE UTILIZZIAMO È IL **GUADAGNO DIFFERENZIALE** O
 QUANDO LA DERIVATA DELLA FUNZIONE
 NELL'INTORNO DEL PUNTO DI LAVORO

$$\frac{\partial g}{\partial N} = a = \frac{g_0}{N}$$

DIPENDE DAL PUNTO DI LAVORO
 (SARÀ IMPORTANTE PER LE
 PROPRIETÀ DI MODULAZIONE)

QUANDO PASSO SOTTOSOGLIA → SE I FOTONI EMESI SONO POCCHI → I PORTATORI
 SI BLOCCANO ALLA SOGLIA, NON
 CAPITA PIÙ NULLA

SE IL LASER EMETTE POTENZA RAGIONEVOLE

$g(N_p)$ → DIPENDE DAL NUMERO DI FOTONI CHE HO

FENOMENO FISICO **SPECTRAL HOLE BURNING**



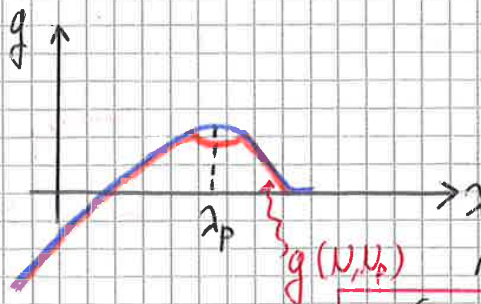
EMISSIONE DI FOTONI CON
 ENERGIA $h\nu_p \Rightarrow N_p$

FOTONI DATI DA
 RICOMBINAZIONE DI e^- ED e^+

① QUEL LIVELLO ENERGETICO
 HO UNA FORTE EMISSIONE
 STIMOLATA, SVOLTO VELOCE,
 MENTE QUEL LIVELLO E
 SI FORMA UN BUCO

POI GLI ELETTRONI RILASSANO
 E VANNO A RIEMPIRE IL BUCO
 SE $\tau_{relax\ intraband}$ È TROPPO LENTO

SI VIENE A CREARE
 UN BUCO SPETTRALE (SPECTRAL
 HOLE BURNING)



— **GUADAGNO SENZA FOTONI**
 — **GUADAGNO CON FOTONI**

IN MODO EMPIRICO

$$g(N, N_p) \approx \frac{g(N)}{1 + \epsilon N_p}$$

② È FATTORE DI COMPRESSIONE DEL GUADAGNO
 → TENE CONTO DI SOPPRESSIONE DEL GUADAGNO
 QUANTIFICA LA PROFONDITÀ DEL BUCO CHE SI CREA

→ PARAMETRO **EMPIRICO**, VIENE MISURATO (SERVIRÀ PER MODULAZIONE
 LASER PER TRASMISSIONE DATI)

⇒ **RIASSUMENDO**

$$a = \frac{\partial g}{\partial N} = \frac{g_0}{(N H_{1/2})(1 + \epsilon N_p)}$$

$$a_p = -\frac{\partial g}{\partial N_p} = \frac{\epsilon g}{(1 + \epsilon N_p)}$$

QUANDO RAGGIUNGO I_{TH} → FOTONI EMESSI DA ORA IN POI SONO UN NUMERO SIGNIFICATIVO

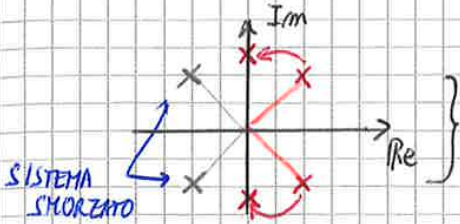
COSA SUCCEDDE A OSCILLATORE QUANDO RAGGIUNGO LA SOGLIA?

Round trip = 1 → TORNA IN PUNTO DA CUI ERA PARTITO (GARANZITO DA g)

MUMENTO UN PO' LA CORRENTE → DOVREI TORNARE IN PUNTO DA CUI SONO PARTITO E UN POCHINO DI PIU'

VEDO AUMENTO IL MIO SISTEMA

ANALIZZO I POLI DEL SISTEMA



$Re(\text{polo}) > 0 \Rightarrow$ IL RUMORE RITORNA

OSCILLATORE NON ESPLODE PERCHÉ IL GUADAGNO UNITARIO È GARANTITO DA UN FENOMENO NON LINEARE

$\frac{dN}{dt} \gg$ # FOTONI AUMENTA

! MA $\frac{dN}{dt}$ DIMINUISCE! IL # PORTATORI FA SCENDERE IL GUADAGNO

|| L'UNICA CONDIZIONE STAZIONARIA POSSIBILE È QUELLA PER CUI IL GUADAGNO È BLOCCATO

SUBITO AMPLIFICO TANTISSIMO IL RUMORE POI IL GUADAGNO DIMINUISCE E MI PORTO IN CONDIZIONE PER CUI I POLI STANNO SU ASSE IMMAGINARIO

GUADAGNO SI BLOCCA E RAGGIUNGE CONDIZIONE STAZIONARIA!

(TUTTI GLI OSCILLATORI SONO COSÌ)

15/11/16

CALCOLO LA DENSITÀ DI FOTONI < $\frac{\text{SOPRASOGLIA}}{\text{SOTTOSOGLIA}}$

DENSITÀ DI FOTONI SOTTOSOGLIA

CONSIDERO R_{st} TRASCURABILE

$$\frac{dN_p}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow \beta \Gamma R_{sp} = \frac{N_p}{\tau_p}$$

DIPENDE DA EMISSIONE SPONTANEA TASSO PICCOLO IN 1° APPROSSIMAZIONE ≈ 0 MA NON È PROPRIO COSÌ

$$N_p = \frac{\tau_p}{\beta} \beta_{sp} \Gamma R_{sp} = \frac{\tau_p}{\beta} \beta_{sp} \Gamma B N^2$$

DENSITÀ DI FOTONI SOPRASOGLIA

EQZ DI BILANCIO DEI PORTATORI

$$\frac{dN}{dt} = \underbrace{\frac{\eta_i I}{qV}}_{\text{TASSO DI INIEZIONE}} - \underbrace{(\underbrace{A N_{TH}}_{\text{TERMINI DI PERDITA}} + \underbrace{B N_{TH}^2}_{\text{TERMINI DI PERDITA}} + \underbrace{C N_{TH}^3}_{\text{TERMINI DI PERDITA}})}_{\text{TERMINI DI PERDITA}} - \underbrace{\tau_p g_{th} N_p}_{\text{EMISSIONE STIMOLATA DI FOTONI}}$$

TASSO DI INIEZIONE

N_{TH} BLOCCATO A VALORE DI SOGLIA DIPENDE DA $\sim \frac{\eta_i I_{TH}}{qV}$

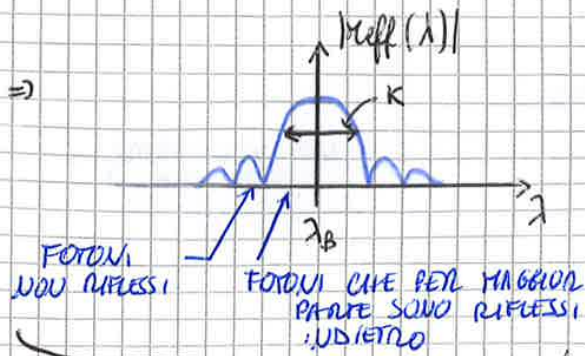
EMISSIONE STIMOLATA DI FOTONI

$$\frac{dN}{dt} = 0$$

$$\rightarrow N_p = \frac{\eta_i (I - I_{TH})}{qV \tau_p g_{th}}$$

N_p DENSITÀ DI FOTONI VA LINEARMENTE CON CORRENTE

MA SE d_m CRESCE
→ CRESCE LA SOGLIA
↓
CRESCE LA QTY DI COMPONENTE NECESSARIA
PER RAGGIUNGERE LA SOGLIA



$\lambda_B = \lambda$ DI BRAG

- MASSIMO
- DIPENDE DA PERIODICITÀ DEL RETICOLO

È UNA SPECIE DI FILTRO OTTICO!

$|r_{eff}(\lambda)|$ → DIPENDE DA λ

SE VOGLIO ALLARGARE IL FILTRO → $\Delta\lambda$ ^{RENDERE}

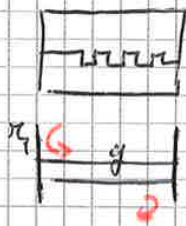
DENSITÀ PIÙ PROFONDA → $\Delta\lambda$ DETERMINATO DA FORMA DEL RETICOLO

DEFINISCO TECNOLOGICAMENTE IL RETICOLO

A VOLTE SI GIOCA SULLA FORMA INOLTRE PIÙ È LUNGO → $\Delta\lambda$



COUSA NE FACCO DEL RETICOLO? STRUTTURA



È EQUIVALENTE A LASER FABRY-PÉROT

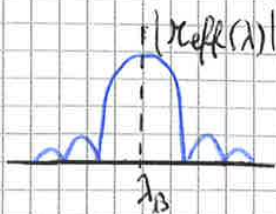
È COME SE AVESSI SPECCHIO CHE DIPENDE DA λ

HO AGGIUNTO UNA RIFLETTIVITÀ FILTRATA

CONDIZIONI DI SOGLIA PER QUESTO OGGETTO

$$\Gamma_g = \alpha_{di} + \alpha_{dm} \approx \alpha_{di} + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{r_1 |r_{eff}|} \right)$$

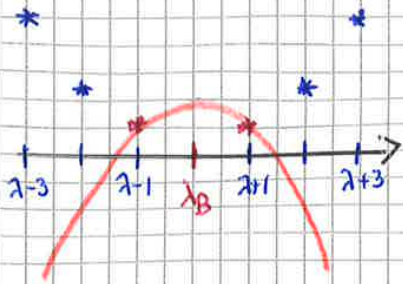
PERDITA AGLI SPECCHI NON È UNA COSTANTE MA È FUNZIONE DI λ



$|r_{eff}|$ A DENOMINATORE

HO PERDITE CHE DIPENDONO DA λ

CON CAVITÀ DISTRIBUITA



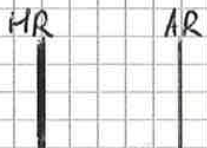
PER LASERARE → I MODI PIÙ VICINI
HANNO g DI SOGUA PIÙ BASSO

PIÙ MI ALLONTANO PIÙ g_{TH} AUMENTA

RAGGIUNGO LA CONDIZIONE PER CUI 2
MODI LASERANTI SONO ESATTAMENTE
SIMULTANEI

NELLA REALTÀ QUESTA È UNA CONDIZIONE CHE CAPITA RARAMENTE
PERCHÉ SUPPONE CHE SIA TUTTO PERFETTAMENTE RIFLESSO

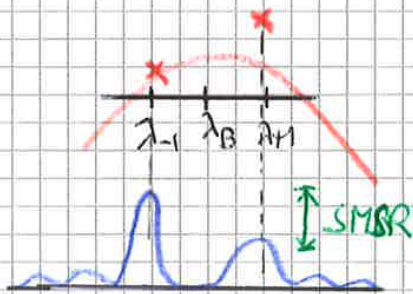
! BASTA CAMBIARE ... LA RIFLETTIVITÀ DEI 2 SPECCHI



HR → MOLTO RIFLETTIVO
AR → ANTI RIFLESSO

} ⇒ DO' ASSIMMETRIA ALLA STRUTTURA
PER FAR SÌ CHE UN MODO
VINCA SULL'ALTRO

OPPURE FACILO UNA STRUTTURA PIÙ COMPLICATA
DI $\frac{1}{4}$ SHIFT



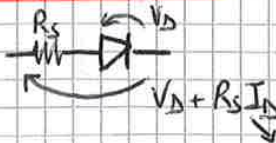
SPETTRO ATTIVO

↓
FOTONI EMESSI A λ DEL MODO
LASERANTE
GLI ALTRI PICCHETTI SONO I
MODI LONGITUDINALI

SMSR → MI DÀ IN dBm LA DIFFERENZA TRA LA POTENZA DEL MODO
LASERANTE PIÙ ALTO E LA POTENZA DEL MODO LONGITUDINALE

! PER UN SINGOLO MODO DEVE ESSERE ALMENO 40 dBm

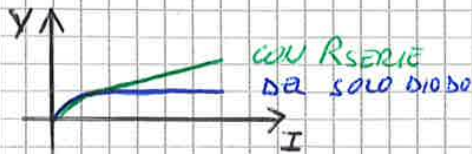
VOLTAGE DROP



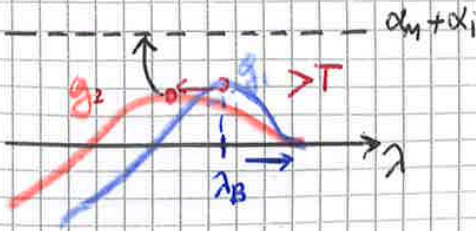
LASER = DIODO CON UNA RESISTENZA SERIE
DOVUTA A RESISTENZE DI STRATI
DI FILI DI BOUNDING

TENSIONE AI CAPI DEL LASER

CARATTERISTICA
TENSIONE-CORRENTE
DEL LASER



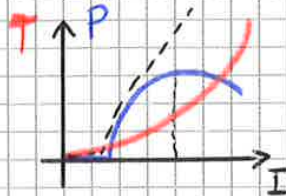
→ LA TRACCIO PERCHÉ
MI INTERESSA
QUANTA POTENZA
OTTICA TIRO
FUORI



DATO CHE g DIMINUISCE
 PER LASERAMENTO LA CORRENTE DA INIETTARE È >
 LA CORRENTE DI SOGLIA CRESCE!
 AL CRESCERE DI T
 IN PIÙ EMETTE A $\lambda \neq$ DA QUELLA CHE EMETTE A T PIÙ BASSA PERCHÉ È CAMBIATO n

2 EFFETTI → PICCO g SI SPOSTA
 $\lambda_B = 2 n_{eff} L$
 λ_B DIPENDE DA n_{eff} CHE VARIA CON T
 PER LASER DFB → EFFETTO DOMINANTE: SPOSTAMENTO DI λ_B
 ↳ UTILIZZATI VTRASMISSIONE OTTICA

COSA SUCCEDDE A LASER NON CONTROLLATO IN T



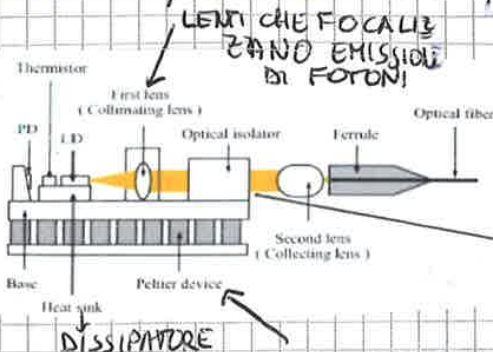
$I \Rightarrow P_{em} \Rightarrow T$ DELLA GIUNZIONE
 LA POTENZA EMessa RISENTE DI AUMENTO DI T
 (NON PIÙ LINEARE)
 POTENZA PIÙ BASSA PERCHÉ IL GUADAGNO È PIÙ BASSO
 DELLA CORRENTE INIETTATA UNA PARTE MISERVA PER RIPORTARE IL GUADAGNO ALLA SOGLIA (NON TUTTO USATO EMISSIONE STIMOLATA)

PACKAGE E CONTROLLO T → CI SONO APPLICAZIONI IN CUI λ CORRISPONDE A CANALE SU CUI INFORMAZIONE, SE SI SPOSTA È UN PROBLEMA [PER APPLICAZIONI PER TELECOMUNICAZIONI]

È IMPORTANTE CHE λ NON CAMBI! DEVO IMPACCHETTARE LASER SU PACKAGE CHE DIA STABILIZZAZIONE IN TEMPERATURA

PACKAGE STABILIZZATI IN T (→ COSTO!):

BUTTERFLY PACKAGE [DIGITALE]



LD → DIODO LASER
 TERMISTORE → RESISTORE LA CUI R DIPENDE DA T
 DEVE ESSERE MONTATO VICINO A DIODO

PD → FOTODIODO DI MONITOR → I IN OUT DA FOTODIODO PUNZUOLA PER SAPERE SE IL LASER SI È ROTTO

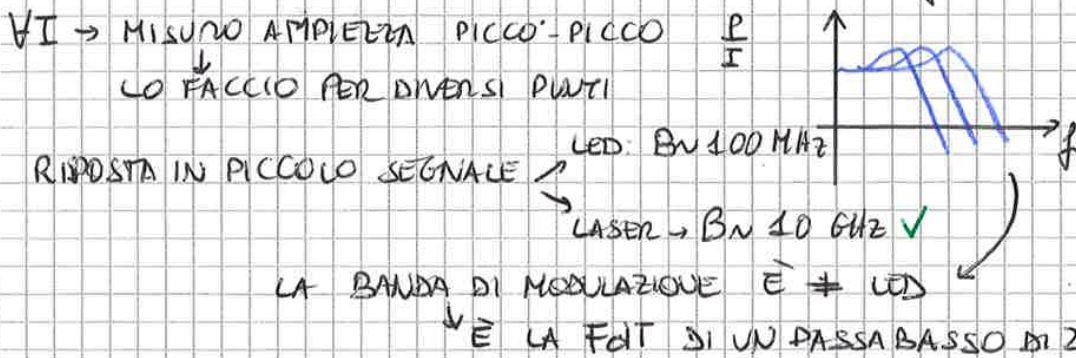
COMPONENTE PASSIVO NON RECIPROCO CHE FA PASSARE LUCE → MA NON ← (SENDO LASER DIVENTEREBBE INSTABILE)
 MISURA POTENZA EMessa DA LASER
 CELLA PULTIER → CELLA CONTROLLATA IN CORRENTE PER PORTARE VIA IL CALORE
 DISSIPARE

LEZIONE 13.2 - COMPORTAMENTO DINAMICO DEL DIODO LASER



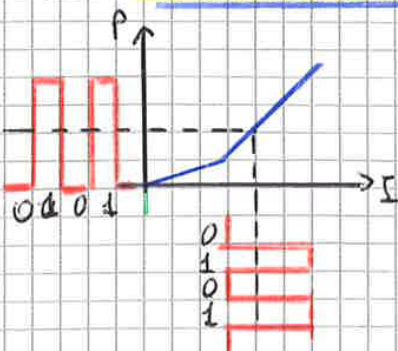
PERCHÉ È RILEVANTE? QUANDO LASER È USATO PER TRASMETTERE DATI
 MISURO LA RISPOSTA DI PICCOLO SEGNALE
 ↓
 INTENSITY MODULATION RESPONSE

INIETTO I → SCELGO IL PUNTO DI LAVORO
 HO UNA CERTA P → MODULO CON SIM LA CORRENTE NEL PUNTO DI LAVORO
 ↓
 VEDO COME RISPONDE LA POTENZA
 ANALISI DI PICCOLO SEGNALE → DIPENDE DA f CON UN MODULO



PICCO → DIPENDE DA PUNTO DI LAVORO → COSÌ HO QUANTO VELOCEMENTE RISPONDE IL LASER AD UNA MODULAZIONE DI I

PER TRASMETTERE DATI



SPENGO E ACCENDO PIÙ VOLTE
 ↓
 MODULAZIONE DI AMPIO SEGNALE
 ↓
 PER VEDERE SE TRASMISSIONE È BUONA MISURO IL DIAGRAMMA AD OCCHIO
 ↓
 VEDO COME MODULARE IL LASER
 ↓

MODULAZIONE IN CORRENTE PORTA CHE INSIEME A VARIAZIONE DI P_{out} È V

↓
 DENSITÀ DI PORTATORI
 ↓
 VARIANO

× MODULAZIONE SPURIA DI f → 2 SI SPOSTA → PUÒ ESSERE UN PROBLEMA

21/11/16

RICORDO

$$\frac{dN}{dt} = j\omega N_1 e^{j\omega t}$$

$$\frac{dN_p}{dt} = j\omega N_{p1} e^{j\omega t}$$

SOSTITUENDO NELL'EQUAZIONE DI BILANCIO:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV} - \frac{N}{\tau} - v_g g N_p \\ \frac{dN_p}{dt} = \Gamma v_g g N_p + \Gamma R_{sp} R_{sp} - \frac{N_p}{\tau_p} \end{cases}$$

⇓

OTTENGO UN SISTEMA LINEARE DI 2 EQUAZIONI IN 2 INCOGNITE

$$\begin{bmatrix} \gamma_{NN} + j\omega & \gamma_{NP} \\ -\gamma_{PN} & \gamma_{PP} + j\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_{p1} \end{bmatrix} = \frac{\eta_i I}{qV} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

con $\gamma_{NN} = \frac{1}{\tau_{eff}} - v_g a N_p$

$\gamma_{NP} = \frac{1}{\tau_p} - \frac{R_{sp}}{N_p} - v_g a_p N_p$

$\gamma_{PN} = \frac{\Gamma}{\tau_{eff}} + \Gamma v_g a N_p$

$\gamma_{PP} = \frac{\Gamma R_{sp}}{N_p} + \Gamma v_g a_p N_p$

con $N_p = N_{p, bias}$

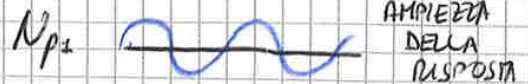
PER TROVARE N_{p1}, N_1 AL VARIARE DI ω RISOLVO IL SISTEMA LINEARE CON REGOLA DI CRAHER

$$N_1 = \frac{\eta_i I_i}{qV} \cdot \frac{1}{\det} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & \gamma_{PP} + j\omega \end{vmatrix}$$

$$N_{p1} = \frac{\eta_i I_i}{qV} \cdot \frac{1}{\det} \begin{vmatrix} \gamma_{NN} + j\omega & 1 \\ -\gamma_{PN} & 0 \end{vmatrix}$$

⇒ FISSATA UNA CERTA INTENSITÀ $\left\langle \begin{matrix} \text{DI CORRENTE} \\ \text{DI MODULAZIONE} \end{matrix} \right\rangle$

TROVO LA RISPOSTA DI PICCO DEI FOTONI CON CUI TROVO LA RISPOSTA DEL LASER



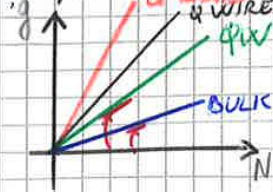
con $\det = \begin{vmatrix} \gamma_{NN} + j\omega & \gamma_{NP} \\ -\gamma_{PN} & \gamma_{PP} + j\omega \end{vmatrix} =$

$$\begin{aligned} &= (\gamma_{NN} + j\omega)(\gamma_{PP} + j\omega) + \gamma_{PN}\gamma_{NP} = \boxed{\gamma_{PN}\gamma_{NP} + \gamma_{PP}\gamma_{NN}} - \omega^2 + j\omega(\gamma_{NN} + \gamma_{PP}) \\ &= \omega_R^2 - \omega^2 + j\omega\gamma \end{aligned}$$

INOLTRE LA CAPACITÀ DI ω → DIPENDE DAL GUADAGNO DIFFERENZIALE g

! PER CUI IL LASER A SEMICONDUZIONE È FATTO LAVORARE DOVE IL g DIFFERENZIALE È GRANDE

LASER QUANTUM WELL → HANNO g CHE CRESCE PIÙ VELOCEMENTE RISPETTO A BULK

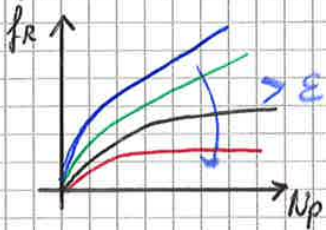


$g_{DIFF}^{BULK} < g_{DIFF}^{QW}$ (PENDENZA)

[IL MIGLIORE SAREBBE Q-DOTS]

QUANT'È LA MASSIMA BANDA CHE POSSO RAGGIUNGERE? QUAL È LA MASSIMA BANDA A -3dB

GRAFICI IN FUNZIONE DI N_p



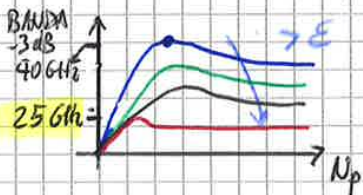
$\epsilon = 0$ → SE NON CI FOSSE LO SPECTRAL HOLE BURNING

$\epsilon \neq 0$ → CON SPECTRAL HOLE BURNING

↓

— TIPICO PER MULTIQUANTUM WELL

MAX BANDA DI MODULAZIONE PER MULTIQW CON FENOMENO SPECTRAL HOLE BURNING È 25 GHz



CALCOLO LA BANDA MAX @ -3dB

$\omega_{-3dB}^2 = \omega_p^2 + \sqrt{\omega_p^4 + \omega_r^4}$

VALORE DEL PUNTO DI LAVORO

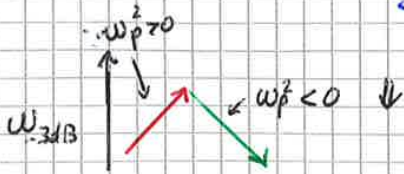
$\omega_p^2 = \omega_r^2 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\omega_r} \right)^2 \right]$

ω_r^2 SEMPRE POSITIVO
 ω_p^2 PUÒ ESSERE < 0 → SE $[] < 0$
 DUOQUE SE $\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\omega_r} \right)^2 > 1$

$\sigma > 0$

SE $\omega_p^2 \rightarrow > 0$ ⇒ ω_{-3dB} AUMENTA PERCHÉ ω_r AUMENTA CON N_p

< 0 ⇒ ω_{-3dB} DIMINUISCE MENTRE N_p AUMENTA



SI HA SE $\omega_p^2 = 0$ ⇒ $\frac{\sigma}{\omega_r} = \sqrt{2}$

CONDIZIONE PER RISPOSTA DI TIPO BUTTERWORTH