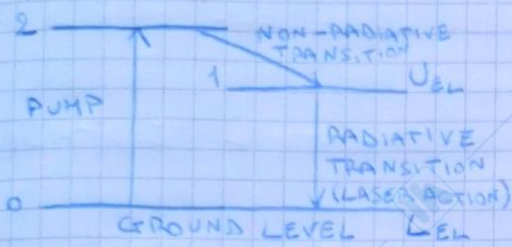
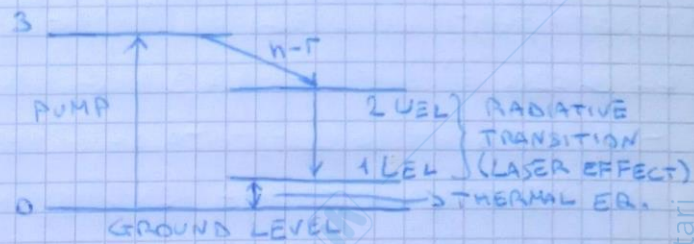


1- DISEGNARE I CORRISPONDENTI SCHEMI PER UN LASER A TRE LIVELLI E UN LASER A QUASI TRE LIVELLI, SPIEGARE LA DIFFERENZA TRA UN LASER A TRE LIVELLI E UN LASER A QUASI TRE LIVELLI, FORNIRE UNA CONFIGURAZIONE SCHEMATICA CHE INCLUDA (E DENOMINI) TUTTI I COMPONENTI DI UN SIDE-DIODE-PUMPED SOLID-STATE CRYSTAL-HOST NIR LASER.



- WORKING CONDITION: $\gamma_{21} \ll \gamma_{10}$

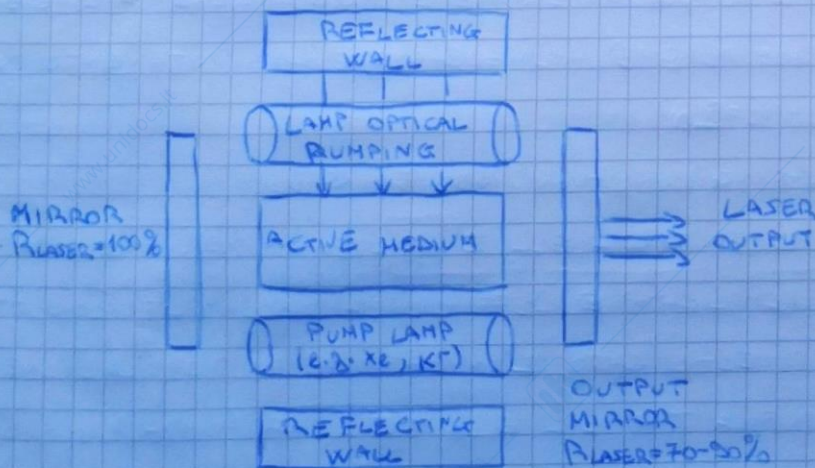
- LASER A TRE LIVELLI, DI SOLITO, HANNO UNA BUONA QUANTUM EFFICIENCY MA POTREBBERO AVERE PROBLEMI A RAGGIUNGERE L'INVERSIONE DI POPOLAZIONE POICHE' IL LIVELLO INFERIORE E' $|0\rangle$, QUINDI $N_1 > N_0$ E' POSSIBILE MA NON FACILE



- WORKING CONDITION: $\gamma_{32}, \gamma_{10} \ll \gamma_{21}$

- IL LASER A QUASI 3 LIVELLI PUO' RAGGIUNGERE L'INVERSIONE DI POPOLAZIONE PIU' FACILMENTE DEL LASER A 3 LIVELLI ANCHE SE IL LIVELLO LASER INFERIORE ($|1\rangle$) NON HA UNA POPOLAZIONE NULO (SONO VICINI IN ENERGIA ALLA TERRA QUINDI ALCUNI ATOMI ESCONO A LIVELLO 1 CAUSA DELL'ENERGIA TERMICA) *

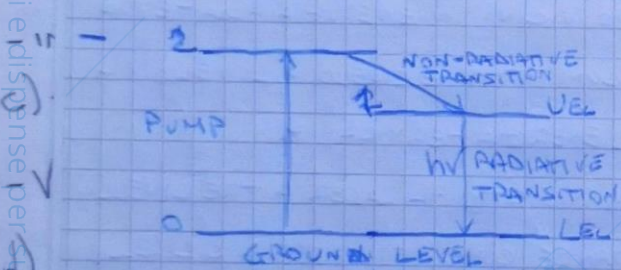
* IN GENERALE, AVRANNO UNA MINORE QUANTUM EFFICIENCY RISPETTO AL LASER A TRE LIVELLI, MA NON TROPPO POICHE' IL $\Delta E(|1\rangle \rightarrow |0\rangle)$ NON E' TROPPO GRANDE (COME NEI LASER A 4 LIVELLI) IL LASER A QUASI 3 LIVELLI COMBINA L'ALTA QUANTUM EFFICIENCY RENDENDO PIU' FACILE OTTENERE L'INVERSIONE DELLA POPOLAZIONE AVENDO LO STATO $|1\rangle$ VICINO ALLO STATO $|0\rangle$ ANCHE SE SONO ANCORA LIVELLI LASER DIVERSI.



EX 2-DESCRIVERE GLI ELEMENTI DI UN LASER A STATO SOLIDO E SPIEGARE COME SI VERIFICANO L'AMPLIFICAZIONE DELLA LUCE E L'OSCUILLAZIONE CW ALLE FREQUENZE OTTICHE. NISSEGNA LO SCHEMA DEI LASER A 3 E 4 LIVELLI E SPIEGA BREVEMENTE VANTAGGI E SVANTAGGI DI QUESTE DIVERSE CONFIGURAZIONI. FORNIRE DATI DETTAGLIATI SUI LIVELLI DI Nd:YAG E SULLE LUNGHEZZE D'ONDA DELLA POMPA/LASING

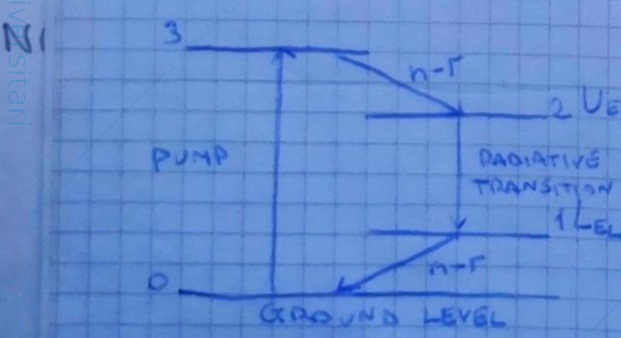
- IL LASER E' COMPOSTO DA 3 PARTI PRINCIPALI:
 - UN MEZZO ATTIVO COSTITUITO DA UN MATERIALE LA CUI STRUTTURA ATOMICA PRESENTA LIVELLI AD UN'ENERGIA ADEGUATA PER EMISSIONE VISIBILE (O IR),
 - UN MECCANISMO DI POMPAGGIO PER ECCITARE GLI ELETTRONI A LIVELLI DI ENERGIA MAGGIORI
 - UN RISONATORE OTTICO PER CONFINARE LA RADIAZIONE

I PRIMI 2 ELEMENTI COSTITUISCONO UN AMPLIFICATORE E FORNISCONO EFFETTIVAMENTE LA LASER, MENTRE L'ALTRO INTRODUCE UN FEEDBACK OTTICO NECESSARIO PER SOSTENERE L'OSCUILLAZIONE LASER. IN QUESTO CASO LE PERDITE (PERCHE' ALCUNI FOTONI SONO ASSORBITI O DIFFRATTI DURANTE IL PROCESSO) SONO COMPENSATI DAL GUADAGNO.



WORKING CONDITION: $\gamma_{21} \ll \gamma_{10}$
 NELLA STRUTTURA A 3 LIVELLI, L'INVERSIONE DELLA POPOLAZIONE AVVIENE TRA IL LIVELLO 0 E 1 SFRUTTANDO UNA TRANSIZIONE NON RADIATIVA 2-1. LA POMPA PROMUOVE GLI ELETTRONI DAL LIVELLO 0 AL LIVELLO 2, ALLORA

UNA TRANSIZIONE VELOCE PORTA GLI ELETTRONI AL LIVELLO 1 REALIZZANDO L'INVERSIONE DI POPOLAZIONE $\Delta N_{10} > 0$. HANNO UNA BUONA QUANTUM EFFICIENCY MA, DATO CHE, 2+1 ELETTRONI DEVONO ESSERE PROMOSSI AL LIVELLO SUPERIORE E RAGGIUNGERE LA CONDIZIONE DI AMPLIFICAZIONE $N_1 > N_0$ NON E' SEMPLICE PERCHE' RICHIEDE ANCHE LO SVUOTAMENTO DEL LIVELLO 0. CIO' SIGNIFICA CHE $\Delta N = N_1 - N_2 = 2n$



WORKING CONDITION: $\gamma_{32}, \gamma_{10} \ll \gamma_{21}$
 IL LASER A 4 LIVELLI E' UTILIZZATO PER MIGLIORARE LA SEMPLICITA' E L'EFFICIENZA NELL'AMPLIFICAZIONE OTTICA IN QUESTO CASO L'INVERSIONE DI POPOLAZIONE SI VERIFICA TRA IL LIVELLO 1 E 2. LA POMPA PROMUOVE GLI ELETTRONI DAL LIVELLO 0 AL LIVELLO 3, ALLORA

SI VERIFICA UNA TRANSIZIONE NON RADIATIVA 3-2 CHE RENDE POSSIBILE UN'EMISSIONE STIMOLATA NEL GAP 2-1. UNA VOLTA NEL LIVELLO 1, GLI ELETTRONI DECAONO AL LIVELLO 0 SENZA FORNIRE RADIAZIONI. SOTTO LA WORKING CONDITION E', QUINDI, SUFFICIENTE PROMUOVERE QUALSIASI n ELETTRONI PER OTTENERE L'INVERSIONE DELLA POPOLAZIONE ΔN_{21} . E' QUINDI PIU' FACILE OTTENERE LA CONDIZIONE $N_2 > N_1 = 0$

- IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DI UN LASER È QUELLO DI UNA STRUTTURA A 4 LIVELLI. LA POMPA OTTICA UTILIZZATA HA LUNGHEZZA D'ONDA $\lambda_p = 0,8 \mu\text{m}$ MENTRE L'EMISSIONE È A $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$. NOTIAMO CHE L'ENERGIA E_p DEI FOTONI POMPA RISULTA SUPERIORE A QUELLA DEI FOTONI LASER, E_L . CIO' AVVIENE PERCHÉ GLI ELETTRONI DEVONO ESSERE PROMOSI DAL LIVELLO 0 AL LIVELLO 3 ED EFFETTUANO LA TRANSIZIONE LASER DAL 2 ALL'1, MA COMUNQUE QUESTO PROVOCA UNA PERDITA DI ENERGIA CHIAMATA DI FETTO QUANTICO. L'ENERGIA PERSA È PARI A $\Delta E = E_p - E_L = h\nu_p - h\nu_L = 5,92 \cdot 10^{-20} \text{ J}$ CHE CORRISPONDE CIRCA AL 24% DELL' E_p .

1- ELENCA LE PROPRIETÀ PECULIARI DEI RAGGI LASER CHE RENDONO IL LASER INEGUAGLIABILI RISPETTO ALLE SORGENTI LUMINOSE TRADIZIONALI. SPIEGARE IL SIGNIFICATO E LA RILEVANZA DI CIASCUNA PROPRIETÀ PECULIARE, ANCHE CON ESEMPI NUMERICI E RIFERIMENTI AD APPLICAZIONI PRATICHE.

1- INTERAZIONE TRA LUCE E MATERIA PUÒ PORTARE A 3 DIVERSI EFFETTI:

- ASSORBIMENTO: AVVIENE QUANDO UN FOTONE A FREQUENZA ν COLPISCE UN MATERIALE CHE PRESENTA UN GAP DI ENERGIA $\Delta E = h\nu$ TRA DUE LIVELLI ($1 \rightarrow 2$). IN QUESTO CASO, IL FOTONE VIENE ASSORBITO CON UNA CERTA PROBABILITÀ E QUANDO CIO' ACCADE LA SUA ENERGIA VIENE TRASFERITA AD UN ELETTRONE AL LIVELLO 1 CHE VIENE PROMOSSO AL LIVELLO 2 CON ENERGIA $E_2 = E_1 + h\nu$. IN QUESTO CASO, LA LUCE CHE COLPISCE IL MATERIALE VIENE ATTENUATA E QUINDI IL MATERIALE AGISCE COME ATTENUATORE.

UNA VOLTA CHE UN ELETTRONE SI TROVA IN UN LIVELLO DI ENERGIA SUPERIORE, PUÒ SUBIRE DUE POSSIBILI FENOMENI: EMISSIONE SPONTANEA O STIMOLATA.

1- L'EMISSIONE SPONTANEA CONSISTE NEL DECADIMENTO DELL'ELETTRONE AD UN LIVELLO DI ENERGIA INFERIORE, CHE SIGNIFICA CHE L'ENERGIA PERSA NEL PROCESSO VIENE EMESA COME RADIAZIONE, MA IN MODO INCOERENTE. IN QUESTO CASO, IL MATERIALE È QUINDI UN EMETTITOR. QUESTO NON È UN EFFETTO DI INTERESSE AI FINI DI RADIAZIONE LASER POICHÉ INCOERENZA SIGNIFICA FREQUENZA INDETERMINATA E FASE E DIREZIONI CASUALI.

2- EMISSIONE STIMOLATA È L'EFFETTO CHIAVE PER OTTENERE IL LASER, POICHÉ FORNISCE UNA EMISSIONE COERENTE AL FOTONE ENTRANTE, CHE VIENE APPLICATO PER MEZZO DI UN SECONDO FOTONE EMESSE CON LA STESSA FREQUENZA, FASE E DIREZIONE DEL PRIMO.

4- DESCRIVERE LE PRINCIPALI CAUSE DI INSTABILITÀ DI FREQUENZA IN UN LASER A STATO SOLIDO POMPATO A DIODI. COME POSSIAMO LIMITARE (PASSIVAMENTE) O SOPPRIMERE (ATTIVAMENTE) IL RUMORE DELLA FREQUENZA LASER?

IL MECCANISMO DI POMPAGGIO NECESSARIO PER COSTRUIRE L'OSCILLATORE LASER MIRA ESATTAMENTE A FORNIRE LE CONDIZIONI AFFINCHÉ L'EMISSIONE STIMOLATA AVVENGA FORZATA.

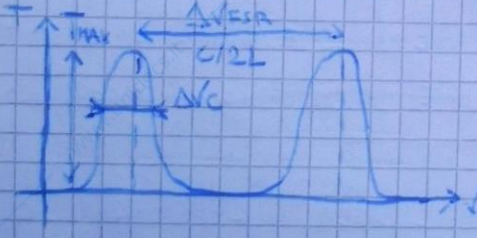
L'INVERSIONE DELLA POPOLAZIONE TRA 2 LIVELLI DI ENERGIA ATTRAVERSO ASSORBIMENTO.

DATI 2 LIVELLI CON GAP ENERGETICO $\Delta E = h\nu$ CHIAMIAMO N_1 IL NUMERO DI ELETTRONI PRESENTI NELL' i -ESIMO LIVELLO, ALL'EQUILIBRIO TERMODINAMICO DOVE ABBIAMO $E_2 > E_1$

a) MAGGIOR PARTE DEI FOTONI IN ARRIVO SARA' ASSORBITA DAGLI ELETTRONI IN LIVELLO 1 D'ALTRA
 b) PARTE SE RIUSCIAMO A RAGGIUNGERE $\Delta N > 0$ (INVERSIONE DI POPOLAZIONE POSITIVA)
 L= OTTENIAMO UN AMPLIFICATORE OTTICO, MA QUESTA CONDIZIONE DEVE ESSERE INDEBITA (LA
 T= DEVE ESSERE ABBASTANZA GRANDE E CI SERVE POMPARE MOLTO PER MANTENERLO AL
 c) LIVELLO NECESSARIO), QUINDI $\Delta N > 0$ IL MEZZO SI DICE TRASPARENTE ALLA SPECIFICA FRE-
 L= ZA CONSIDERATA. SUCCEDERE QUANDO IL 50% DEGLI ELETTRONI RIMANE AL LIVELLO INFERIO-
 RE E L'ALTRA META' IN QUELLO SUPERIORE. I DUE LIVELLI SONO BILANCIATI E QUINDI LA PROBABILITA'
 DI AVERE ASSORBIMENTO O EMISSIONE E' LA STESSA (CASO LIMITE).

S-FSR E FINESSE (F) DELL'INTERFEROMETRO FABRY-PEROT! FORNIRE DEFINIZIONE E SPIEGARE IL SIGNIFICATO

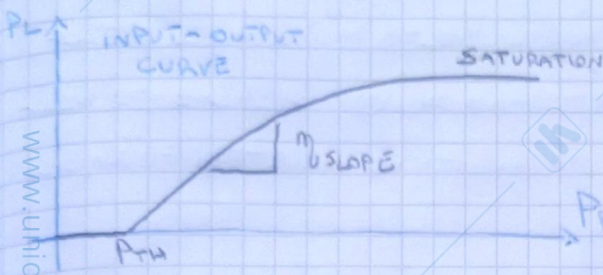
IL RISONATORE E' COMPOSTO DA UNA CAVITA' DI LUNGHEZZA L E DUE SPECCHI CON UNA FORZA E RIFLETTIVITA' R . IL MEZZO ATTIVO E' IN GENERE POSTO AL CENTRO DELLA CAVITA' MENTRE UNO DEGLI SPECCHI HA UNA RIFLETTIVITA' PIU' BASSA PER FAR USCIRE ALQUANTO IN UNA CERTA DIREZIONE. IL PIU' IMPORTANTE ASPETTO DEL RISONATORE E' LA SUA SELETTIVITA' IN LUNGHEZZA D'ONDA, INFATTI LE UNICHE λ POSSIBILI CHE POSSONO ESSERE TRASMESSE SONO QUELLE CHE RISONANO NELLA CAVITA', I CUI VALORI SONO $\lambda = 2L/m$ (M FORDINE DI 1000 Å) POICHE' IL PERCORSO DI ANDATA E RITORNO E' PARI A $2L$. DA QUI SEGUE L'ESPRESSIONE DELLE FREQUENZE RISONANTI $\nu = m c / 2L$ E QUELLA DELLA FREE-SPECTRAL-RANGE $\Delta \nu_{FSR} = c / 2L$ Ossia LA DISTANZA TRA DUE FREQUENZE RISONANTI CONSECUTIVE. A CAUSA DI NON IDEALITA' FREQUENZE TRASMESSE NON SONO SOLO QUELLE RISONANTI, MA OSSERVIAMO UN AMPLIAMENTO SPETTRALE DEL COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE INTORNO AI MODI RISONANTI



QUESTO AMPLIAMENTO SPETTRALE HA LARGHEZZA DI BANDA $\Delta \nu_C$ CHE E' LEGATO AL FSR ATTRAVERSO UN PARAMETRO CHIAMATO FINESSE!

$$F = \frac{\Delta \nu_{FSR}}{\Delta \nu_C} = \frac{\pi (R_1 R_2)^{1/4}}{1 - (R_1 R_2)^{1/4}} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R} \text{ QUANDO } R_1 = R_2 = R$$

6 - DEFINIRE IN GENERALE LA SOGLIA DI INVERSIONE DELLA POPOLAZIONE LASER
 OTTEVIAMO LA CONDIZIONE DI SOGLIA DA $\alpha \cdot \Delta N_{th} = \frac{1}{2} (-\ln(R_1) - \ln(R_2))$ DOVE
 $\delta = \frac{1}{2} (-\ln(R_1) - \ln(R_2))$ È LA PERDITA LOGARITMICA DOWNT AGLI SPECCHI, CHE DEVE
 ESSERE UGUALE AL GUADAGNO LOGARITMICO NEL SINGOLO PASSAGGIO. È POSSIBILE CORRERRE
 L'INVERSIONE DELLA POPOLAZIONE ALLA PERDITA LOGARITMICA COME $\Delta N_{th} = (N_2 - N_1)_{th} = \delta / \alpha$



QUESTA SOGLIA DI INVERSIONE DELLA POPOLAZIONE CORRISPONDE A UNA CERTA SOGLIA DI POTENZA DELLA POMPA P_{th} , QUINDI POSSIAMO TRACCIARE UNA CURVA CHE METTE IN RELAZIONE LA POTENZA DEL LASER CON QUELLA DELLA POMPA, DOPO CHE P_{th} È STATO RAGGIUNTO.

PRIMA L'OSCILLAZIONE DEL LASER E LA POTENZA DEL LASER AUMENTA LINEARMENTE
 CON LA PENDENZA $\eta_{slope} = \frac{\Delta P_L}{\Delta P} = \frac{P_L}{P_P - P_{th}}$ FINO A SATURAZIONE

7 - DEFINIRE IL PARAMETRO M^2 , FORNENDONE LA FORMULA, E SPIEGARNE IL SIGNIFICATO NELLA CARATTERIZZAZIONE DI UN RAGGIO LASER

$M^2 = \theta_{LMS} / \theta_{DL} = \theta_{LMS} / \lambda / \pi w_0$ È IL RAPPORTO TRA LA DIVERGENZA DEL LASER E LA DIVERGENZA DEL CORRISPONDENTE RAGGIO GAUSSIANO CON LIMITAZIONE DI DIFFRAZIONE (DL) CON LA STESSA VITA DEL RAGGIO. IN GENERALE, LA DIVERGENZA DI UN RAGGIO LASER MULTIMODALE È MAGGIORE DI QUELLA DEL CORRISPONDENTE RAGGIO DL E IL PARAMETRO M^2 CONTA QUANTE VOLTE IL RAGGIO È PIÙ DIVERGENTE DELLA MINIMA DIVERGENZA POSSIBILE. IN QUESTO CASO, SE IL RAGGIO DI USCITA DEL LASER TEM₀₀ YAG È COMPLETAMENTE GAUSSIANO TEM₀₀, DOVREMMO AVERE $M^2 = 1$

8 - UTILIZZANDO UN VELOCIMETRO LASER DOPPLER, MISURIAMO LA VELOCITÀ DELLE PARTICELLE SFERICHE SOSPese ALL'INTERNO DI UN SERBATOIO LASER TRASPARENTE (DIAMETRO DELLE PARTICELLE COMPRESO TRA 0,2 μm ÷ 50 μm) QUANDO L'ACQUA CIRCOLA A VALORI DI VELOCITÀ COMPRESI TRA 2 mm/s E 5 cm/s.

QUALE SORGENTE LASER È PIÙ ADATTA PER QUESTO TIPO DI MISURAZIONE? COME MAI? SCEGLI UN FOTORILEVATORE APPROPRIATO E DISCUTI IL SUO POSSIBILE VALORE DI REATTIVITÀ IN QUALE DIREZIONE, E PERCHÉ, DOVREMMO POSIZIONARE L'OTTICA RICEVENTE E IL FOTORILEVATORE. UNA SORGENTE LASER APPROPRIATA PER L'LDV PROPOSTO POTREBBE ESSERE UN LASER He-Ne (λ = 632,8 nm ROSSO) O UN LASER Nd:YAG A FREQUENZA RADDOPPIATA (λ = 532 nm, VERDE) PERCHÉ IL RAGGIO DI USCITA È VISIBILE CON PROFILO DEL FASCIO DI USCITA PERFETTAMENTE GAUSSIANO (TEM₀₀ CON $M^2 = 1$) E BUONA STABILITÀ DI FREQUENZA E AMPIEZZA. LA LUNGHEZZA D'ONDA VISIBILE (ROSSA O VERDE) CONSENTE UN FACILE ALLINEAMENTO DEI DUE FASCI NELLA REGIONE DI INTERFERENZA E DI MISURA.

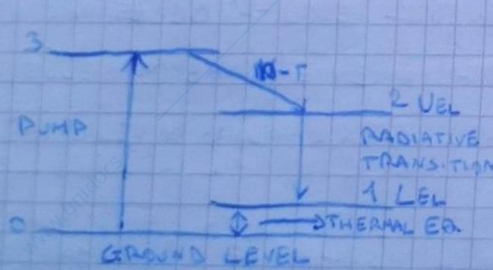
PER AVERE PIÙ POTENZA OTTICA, POTREMMO ANCHE UTILIZZARE UN DIODO LASER A SEMICONDUCTORE VISIBILE (LD) MA AL COSTO DI UNA QUANTITÀ DEL RAGGIO RADDOPPIATO, POICHÉ I DIAMETRI

EX SIC
PRO MA
a) PD
b) DT
L= DE
T+ LI
c) LA
L= 2A
RE
d) LI
EX S-
LA
a) E
- P IF
b) E
- I MI
- I LI
c) IN
- I G
- P
d) D
- I D
- I F
c) S
N
N

QUINDI LA LUCE DIFFUSA È PRINCIPALMENTE NELLA DIREZIONE AVANTI E INDIETRO,
POSIZIONARE IL FOTORICEVITORE ALL'INGRESSO O LATO DI USCITA DEL SERBATOIO A CAUSA
DELLA LUNGHEZZA D'ONDA DEL LASER VISIBILE, POSSIAMO UTILIZZARE UN FOTODIODO S
RESPONSIVITÀ NELL'INTERVALLO VISIBILE DI CIRCA 0,5 A/W.
LA MAGGIOR PARTE DELLE PARTICELLE RILEVATE HA UN RAGGIO MOLTO PIÙ GRANDE DELLA
LUNGHEZZA D'ONDA VISIBILE ($\approx 0,5 \mu m$) E QUINDI LO SCATTERING È PRINCIPALMENTE
REGIONE MIE. PERTANTO, POSIZIONARE IL FOTORICEVITORE IN AVANTI (O INDIETRO) FORN
UNA BUONA EFFICIENZA DI RILEVAMENTO.

SE INTERROMPIAMO LA CIRCOLAZIONE DELL'ACQUA E LE PARTICELLE SONO ANCORA SO
NEL LIQUIDO, CHE TIPO DI STRUMENTO LASER DOVREMMO USARE PER MISURARE LA DISTAN
NE DEI DIAMETRI? SPIEGARE IL PRINCIPIO DELLA MISURAZIONE E SPIEGARE COME LA
LUBRIFICAZIONE DIPENDE DALLA LUNGHEZZA D'ONDA DEL LASER E DAI PARAMETRI DEL SISTEMA
DOBBIAMO USARE UN PRATICO SIZE ANALYZER, RECUPERANDO LA DIMENSIONE MEDIA
DELLE PARTICELLE DALLA DISTRIBUZIONE ANGOLARE DELLA LUCE LASER DIFFUSA. LA RISOLU
E LA PRECISIONE DI TALE STRUMENTO DI MISURAZIONE OTTICA MIGLIORANO QUANDO LA DIMEN
DELLE PARTICELLE DIVENTA PIÙ PICCOLA, MENTRE SONO PROPORZIONALI ALLA LUNGHEZZA D'ONDA
DEL LASER E ALLA SUA PRECISIONE.

10- SPIEGARE IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO E I POSSIBILI VANTAGGI/SVANTAGGI DEL LASER
A QUASI 3 LIVELLI. SPIEGA PERCHÉ IL POMPAGGIO LONGITUDINALE È FONDAMENTALE PER
QUESTI LASER



WORKING CONDITION: $\nu_{32}, \nu_{10} \ll \nu_{21}$
QUESTO TIPO DI STRUTTURA È A 3 LIVELLI DI SISTEMA CON IL
LIVELLO 1 MOLTO VICINO AL LIVELLO 0, IL CHE SIGNIFICA
CHE IL LIVELLO 1 NON È PIÙ SEMPRE VUOTO, MA PRESENTA
PIUTTOSTO UN CERTO NUMERO n DI ELETTRONI.

DOBBIAMO PROMUOVERE $n > m$ ELETTRONI AL LIVELLO SUPERIORE, IL CHE È PIÙ DIFFICILE
DI UN PURO SISTEMA A 2 LIVELLI. QUINDI, ORA LA CONDIZIONE PER L'AMPLIFICAZIONE È: $N_2 > N_1$
NELLA CAVITÀ DEL RISONATORE ABBIAMO IL MEZZO ATTIVO POSTO TRA DUE SPECCHI, QUINDI
QUANDO IL MEZZO VIENE ECCITATO PER MEZZO AD UNA POMPA, I MODI LONGITUDINALI VENGONO
FATTI RIMBALZARE AVANTI E INDIETRO TRA GLI SPECCHI E SPERIMENTARE UN GUADAGNO
OTTICO PER OGNI PASSAGGIO ATTRAVERSO IL MEZZO STESSO

11- SPIEGA PERCHÉ, TIPICAMENTE, UN MI NON VIENE UTILIZZATO PER MISURARE LE
DISTANZE ASSOLUTE E COME POTREMMO MODIFICARE IL TIPICO SCHEMA DI SORGENTE E RICE
VAMENTO PER MISURARE LE DISTANZE ASSOLUTE DEL BERSAGLIO NELL'INTERVALLO 0-1m.
L'INTERFEROMETRIA CONSISTE NELL'ESEGUIRE UN RILEVAMENTO COERENTE AUTOBATTENDO
UN SEGNALE CON SE STESSO DOPO ESSERE STATO DIVISO TRA UN PENCONSO DI RIFERIMENTO E

LA LUNGHEZZA LUNGO IL PERCORSO DI MISURA PUO' ESSERE RILEVATA E QUANTIFICATA OSSERVANDO LE FRANGE INTERFEROMETRICHE. CI CONCENTRIAMO SULLA VARIAZIONE DELLA DISTANZA DI UN BRACCIO IN MOVIMENTO. POSSIAMO OTTENERE UNA RISOLUZIONE MOLTO ALTA, NELL'ORDINE DI $\Delta L = 100 - 10 \text{ nm}$ PER DISTANZE DA MENO DI 0,1m FINO A 10 Km.

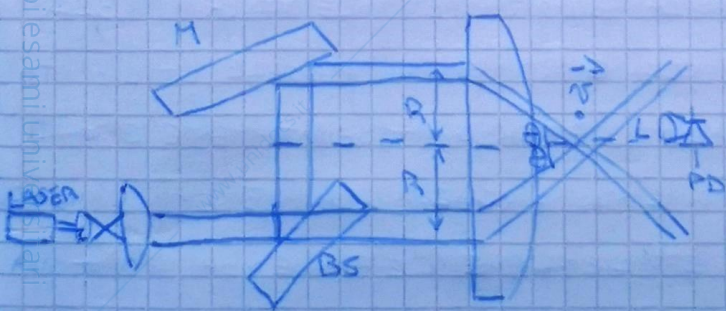
AD ESEMPIO, AGGIUNGENDO UNA MODULAZIONE LINEARE ALLA FREQUENZA OTTICA DEL LASER $\nu(t) = \nu_0 + \alpha \cdot t$, POTREMMO RILEVARE UN SEGNALE OSCILLANTE COSENO CON UNA FREQUENZA ELETTRO-MAGNETICA DIRETTAMENTE PROPORZIONALE ALLO SQUILIBRIO DELL'INTERFEROMETRO $(L_R - L_M)$ E QUINDI, CAMBIANDO LA LUNGHEZZA DEL BRACCIO DI RIFERIMENTO (L_R), POTREMMO MISURARE IL VALORE ASSOLUTO DELLA LUNGHEZZA DEL BRACCIO DI MISURA.

1) - DESCRIVERE LE PRINCIPALI CAUSE DI INSTABILITA' DI FREQUENZA IN UN LASER A STATO SOLIDO POMPATO A DIODI. COME POSSIAMO LIMITARE PASSIVAMENTE IL RUMORE DELLA FREQUENZA DEL LASER? IN CHE MODO QUESTO RUMORE LIMITA UNA MISURAZIONE DELLE VIBRAZIONI DA PARTE DI UN INTERFEROMETRO DI MICHELSON.

LAVORANDO IN BANDA BASE, LE INTERFERENZE ELETTROMAGNETICHE POSSONO INFLUIRE SULL'ESITO EFFETTUATO DALL'INTERFEROMETRO E SULL'ALLINEAMENTO DEGLI SPECCHI.

2) - FORNIRE UN DISEGNO DELLA CONFIGURAZIONE SPERIMENTALE E SPIEGARE BREVEMENTE COME FUNZIONA LA MISURAZIONE OTTICA.

FORNIRE LIVELLI DI POTENZA OTTICA SICURI CHE POSSONO ESSERE UTILIZZATI PER UN ESPERIMENTO ALL'APERTO E IN UN'AREA NON RISTRETTA.



NELLA REGIONE DI SOVRAPPOSIZIONE DEI DUE RAGGI LASER IDENTICI E INCROCIATI OSSERVIAMO UN MODELLO DI INTERFERENZA CON FRANGE DI LUCE CHIARA E SCURA AVENTI UNA DISTANZA PICCO-PICCO Δ (DIPENDENTE DALL'ANGOLO DI INCIDENZA DEI RAGGI 2θ NON CHE DALLA LUNGHEZZA D'ONDA DEL LASER).

PER LE PARTICELLE CHE ATTRAVERSAANO LA REGIONE DI INTERFERENZA CON VELOCITA' v ORTOGONALE AL PATTERN DELLE FRANGE, SI PUO' OSSERVARE LUCE DIFFUSA VARIABILE NEL TEMPO CHE OSCILLA AD UNA FREQUENZA f_D CHE E' IL RECIPROCO DEL TEMPO/PERIODO ATTRAVERSAAMENTO DELLE FRANGE $T_D = \Delta/v$ E QUINDI DIRETTAMENTE PROPORZIONALE ALLA VELOCITA' v .

POICHE' STIAMO LAVORANDO ALLA LUNGHEZZA D'ONDA VISIBILE $\lambda = \lambda_{\text{green}} = 532 \text{ nm}$, IL LASER PUO' ESSERE CONSIDERATO IN UNA CLASSE DI SICUREZZA LASER IIIA QUANDO LA SUA POTENZA E' MANTENUTA AL DI SOTTO DI 5mW. PERTANTO, OPERANDO ALL'APERTO ED IN AREE NON RISTRETTE IL LIMITE DI POTENZA OTTICA DI 5mW PUO' ESSERE UTILIZZATO SENZA (SIGNIFICATIVO) PERICOLO.

14- COME SI CONFRONTA QUESTA RISOLUZIONE ΔT CON LA DURATA DELL'IMPULSO, τ_p ?

EX) SI, PROBLEMI POSSONO SOGGERE E AVALE ALTRO TIPO DI LASER POTREMMO USARE PER

a) PO' TALI DIFFICOLTA' POSTE DALLE MISURAZIONI OTTICHE PULSATE?

b) PER UTILIZZANDO IL Q-SWITCHED PROPOSTO, IL TEMPO RICHIESE ($\Delta T = 0,13 ns$) E' SIGNIF

L= OT RE VAMENTE MINORE DELLA DURATA TEMPORALE DELL'IMPULSO OTTICO ($\tau_p = 8 ns$). INFATTI

- DI LA IN QUESTE CONDIZIONI LA MISURA NON E' SEMPLICE E PUO' FORMARE ERRORI SIGNIFICATI

c) LA RISOLUZIONE TEMPORALE RICHIESTA E' MINORE DELLA DURATA TEMPORALE DELL'IMPULSO

L= 2 RI IN PRESENZA DI RUMORE DI AMPIEZZA SI POSSONO OTTENERE ERRORI SIGNIFICATIVI

a) UN LOCALIZZAZIONE DELLA "POSIZIONE TEMPORALE DELL'IMPULSO" CON RISOLUZIONE ΔT M

L= 3 S SAREBBE PREFERIBILE MISURARE IL TOP E RISOLVERE ΔT CON UN IMPULSO OTTICO

E NE MOLTO INFERIORE ALLA RISOLUZIONE DESIDERATA. QUINDI, PER UN ΔT FISSATO, E' UTILE

a) NE IL VALORE DI τ_p .

L= 4 PER OTTENERE UNA RISOLUZIONE TEMPORALE PIU' BREVE (ΔT MINORE), SI POTREBBE

E DI IMPULSO OTTICI PIU' BREVI, SI POTREBBE USARE UNA SORGENTE LASER IN MODALITA' Q-SW

M DE CON $\tau_{p,HL} = 10 ps$ OTTENENDO $\Delta T / \tau_{p,HL} = 13$. IN QUESTO CASO LA MISURA DEL TOP

E' MOLTO PIU' RISOLVIBILE E POTREMMO RAGGIUNGERE ANCHE RISOLUZIONI ΔT DELL'ORDINE

" DE $\tau_{p,HL}$ (RISOLUZIONE $\Delta T \approx 6 ps \approx \tau_{p,HL} / 16$)

15- QUALI SONO I VANTAGGI DELLA LUNGHEZZA D'ONDA DI USCITA DI $1,55 \mu m$?

F 10- I VANTAGGI DELLA LUNGHEZZA D'ONDA DI USCITA LASER DI $1,55 \mu m$ SONO CHE QUESTA

L= A LUNGHEZZA D'ONDA ^{POSSONO} ESSERE TRASMESSI CON UN'ATTENUAZIONE ESTREMAMENTE BASSA

S Q. ($\alpha_{dB} \approx 0,02 dB/Km$) LUNGO LE FIBRE OTTICHE E CHE LA REGIONE SPETTRALE OTTICA DI $1,5 \mu m$

COME QUALSIASI ALTRA $\lambda > 1,4 \mu m$, E' SICURO PER GLI OCCHI E QUINDI PUO' ESSERE UTILIZZATO

S IN APPLICAZIONI LASER NELLO SPAZIO LIBERO A LIVELLI DI POTENZA MODERATAMENTE ELEVATI

16- FORMARE UNA DEFINIZIONE/SPIEGAZIONE FORNENDO ANCHE ALCUNI ESEMPI NUMERICI

DI COSA SONO LA QUANTUM EFFICIENCY E LA SLOPE EFFICIENCY E L'EFFICIENZA COMPLESSIVA

DA ELETTRICA A OTTICA, IN UN LASER A STATO SOLIDO POMPATO A DIODO

17- L'EFFICIENZA QUANTICA DEL LASER E' IL RAPPORTO TRA L'ENERGIA DEL FOTONE LASER E

DI L'ENERGIA DEL FOTONE DELLA POMPA. $\eta = \frac{E_L}{E_p} = \frac{h\nu_L}{h\nu_p} = \frac{\lambda_p}{\lambda_L}$

MA AD ES: IL LASER ER: GLASS FORNISCE UN'AMPIA LARGHEZZA DI BANDA DI EMISSIONE,

Q. $1600-1620 nm$, CENTRATA ATTORNO A $\lambda_L = 1,55 \mu m$. IL LASER DI POMPAGGIO UTILIZZATO HA UNA

F. LUNGHEZZA D'ONDA $\lambda_p = 0,98 \mu m$ ($\lambda_L = 1,533 \mu m$) O $\lambda_p = 1,5 \mu m$ ($\lambda_L = 1,55 \mu m$). INOLTRE

Q. SECONDO CORRISPONDE UN QUANTUM DEFECT (OSSIA LA PERDITA DI ENERGIA CAUSATA

11 DAGLI ELETTRONI QUANDO DEVONO ESSERE PROMOSI DAL LIVELLO 0 AL LIVELLO 3 E FACENDO

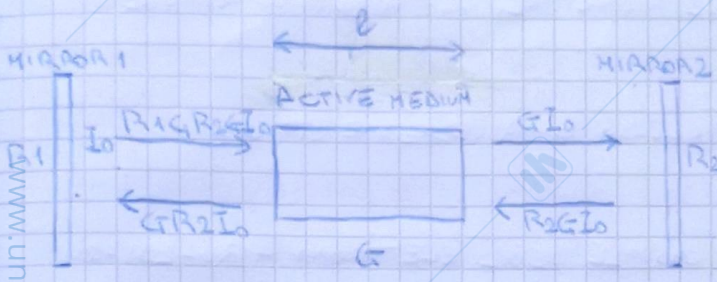
Q. IL PASSAGGIO DAL 2° AL 1°) DEL 3% PER IL 1° E DEL 6,5% PER IL 2° (QUANTUM EFFICIENCY

VA MIGLIORE)

INIZIA L'OSCILLAZIONE DEL LASER CHE AUMENTA LINEARMENTE CON LA PRESSIONE

$\text{slope } \frac{dP_L}{dP} = \frac{P_L}{P_0 - P_{th}}$ FINO A SATURAZIONE

17 - MODI LONGITUDINALI E TRASVERSALI DI UN RISONATORE LASER. SPIEGARE QUESTI CONCETTI UTILIZZANDO DEI SEGNI E FORMULE SPECIFICHE.



NELLA CAVITA' DEL RISONATORE ABBIAMO IL MEZZO ATTIVO POSTO TRA QUEI SPECCHI, QUINDI, QUANDO IL MEZZO VIENE ECCITATO DA UNA POMPA I MODI LONGITUDINALI VENGONO FATTI RIBALZARE QUANTI E INDIETRO TRA GLI SPECCHI SPERIMENTANDO

QUADAGNO OTTICO PER OGNI PASSAGGIO ATTRAVERSO IL MEZZO STESSO $G = \frac{I_{out}}{I_{in}} = e^{2\Delta N L}$
 $GR_1 GR_2 I_0 = I_0$ SO $G^2 = \frac{1}{R_1 R_2} = e^{2\Delta N L} \rightarrow \Delta N L = \frac{1}{2} (\ln(R_1) + \ln(R_2))$ AND $\Delta N = \frac{1}{2L} (\ln(R_1) + \ln(R_2))$
 $\Delta N_{th} = (N_2 - N_1)_{th} = \Delta N$

PER CAPIRE COM'E' FATTO IL CAMPO EM DEL LASER E' NECESSARIO RISOLVERE L'EQUAZIONE HELMOLTZ NELLO SPAZIO LIBERO, SOTTO L'ASSUNZIONE DI PARASSIALITA', CHE SPIEGA LA DIFFRAZIONE. FACENDO QUESTO IN COORDINATE CARTESIANE TROVIAMO CHE IL PROFILO TRASVERSALE DEL CAMPO ELETTRICO PUO' ASSUMERE LE FORME DEFINITE DAI MODI DI HERMITE

GAUSS: $E = E_0 \underbrace{H_0^{(x)}}_{\text{sono}} \left(\frac{x}{w(z)} \right) \underbrace{H_m^{(y)}}_{\text{sono}} \left(\frac{y}{w(z)} \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{w(z)^2}}$

QUESTI MODI TEM₀₀ E DIPENDONO LUNGO X E Y DAL PRODOTTO TRA UN POLINOMIO DI HERMITE E UNA GAUSSIANA. PER TEM₀₀ QUANDO H₀(x) = 1 E IL CAMPO ELETTRICO SI SEMPLIFICA AD $E = E_0 e^{-\frac{x^2+y^2}{w_0^2}}$ DOVE W₀ E' IL BEAM WAIST IN Z=0, QUINDI IL RAGGIO DELLA DIMENSIONE DEL PUNTO CIRCOLARE.

SIAMO INTERESSATI A CAPIRE COME LA DIFFRAZIONE MODIFICA LA FORMA TRASVERSALE DEL CAMPO PER AUMENTARE Z. DURANTE LA PROPAGAZIONE, IL BEAM SUBISCE UN ALLARGAMENTO PARI A

$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2} = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2}$ DOVE $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = \text{RAILEIGH DISTANCE}$.

18 - QUANDO IL BERSAGLIO SI FERMA A UNA DISTANZA L_T = 1,01m, IL VIBRARE SCOSTO ~~...~~ E INDUCE PICCOLE VIBRAZIONI DEL BERSAGLIO (SPK) CHE POSSIAMO RILEVARE VIBRAZIONI CON PICCOLE?

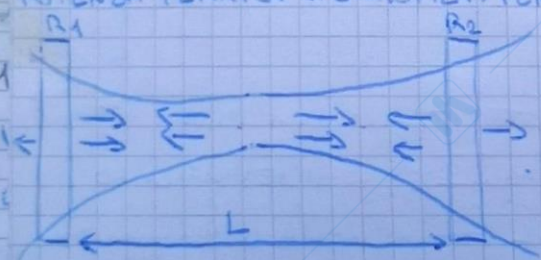
PER RILEVARE VIBRAZIONI TARGET MOLTO PIU' PICCOLE DELLA LUNGHEZZA D'ONDA DEL LASER, E QUINDI MOLTO PIU' PICCOLE DELLA RISOLUZIONE "DIGITALE" DELL'INTERFEROMETRO NELLA MODALITA' DI CONTEGGIO DI FRANGI, DOVREMMO USARE UN RILEVAMENTO COMPLETAMENTE ANALOGICO DELLO SFASAMENTO INTERFEROMETRICO Δφ, NELLA REGIONE IN CUI LA RISPOSTA DELL'INTERFEROMETRO E' LINEARE IN Δφ. PER OTTENERE QUESTA CONDIZIONE OPERATIVA, POSSIAMO IMPOSTARE L'INTERFEROMETRO "IN QUADRATURA" CON Δφ_{0} = k \cdot 2(L_T - L_A) = \pi/2 IN MODO CHE IN QUESTA REGIONE DI LAVORO, LINEARE QUANDO Δφ << 1, SI ABBAIA UNA VARIAZIONE ANALOGICA DI FOTOCORRENTE PROPORZIONALE ALLE VARIAZIONI DI SPOSTAMENTO E DISTANZA}

E) 1 QUESTA APPROSSIMAZIONE È VALIDA SU UNO DEI SUPERARE I TUOI ESAMI UNIVERSITARI
 (Δs ≪ λ) E PRODUCE CAMBIAMENTI DI FASE Δφ ≪ π.
 2) CREDENDO CON UN INTERFEROMETRO IN QUADRATURA, LA MINIMA VARIAZIONE DI DISTANZA Δs
 3) CHE È IL NOISE EQUIVALENT DISPLACEMENT (NED). CONSIDERANDO IL RUMORE TECNOLOGICO
 L= RUMORE TERMICO ELETTRONICO, CI APPROPIAMO CON DUE PRINCIPALI CONTRIBUTI DI RUMORE.

- 1- NEDp DAL RUMORE DI FASE DEL LASER.
 2- NEDa DAL RUMORE QUANTICO ASSOCIATO AL PROCESSO DI RIVELAZIONE OTTICA.
 3- NEDt DAL RUMORE TERMICO ASSOCIATO AL MOTO CASUALE DEGLI ELETTRONI A QUALSIASI TEMPERATURA DI LAVORO T > 0K.
 4- NEDe DAL RUMORE IN ECCESSO DEI CIRCUITI ELETTRONICI.

SOMMARE I DUE CONTRIBUTI DI RUMORE DOMINANTI SIGNIFICA SOMMARE LE DUE VARIANZE <NEDp²> E <NEDa²>. QUANDO LAVORIAMO CON UN INTERFEROMETRO UNBALANCED, CIOÈ (LH-LR) ≠ 0 OTTIENIAMO NEDp ≫ NEDa IN MODO DA POTER CONSIDERARE SOLO IL TERMINE DEL RUMORE DI FASE

10- SPIEGARE IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO E LE PROPRIETÀ DI UN MISURATORE DI POTENZA TERMICA (TERMOPICA) PER RADIAZIONE IR



IL RISONATORE È COMPOSTO DA UNA CAVITÀ DI LUNGHEZZA L E DUE SPECCHI CON UNA CERTA FORMA E RIFLETTIVITÀ. IL MEZZO ATTIVO È IN GENERE POSTO AL CENTRO DELLA CAVITÀ, MENTRE UNO DEGLI SPECCHI HA RIFLETTIVITÀ MINIMA RISPETTO ALL'ALTRA PER FAR USCIRE I FOTONI IN UNA CERTA DIREZIONE.

IL PIÙ IMPORTANTE ASPETTO DI UN RISONATORE È LA SUA SELETTIVITÀ IN LUNGHEZZA D'ONDA. INFATTI, L'UNICO POSSIBILE CHE PUÒ ESSERE TRASMESSO SONO QUELLI CHE RISONANO NELLA CAVITÀ λ = 2L/m CON 2L = PERCORSO DI ANDATA E RITORNO E m = ORDINE DI MODO RISONANTE. SEGUE LA RESONANCE FREQUENCY: ν = m c / 2L E LA FREE SPECTRAL RANGE (FSR) OSSIA LA DISTANZA TRA DUE FREQUENZE RISONANTI CONSECUTIVE: ΔνFSR = c / 2L

A CAUSA DI NON IDEALITÀ LE FREQUENZE TRASMESSE NON SONO QUELLE RISONANTI, MA OSSERVANO UN AMPLIAMENTO SPETTRALE DEL COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE INTORNO AI MODI RISONANTI. QUESTO AMPLIAMENTO SPETTRALE HA LARGHEZZA DI BANDA Δνc CHE È LEGATO AL FSR ATTRAVERSO UN PARAMETRO CHIAMATO FINESSE DEFINITO COME!

$$F = \frac{\Delta\nu_{FSR}}{\Delta\nu_c} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} = \frac{\pi \sqrt{R_1 R_2}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}} \quad \text{DOVE } R = \sqrt{R_1 R_2}$$

IL COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE T = P_{OUT} / P_{IN} DEL FABRY-PÉROT SEGUE IL PROFILO

$$\text{SPETTRALE DI AIRY: } T(\varphi) = \frac{(1-R)^2}{1 + R^2 - 2R \cos \varphi} \quad \text{CON } \varphi = 2\pi \cdot \frac{2L}{\lambda} = 2\pi \cdot m = 2\pi \sqrt{\frac{2L}{\lambda}}$$

E CON R₁ = R₂ = R.

ABBIAAMO ANCHE IL FATTORE QUALITÀ $Q = \frac{f}{\Delta f} = \frac{v}{\Delta v}$. $f = m \cdot \frac{c}{\lambda}$ CHE MISURA L'ALLARGAMENTO SPETTRALE RISPETTO ALLA FREQUENZA DI LAVORO.

20 - ELENCA LE PROPRIETÀ DEI RAGGI LASER CHE RENDONO I LASER INEGUAGLIABILI RISPETTO ALLE SORGENTI LUMINOSE TRADIZIONALI. SPIEGARE IL SIGNIFICATO E LA RILEVANZA DI CIASCUNA PROPRIETÀ PECULIARE, ANCHE CON ESEMPI NUMERICI E RIFERIMENTI AD APPLICAZIONI PRATICHE

1 - MONOCROMATICITÀ = EMETTE UN SOLO COLORE

COERENZA SPAZIALE E TEMPORALE = STESSO COMPORTAMENTO SULL'ASSE DEL TEMPO E DELLA FREQUENZA

DIREZIONALITÀ = VIAGGIANO TUTTI NELLA STESSA DIREZIONE E ALLA STESSA VELOCITÀ

LUMINOSITÀ (ALTA DENSITÀ DI ENERGIA SPAZIALE) = QUANTO POSSIAMO CONFINARE L'ENERGIA OTTICA NELLO SPAZIO

POLARIZZAZIONE = TUTTI I FOTONI HANNO LA STESSA DIREZIONE DI POLARIZZAZIONE

DURATA (DENSITÀ TEMPORALE DI ENERGIA) = POSSIAMO CONCENTRARE L'ENERGIA

IN POCHI SECONDE E POI PER MOLTO TEMPO HANNO ZERO ENERGIA E POI CREAMO UN ALTRO IMPULSO

QUINDI L'ENERGIA CONCENTRATA IN UN INTERVALLO MOLTO BREVE. IN QUESTO MODO ABBIAMO

UNA POTENZA DI PICCO MOLTO ELEVATA

21 - DESCRIVERE LE PRINCIPALI CAUSE DI INSTABILITÀ DI FREQUENZA IN UN LASER A

STATO SOLIDO POMPATO A DIODI. COME POSSIAMO LIMITARE (PASSIVAMENTE) O SOPPRIMERE (ATTIVAMENTE) IL RUMORE DELLA FREQUENZA LASER?

LA INSTABILITÀ DI FREQUENZA PUÒ ESSERE CAUSATO DALLE OSCILLAZIONI DELLA CAVITÀ

DEL RISONATORE DI LUNGHEZZA $2L$, COME SI PUÒ VEDERE DALLE EQUAZIONI DEI MODI LONGITUDINALI

$v = m \frac{c}{2L} \Rightarrow \Delta v = m \cdot \frac{c}{2L^2} (-\Delta L) \Rightarrow \frac{\Delta v}{v} = -\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$

UN'ALTRA CAUSA PUÒ ESSERE LA VARIAZIONE DI LUNGHEZZA DELLA CAVITÀ LASER ΔL

DOVUTA ALLA VARIAZIONE DELLA TEMPERATURA AMBIENTE ΔT

$\frac{\Delta v}{v} = -\frac{\Delta L}{L} = -\alpha \Delta T$

POTREMMO LIMITARE QUESTO RUMORE AGENDO SULLA LUNGHEZZA ΔL DIMINUENDOLA, DIMINUI-

DO A SUA VOLTA IL RUMORE DI FREQUENZA OPPURE CERCARE DI DIMINUIRE LA TEMPERATURA

OTTENENDO UNA RIDUZIONE DEL RUMORE

22 - COME (E PERCHÉ) DOVREMMO USARE L'INTERFEROMETRO PER RILEVARE LE PICCOLE

VIBRAZIONI INDOTTE DALLE ONDE SONORE?

PER RILEVARE PICCOLI SPOSTAMENTI O VIBRAZIONI ($\Delta s \ll \lambda$) NEL BERSAGLIO, COME QUELLE

INDOTTE DALLE ONDE SONORE SULLA FINESTRA DI VETRO, DOBBIAMO FAR FUNZIONARE L'INTERFEROMETRO

IN QUADRATURA, DOVE I SEGNALI DI POTENZA, CORRENTE E TENSIONE AL RICEVITORE

SONO PROPORZIONALI AL QUADRO DEI "PICCOLI" SPOSTAMENTI DALLA CONDIZIONE DI QUADRATURA.

ESSENDO L'ARGOMENTO, O SFASAMENTO, DELLA FUNZIONE SEMPRE PICCOLA ($\Delta \phi \ll \pi$),

SI ESTRAE UNA TENSIONE DIRETTAMENTE PROPORZIONALE ($\sin \Delta \phi \approx \Delta \phi$) ALLO SFASAMENTO

EY

(P_{MC})

a)

OPERATIVE SI HA $V_{ANE} + 0,5V_{PP} \sin(K_2 \Delta S)$ E

SEGNALE DI TENSIONE FOROMILLEVATO E' $V_{AC} = 0$

b)

OTTENIAMO COSI' UNA TENSIONE DI RETTAMENTE

$L =$

CHE VOGLIAMO MISURARE