VRSTE LASERA

Podela lasera

Prema vrsti materijala od kojeg je napravljen izvor:

- Čvrstotelni laseri
- Gasni laseri
- Poluprovodnički laseri
- Tečni laseri

Prema načinu pumpanja aktivne (radne) sredine

- laseri sa optičkim pumpanjem (kristalni i tečni)
- laseri koji se pumpaju električnim pražnjenjem.
- Hemijski laseri

Prema režimu rada:

- Kontinualni
- Impulsni laser

Prema oblasti spektra u kojoj emituje svetlost:

- Laseri u vidljivom delu spektra
- Laseri u bliskoj infracrvenoj oblasti
- Laseri u dalekoj infracrvenoj oblasti
- X- laseri, zračenje u X- oblasti

Poluprovodnički laseri

Istorijat

- 1957. godine ideja o poluprovodničkim laserima (N. Basov)
- 1962. godine u SAD demonstrirane 4 verzije poluprovodničkih lasera
  - Dr Robert N. Hol – Istraživački razvojni centar General Electric (Njujork)
  - Dr Nick Holonyak, mlađi – Industrijski centar General Electric (Sirakuza, Njujork)
  - Dr Marshal Neytan – IBM Istraživačka laboratorija (Yorktown Heights - Njujork)
  - Dr Robert Redikep – MIT Lincoln Laboratory (Leksington, Masačusets)
  - 1963-1968. H. Kremer, Ž. Alferov, R. Kazarinov, laserska dioda sa heterostrukturom-prvi laser sa duplom heterostrukturom

• 1970. Pronađena prva quantum well struktura

• 1978. Rad laserske diode GaAlAs/GaAs na sobnoj temperaturi, bazirane na quantum well strukturi

• 1979. Površinsko emitujuća (surface-emitting) laserska dioda (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers)

• 1981. Laserske diode sa distribuiranim Bragovim reflektorom (DBF), GaInAs/InP, emitovana talasna dužina 1.58μm

• 1985. VCSEL (GaAlAs/GaAs) laser dioda, rad u impulsnom režimu na sobnoj temperaturi

• 1991. Prvi kratkotrajni rad plavo – zelene emitujuće laserske diode na poluprovodniku ZnSe

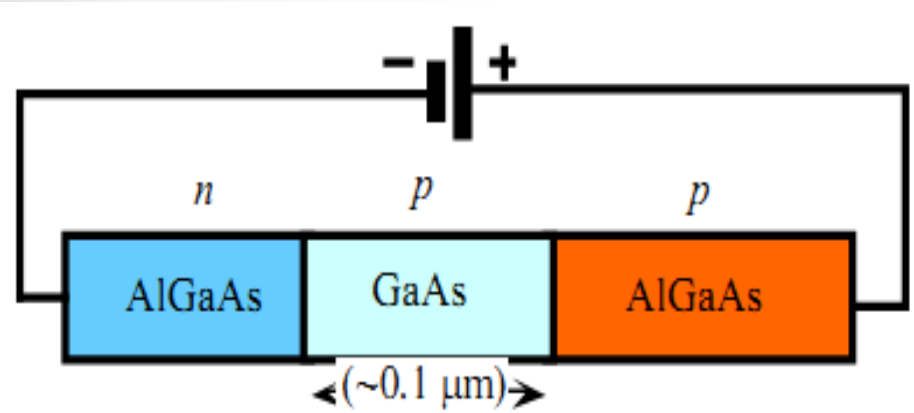
• 1996. Prvi efikasan plavo emitujući laser pri radu na sobnoj temperaturi, baziran na poluprovodnicima III-V grupe, GaN

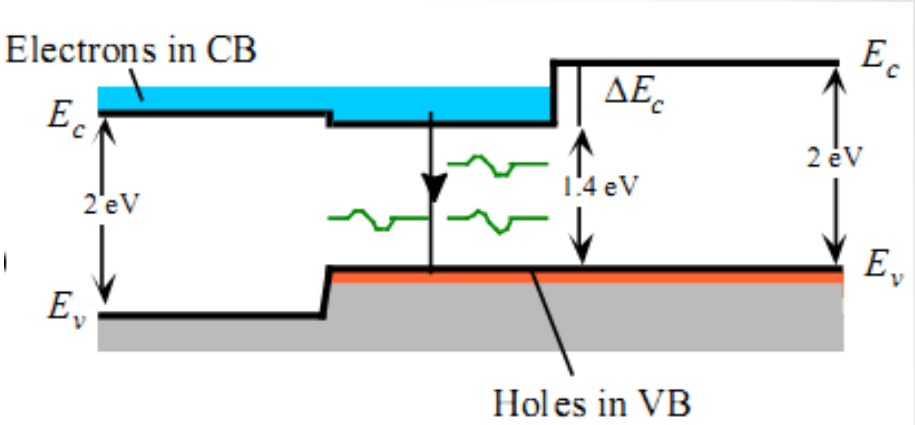
Materijali za izradu poluprovodničkih lasera

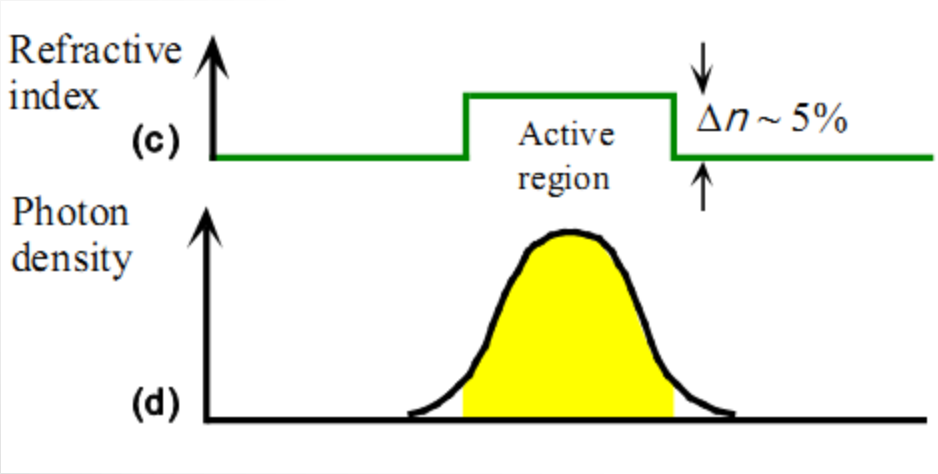
- Različiti materijali zavisno od željene talasne dužine
- Materijali iz II, III i V i VI grupe periodnog sistema
  - II grupa – Cd, Zn
  - III grupa - Al, In, Ga, Ti
  - V grupa - P, As, Sb
  - VI grupa – S, Se, Te

Материјал	Формула једињења	Енергетски процеп	Таласне дужине
III-V једињења		Eg(eV) на 300K	λ(nm)
Алуминијум-Арсенид	AlAs	2.16	2678.1
Алуминијум-Фосфид	AlP	2.45	3037.6
Алуминијум-Антимонид	AlSb	1.58	1959.0
Бор-Нитрид	BN	7.5	9298.9
Бор-Фосфид	BP	2	2479.7
Галијум-Арсенид	GaAs	1.42	1760.6
Галијум-Нитрид	GaN	3.36	4165.9
Галијум-Фосфид	GaP	2.26	2802.1
Галијум-Антимонид	GaSb	0.72	892.7
Индијум-Арсенид	InAs	0.36	446.3
Индијум-Фосфид	InP	1.35	1673.8
Индијум-Антимонид	InSb	0.17	210.8
II-VI једињења			
Кадмијум-Сулфид	CsS	2.42	3000.4
Кадмијум-Селенид	CdSe	1.7	2107.7
Кадмијум-Телурид	CdTe	1.56	1934.2
Цинк-Сулфид	ZnS	3.69	4562.6
Цинк-Селенид	ZnSe	2.71	3360.0
Цинк-Телурид	ZnTe	2.39	2963.2

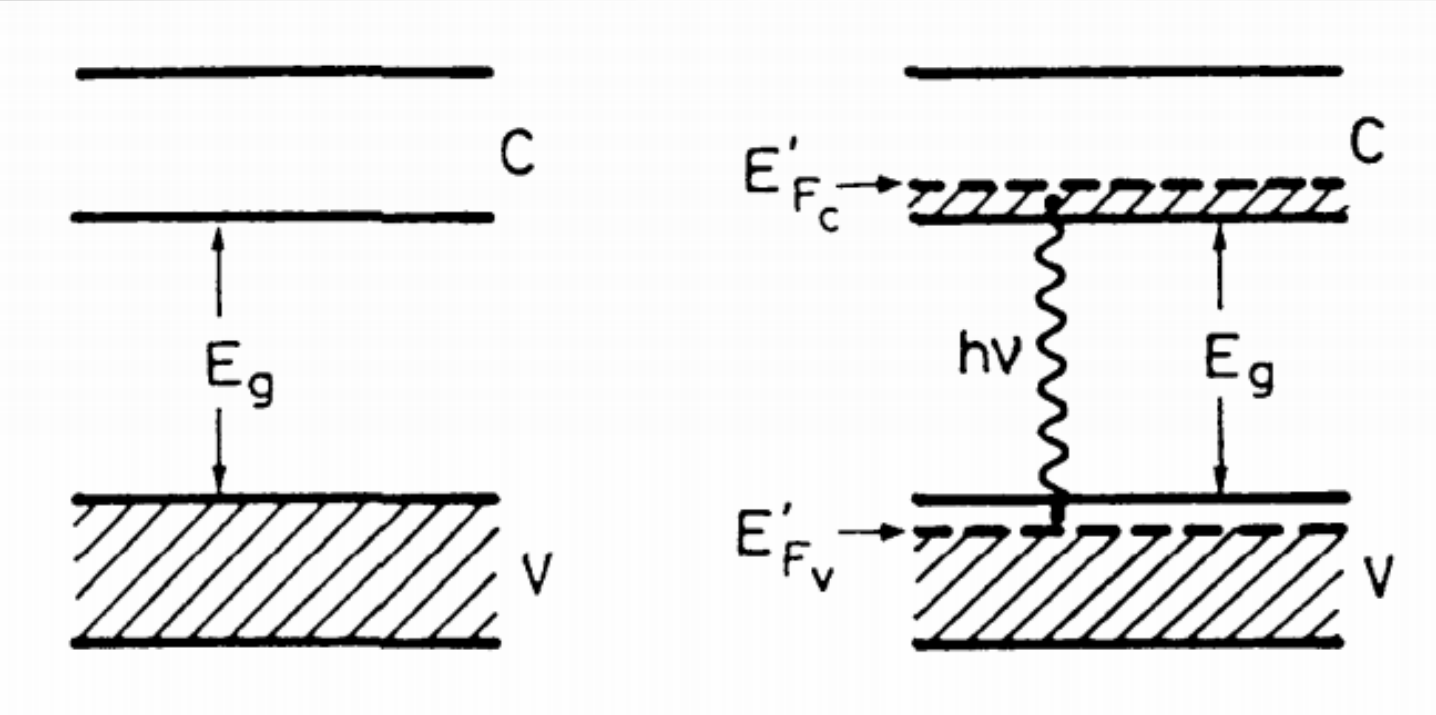
Princip rada poluprovodničkog lasera



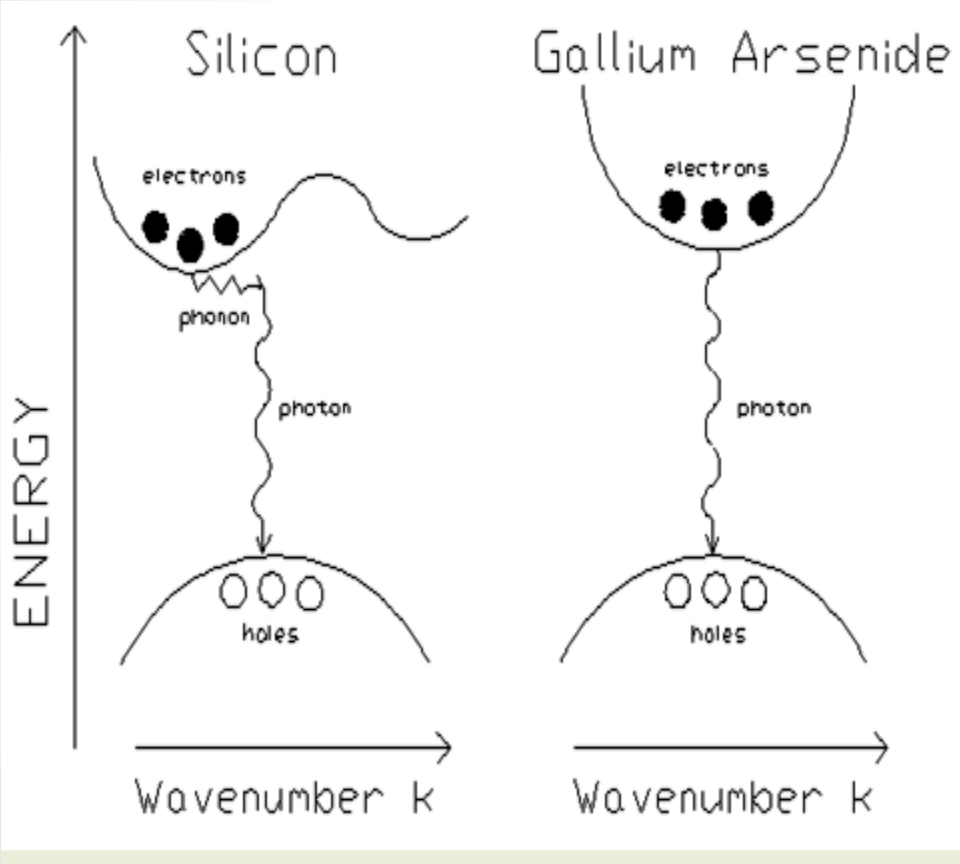


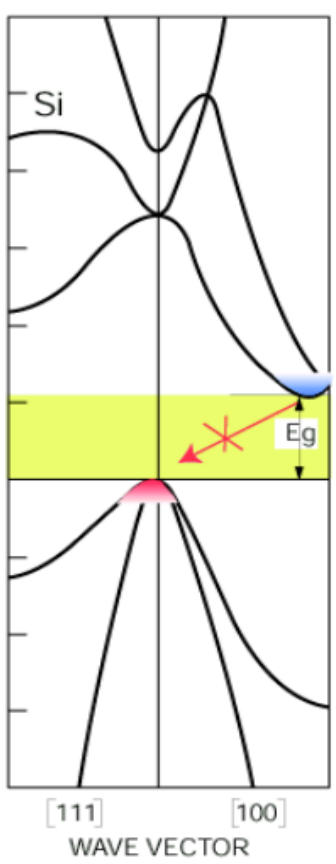


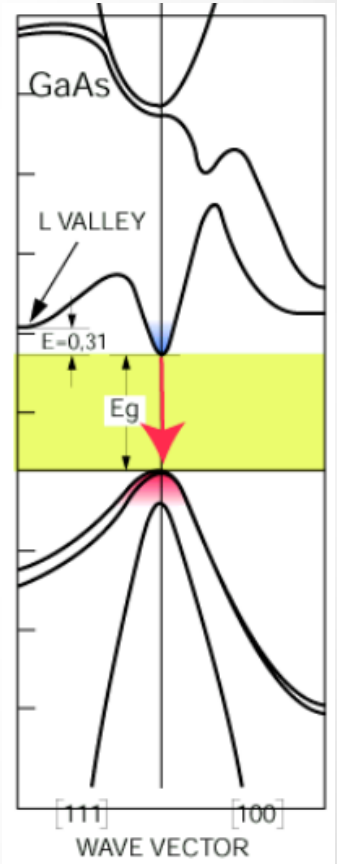
- Waveguide effect



- Pretpostavimo da su (pri $T = 0$ K) elektroni prevedeni iz valentne u provodnu zonu.
- Unutar provodne zone elektroni se za vrlo kratko vreme (10^{-13} s) rasporede na najniže nivoe i ta zona je popunjena do nekog nivoa $E_c = E_{F'c}$.
- Analogno se rasporede i elektroni u valentnoj zoni nivoa $E_v = E_{F'v}$, a iznad toga nivoa (do vrha valentne zone) ostaju šupljine.
- Između valentne i provodne zone pojavljuje se inverzija naseljenosti. Parovi elektron-šupljina predstavljaju pobuđena stanja.
- Elektroni iz provodne zone prelaze nazad u valentnu zonu (taj proces se naziva rekombinacija para elektron-šupljina), emitujući pri tome foton.
- Ako se takav poluprovodnik smesti u odgovarajući rezonator, stimulisani prelazi, uslovljeni rekombinacionim zračenjem, dovešće do laserske generacije.

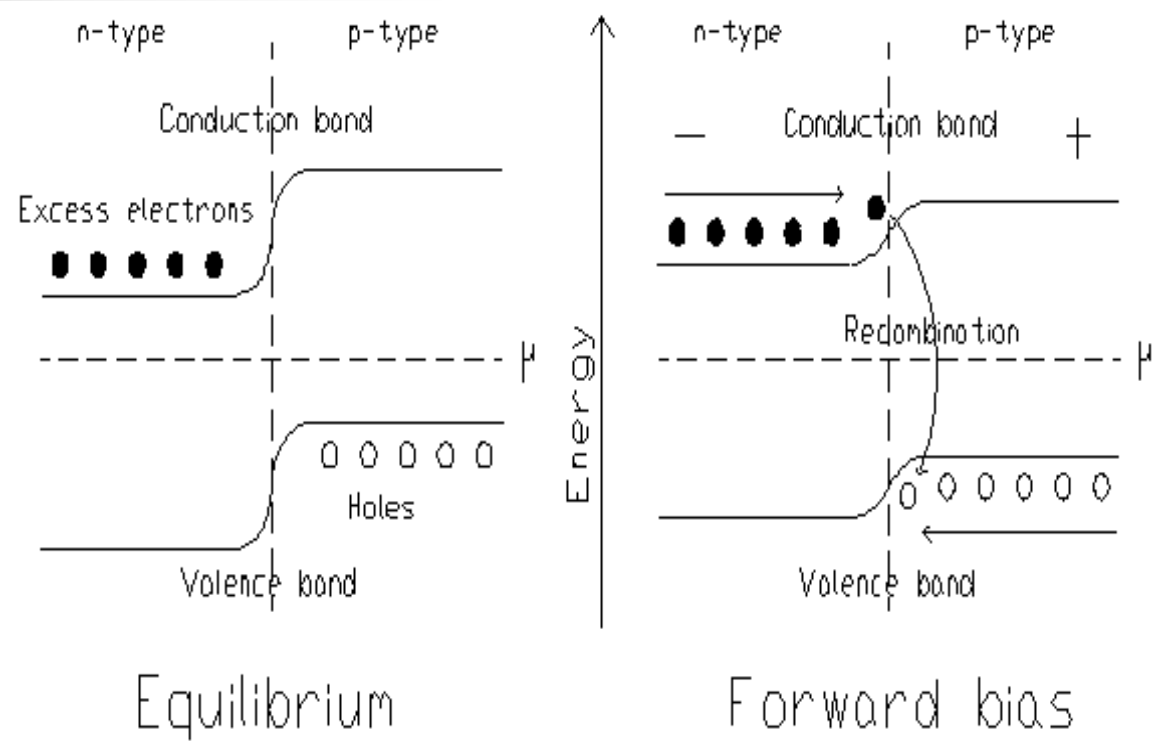

Silicon
Gallium Arsenide
electrons
phonon
photon
holes
ENERGY
Wavenumber k
electrons
photon
holes
Wavenumber k


Si
Eg
111
100
WAVE VECTOR


GaAs
L VALLEY
E=0,31
Eg
111
100
WAVE VECTOR

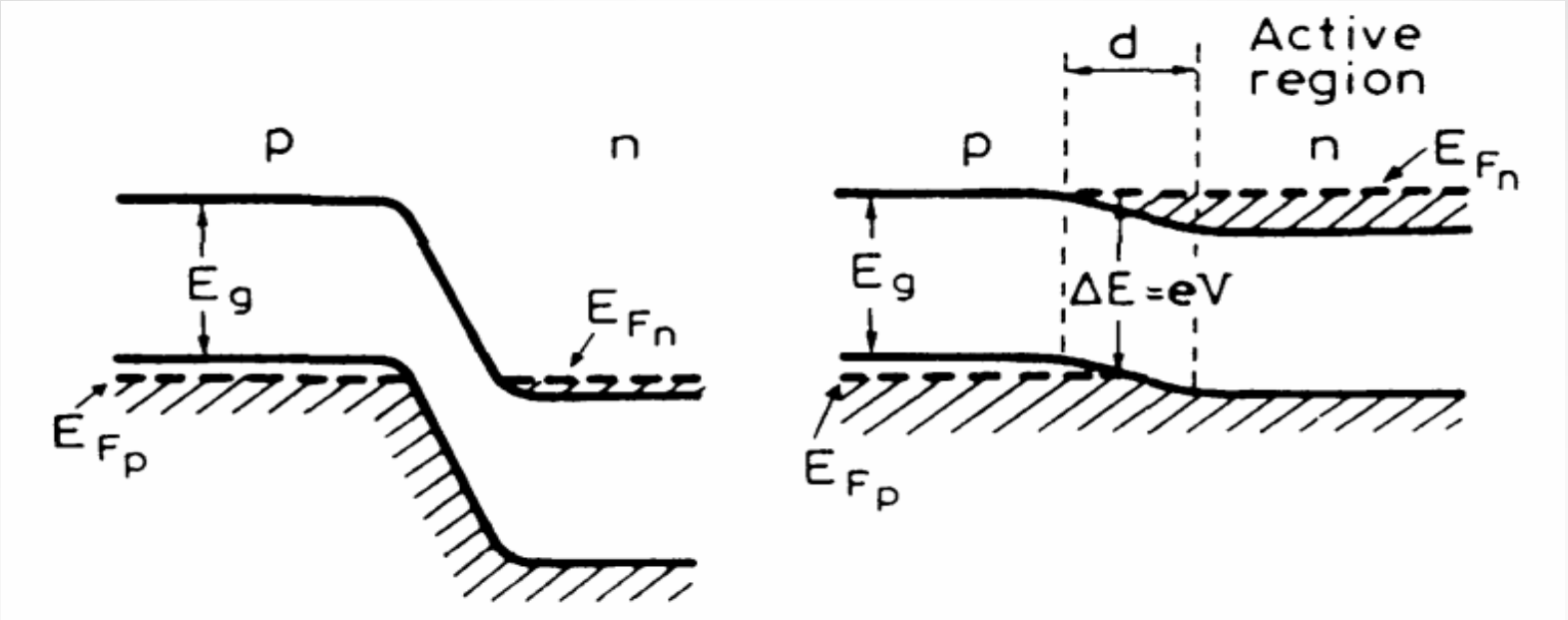
Razvoj poluprovodničkih – diodnih lasera

- Mehanizmi u poluprovodniku slični kao kod LED dioda



- U stanju ravnoteže, nosioci naelektrisanja, višak elektrona i šupljina, su ograničeni n i p regionima od strane potencijalne barijere koja se formira prilikom spoja.
- Kada je spoj direktno polarisan dovođenjem eksternog napona, potencijalna barijera se sužava i nosioci naelektrisanja mogu da difunduju kroz spoj.

- Na spoju postoji višak elektrona i šupljina tako da su ispunjeni uslovi za rekombinaciju.
- Ovo omogućava da se višak nosilaca naelektrisanja nakupi u oblasti spoja kako bi zamenili one koji se izgube u rekombinaciji tako da električna struja protiče.
- Rekombinacija je proces u kome se energija oslobađa pošto se višak elektrona spušta preko energetskog procepa kako bi popunio prazna mesta u valentnoj zoni.
- Očekuje se da se energija emituje u vidu fotona, što nam daje diodu koja emituje svetlost

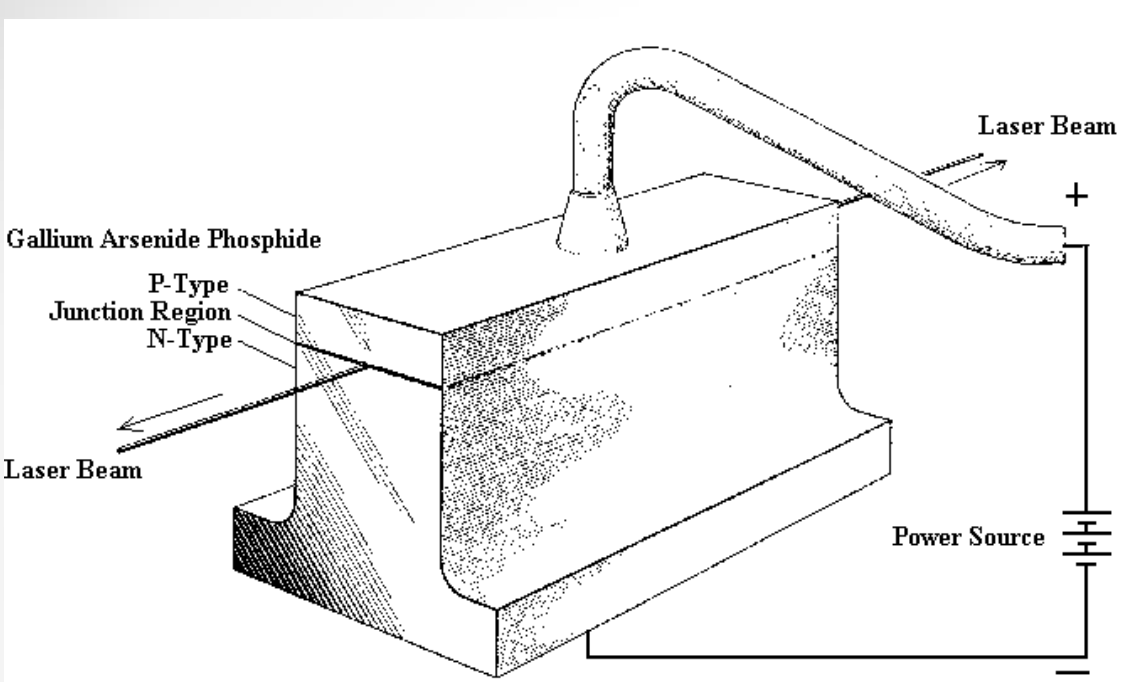


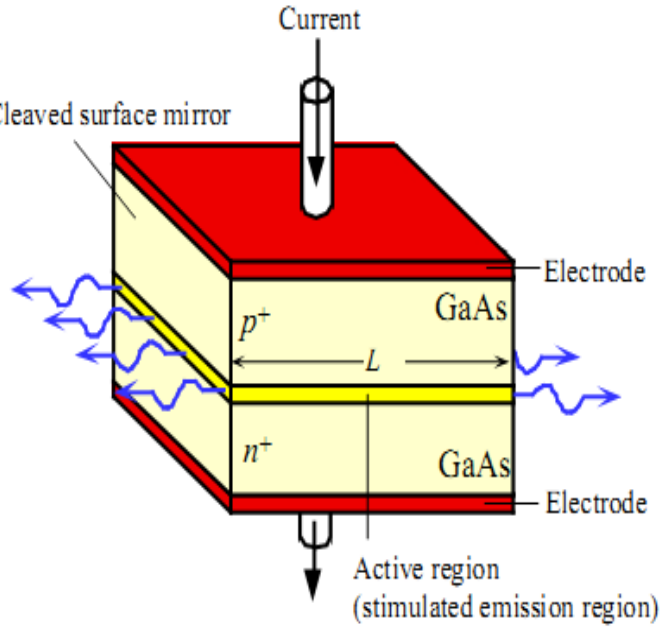
- Kada p-n dioda nije priključena na napon elektroni "teku" sa n-strane ka p-strani sve dok se ne uspostavi potencijalna barijera koja sprječava dalji tok elektrona.
- Pri tome Fermijev nivo $E_p = E_{Fp}$ poluprovodnika p-tipa, koji je u valentnoj zoni, i Fermijev nivo $E_n = E_{Fn}$ poluprovodnika n-tipa, koji je u provodnoj zoni, imaju iste vrednosti.

- Ako se na p-n spoj priključi napon V koji snižava potencijalnu barijeru , nivoi se pomjeraju za $\Delta E = eV$, u oblast p-n prelaza se injektiraju elektroni iz provodne zone poluprovodnika n-tipa i šupljine iz valentne zone poluprovodnika p-tipa i tako se u toj prelaznoj oblasti stvara inverzija naseljenosti.

- Napon V je npr. za homostrukturni GaAs laser $V \approx 1.5V$.

Homostrukturna dioda





- Rezonator se pravi sečenjem kristla duž dve paralelne površine normalne na ravan spoja
- GaAs/vazduh- veliki indeks prelamanja sa refleksijom oko 35%
- Laserski efekat u ravni pn spoja
- Ograničenja: nosioci mogu da difunduju van regiona spoja, manje pojačanje; znatan gubitak svetlosti prilikom emisije normalne na osu rezonatora
-

Problemi

- Velike okidne struje (50 000 ÷ 100 000 A/cm^2)

- Oslobađanje prevelike količine toplote zbog čega je potrebno hlađenje (tečni azot)

- Potreba za smanjenjem okidne struje

  -Uglačavanje kontaktnih spojeva na poluprovodnicima

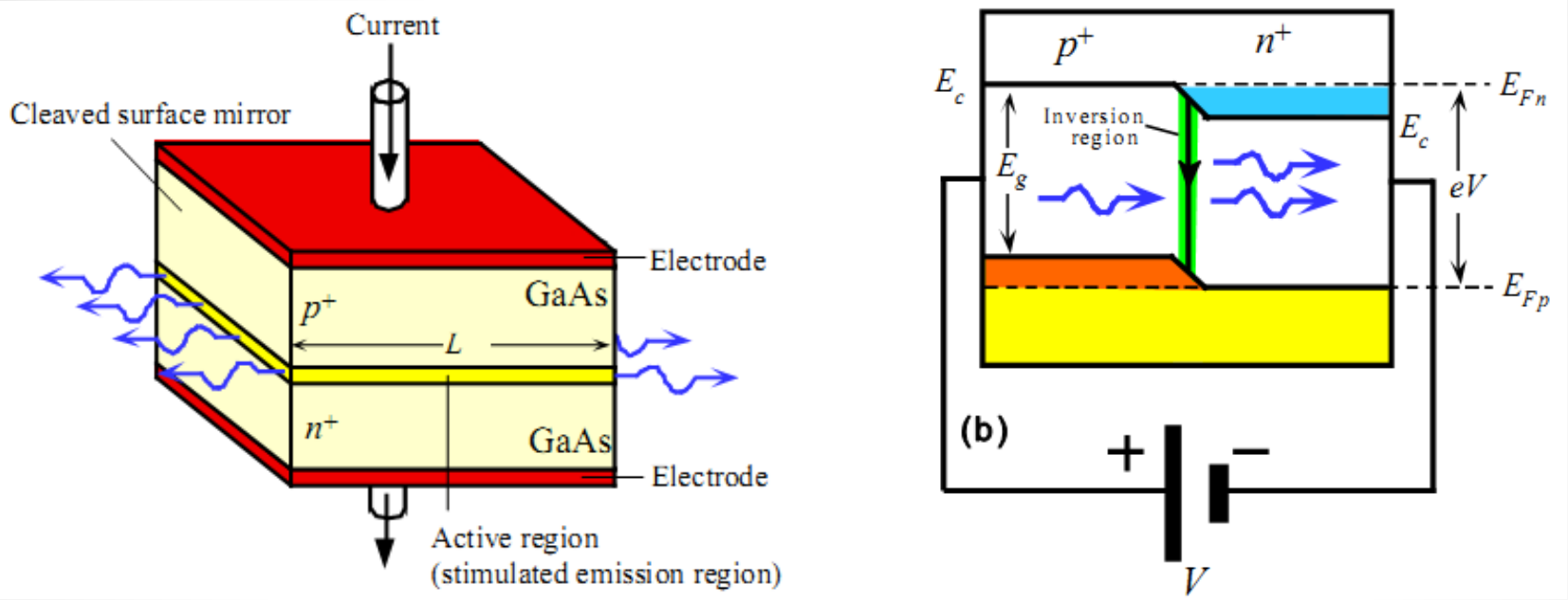
  -Narastanje poluprovodnika (Umesto da formiramo spoj difundovanjem akceptorskih primesa u poluprovodnik *n* tipa kako bi formirali deo *p* tipa, vrši se poliranje *n* tipa supstrata i onda se vrši narastanje sloja *p* tipa topljenjem *p* tipa materijala i na ovaj način dobijamo spoj koji je skoro idealno ravan)

  -Smanjenje okidne struje na oko 10A

Tipovi poluprovodničkih lasera

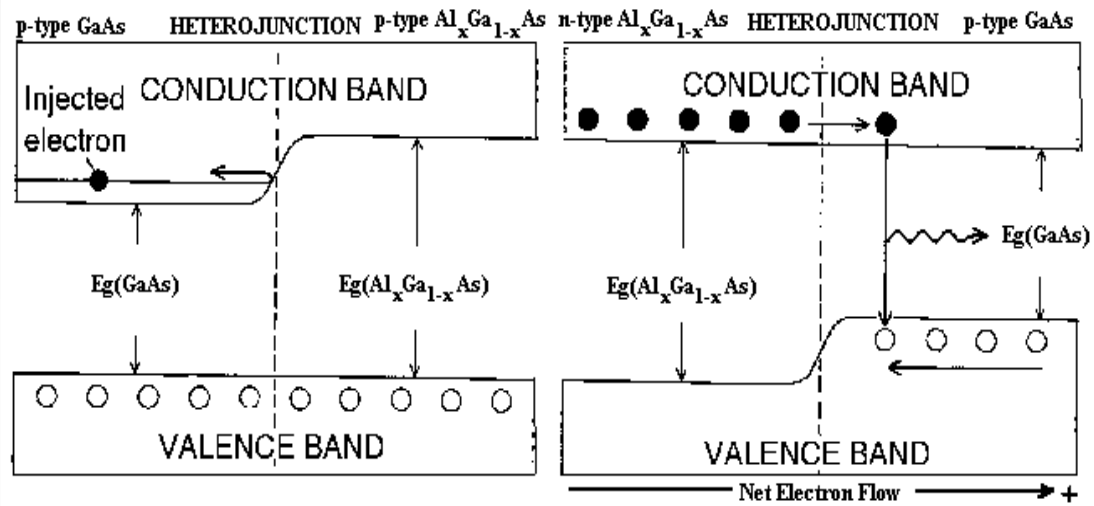
- Prema načinu emitovanja svetlosti:
  - Ivično emitujući
  - Površinsko emitujući
- Prema strukturi:
  - Homojunction
  - Heterostrukturni
  - Quantum well
  - VCSEL
  - VECSEL

Homojunction laserska dioda



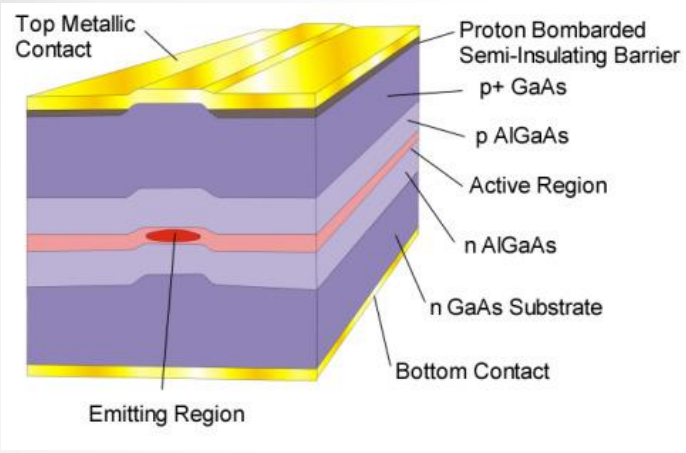
- Potrebne visoke okidne struje:
  - 1000 A/cm^2 na temperaturi 77K
  - 100 000 A/cm^2 na temperaturi 300K

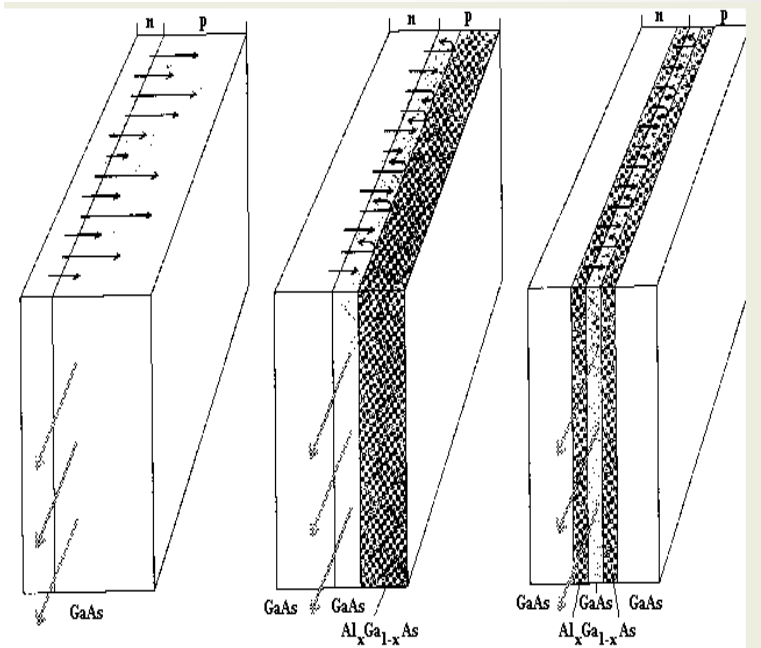
Heterostrukturni laseri



Na slici su prikazana dva tipa heterospoja.
U oba slučaja spoj je ostvaren između dva poluprovodnika sa različitim energetskim procepima.
Na levoj strani slike oba poluprovodnika su p- tipa. Ovo znači da će u stanju ravnoteže valentna zona biti jednaka kroz celu strukturu, a stepenica će se javiti u provodnoj zoni uz sam spoj. Valentni nivo ne ometa većinske nosioce, šupljine, ali stepenica u provodnoj zoni predstavlja barijeru elektronima koji difunduju u ovu oblast.
Na desnoj strani slike prikazan je n-p heterospoj. Ovde postoji stepenik u valentnoj zoni čak i pri direktnoj polarizaciji koji predstavlja barijeru za difuziju šupljina izvan regiona spoja.

Heterostrukturni laseri





Na slici data su poređenja u radu homostrukturnog lasera (levo), jednostrukog heterostrukturnog lasera (sredina) i dvostrukog heterostrukturnog lasera (desno).

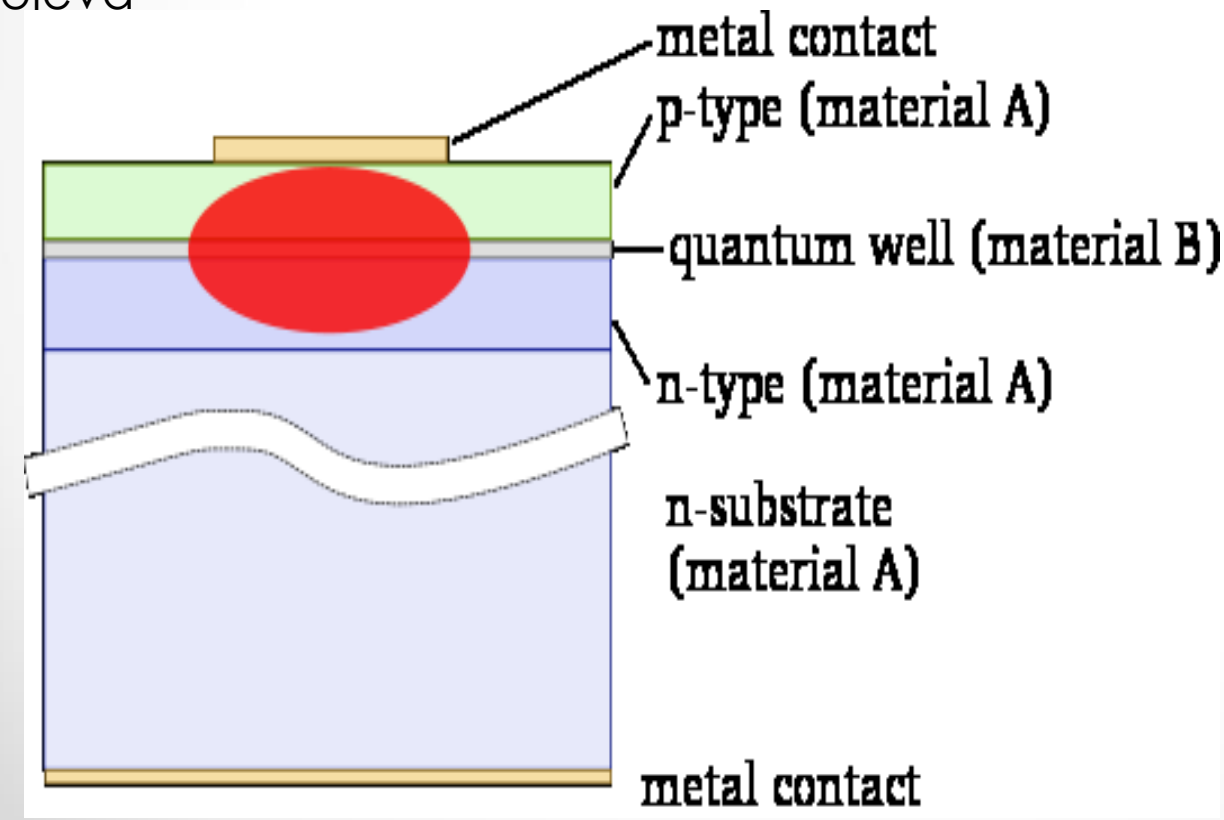
U homostrukturnom laseru elektroni (crne strelice) se injektuju u p-n spoj sa različitim udaljenostima u p oblasti.

U homostrukturi svetlost ulazi u susedni materijal izvan regiona gde se dešava većina stimulacije, uzrokujući gubitke svetlosti koja u drugu ruku može doprineti stimulaciji. U jednostrukoj heterostrukturi svetlost ne prolazi kroz p-p heterospoj i elektroni se odbijaju usled postizanja većeg stepena sakupljanja elektrona i svetlosti.

U dvostrukoj heterostrukturi šupljine, elektroni i svetlost su efikasno sakupljeni u veoma uzanu oblast između dva heterospoja. Elektrone odbija potencijalna barijera u provodnoj zoni na p-p heterospoju, a šupljine odbija potencijalna barijera u valentnoj zoni p-n heterospoja. Koncentracija svetlosti nastaje usled različitih indeksa prelamanja između GaAs i GaAlAs.

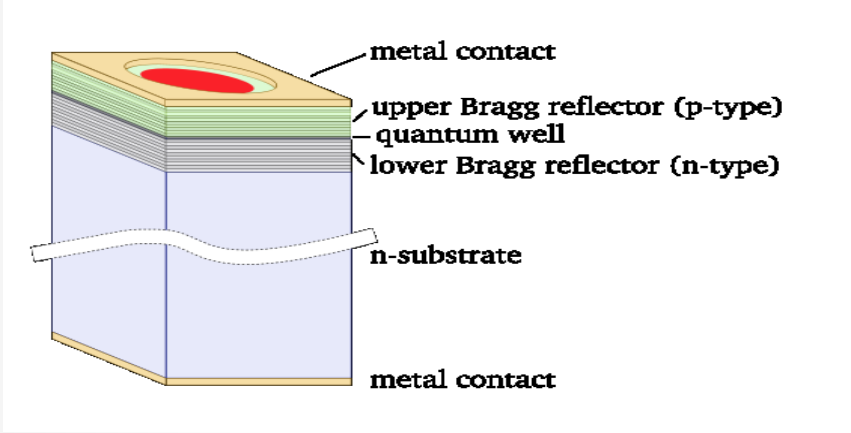
Quantum well laseri

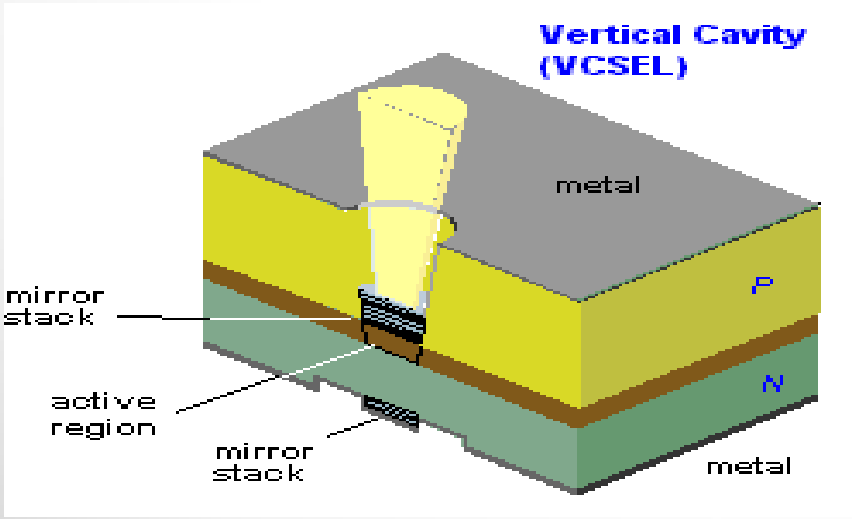
• Centralni sloj je veoma tanak i ima ulogu kvantne jame
-Ivično emitujući
-Energija kvantovana
-Efikasnost lasera sa kvantnom jamom je veća nego kod zapreminskih lasera -funkcija gustine stanja elektrona u kvantnoj jami ima naglu ivicu koja koncentriše energiju elektrona i na taj način doprinosi radu lasera.
-Veća snaga sa multiple quantum well strukturom-više quantum well slojeva



VCSEL laseri

- Vertical Cavity Surface Emitting Lasers

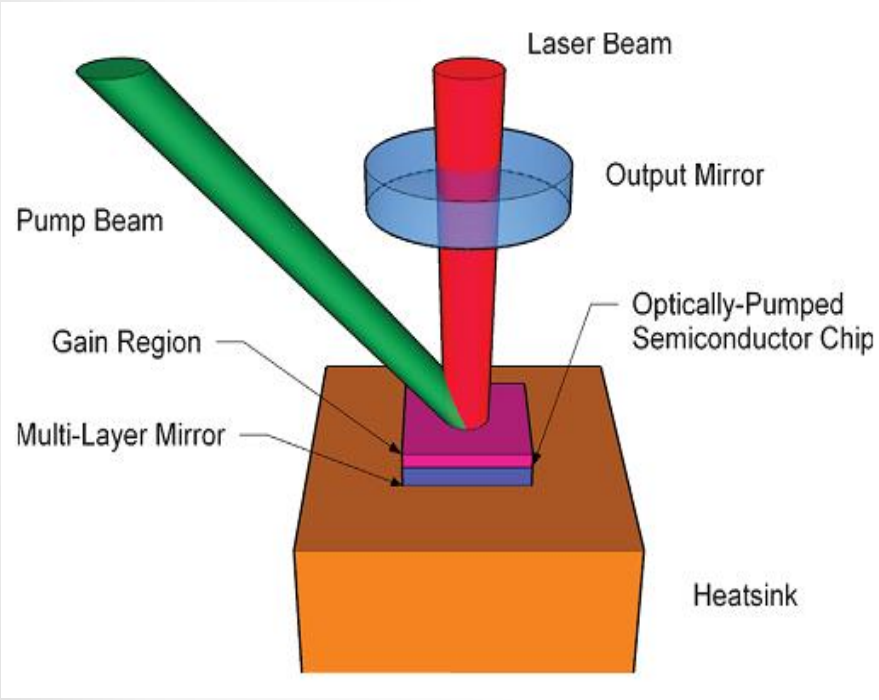




- Rezonator duž pravca proticanja struje
- Dužina aktivne oblasti je veoma kratka u poređenju sa lateralnim dimenzijama- zračenje nastupa na površini
- Zbog visoke refleksije dielektričnog ogledala, imaju male izlazne snage
- Lakša proizvodnja u odnosu na ivično emitujuće jer se mogu testirati u toku proizvodnje
- Desetine hiljada se proizvodi na jednom wafer-u od GaAs.

VECSEL LASERi

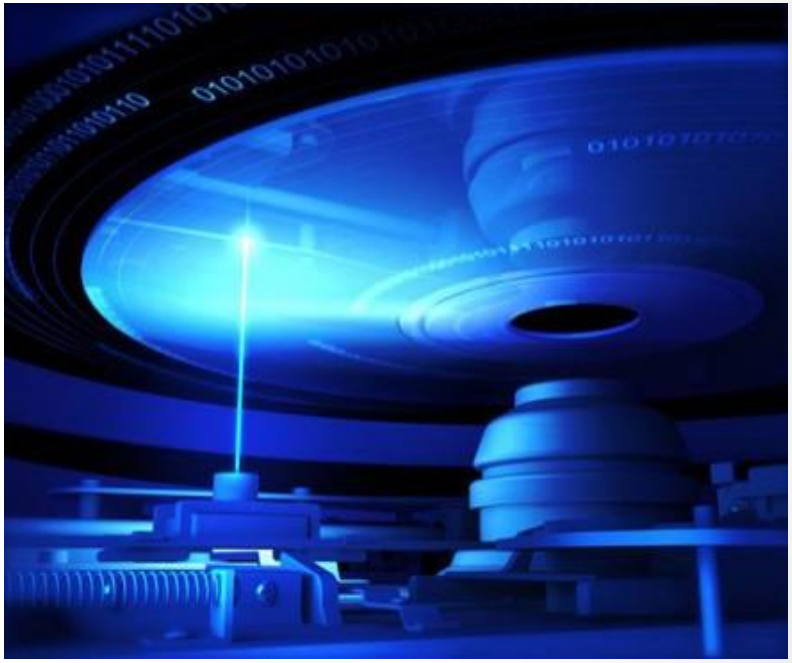
- Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers



- U VCSEL laserima ogledala su se obično dobijala epitaksijalnim narastanjem kao deo diode ili se narastanje vršilo zasebno pa se onda vršilo bondiranje na poluprovodnik koji sadrži aktivnu oblast.
- Kod VECSEL lasera jedno od ogledala je izvan strukture diode, jama obuhvata i oblast slobodnog prostora
- Tipična udaljenost diode od spoljašnjeg ogledala je oko 1cm
- mala debljina poluprovodničke pojačavačke oblasti u pravcu prostiranja svetlosti, manje od 100nm
- optički ili električno pumpani

PRIMENA POLUPROVODNIČKIH LASERA

- U obradi informacija: crveni- prilikom skladištenja i čitanja podataka, markeri, pumpa za YAG
  - AlGaAs (780nm): CD
  - AlGaInP (640nm): DVD
  - ZnSe (460-520nm): BlueRay
- U optičkim komunikacijama, u mernim i kontrolnim instrumentima, meračima razdaljine, laserskim štampačima, skenerima i bar kod čitačima, kao i u medicini (u nekim vrstama hirurgije i dermatologije)



TEČNI LASERI

- Laseri na bazi tečnosti imaju prednosti i nedostatke u poređenju sa drugim vrstama lasera.
- Tečnosti su, kao i gasovi, **optički homogenije** od čvrstih tela, tako da su gubici zračenja manji nego u čvrstim telima.
- **Oblik aktivne sredine** se može birati po želji nalivanjem tečnosti u sud željenog oblika.
- U tečnim laserima može se postići ista koncentracija aktivnih čestica kao kod čvrstih tela, tako da se može dobiti velika energija zračenja po jedinici zapremine aktivnog tela.
- Hlađenje aktivne sredine kod tečnih lasera se može postići– cirkulacijom tečnosti (kroz hladnjak), a pri impulsnom režimu rada može se radna zapremina tečnosti u potpunosti obnoviti.

TEČNI LASERI

- Stabilnost tečnih lasera u odnosu na termička naprezanja je znatno veća nego kod lasera čvrstog stanja.
- Bitan nedostatak tečnih lasera je vremenska nestabilnost rastvora (već nakon 1–2 meseca rada u rastvoru se stvara talog koji bitno smanjuje lasersku emisiju).
- Tečni laseri sa neorganskim rastvorima su toksični, pa i o tome treba voditi računa.
- Termo-optički koeficijent tečnosti je veliki, što dovodi do stvaranja termičkih sočiva čiji fokus se menja u toku impulsa zračenja, tako da divergencija laserskog zraka može iznositi nekoliko stepeni, a povećani su i gubici.

Istorijat

- 1963. godine - organometalni ili helatni tečni laseri.
- Primer je europijum helatni laser TTA (tenoltrifluoracetonat).
- Tu je Eu aktivni jon u molekulu organometalnog helata.
- Helatni molekuli pobuđeni optičkim pumpanjem predaju apsorbovanu energiju (brzim neradijativnim prelazima) ugrađenim jonima europijuma. Time je omogućeno optičko pumpanje spektralno uske linije preko širokih apsorpcionih traka helatnih molekula.
- Lasersko zračenje talasne dužine odgovara prelazu sa nivoa 5 na donji laserski nivo 7 koji se vrlo brzo prazni neradijativnim prelazima u osnovno stanje.
- Nedostaci helatnih lasera (zbog kojih oni nemaju veći praktični značaj) je:
  - što se mora raditi na niskim temperaturama da bi se dobilo znatnije pojačanje,
  - i što se talasna dužina laserskog zračenja ne može menjati kontinualno (kao kod tečnih lasera sa organskim bojama)

Tipovi tečnih lasera

- Dva osnovna tipa tečnih lasera su laseri sa neorganskim tečnostima i laseri sa rastvorima organskih boja.
- Nedostatak lasera sa neorganskim rastvorima je što se kod njih koriste hemijski agresivne tečnosti i što ne mogu da rade u neprekidnom režimu.

- Tečni laseri sa organskim bojama su otkriveni slučajno 1966. godine prilikom istraživanja stimulisanog Ramanovog rasijanja u organskoj boji.

- 1970. godine otkriven je i prvi kontinualni tečni laser sa organskim bojama.

- Od svih tečnih lasera najvažniji su tečni laseri sa organskim bojama, zbog mogućnosti kontinuiranog menjanja talasne dužine laserske emisije.

- Tečni laseri se uglavnom pobuđuju optičkim pumpanjem.
- Njihova snaga u impulsnom režimu je do nekoliko MW.
- Dužina trajanja impulsa je 1–15 μs kada se pobuđivanje aktivne sredine vrši bljeskalicom, odnosno 10–30 ns ako se pobuda vrši drugim laserom.

Neorganski tečni laseri

- Laseri na bazi rastvorenih soli neodimijuma u neorganskim tečnostima kao što su $SeOCl_2$ (selenohidroksid) i $POCl_3$ (fosforoksihlorid) u prisustvu $SnCl_4$ ili $ZrCl_4$.
- U takvim rastvorima dolazi do hemijskih reakcija tipa

$$Nd_2O_3 + 3\ SnCl_4 + 3\ SeOCl_2 \rightarrow 2\ Nd^{3+} + 3\ SnCl_6^{--} + 3\ SeO_2$$

$$Nd_2O_3 + 3\ SnCl_4 + 3\ POCl_3 \rightarrow 2\ Nd^{3+} + 3\ SnCl_6^{--} + 3\ P_2O_3Cl_4$$

- Ovde se koristi emisioni i apsorpcioni spektri jona Nd^{3+} , tako da se ova vrsta lasera može tretirati kao varijanta neodimijumskih lasera.
- Dimenzije epruvete sa aktivnom tečnošću (kivete) su: dužina 152 mm i prečnik 9,3 mm.
- Tangencijalna efikasnost (ili tzv. diferencijalni koeficijent korisnog djelovanja) ovih lasera je 1–4%.

- Izlazna snaga u početku raste linearno sa porastom snage pumpanja, a zatim dolazi do povećanja gubitaka i izrazite nelinearnosti.
- Uzrok tih gubitaka su prostorna nehomogenost pobude i centri boja.
- Pošto tečnost nije idealno homogena, energija bljeskalice se ne raspoređuje ravnomerno po njenoj zapremini, što dovodi do stvaranja pozitivnih ili negativnih termičkih sočiva sa relativno malim fokusnim rastojanjima.
- Takvi gubici rastu sa povećanjem snage pumpanja.
- Pojava termičkih sočiva je osnovni nedostatak ove vrste lasera i od njihove kompenzacije zavisi praktična primena ovih lasera.
- Drugi uzrok gubitaka je pojava centra boja u aktivnoj sredini pri delovanju svetlosti bljeskalice.
- Ovi centri apsorbuju deo zračenja.
- Kao još jedan nedostatak ovih tečnih lasera treba spomenuti veliku toksičnost rastvarača
- Neodimijumski tečni laseri se primjenjuju za pojačanje i lasersku emisiju impulsa velikih snaga i energija (npr. pomoću lasera sa aktivnom sredinom tipa Nd:POCl3:ZeCl4 u režimu modulacije dobrote dobijena je snaga impulsa od 50 MW).

Laseri sa organskim bojama

- Laseri na bojama su laseri koji koriste organsku boju kao laserski medijum, obično kao rešenje za tečnost.
- U poređenju sa gasovima i većinu čvrstih stanja laserskih medijuma, boje se obično koriste za mnogo širi opseg talasnih dužina.
- Širok opsegih čini posebno pogodnim za podesive lasere i impulsne lasere.
- Štaviše, boja može biti zamenjena drugom vrstom medijuma kako bi se generisale različite talasne dužine lasera, iako to obično zahteva zamenu drugih optičkih komponenata lasera.
- Lasere na bojama su nezavisno otkrili **P.P. Sorokin** i **F.P. Šefera** (i njihove kolege) u 1966. godine.

- Laseri na bojama se sastoje od organskih boja koje se mešaju sa rastvaračima, koje mogu cirkulisati kroz ćelije boja, ili koje se prenose preko otvorenog prostora korišćenjem prenosnika boja.

- Visok energetski izvor svetlosti je potreban da se "pumpa" tečnost van svog laserskog praga. Brzo pražnjenje fleš lampe ili spoljašnji laser se obično koriste za ovu svrhu.

- Izlazno ogledalo je normalno, oko 80 odsto reflektivnog zračenja, dok su sva ostala ogledala obično više od 99% refleksvna.

- Pošto tečni medijum u laserima na boji može da ima bilo koji oblik, postoji mnoštvo različitih konfiguracija koje se mogu koristiti:

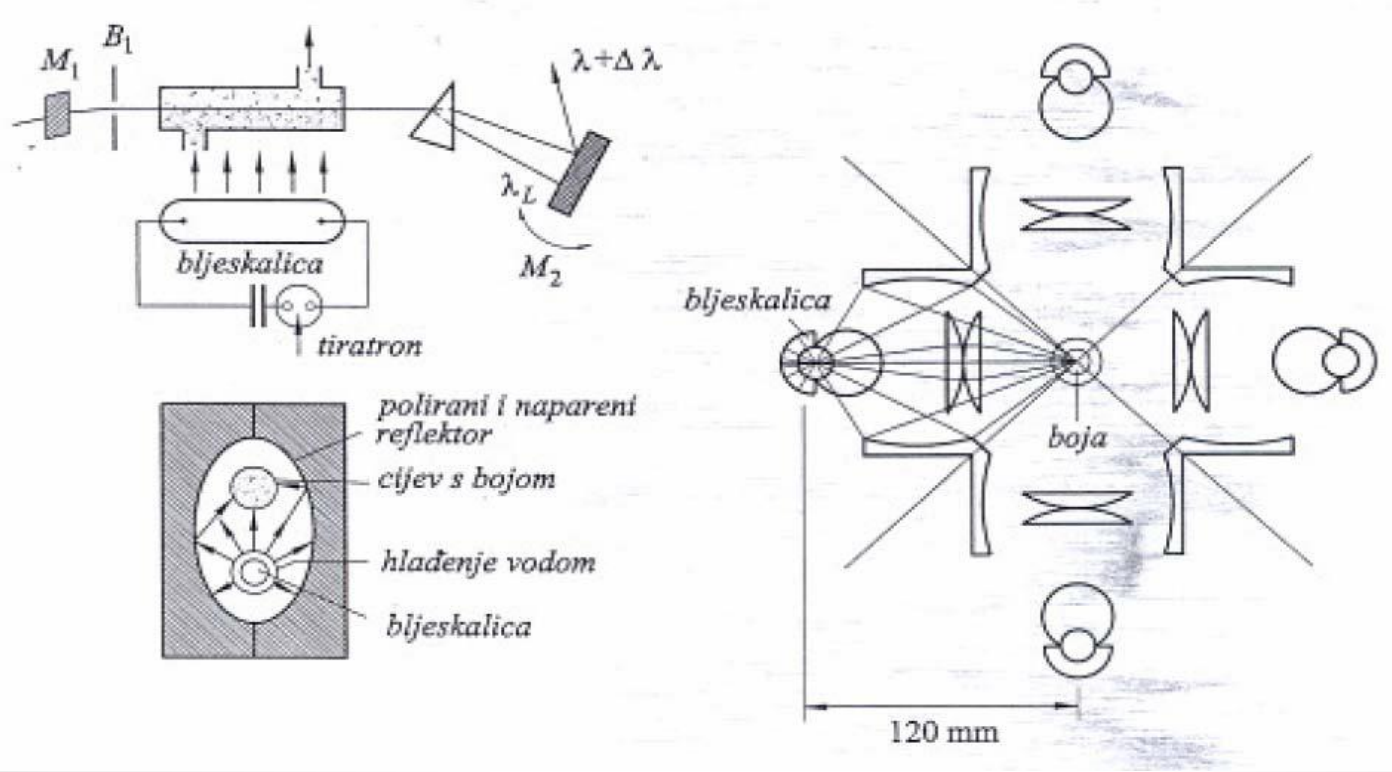
1) **Aksijalni impulsni laseri** imaju šuplji, prstenasti oblik fleš lampe, koja okružuje ćeliju boje, koja ima manju induktivnost za kraće osvetljaje i poboljšanu efikasnost prenosa.

2) **Koaksijalni impulsni laseri** imaju prstenastu ćeliju boje koja okružuje fleš lampu, za još bolju efikasnost transfera, ali imaju manju dobit usled difrakcije gubitaka. Blic impulsni laseri mogu se koristiti samo za pulsirajući izlaz.

Laseri s bojom bobuđeni bljeskalicama

- Može se pobuditi veliki broj boja
- Velike snage
- Jednostavniji za proizvodnju od CW lasera

Da bi se dobila uska spektralna linija ugrađuju se prizme, optičke rešetke, interferencijski filteri i FP –interferometri.



Na prvoj slici geometrija eliptičnog reflektora omogućuje pobudu protočnog rastopa boje putem ksenonske bljeskalice, dok je na drugoj pokazana mogućnost pobude sa četiri bljeskalice.

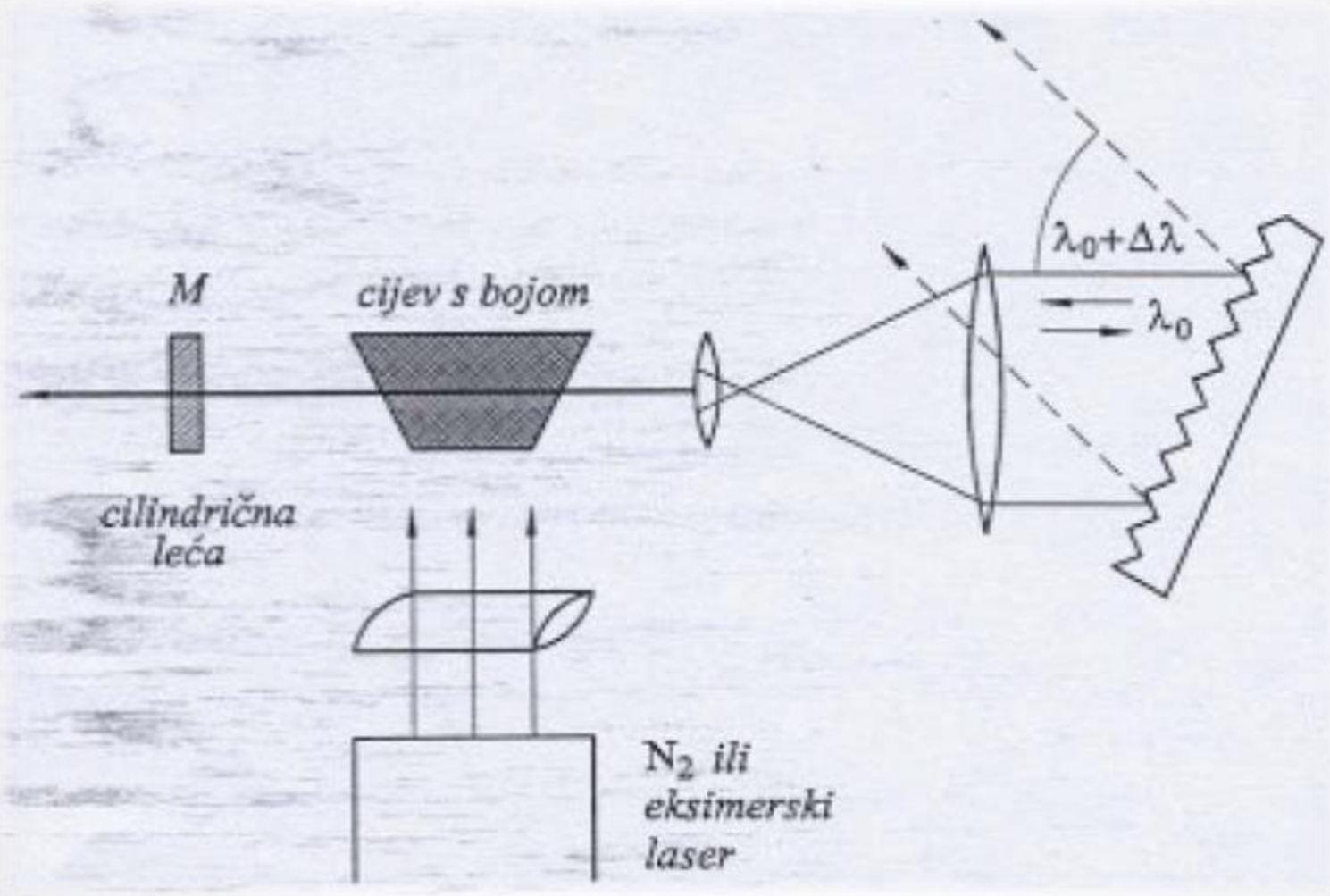
Laseri s' bojom pobudjenim impulsnim laserima

- Najčešće se koristi azotov laser s talasnom dužinom od 337nm.

- - Dovoljna snaga za inverziju naseljenosti
- - Pobuđuje boje florescentnim spektrom od bliskog ultraljubičastog do bliskog infracrvenog spektra
- - Može biti transverzalni ili longitudinalni
- Koriste se još i excimerski laseri, Nd:YAG ili Nd:staklo laseri, te laseri sa Cu parama.

- Ako odabir talasne dužine vršimo rešetkom, treba voditi računa da je moć razlučivanja rešetke proporcionalna umnošku **Nm**, gdje je **N** broj osvetljenih zareza na rešetci, a **m** je red spektra.
- Zato laserski zrak treba proširiti, a i zbog toga da ne bi oštetili površinu rešetke zbog snažnog osvetljenja..

Laseri s′ bojom pobudjenim impulsnim laserima



Transverzalna pobuda

Laseri s' bojom konstantnog talasa (CW)

- **Skoro uvek se koristi argon jonski laser za pobudu**:

  - Ima široki spektar od ultraljubičastog do plavo – zelenog spektra
  - Mogu biti realizovani pomoću rezonatora sa stojećim talasom ili kao "kružni" laseri s bojom kod kojih se dobija veća snaga u 'single' – modu rada.

- **Moguće je podešavanje na nekoliko načina da bismo dobili željenu talasnu dužinu:**
  - Promena boje koju koristimo
  - Promena otapala koje koristimo za mešanje s bojom
  - Menjanje dužine aktivnog medija

- **Konkretne primene:**

  - Medicina (lečenje opekotina prouzrokovanih suncem, itd.)
  - Spektroskopija, holografija
  - Auto industrija (dijagnoza izduvnih gasova motora)
  - Analiza hemijskih reakcija
  - Merenje brzih PIN fotodioda i MSM (metal-poluvodikmetal) fotodetektora.

Rukovanje laserima na bojama

- Boje koje se koriste u ovim laserima sadrže prilično velike organske molekule koji imaju sposobnost fluorescencije.
- Dolazna svetlost aktivira molekule privremene boje u stanje spremnosti da emituju zračenje.
- U ovom stanju, molekuli emituju svetlost preko fluorescencije, a boja je transparentna za lasersku talasnu dužinu.
- U okviru mikrosekundi, ili manje, molekuli će se promeniti u njihovo trostruko stanje.
- Samim tim svetlo se emituje preko fosforescentnosti, a molekuli apsorbuju lasersku talasnu dužinu, što je neprozirna boja.

- Tečne boje i imaju izuzetno visok laserski prag.
- Fleš lampe impulsnih lasera, zahtevaju bljesak izrazito kratkog trajanja, da dostavi velike količine energije potrebne da donese prošli nivo pre apsorpcije što prevazilazi singlet emisiju.
- Laseri na bojama sa spoljnom pumpom lasera mogu da usmere dovoljnu energiju pravilne talasne dužine u boju sa relativno malom količinom unosa energije.
- Boja mora biti dostavljena na velikim brzinama da bi molekuli izašli iz snopa.
- Organske boje imaju tendenciju da se raspadaju pod uticajem svetlosti.
- Rešenje za boje je da ona normalno cirkuliše iz velikog rezervoara, odnosno kroz stakleni kontejner.
- Sa staklenim kontejnerom, se izbegavaju gubici refleksije od staklenih površina i kontaminacija na zidovima.

- **Tečne boje** imaju veoma visok prirast kao laserski medijimi.

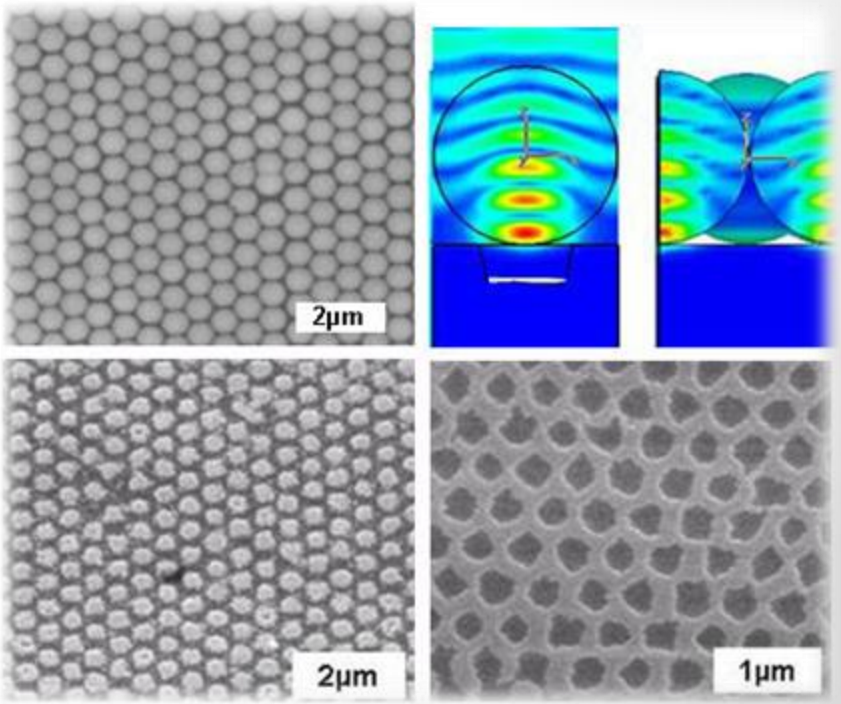
- Zrak samo treba da napravi nekoliko prolaza kroz tečnosti da dostigne punu snagu, a time i visoku prozračnost kroz izlaznu spojnicu.

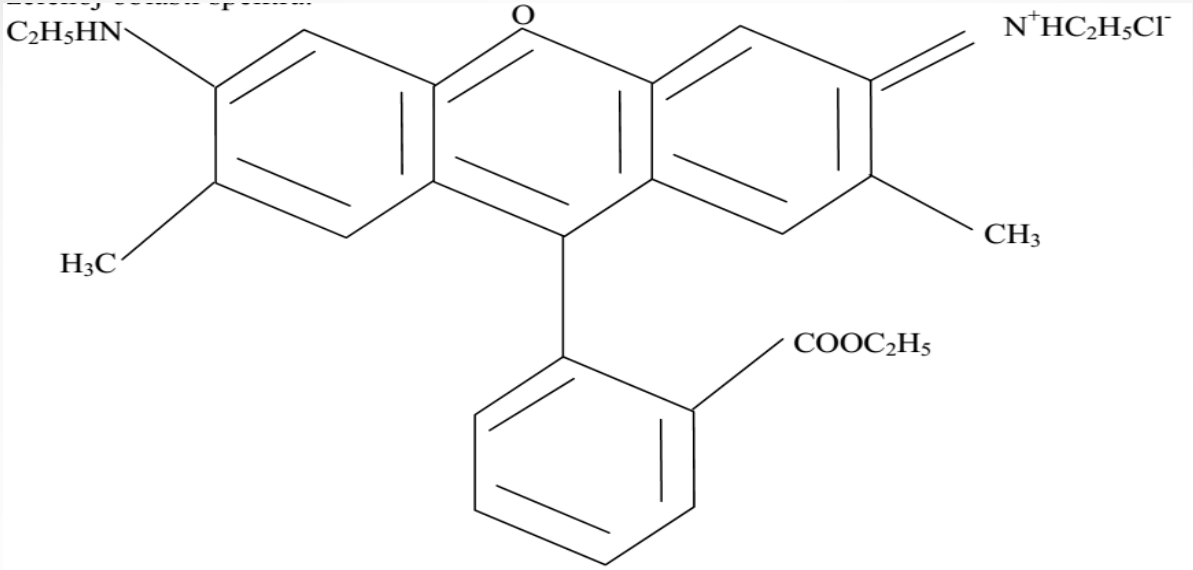
- Visoko pojačanje takođe dovodi do visokih gubitka, jer refleksija sa privremenom bojom zidova ćelija ili fleš lampom reflektora, neće dramatično smanjiti količinu energije na raspolaganju za gredu.

- Pumpe šupljina su obložene često, eloksiranom, ili na drugi način napravljena od materijala koji neće odraziti na laserski talasnoj dužini, dok odražava pumpe talasnoj dužini.

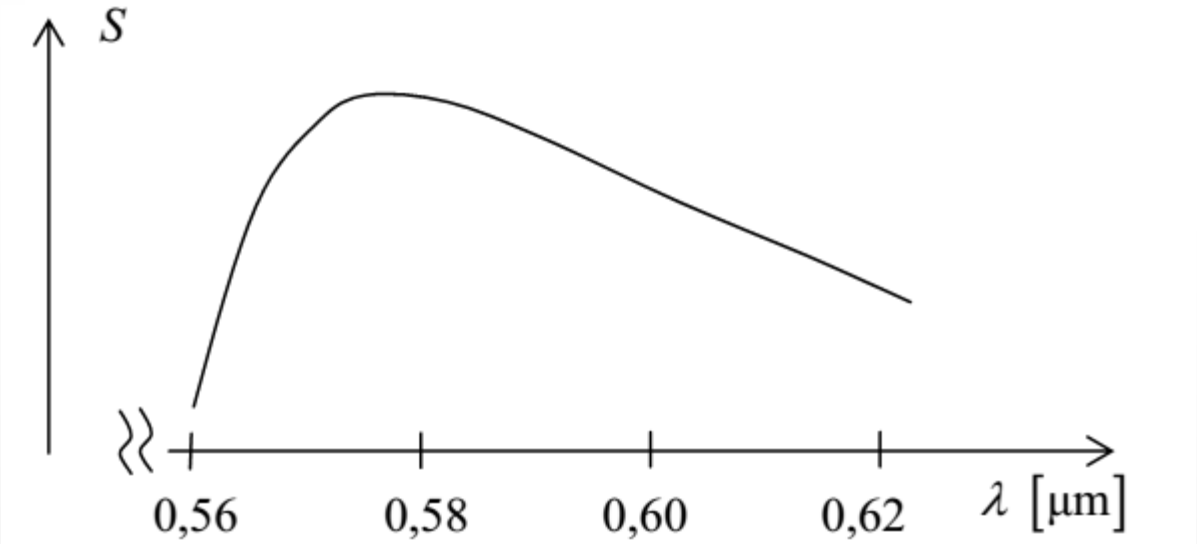
Hemikalije za boje

- Neki od laserskih boja su Rodamin, fluorescentne boje, kumarin, stilbene, umbelliferone, tetracene, malahit zeleno, i druge.
- Dok se neke boje zapravo koriste u prehrambenoj industriji, većina boja su veoma često toksične i kancerogene.
- Mnoge boje, kao što su Rodamin 6G, (u obliku hlorida), mogu biti vrlo korozivne za sve metale osim za one od nerđajućeg čelika.
- Raznovrsni rastvarači mogu da se koriste, iako će se neke boje rastvoriti u nekim rastvaračima bolje nego u drugima.
- Neki od rastvarača koji se koriste su voda, glikol, etanol, metanol, heksan, cikloheksan, ciklodektrin, i mnogi drugi.
- Rastvarači su često veoma toksični, i može ponekad da se direktno apsorbuju preko kože ili preko inhalacione pare.
- Mnogi rastvarači su takođe izuzetno zapaljivi.





Strukturna formula rodamina 6G *(ksantenska boja)*



Spektar zračenja rodamina 6G *(ksantenska boja)*