**Ponašanje elektromagnetskih valova u šupljini**

- Izvor el. mag. zračenja je u šupljini

- Stranice šupljine: A, B, C; temperatura je T

- U termičkoj ravnoteži emitirana snaga jednaka je apsorbiranoj za sve frekvencije vala

Dva slučaja:

1. Faza reflektiranog vala statistički je neovisna o upadnom valu i nije s njime u skladu

2. Reflektirani valovi su u fazi sa upadnim valom i nastupa konstruktivna interferencija. Šupljina se ponaša kao rezonator.

**Gustoća modova u šupljini**

Valovi s valnim vektorom se reflektiraju što vodi na 8 mogućih kombinacija (±kx, ±ky, ±kz) koje mogu interferirati.Na zidu šupljine se stvara stojni val, pa mora biti E=0 što daje uvjet za uspostavu stojnog vala.Duljina stranice mora biti višekratnik od

Gustoća modova u šupljini

Svaki ravni val čije komponente zadovoljavaju izvedeni uvjet predstavlja stojin val opisan brojevima (p,q,r). To su modovi u šupljini.

***Raspodjela modova u šupljini:***

Na osima x,y,z koordinatnog sustava odrede se jedinični odsječci: 1/A, 1/B i 1/C. U tom sustavu svaki valni vektor odgovarat će jednoj točki, a sve točke će formirati jediničnu kocku periodičnosti. Bilo koja točka je od ishodišta udaljena za:

Gustoća modova u šupljini

Najopćenitije el. mag. polje u šupljini superpozicija je različitih valova. Transverzalni valovi se označavaju: TEMp,q,r

- xy je transverzalna ravnina

- z je longitudinalna os

TEM00,r longitudinalni titraji, nema čvorova u xy ravnini

**Dijelovi lasera**

• Laser se sastoji od četiri elementa koja su potrebna da bi laser proizveo koherentno svjetlo uz pomoć stimulirane emisije:aktivni medij, mehanizam pobude, povratni mehanizam, izlazni mehanizam

***Rad lasera***

• Nakon aktiviranja mehanizma pobude, energija teče kroz

aktivni medij, što rezultira prelazom atoma iz osnovnog u

pobuđeno stanje. Na taj način se postiže inverzija naseljenosti.

Neki od atoma spontano prelaze iz višeg u niže energijsko

stanje, emitirajući nekoherentne fotone određene valne duljine u raznim smjerovima. Većina tih fotona izlazi iz aktivnog medija. Oni fotoni koji se počinju gibati u smjeru osi aktivnogmedija izazivaju stimuliranu emisiju. Tako proizvedena zraka dolazi do povratnog mehanizma gdje se odbija i ponovo ulazi u aktivni medij. Dio svjetlosti koji dolazi do izlaznog mehanizma napušta laser u obliku laserske zrake

***Modovi laserske svijetlosti***

• laserske zrake čiji transverzalni modovi (koji određuju raspodjelu intenziteta laserske svjetlosti u presjeku zrake), ovisno o funkciji raspodjele intenziteta, spadaju u slijedeće

skupine:

• Gaussovi modovi, Hermite-Gaussovi, Laguerre-Gaussovi, te Besselovi modovi

*Gaussov osnovni mod*

• Gaussov profil intenziteta laserske zrake odgovara teoretskom TEM00 modu, te je najčešći kod većine lasera. Gaussov mod odlikuje se jednim središnjim maksimumom,

od kojeg se intenzitet svjetlosti rasipa po Gaussovoj razdiobi.

*Gaussov mod laserske svjetlosti*

• Električno polje Gaussove zrake definirano je kao:

•

• Kod širenja Gaussove laserske zrake dolazi do njenog rasipanja, tako da se radijus zrake širi, a intenzitet svjetlosti u njenom maksimumu pada. Radijus zrake je definiran intenzitetom od 1/e2 (tj. na 13.5 %) u odnosu na maksimum

Gaussov mod laserske svjetlosti

• pri čemu je zR Rayleighev domet definiran

Kao

*Hermite-Gaussovi modovi*

• Viši TEMmn modovi koji imaju pravokutno simetrične maksimume intenziteta, odgovaraju Hermite-Gaussovim funkcijama (rezonatori s kvadratičnim zrcalima).

•

*Laguerre-Gaussovi modovi*

Viši TEMmn modovi koji imaju radijalno simetrične maksimume intenziteta, odgovaraju Laguerre-Gaussovim funkcijama. Jedna od osnovnih karakteristika Laguerre-

Gaussovih (LG) zraka kružno pomicanje faze, takve zrake

posjeduju orbitalni kutni moment (cilindrični rezonator).

*Besselovi modovi*

• Besselove zrake mogu se dobiti propuštanjem Laguerre-

Gaussovih zraka kroz aksikon (poseban tip leće u obliku

stošca), čime se dobiva vrlo uzak radijus zrake.

**LASERSKI REZONATORI**

- U zatvorenoj šupljini može postojati polje sa spektralnom gustoćom zračenja koja je određena temperaturom T i vlastitim frekvencijama modova šupljine.

- Energija zračenja raspodjeljena je između puno modova pa će sustav brzo doći u termičku ravnotežu pa je omjer stimulirane i spontane emisije mali. Zatvorene šupljine s L>>λ nisu pogodne za laserske rezonatore.

- Da bi dobili veliku gustoću energije zračenja u malom broju modova rezonator mora imati jaku povratnu vezu za te modove i veliki gubitak za druge modove.

***Fabry-Perot interferometar***

- najjednostavniji model laserske šupljine

- Nastaje stojni val ako je:

***Prag laserske akcije***

-rezonator ispunjen aktivnim sredstvom

-jedno zrcalo je polupropusno

-u rezonatoru postoje gubitci: apsorpcija, raspršenje i sl.

**Oscilacije u laseru**

- Aktivni medij- služi kao pojačalo

- Zrcala rezonatora- povratna veza pa nastaju laserske oscilacije

- U rezonatoru mogu postojati oscilacije međusobno razmaknute:

- U mediju kada postoji inverzija naseljenosti koeficijent apsorpcije koji daje pojačanje snopa

- ima profil kao i linija prijelaza u sredstvu

**Spektralna karakteristika laserskog zračenja**

-spektar frekvencija lasera određen je spektralnom karakteristikom medija i rezonnatnim modovima rezonatora

-svi modovi koji su iznad praga laserske akcije sudjeluju u laserskim oscilacijama

- može ih biti više

**Rad lasera**

- Kada snaga pumpanja dosegne vrijednost praga započinju laserske oscilacije tamo gdje je pojačanje najveće

- Za vrijeme pumpanja pojačanje je veće od gubitaka i stimulirani val u rezonatoru se pojačava u svakom krugu

- pojačavaju se sve frekvencije koje su iznad praga

**Oblici rezonatora**

1. Rezonatori s ravnim zrcalima- valna fronta vala na izlazu je zakrivljena oko 30% blizu ruba zrcala; jako osjetljiv na međusobnu paralelnost zrcala i na optičku kvalitetu zrcala.

prednost: pobuđeni su svi atomi i iskorišten cijeli volumen.

2. Rezonatori sa sfernim zrcalima (fokusiraju zraku koja divergira)

- najbolje je da je zakrivljenost valne fronte izlaznog vala jednaka zakrivljenosti zrcala

Prema stabilnosti:

• Stabilni rezonatori (el. mag. polje na površini zrcala se reflektira samo u sebe uz ogibne gubitke)

• Nestabilni rezonatori

Svojstvo rezonatora izražava se kroz parametre zakrivljenosti (i = 1,2):

d- razmak između zrcala, R – polumjer zrcala

Polumjeri r sjena (“mrlja”) na zrcalima:

1. g1=0 ili g2=0 ili g1g2=1 veličina mrlje je beskonačna i snop divergira tj. rezonator postaje nestabilan

2. Uvjet stabilnosti rezonatora: 0< g1g2 < 1 ili g1= g2=0

• Konfokalni rezonator- ako zrcala nisu potpuno jednaka javlja se problem kao kod ravnih zrcala

• Ako se želi mali promjer cijevi to je poželjna konfiguracija

Nestabilni optički rezonator

-koriste se kada treba odstraniti transverzalne modove višeg reda

- rezonator radi u osnovnom modu

**Višeslojne dielektrične površine**

• Zrcala u laserima imaju visoku refleksivnost

• Granica između dva optička sredstva s indeksima loma n1 i n2

• Reflesivnost je :

• Veliki n znači velika apsorpcija. Treba uzeti niz slojeva s izmjenično velikim i malim n

• Debljina sloja nd – treba postići interferenciju

• Može se postići refleksivnost do 0,9995

**FAKTOR DOBROTE – KVALITETE LASERSKOG REZONATORA**

-laserska šupljina se opisuje faktorom kvalitet Q

Q se definira:

W – ukupna energija u rezonatoru

dW/dt – gubitak energije u jednom krugu u rezonatoru

Može se napisati:

Nakon jednog zatvorenog kruga u vremenu t=2L/c energija se smanji:

Nakon vremena T energija sadržana u modu padne na 1/e vrijednost. T je srednje vrijeme života u tom modu.

Pretpostavimo da je u t=0 energija svih modova jednaka. Ako je factor gubitaka veliki za većinu modova, a mali za neki mod laser će tada oscilirati u tom modu.

**EKSPERIMENTALNA REALIZACIJA JEDNOMODNIH**

**LASERA**

-laser može oscilirati istovremeno u više transverzalnih TEMpqr I longitudinalnih modova TEM00r

Laseri nastoje raditi u najvišim mogućim modovima jer oni imaju veći promjer snopa što im omogućava da iz sredstva izvuku što više energije.

***Longitudinalni modovi:***

- longitudinalni modovi su u rezonatoru razmaknuti za c/2L

Broj longitudinalnih modova ovisi o:

1. duljini rezonatora

2. širini krivulje pojačanja sredstva

-mod koji oscilira najbliže maksimumu krivulje pojačanja izvlači najviše energije iz sredstva

**Izdvajanje jedne linije:**

1. ako je udaljenost modova veća od širine profila linije tada selektivna refleksivnost zrcala može izdvojiti jednu liniju

-duljina rezonatora bi trebala biti prikladna

Za He-Ne laser širina linije je 1500 MHz pa je

L<10 cm

-mala dimenzija rezonatora nije pogodna jer se dobiva mala izlazna snaga

2. ako su linije bliske za izdvajanje jedne koristi se neki optički element (prizma, rešetka i sl. )

Izdvajanje pomoću prizme: prizma može biti unutar ili izvan rezonatora

- samo zraka koja iz prizme dolazi vertikalno na zrcalo M2 reflektira se sama u sebe i može doseći prag oscilacija

- ostale linije se izgube iz rezonatora

- zakretanjem zrcala M2 odabire se željena linija

- svjetlost bi na M2 trebala doći pod Brewsterovim kutom (polarizacija)

- Littrov prizma – kombinacija prizme i zrcala (b)

Prizme apsorbiraju IR zračenje pa su bolje optičke rešetke koje se koriste u refleksiji:Δs = m⋅λ,d- konstanta rešetke

m – red spektra

- za α=β Littrow rešetka

2d sinα = m⋅λ nastaje interferencija

**FABRY-PEROT ETALON**

- FP etalon (planparalelni sloj od stakla ili kvarca) ili FP interferometer (dvije paralelne staklene ploče razmaknute za d)

- za n>n' reflektirani val je za π pomaknut u odnosu na upadni

- val djelom prođe kroz etalon i reflektira se na drugoj plohi (na njoj nema promjene u fazi)

- val reflektiran na drugoj plohi se od upadnog razlikuje u fazi za:

Prvi i drugi reflektirani val se razlikuju u fazi za π:

Destruktivna interferencija je za:

ΔΦ′ = (2m +1)π tj. Za frekvencije

Za ove frekvencije je refleksija minimalna, a transmisija najveća.

Ako se uključe višestruke refleksije u etalonu:

θ je upadni kut

Razmak frekvencija

-za mali d razmak frekvencija etalona će biti veliki u usporedbi s širinom linije medija.

-podešavanjem upadnog kuta θ rezonantna frekvencija se može dovesti u sredinu linije, dok će sljedeća rezonantna frekvencija biti izvan linije

**Transmisija kroz FP etalon:**

T – faktor transmisije

R – faktor refleksije

I0 – upadni intenzitet

Nakon n refleksija:

Ukupni transmitirani intenzitet:

Definiramo finesu: to je omjer razmaka između susjednih pruga I poluširine transmitiranog moda.

-Za selektiranje samo željenih modova finesa mora biti velika

- umetanjem FP etalona u rezonator podesi se da se maksimalno transmitirani mod poklopi sa željenom vlastitom frekvencijom rezonatora

**SPEKTRALNA MOĆ RAZLUČIVANJA**

Definira se kao:

Rayleighijev kriterij

najmanja razlika dviju bliskih linija koje su razlučene

kao dvije

- linije su razlučene ako središte ogibnog maksimuma jedne linije pada u prvi minimum druge linije

- za što bolje razlučivanje želimo da R bude što veći tj.

što manji

**UKLANJANJE TRANSVERZALNIH MODOVA VIŠEG REDA**

-U rezonatoru postoje viši transverzalni modovi TEMp,q,r; oni se mogu ugušiti odgovarajućom geometrijom rezonatora (odgovarajući presjek I duljina)

- transverzalni modovi u rezonatoru imaju velike gubitke pri difrakciji;

ovise o polumjeru apeture rezonatora a, udaljenosti između zrcala L i

Fresnelovom broju N

Omjer difrakcijskih gubitaka za TEM10 i TEM00 modove u simetričnom rezonatoru kao funkcija N za različite parametre rezonatora g1=g2=g

- za neki promjer aperture 2a koja guši mod TEM10 ima male gubitke za mod TEM00

- umetanjem aperture u rezonator transverzalni modovi višeg reda mogu se ukloniti

-

Intenzitet moda mijenja se u ravnini okomito na smjer širenja. Mod TEM00 dosiže maksimum u času kada je TEM10 u minimumu. Iz krivulje pojačanja

vidi se da je na udaljenosti rm viši mod eliminiran.

**Koherencija**

Ako su S1 i S2 pukotine na zastoru u Youngovom pokusu na koje istovremeno dolazi svjetlost iz istog izvora tada će u nekoj točki P na zastoru ukupno električno polje biti

jednako zbroju el. polja koje u tu točku dolaze iz svakog od izvora (prema slici):

Funkcija međusobne koherencije el. polja definira se kao funkcija autokorelacije:

Ako je izvor zračenja stacionaran naskon uključivanja tada funkcija koherencije polja ovisi samo o razlici vremena τ = t1-t2 pa ju označavamo s

koji opisuje stupanj do kojeg su polja u točkama --------------- sposobna interferirati.

Intenzitet svjetlosti u točki P je tada:

Stupanj koherencije se definira kao:

Za monokromatski izvor je

Najveća i najmanja vrijednost intenziteta u točki P mogu se napisati:

Kao mjeru koherencije svjetlosti može se definirati vidljivost – oštrina interferencijskih

pruga:

Ako je u nekoj točki potpuna destruktivna interferencija Imin=0 i V=1. Za Imin= Imax je V=0 i nema interferencijskih pruga; polje u točki P je nekoherentno.

Uvrštavanjem izraza za Imin i Imax vidljivost interferencijskih pruga je:

lγl je direktna mjera vidljivosti pruga; 0 ≤ lγl ≤ 1. Za potpuno koherentno polje lγl=1, za potpuno nekoherentno polje lγl =0, a kada je 0 < lγl < 1 polje je djelomično koherentno.

***1. Vremenska koherencija***

Ako je razlika faze valova koji stižu u točku P u vremenima t1 i t2 ista za sve valove :

ΔΦ = Φ (P, t1) −Φ (P, t2)

val je vremenski koherentan.

Vremenski interval Δt za koji je ΔΦ∠π je koherentno vrijeme. Koherentna duljina: ΔsC = Δt ⋅ c

Vremenska koherencija se mjeri Michelsonovim interferometrom:

Slika : Vremenska koherencija mjerena Michelsonovim interferometrom

- Zrcalo M2 može pomicati vertikalno

- na zastoru B se promatra za koji najveći pomak zrcala dva snopa više neće

interferirati, odnosno neće biti pruga interferencije. Mjenjanjem udaljenosti zrcala

mijenja se vrijeme potrebno da svjetlost stigne do zastora B. Na taj se način može

mjeriti vidljivost pruga interferencije na zastoru i odrediti vrijeme koherencije.

- Ta veličina je ΔsC = Δt ⋅ c

- Vrijeme koherencije se približno može odrediti iz širine spektralne linije svjetlosti

koja izlazi iz izvora:

Δt ⋅Δv ≈1.

Za Δν= 1 MHz Δt= 1 μs.

***2. Prostorna koherencija***

- ako je razlika u fazi dvaju valova u točki P konstantna u vremenu polje je prostorno koherentno

- gleda se ----- tj. promatra se funkcija korelacije u dvije različite točke u istom vremenskom trenutku.

- prostorna koherencija se analizira pomoću Yungovog pokusa s dvije pukotine S1 i S2 u ravnini B. Mjeri se vidljivost pruga tako da se povećava lr1 – r2l . Ako laser

radi u jednom modu pokusi pokazuju da je V≅1 za veliki raspon lr 1– r2l .

Višemodni rad lasera smanjuje prostornu koherenciju.

***Yungov pokus ( izvod iz knjige)***

- Svaka točka na jednodimenzionalnom izvoru R1 R2 emitira valove oni prolaze kroz pukotine i njihova superpozicija određuje raspodjelu intenziteta u ravnini B ,

u nekoj točki P te ravnine:

Slika: Youngov uređaj za mjerenje prostorne koherencije

- U proizvoljnoj točki P ravnine B rezultantni intenzitet će ovisiti o razlici faza Δϕ =ϕ (S1) −ϕ (S2 ) i o razlici optičkih puteva S 1 P − S 2 P

- b duljina izvora svjetlosti je vrlo mala u usporedbi s njegovom udaljenosti od zastora r

- razlika puteva Δs = R1S2 − R1S1

Δs = R2S1 − R1S1, jer je R1S2 = R2S1

za b≪d je približno Δs ∼

- uvjet za prostornu koherenciju je određen sa maksimalnim razmakom pukotina d za

koji još vrijedi nejednadžba:

-uvjet prostorne koherencije za jednodimenzionalni izvor:

-Maksimalna duljina d se naziva koherentna duljina prostorne koherencije

- Za dvodimenzionalni izvora u obliku kvadrata stranice b, odnosno površine-----------------prostornu koherenciju će određivati koherentna površina-----------------.

- Uvjet koherencije:

- koherentna površina -koherentni volumen

.