# Poluvodički laseri i primjene

**Vugrinčić, Stela**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:263943

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Stela Vugrinčić

# POLUVODIČKI LASERI I PRIMJENE

Diplomski rad

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: FIZIKA, nastavnički

**Stela Vugrinčić**

Diplomski rad

# Poluvodički laseri i primjene

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. D. Veža

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2016.

*Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Veži na pruženom znanju, strpljenju i pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.*
*Zahvaljujem dr. sc. Maji Planinić na pomoći pri pisanju metodičkog dijela diplomskog rada.*
*Najveće hvala mojim roditeljima na razumijevanju i podršci tijekom studija.*

## Sažetak

Laserska dioda je poluvodičko optičko pojačalo s optičkom povratnom vezom. Poluvodičko optičko pojačalo je propusno polarizirani jako dopirani $p^+$-$n^+$ spoj napravljen od poluvodičkog materijala s tzv. direktnim energijskim procjepom. Pobuđenje aktivnih atoma postiže se prolaskom struje kroz medij, nakon čega dolazi do emisije svjetlosti i optičkog pojačanja. Optičku povratnu vezu stvara refleksija svjetlosti na "unutarnjim zrcalima" koja se dobivanju kalanjem poluvodičkog materijala po kristalnim ravninama (stvarajući Fabry-Perot rezonator). Obzirom da poluvodički materijal ima visoki indeks loma u odnosu na zrak/vakuum (n$\sim$3.5), koeficijent refleksije je dovoljno visok da osigura jaku optičku povratnu vezu, pretvarajući tako optičko pojačalo u optički oscilator, odnosno u laser.

U diplomskom radu bit će opisana fizička svojstva poluvodičkih laserskih dioda, princip rada diodnih lasera i različite mogućnosti njihove primjene. U demonstracijskom eksperimentu bit će istražena i njihova osnovna svojstva.

# Semiconductor diode lasers and applications


## Abstract

Laser diode is semiconductor optical amplifier with optical feedback. Semiconductor optical amplifier is forward biased highly doped $p^+$-$n^+$ junction made of semiconductor material with direct energy gap. Excitation of active atoms is achieved with current passing through medium, followed by emission of light and optical amplification. Optical feedback is created by reflection on ”internal mirrors” which are made by cleaving the crystal at crystal plains, thus creating Fabry-Perot resonator. Because semiconductor material has high index of refraction compared to air/vacuum (n$\sim$3.5), coefficient of reflection is high enough to ensure high optical feedback, thus converting optical amplifier into optical resonator, or laser.

This work will describe physical characteristics of semiconductor diode lasers, principle of work of laser diode and possibilities of their applications. Their basic characteristic will also be researched through demonstration experiment.

# Sadržaj

**1 Uvod** **1**

**2 Poluvodiči** **3**
2.1 Vrste poluvodiča . . . . . 7
2.2 Poluvodička dioda . . . . . 10

**3 Poluvodički izvori svjetlosti** **14**
3.1 Svjetleća dioda . . . . . 14
3.2 Laserske diode . . . . . 19

**4 Optoelektroničke karakteristike poluvodičkog diodnog lasera** **25**

**5 Primjene poluvodičkih izvora svjetlosti** **31**
5.1 Optička komunikacija . . . . . 31
5.1.1 Primjena svjetlećih dioda u optičkoj komunikaciji . . . . . 33
5.1.2 Primjena laserskih dioda u optičkoj komunikaciji . . . . . 34
5.2 Optička pohrana podataka . . . . . 35
5.3 Pisač . . . . . 36
5.4 Barkod čitači . . . . . 37
5.5 Optičko pumpanje lasera . . . . . 38
5.6 Laserska spektroskopija s optogalvanskom detekcijom . . . . . 39
5.7 Ostale primjene poluvodičkog diodnog lasera . . . . . 41

**6 Metodički dio** **42**
6.1 Tijek sata [35], [36], [37] . . . . . 44
6.1.1 Uvodni dio . . . . . 44
6.1.2 Središnji dio . . . . . 45
6.1.3 Završni dio . . . . . 51

**7 Zaključak** **54**

**Dodaci** **55**

**A Modovi optičkog rezonatora** **55**
A.1 Longitudinalni modovi titranja . . . . . 55
A.2 Transverzalni modovi titranja . . . . . 55

# 1 Uvod

Već je 1917. A. Einstein predvidio mogućnost postojanja stimuliranog zračenja, što je duži niz godina ostalo nezapaženo. Godine 1953. C. Townes i suradnici su demonstrirali rezultate svojih istraživanja o stimuliranoj emisiji svjetlosti. Poslali su snop molekula amonijaka u električno polje koje je otklonilo molekule niže energije. Molekule s visokom energijom poslali su u drugo električno polje. Izlaganje drugom električnom polju uzrokovalo je da sve molekule amonijaka s visokom energijom, gotovo istovremeno, padnu u osnovno stanje, emitirajući pritom mikrovalne fotone iste frekvencije i smjera širenja. Townes je opisanu napravu nazvao maser (akronim od engl. *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*: pojačanje mikrovalova stimuliranom emisijom zračenja). Kako je Townes nastavljao eksperimente s maserom, bilo je sve jasnije da do stimulirane emisije može doći i na mnogo kraćim valnim duljinama, kao što je infracrveno valno područje ili čak vidljiva svjetlost. U lipnju 1960. godine fizičar Theodore Maiman je uspio napraviti uređaj, koji se sastojao od malog štapića sintetskog rubina paralelno poliranih rubova, koji je pobuđivala ksenonska bljeskalica [1]. Tako je stvoren izvor veoma uskog snopa monokromatske svjetlosti-laser (akronim od engl. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*: pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja). Godine 1961. A. Javan i suradnici su konstruirali prvi plinski laser na smjesi He i Ne [2].

U početku su istraživanja poluvodiča bila koncentrirana na proučavanje silicija. Međutim, sam silicij ne može emitirati vidljivu svjetlost. Godine 1952. H. Welker je ukazao na činjenicu da se potencijalno korisne elektroničke naprave mogu izraditi od poluvodičkih materijla sastavljenih od elemenata III i IV grupe periodnog sustava. Jedan od takvih poluvodiča, galijev arsenid (GaAs), postao je jako važan u potrazi za efikasnim poluvodičkim laserom. No, korištenju GaAs, kao osnove za poluvodički laser, prethodio je cijeli niz fundamentalnih istraživanja: studije o naraštanju kristala visoke čistoće sloj po sloj, istraživanje kristalnih defekata, dopanada i analize utjecaja topline na stabilnost sloja. Sljedeći napretke u tim granama, grupa istraživača zaposlenih u General Electric, IBM, Lincoln Laboratory i Massachusetts Institute of Technology razvila je 1962. godine GaAs laser [1].

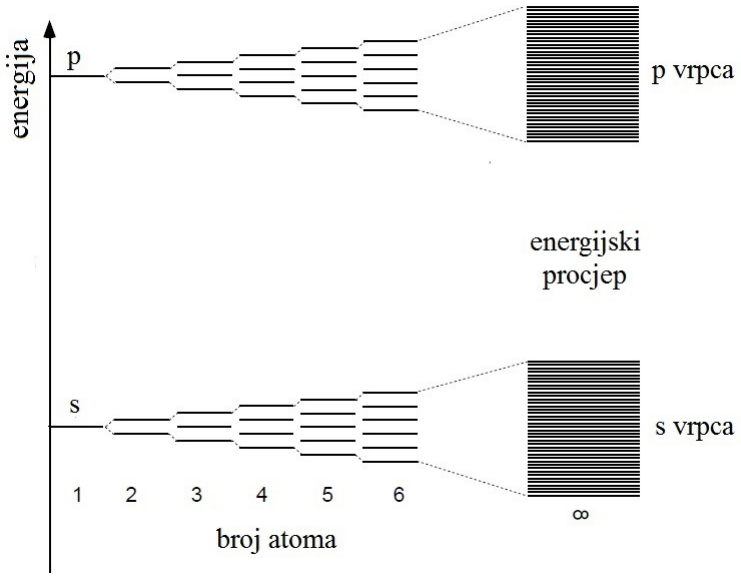
Paralelno su se razvijale i druge vrste lasera. Tako je 1963. godine Heller konstruirao prvi laser na tekućem mediju, a nešto kasnije, 1966., Sorokin i Lempicki uspijevaju dobiti laserski efekt na organskim bojama. Slijede kemijski laseri te razvoj lasera velike optičke snage [2].

Poluvodički laseri su postali gotovo najbitniji proizvod optoelektroničke industrije. Prednosti poluvodičkog lasera su mnogostruke: to je monokromatski, koherentni kolimininirani izvor svjetla, kompaktan je, lagan, dugog životnog vijeka te male potrošnje električne energije. Osim toga može ih se direktno modulirati i to vrlo viskom frekvencijama, što je vrlo važno u optičkim komunikacijama. Zbog svih navedenih osobina, postali su univerzalno pomoćno sredstvo u mnogim granama znanosti,

tehnike i tehnologije. Svrha je diplomskog rada detaljnije upoznavanje s načinom rada poluvodičkog diodnog lasera i njegovim primjenama. Kako su osnovni dio svakog poluvodičkog diodnog lasera laserske diode, a one su svojom konstrukcijom i načinom rada slične svjetlećim diodama, dio diplomskog rada posvećen je i svjetlećim diodama te njihovim primjenama.

# 2 Poluvodiči

U pojedinom atomu elektroni imaju određenu energiju s obzirom na jezgru atoma; nalaze se na određenim energijskim razinama. Diskretne energijske razine i pripadne valne funkcije dobivaju se rješavanjem Schrödingerove jednadžbe. Na jednoj energijskoj razini mogu se nalaziti najviše dva elektrona, ali različitih spinova (Paulijev princip). Kada su dva atoma daleko, međusobni utjecaj je zanemariv i može se tretirati kao perturbacija. Kako se udaljenost između atoma smanjuje, dolazi do preklapanja valnih funkcija te se, kao posljedica interakcije, svako energijsko stanje cijepa u dva nova stanja, jedno više, a drugo niže energije. Međudjelovanjem N atoma, svaka energijska razina se rascijepi na N bliskih energijskih stanja, pri čemu je N broj atoma. U slučaju kristala broj atoma koji međudjeluju je jako velik (reda veličine $10^{23}$) zbog čega su energijske razine infinitezimalno bliske te formiraju kvazikontinuirane energijske vrpce. Energijske vrpce su odvojene energijskim procjepom [3]. Najviša potpuno popunjena vrpca naziva se valentnom vrpcom, a sljedeća vodljivom vrpcom [1] [4]. Formiranje energijskih vrpci prikazano je na slici 2.1.

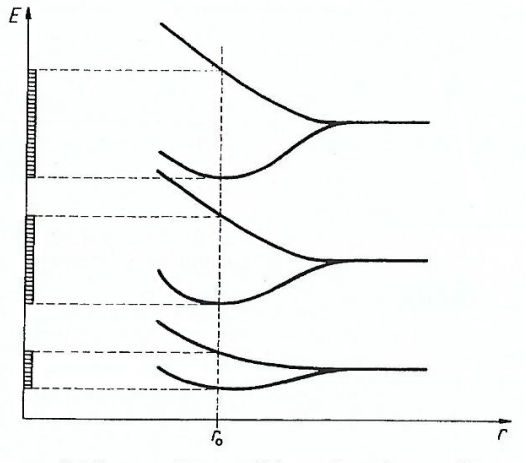



Slika 2.1: Shematski prikaz prijelaza s diskretnih atomskih energijskih razina na energijske vrpce kristala [5].

Preklapanje elektronskih valnih funkcija povećava se s povećanjem energije pa se više energijske razine transformiraju u široke energijske vrpce. Suprotno tome, energijske razine elektrona bližih jezgri se tek neznatno proširuju. S porastom širine vrpce, smanjuje se širina energijskog procjepa. Tako se jako proširene energijske vrpce mogu preklapati. Budući da širina energijske vrpce ovisi o stupnju preklapanja

[1] naziva se vodljivom vrpcom jer pripadni elektroni u električnom polju prelaze u viša kvantna stanja, proizvodeći pritom električnu struju [4]

valnih funkcija, širina energijske vrpce također će ovisiti o razmaku susjednih atoma, kao što je prikazano na slici 2.2 [3].




Slika 2.2: Širina energijskih vrpci u kristalu u ovisnosti o razmaku između susjednih atoma, pri čemu je $r_0$ ravnotežni razmak atoma u kristalu [3].

Da bi objasnio svojstva metala, Sommerfeld je predložio pojednostavljeni model u kojem se zanemaruje bilo kakav oblik interakcije te se razmatra kretanje slobodnog elektrona u pravokutnoj potencijalnoj jami. Pritom su rješenja Schrödingerove jednadžbe:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\,\nabla^2\,\psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r})\,, \tag{2.1}$$

ravni valovi:

$$\psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{V}}\,e^{i\,\vec{k}\cdot\vec{r}}\,, \tag{2.2}$$

pri čemu je $\vec{k}$ valni vektor, a V volumen potencijalne jame. Valnoj funkciji korespondira energija:

$$E(\vec{k}) = \frac{\hbar^2\,k^2}{2m}\,. \tag{2.3}$$

Pritom je valni vektor određen rubnim uvjetima:

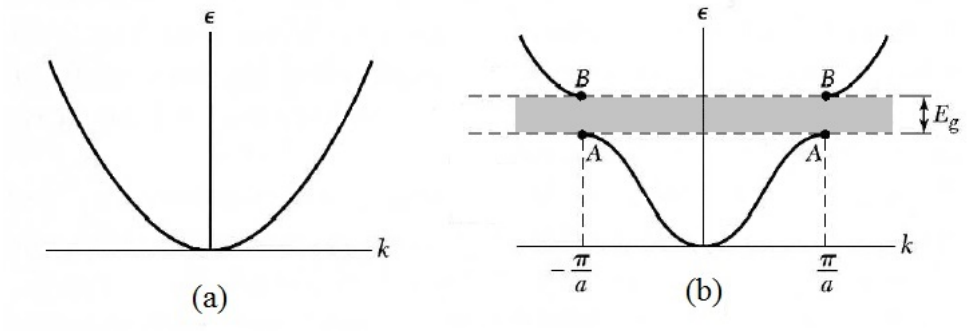
$$k_i = \frac{2\,\pi}{L}\,n_i;\;\; i = x,\,y,\,z;\;\; n_i = 0, \pm 1, \pm 2... \tag{2.4}$$

Iako su stanja kvantizirana, zbog velikog broja elektrona, energija se praktički mijenja kontinuirano i može se u jednodimenzionalnom slučaju predočiti parabolom, kao što je prikazano na slici 2.3 (a) [3].

Realističnija aproksimacija mora uzeti u obzir nejednolikost raspodjele pozitivnog naboja unutar metala. Rješenje Schrödingerove jednadžbe za periodički potencijal je Bloch-ova funkcija koja je produkt ravnog vala i periodičke funkcije:

$$\psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i\,\vec{k}\cdot\vec{r}}\,u(\vec{r});\;\; u(\vec{r}) = u(\vec{r}+\vec{R}), \tag{2.5}$$

dok je energijski spektar sličan energijskom spektru slobodnog elektrona, ali se pojavljuje energijski procjep, kao što je prikazano za slučaj jedne dimenzije na slici 2.3 (b). Postojanje energijskog procjepa očituje se i pri Braggovoj refleksiji. Elektronski snop će se totalno reflektirati ako je valni broj jednak višekratniku od $\pi/a$, pri čemu je a konstanta kristalne rešetke. Elektroni tih energija ne šire se kristalom.




Slika 2.3: Graf ovisnosti energije elektrona o valnom vektoru za: (a) elektrone u pravokutnoj potencijalnoj jami, (b) elektrone u periodičkom potencijalu kristalne rešetke konstante a [6].

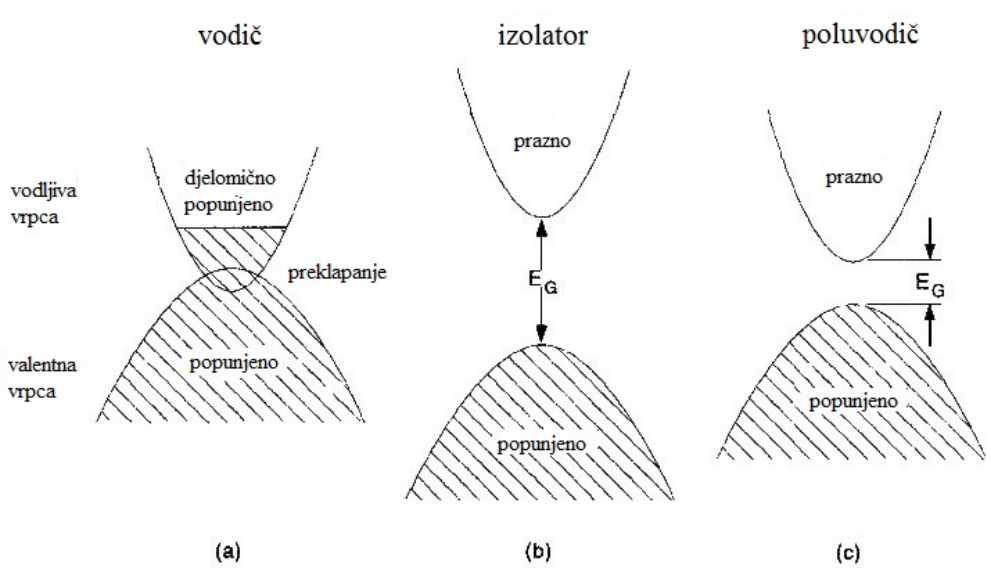
Gibanje elektrona u kristalu pod djelovanjem sile može se usporediti s gibanjem slobodnih elektrona, ali pritom elektron ima efektivnu masu. Efektivna masa se može izraziti za slučaj jednodimenzionalne rešetke kao:

$$m^* = (\hbar^2)/(\frac{d^2E}{dk^2})\,. \tag{2.6}$$

Efektivna masa je funkcija valnog vektora. Ona je različita u različitim kvantnim stanjima, a može biti pozitivna ili negativna ovisno o tome nalazi li se elektron na dnu ili vrhu vrpce. Njezina je vrijednost obrnuto proporcionalna zakrivljenosti energijske vrpce [3].

Vodljivost materijala određuju valentni elektroni koji su najslabije vezani uz jezgre atoma. Valentnim elektronima odgovaraju energije valentne vrpce, odnosno najviše energije elektrona vezanih uz jezgre atoma. Minimalna energija potrebna za oslobađanje elektrona odgovara širini energijskog procjepa jer elektroni ne mogu poprimati energije unutar energijskog procjepa. U vodiču se valentna i vodljiva vrpca djelomično preklapaju, kao što je prikazano na slici 2.4 (a), te je na temperaturi $T >$ 0 K većina valentnih elektrona slobodna [7].

U poluvodičima i izolatorima vodljiva i valentna vrpca su odvojene energijskim procjepom energije $E_G$, kao što je prikazano na slici 2.4 (b) i (c) [7]. U mnogim poluvodičima energijski procjep između valentne i vodljive vrpce iznosi od 1 do 2 eV. Ta je vrijednost nekoliko puta manja nego u tipičnim izolatorima. Zahvaljujući uskom energijskom procjepu, u poluvodičima se nosioci naboja mnogo lakše pobuđuju nego u izolatorima [3].




Slika 2.4: Vodljiva i valentna vrpca: (a) vodiča, (b) izolatora, (c) poluvodiča [10].

Najčešće korišteni poluvodički materijal je silicij (Si). Kao četverovalentni element, silicij ima četiri valentna elektrona. Atomi silicija se vežu međusobno u kristalnu strukturu, koja se naziva dijamantnom strukturom, s rasporedom u kojem se svaki atom nalazi u središtu tetraedra, a četiri susjedna atoma leže u njegovim vrhovima. Među atomima silicija u kristalnoj rešetci uspostavlja se kovalentna veza u kojoj svaki atom dijeli svoja četiri valentna elektrona sa susjedna četiri atoma silicija. Na temperaturi $T > 0$ K dio valentnih elektrona postiže dovoljnu energiju za prekid veze i oslobađa se od matičnog atoma, što odgovara skoku iz valentne u vodljivu vrpcu na energijskom dijagramu. Na mjestu razbijene veze javlja se manjak elektrona, odnosno šupljina. Šupljinu popunjava elektron iz susjedne veze, čime se šupljina seli na njegovo mjesto i postupak se ponavlja. Uz kretanje slobodnih elektrona, u kristalu silicija uspostavlja se i kretanje valentnih elektrona preko šupljina razbijenih veza. Niz prelazaka elektrona po mjestima šupljina može se jednostavnije promatrati kao kretanje šupljina u suprotnom smjeru. Kako na mjestu šupljine postoji manjak električki negativnog elektrona, njezin naboj je pozitivan, a po iznosu odgovara naboju elektrona. Tako su za električnu struju u poluvodiču odgovorna dva tipa nosilaca: slobodni elektroni vodljive vrpce i šupljine valentne vrpce.

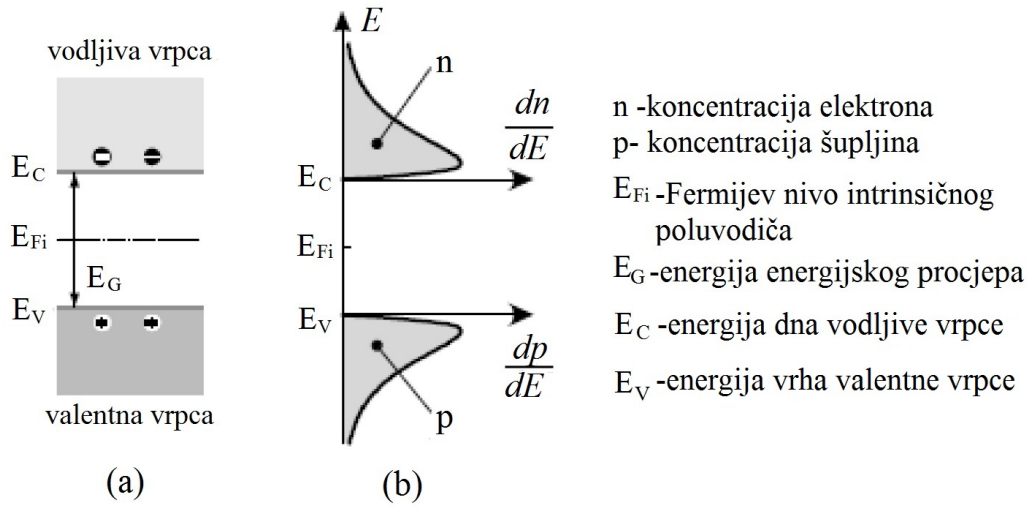
Proces kidanja veze između valentnog elektrona i atoma te stvaranje para elektron-šupljina naziva se procesom generacije. Na temperaturi $T > 0$ K taj se proces stalno ponavlja. Isto tako, pojedini slobodni elektroni, prolaskom kroz kristal, dolaze u blizinu prekinute kovalentne veze i popunjavaju je, čime gube energiju i postaju valentni elektroni. Ovaj proces se naziva rekombinacija. U stanju ravnoteže, u kojem na poluvodič ne djeluju vanjski utjecaji, procesi generacije i rekombinacije su uravnoteženi i održavaju konstantan umnožak koncentracija elektrona i šupljina [7].

## 2.1 Vrste poluvodiča

Čisti poluvodič bez primjesa naziva se intrinsični poluvodič, a pripadna koncentracija nosilaca naboja intrinsična koncentracija *($n_i$)*. U intrinsičnom poluvodiču koncentracija slobodnih elektrona ($n$) u vodljivoj vrpci jednaka je koncentraciji šupljina ($p$) u valentnoj vrpci, kao što je prikazano na slici 2.5 (b):

$$n_i = n = p\,. \tag{2.7}$$

Vodljivost intrinsičnog poluvodiča bitno se mijenja promjenom temperature. Porastom temperature povećava se broj elektrona s termičkom energijom dovoljno velikom za prekid kovalentne veze. Vodljivost čistog silicija može povećati i neki drugi vanjski utjecaj koji svojom energijom stvara parove slobodnih elektrona i šupljina. To može npr. biti elektromagnetsko zračenje.




Slika 2.5: Intrinsični poluvodič: (a) položaj Fermijevog nivoa, (b) koncentracije elektrona i šupljina [7].

Slobodni elektroni posjeduju energije u vodljivoj vrpci, ali nemaju svi elektroni unutar vodljive vrpce jednake energije, već su njihove energije statistički raspoređene. Raspodjela elektrona u vodljivoj vrpci određena je Fermi-Diracovom funkcijom:

$$f(E_C) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E_C - E_{Fi}}{\mathrm{k_B} T}} + 1}\,, \tag{2.8}$$

pri čemu je $E_{Fi}$ Fermijeva energija intrinsičnog poluvodiča [2], a $E_C$ energija minimuma (dna) vodljive vrpce. Raspodjela šupljina u valentnoj vrpci izražena je kao:

$$f(E_V) = \frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{E_{Fi} - E_V}{\mathrm{k_B} T}} + 1}\,, \tag{2.9}$$

pri čemu je $E_V$ energija maksimuma (vrha) valentne vrpce. U intrinsičnom poluvodiču broj šupljina u valentnoj vrpci jednak je broju elektrona u vodljivoj vrpci pa

[2] Fermijeva energija - energija najvišeg zauzetog stanja pri temperaturi apsolutne nule

su i raspodjele elektrona i šupljina u navedenim vrpcama jednake. Izjednačavanjem relacija 2.8 i 2.9, dobiva se položaj intrinsičnog Fermijevog nivoa *($E_{Fi}$)*:

$$E_{Fi} = \frac{E_V + E_C}{2} \,. \tag{2.10}$$

Uz poznatu vrijednost energije energijskog procjepa:

$$E_G = E_C - E_V \,, \tag{2.11}$$

može se pokazati kako je položaj Fermijevog nivoa intrinsičnog poluvodiča u sredini energijskog procjepa, kao što je prikazano na slici 2.5.

Relacija 2.10 vrijedi u slučaju da je efektivna masa elektrona jednaka efektivnoj masi šupljina. Općeniti izraz za položaj intrinsičnog Fermijevog nivoa je:

$$E_{Fi} = \frac{E_V + E_C}{2} + \frac{3}{4}\,\mathrm{k_B}\,T \ln(\frac{m_p^*}{m_n^*}) \,. \tag{2.12}$$

U izvedbi poluvodičkih elemenata specifična vodljivost poluvodiča kontrolirano se podešava dopiranjem, odnosno dodavanjem atoma određenih primjesnih elementa u strukturu materijala. Primjese, koje mijenjaju vodljivost poluvodiča, elementi su čija valentnost je za jedan veća ili manja od valentnosti atoma poluvodiča. U siliciju su primjese peterovalentni ili trovalentni elementi.

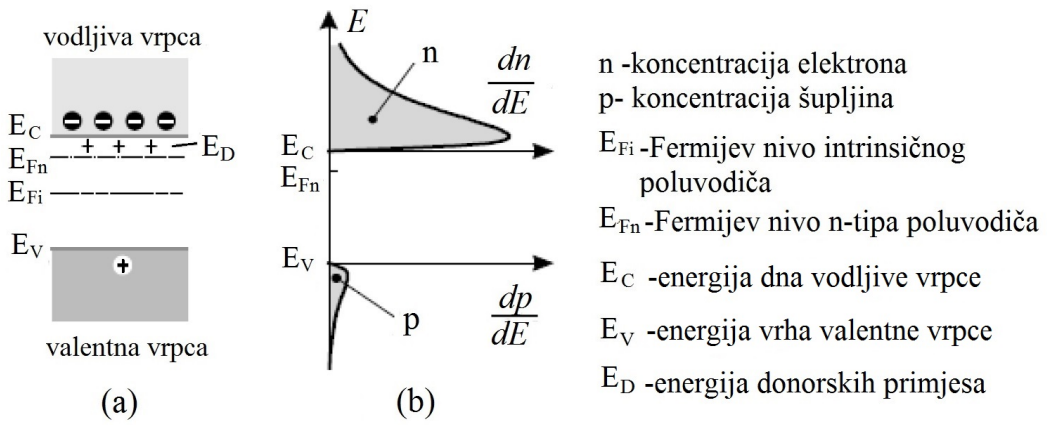
U slučaju peterovalentnih primjesa, četiri valentna elektrona atoma primjese uspostavljaju vezu s četiri susjedna atoma silicija. Peti elektron je slabo vezan za svoj atom. Energija potrebna za raskid veze atoma i petog elektrona je mala pa su na sobnoj temperaturi praktički svi takvi elektroni slobodni. Oslobađanjem, peti elektron se može kretati kroz materijal. Otpuštanjem jednog elektrona u vodljivu vrpcu, atomi peterovalentne primjese postaju pozitivni ioni. Peterovalentni atom, koji daje slobodni elektron, naziva se donor. Energija primjesa je niža od energije dna vodljive vrpce $E_C$ za iznos energije ionizacije petog elektrona, kao što je prikazano na slici 2.6 (a). Poluvodič dopiran donorskim primjesama ima znatno veću koncentraciju slobodnih elektrona od koncentracije šupljina, što je prikazano na slici 2.6 (b). Poluvodič u kojem struju pretežno čine negativno nabijeni elektroni naziva se n-tip poluvodiča.

Položaj Fermijevog nivoa n-tipa poluvodiča nalazi se iznad intrinsičnog Fermijevog nivoa u energijskom procjepu:

$$E_{Fn} = E_{Fi} + \mathrm{k_B}\,T \ln{(\frac{n}{n_i})} \,. \tag{2.13}$$

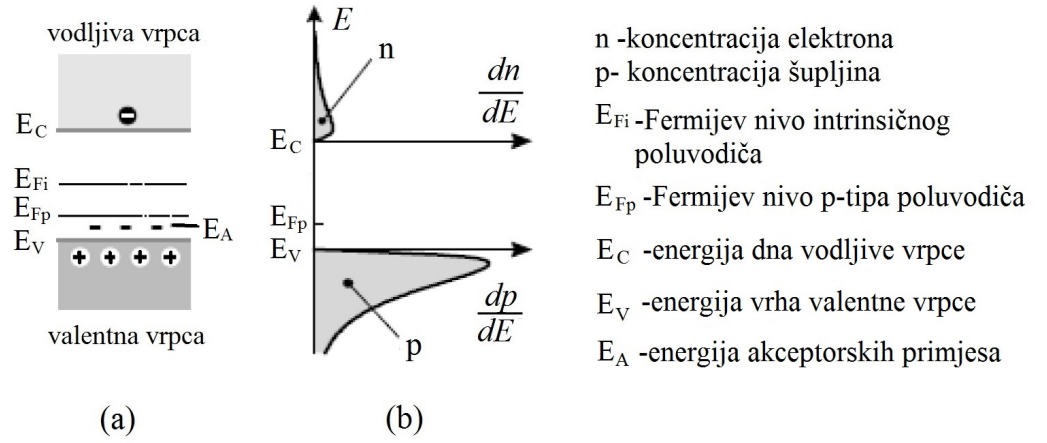
Položaj Fermijevog nivoa u n-tipu poluvodiča prikazan je na slici 2.6.

Moguće je kao primjese dodavati i trovalentne atome. Tri valentna elektrona primjese uspostavljaju vezu s tri atoma silicija. Veza s jednim atomom silicija ostaje nepopunjena. Na tom mjestu prisutna je šupljina. U nepopunjenu vezu lako se prebacuje valentni elektron iz susjedne veze, čime stvara šupljinu na svom prvobitnom




Slika 2.6: N-tip poluvodiča: (a) položaj Fermijevog nivoa, (b) koncentracije elektrona i šupljina [7].

položaju. Time dolazi do kretanja šupljine preko valentnih elektrona. Primajući elektron, atom primjese se ionizira, postajući negativno nabijen. Trovalentna primjesa naziva se akceptor. Energija akceptora je viša od energije vrha valentne vrpce za energiju ionizacije atoma primjese, kao što je prikazano na slici 2.7 (a). U ovom slučaju šupljine su većinski, a elektroni manjinski nosioci, kao što je prikazano na slici 2.7 (b). Materijal karakteriziran većinskim pozitivnim šupljinama naziva se p-tip poluvodiča.




Slika 2.7: P-tip poluvodiča: (a) položaj Fermijevog nivoa, (b) koncentracije elektrona i šupljina [7].

Položaj Fermijevog nivoa p-tipa poluvodiča nalazi se ispod intrinsičnog Fermijevog nivoa u energijskom procjepu:

$$E_{Fp} = E_{Fi} - \mathrm{k_B}\, T \ln\left(\frac{p}{n_i}\right), \tag{2.14}$$

kao što je prikazano na slici 2.7.

Poluvodič dopiran donorima ili akceptorima naziva se još i primjesni ili ekstrinzični poluvodič.

Kao elementarni poluvodički element koristi se i germanij (Ge). Germanij je također četverovalentni element, čija je kristalna struktura ista kao i u slučaju silicija, a dopira se peterovalentnim i trovalentnim primjesama. U izradi elektroničkih elemenata upotrebljavanju se i složeni poluvodički materijali građeni najčešće od spojeva trovalentnih i peterovalentnih elemenata (galijev arsenid (GaAs) ili indij fosfid (InP)), odnosno dvovalentnih i šesterovalentnih elementa [7].

Osnovna karakteristika poluvodiča je visok stupanj osjetljivosti na vanjske uvjete. Promjene temperature i tlaka, stavljanje uzorka u elektromagnetsko polje te dodavanje primjesa mogu bitno promijeniti vodljivost poluvodiča. Ta je osjetljivost osnova za primjenu poluvodiča u različitim tehničkim uređajima (tranzistori, ispravljači, modulatori, fotoelementi...) [3].

## *2.2 Poluvodička dioda*

Dosadašnja razmatranja bila su ograničena na poluvodič p- ili n-tipa. Spajanjem p- i n-tipa poluvodiča realizira se pn-spoj koji predstavlja poluvodičku diodu. U praksi je to jedan kristal čiji je jedan dio dopiran donorskim, a drugi akceptorskim primjesama [2].

Spajanjem poluvodiča p-tipa i poluvodiča n-tipa dobiva se struktura u kojoj je na jednoj strani mnoštvo šupljina, a malo elektrona, dok je na drugoj strani situacija suprotna. Zbog velike razlike koncentracija nosilaca istog tipa na jednoj i drugoj strani spoja, u trenutku kontakta dolazi do difuzije nosilaca. Šupljine prelaze s p-na n–stranu, a elektroni s n- na p-stranu. Rezultat su difuzijske struje šupljina ($I_{Dp}$) i elektrona ($I_{Dn}$). Gustoća difuzijske struje elektrona $J_{Dn}$ proporcionalna je gradijentu koncentracije elektrona:

$$J_{Dn} = e\, D_n \frac{dn(x)}{dx}\,. \tag{2.15}$$

Budući da struja teče u smjeru pozitivnog gradijenta elektrona, difuzijska struja i gradijent koncentracije elektrona su istog predznaka. Koeficijent $D_n$ naziva se difuzijska konstanta elektrona. Nejednolika raspodjela šupljina p(x) duž koordinate x, uzrokuje difuziju šupljina i pripadnu difuzijsku gustoću struje:

$$J_{Dp} = -e\, D_p \frac{dp(x)}{dx}\,, \tag{2.16}$$

gdje je $D_p$ difuzijska konstanta šupljina. U jednadžbi 2.16 javlja se negativan predznak jer šupljine difundiraju u smjeru negativnog gradijenta, a smjer struje, pa i gustoće struje, odgovara smjeru kretanja pozitivnih šupljina.

Šupljine koje prelaze na n-stranu rekombiniraju se s elektronima, a elektroni koji dolaze na p-stranu poluvodiča rekombiniraju se sa šupljinama. Time u okolini pn-spoja nastaje usko područje bez pokretnih nosilaca naboja koje se zove područje osi-

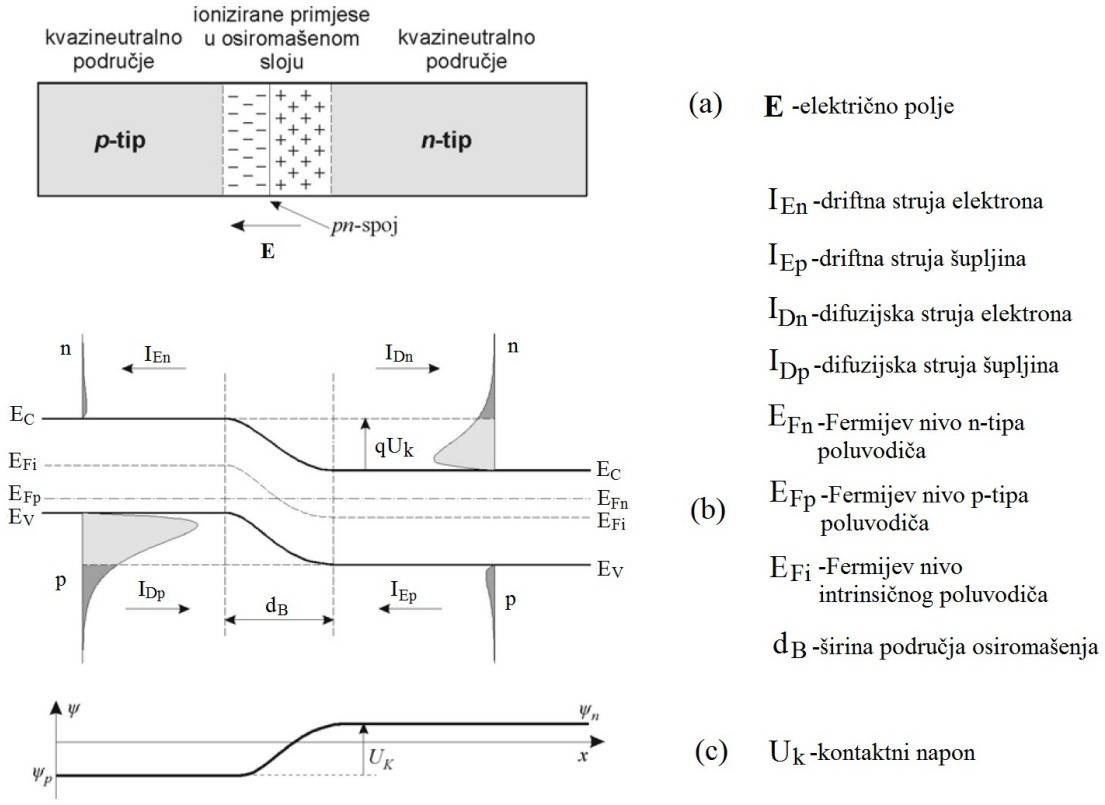
romašenja. To je ujedno područje prostornog naboja. Budući da su se u području osiromašenja na n-strani elektroni rekombinirali sa šupljinama, zaostao je prostorni naboj pozitivno ioniziranih donorskih primjesa. Iz istog razloga na p-strani područja osiromašenja postoji prostorni naboj negativno ioniziranih akceptorskih primjesa. Prostorni naboj uspostavlja električno polje čiji je smjer od n- prema p-strani spoja. Polje uzrokuje driftne struje elektrona ($I_{En}$) i šupljina ($I_{Ep}$) suprotnog smjera od difuzijskih. Gustoća driftne struje elektrona $J_E$ proporcionalna je jakosti električnog polja:

$$J_{En} = e\, n\, \mu_n\, E\,, \tag{2.17}$$

gdje je $\mu_n$ pokretljivost elektrona. Za driftnu struju šupljina vrijedi:

$$J_{Ep} = e\, p\, \mu_p\, E\,, \tag{2.18}$$

pri čemu je $\mu_p$ pokretljivost šupljina. Driftne struje vraćaju elektrone s p- na n- stranu, a šupljine s n- na p-stranu. Izjednačavanjem difuzijskih i driftnih struja uspostavlja se ravnoteža. Energetski dijagram pn-spoja u stanju ravnoteže, kao i smjer driftnih i difuzijskih struja, prikazan je na slici 2.8 (b).




Slika 2.8: Pn-spoj u ravnoteži: (a) ionizirane primjese u području osiromašenja, (b) energetski dijagram, (c) raspodjela potencijala [7].

Gustoća ukupne struje poluvodiča za općeniti slučaj trodimenzionalne prostorne

raspodjele nosilaca, dana je relacijama:

$$\vec{J_n} = \vec{J_{En}} + \vec{J_{Dn}} = e\, n\, \mu_n\, \vec{E} + e\, D_n\, \vec{\nabla} n\,, \tag{2.19}$$

$$\vec{J_p} = \vec{J_{Ep}} + \vec{J_{Dp}} = e\, p\, \mu_p\, \vec{E} - e\, D_p\, \vec{\nabla} p\,, \tag{2.20}$$

pri čemu su $\vec{J_n}$ i $\vec{J_p}$ gustoće struja elektrona i šupljina.

Budući da postoji veza električne potencijalne energije $E_p$ i potencijala [3], razlika potencijala unutar područja osiromašenja popraćena je razlikom energija p- i n-strane spoja. Savijanje energetskog dijagrama prisutno je u području osiromašenja, čija je širina označena s $d_B$. Na slici 2.8 (b) vidljivo je da se porastom energija p-strane i smanjenjem energija n-strane, Fermijev nivo p-tipa ($E_{Fp}$) i n-tipa poluvodiča ($E_{Fn}$) približavaju i u stanju ravnoteže izjednačavaju. Pomak energija, prema slici 2.8 (b), uspostavlja u stanju ravnoteže energetsku barijeru iznosa $q\ U_k$ koja se suprotstavlja toku većinskih nosilaca, pri čemu je $U_k$ tzv. "kontaktni napon" koji postoji zbog razlike potencijala između n- i p-strana poluvodiča. Raspodjela potencijala vidljiva je na slici 2.8 (c). U uvjetima ravnotеže, bez priključenog vanjskog napona, difuzijske struje većinskih nosilaca poništene su driftnim strujama manjinskih nosilaca.

Ako se između p- i n-strane pn-spoja, odnosno između anode i katode poluvodičke diode, priključi pozitivan napon ($U_{AK}$), razlika potencijala u području osiromašenja smanjit će ukupni napon ($U_{TOT}$):

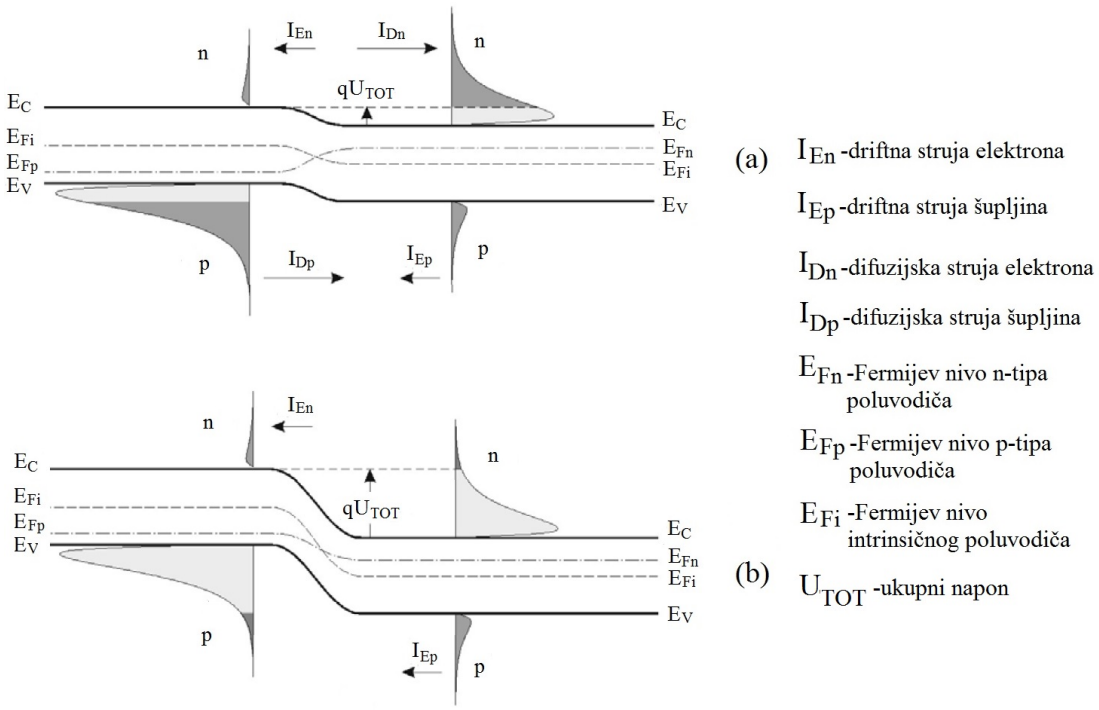
$$U_{TOT} = U_K - U_{AK}\,. \tag{2.21}$$

Smanjenja razlika potencijala rezultira sniženjem energetske barijere, što je prikazano na slici 2.9 (a).

Smanjenjem energetske barijere povećava se broj većinskih nosilaca koji mogu prijeći s jedne strane pn-spoja na drugu stranu. To je vidljivo u povećanju tamnije sjenčane površine ispod funkcije raspodjele većinskih nosilaca (usporedba slika 2.8 (b) i 2.9 (a)). U odnosu na stanje ravnoteže povećana je struja većinskih nosilaca, a struja manjinskih nosilaca, za koje ionako ne postoji barijera, ostaje nepromijenjena. Difuzijske struje većinskih nosilaca veće su od driftnih struja manjinskih nosilaca i kroz pn-spoj teče struja. Daljnje povećanje pozitivnog napona ($U_{AK}$) dodatno snižava energetsku barijeru. Time se povećava broj većinskih nosilaca koji difundiraju preko pn-spoja te se takva polarizacija naziva propusnom polarizacijom.

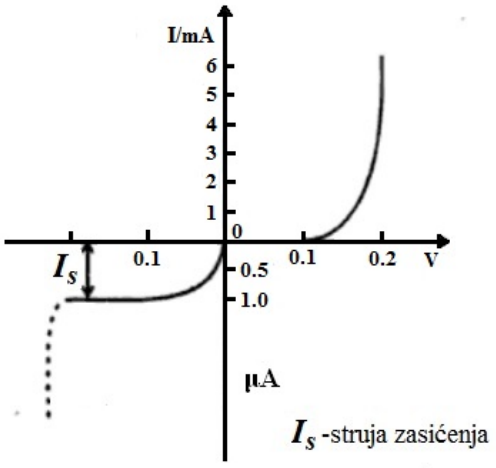
Ako se na pn-spoj priključi vanjski napon, takav da je anoda (p-strana) spojena na niži potencijal od katode (n-strane), negativni vanjski napon istog je predznaka kao i kontaktni napon. Time se povećava ukupni napon $U_{TOT}$ u osiromašenom sloju. Povećanjem potencijalne razlike ($U_{TOT}$), povisuje se energetska barijera i smanjuje se broj većinskih nosilaca koji difuzijom prelaze na drugu stranu spoja. Povećanje barijere vidljivo je na slici 2.9 (b). Budući da se difuzijske struje većinskih nosilaca

[3] $E_p = -q\,\psi$, pri čemu je q naboj elektrona, a $\psi$ potencijal




Slika 2.9: Energetski dijagram pn-spoja: (a) uz propusnu polarizaciju, (b) uz nepropusnu polarizaciju [7].

smanjuju, u struji pn-spoja prevladavaju driftne struje manjinskih nosilaca koje se ne mijenjaju s priključenim naponom. Već pri relativno malim negativnim naponima, po iznosu većim od 100 mV, barijera je dovoljno visoka da potpuno sprječava prijelaz većinskih nosilaca pa preko pn-spoja teče vrlo mala struja manjinskih nosilaca. Budući da se ta struja ne mijenja s naponom, ona se naziva struja zasićenja ($I_S$). Negativni napon $U_{AK}$ sprječava tok struje preko pn-spoja i ta polarizacija se naziva nepropusna ili reversna polarizacija.




Slika 2.10: Strujno-naponska karakteristika poluvodičke diode. Mjerila na osi ordinata su različita kako bi se mogla prikazati mala struja zasićenja [8].

Strujno-naponska karakteristika diode, prikazana na slici 2.10, dobro se slaže s fizikalnim opisom pn-spoja temeljenim na energijskim dijagramima. Pri propusnoj polarizaciji dioda dobro vodi struju, a pri nepropusnoj polarizaciji struja diode je zanemariva [7].

Pobuđenje poluvodičkog materijala može se ostvariti, osim električnim, i optičkim putem. Na tom principu radi fotodioda. Ako se nepropusno polarizirana fotodioda osvijetli, valentni elektron dobiva dovoljno energije da postane slobodan (prelazi iz valentne u vodljivu vrpcu). Taj proces se naziva optička ekscitacija. Nakon što elektromagnetsko zračenje generira parove elektrona i šupljina, razdvaja ih električno polje u području osiromašenja što generira struju kroz diodu. Interval valnih duljina, koje detektira fotodioda, ograničen je energijom energijskog procjepa poluvodičkog materijala [9].

# 3 Poluvodički izvori svjetlosti

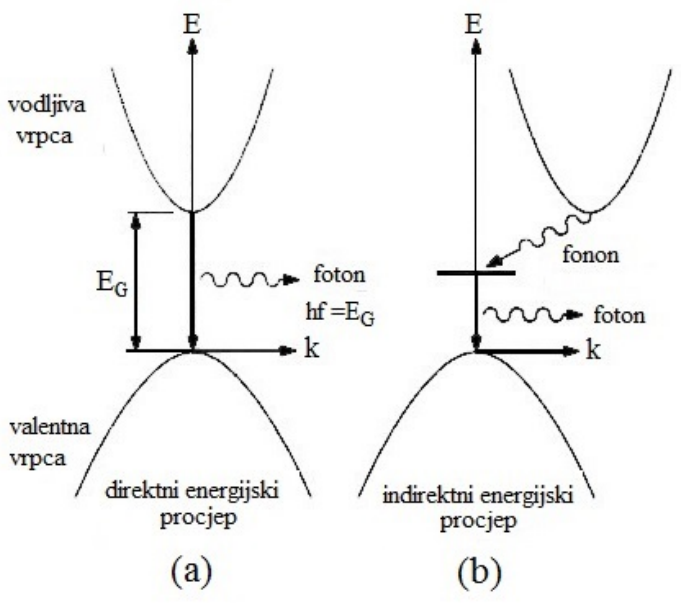
## *3.1 Svjetleća dioda*

Svjetleća dioda, LED (engl. light emitting diode), vrsta je poluvodičke diode koja emitira svjetlost kada kroz nju teče struja. Kao što je već rečeno, par elektron-šupljina može se u poluvodiču stvoriti na nekoliko načina. Obično se vrši injekcija manjinskih nosilaca [2]. Naime, pri propusnoj polarizaciji pn-spoja energetska barijera se smanjuje te raste broj većinskih nosilaca koji difuzijom prelaze na drugu stranu spoja. Nosioci koji prođu preko pn-spoja, dolaze na suprotnu stranu gdje su manjinski nosioci. Taj se prijelaz nosilaca naziva injekcija manjinskih nosilaca. Injektirani nosioci povećavaju koncentracije manjinskih nosilaca uz rub područja osiromašenja. Porastom rubnih koncentracija iznad ravnotežnih vrijednosti, narušava se ravnoteža te se pojačava mehanizam rekombinacije nosioca [7].

Poluvodički materijali se mogu podijeliti na materijale s direktnim i indirektnim energijskim procjepom. Poluvodiči s direktnim energijskim procjepom imaju minimum vodljive vrpce i maksimum valentne vrpce na istoj vrijednosti valnog vektora $\vec{k}$, kao što je prikazano na slici 3.1 (a).

U tom slučaju rekombinacija elektrona i šupljine događa se bez promjene valnog vektora, odnosno impulsa elektrona [4], a popraćena je emisijom fotona, čiji impuls zanemariv u odnosu na impuls elektrona [10]. Takav prijelaz naziva se radijativnim. Rekombinacija se ne događa trenutno, već elektron egzistira u vodljivoj vrpci s radijativnim vremenom života ($\tau_r$) [11]. U slučaju poluvodiča s indirektnim energijskim procjepom, minimum vodljive i maksimum valentne vrpce nalaze se na različitim vrijednostima valnog vektora. Kako bi impuls bio sačuvan, elektronski prijelaz se vrši preko defekata prisutnih u kristalu i popraćen je pobuđivanjem fononskih modova

[4] veza impulsa i valnog vektora: $\vec{p} = \hbar \vec{k}$




Slika 3.1: Poluvodički materijali s direktnim i indirektnim energijskim procjepom [10].

titranja [5] uz jako zagrijavanje kristala [10]. Opisani prijelazi nazivaju se neradijativnim prijelazima, a karakterizirani su neradijativnim vremenom života ($\tau_n$). Uz fonon se može emitirati i foton, kao što je prikazano na slici 3.1 (b), a takvi prijelazi mogu, ali i ne moraju, generirati vidljivu svjetlost. Primarni interes u dizajnu svjetlećih dioda upravo je stvoriti uvjete u kojima su radijativni prijelazi puno češći od neradijativnih.

Pri konstrukciji svjetleće diode ključan je odabir poluvodičkog materijala. Silicij i germanij su poluvodiči s indirektnim energijskim procjepom pa su radijativni procesi vrlo malo vjerojatni. Budući da je $\tau_r >> \tau_n$, svi injektirani nosioci se rekombiniraju neradijativno prije nego što se dogodi radijativni proces [11]. Zbog toga silicijska poluvodička dioda ne emitira svjetlost prilikom vođenja struje, a u slučaju emisije, emitirala bi elektromagnetsko zračenje u infracrvenom području spektra zbog male energije energijskog procjepa. U slučaju poluvodiča s direktnim energijskim procjepom, kao što je galijev arsenid (GaAs), $\tau_r << \tau_n$ pa je rekombinacija radijativna [12].

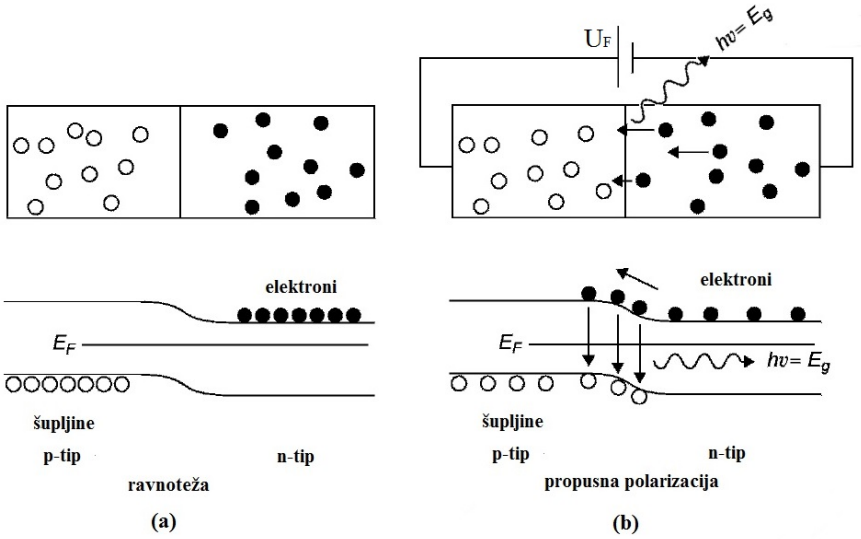
Svjetleća dioda je propusno polarizirani pn-spoj poluvodičkih materijala s direktnim energijskim procjepom u kojem struja generira parove elektron-šupljina koji se rekombiniraju i emitiraju energiju u obliku fotona vidljive svjetlosti. Kako se povećava struja kroz diodu, tako se povećava i produkcija parova pa i sama rekombinacija. Prema tome, izlazni intenzitet svjetlosti ovisi o struji kroz uređaj. Princip rada svjetleće diode prikazan je na slici 3.2. [12].

Valna duljina emitiranog fotona određena je razlikom energija elektrona i šupljine koji se rekombiniraju:

[5] fononi - kvanti titranja kristalne rešetke [2]

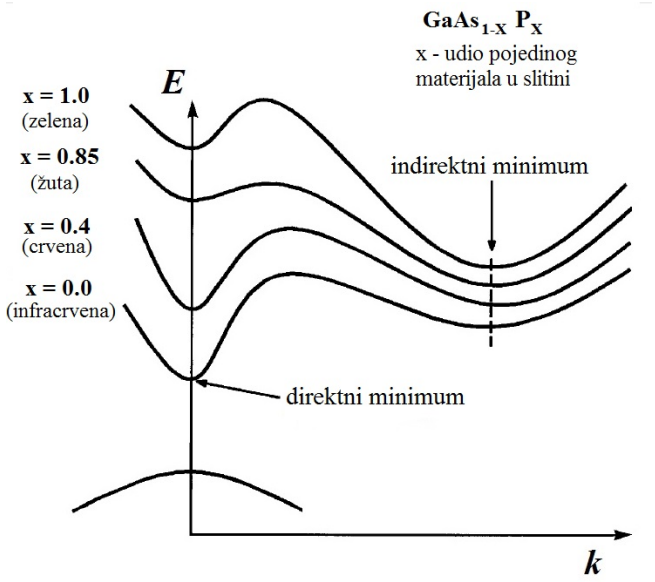
$$\lambda \approx \frac{\mathrm{hc}}{E_G} = \frac{\mathrm{hc}}{E_C - E_V}\,. \tag{3.1}$$

Izraz 3.1 za valnu duljinu emitiranog fotona je aproksimativan jer elektroni i šupljine popunjavaju vrpce prema Fermi-Diracovoj raspodjeli te njihova energija nije uvijek jednaka minimumu vodljive ili maksimumu valentne vrpce [11].




Slika 3.2: Shematski prikaz pn-spoja svjetleće diode: (a) u ravnoteži, (b) uz propusnu polarizaciju [12].

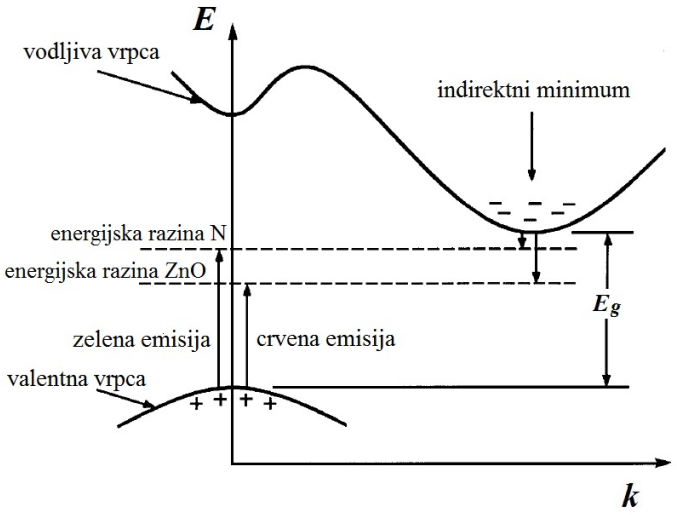
Da bi se promijenila valna duljina emitirane svjetlosti, potrebno je promijeniti veličinu energijskog procjepa poluvodičkog materijala. Primjerice, galijev arsenid




Slika 3.3: Energijski dijagram za različite slitine $GaAs_{1-x}P_x$ [11].

(GaAs) s energijom procjepa od 1,4 eV emitira u infracrvenom području i to svjetlost valne duljine 900 nm. Da bi se postigla emisija crvene svjetlosti u vidljivom području,

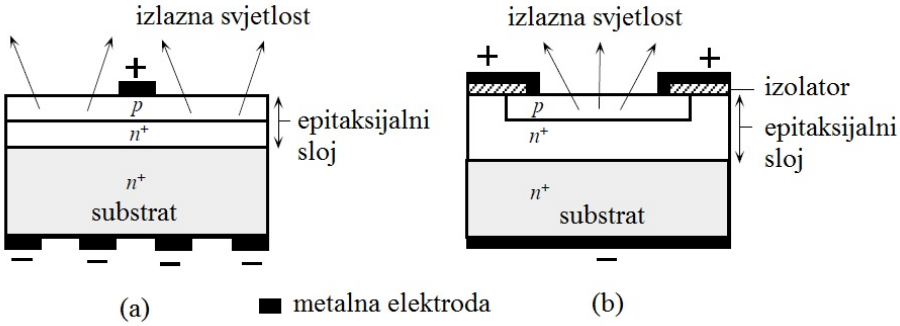
energija procjepa mora biti oko 1,9 eV. To se postiže kombinacijom GaAs s drugim poluvodičkim materijalom koji ima veći energijski procjep, npr. galijev fosfid (GaP) s energijskim procjepom od 2,3 eV. Energija procjepa tako dobivenog galij arsenid fosfida (GaAsP) može se mijenjati između 1,4 i 2,3 eV ovisno o udjelu arsena (As) i fosfora (P), kao što je prikazano na slici 3.3. Sa slike 3.3 vidljivo je da za x >0,4 (udio GaP od 40% i GaAs od 60%), GaAsP postaje materijal s indirektnim energijskim procjepom. U tom slučaju dodaju se isoelektronske primjese (engl. isoelectronic impurities) koje uvode novi radijativni proces rekombinacije. Pritom se atomi fosfora zamjenjuju atomima dušika (N) koji su jednake valencije (peterovalentni atomi), ali veće elektronegativnosti. To omogućuje atomu dušika da lakše privuče elektron iz vodljive vrpce. Tako prvotno neutralna, isoelektronska primjesa postaje negativno nabijena i privlači šupljinu te se formira slabo vezani par elektron-šupljina, odnosno eksciton. Anihilacija para elektron-šupljina rezultira emitiranjem fotona, čija energija je manja od energijskog procjepa poluvodičkog materijala, jer je energijska razina isoelektronskih primjesa niža od dna vodljive vrpce, kao što je prikazano na slici 3.4. Kao isoelektronska primjesa, koristi se i cinkov oksid (ZnO). Energijska razina cinkovog oksida je niža od energijske razine dušika pa je emitirani foton manje valne duljine [11].




Slika 3.4: Prikaz formiranja ekscitona dodavanjem isoelektronskih primjesa N i ZnO u poluvodičkom materijalu s indirektnim energijskim procjepom [11].

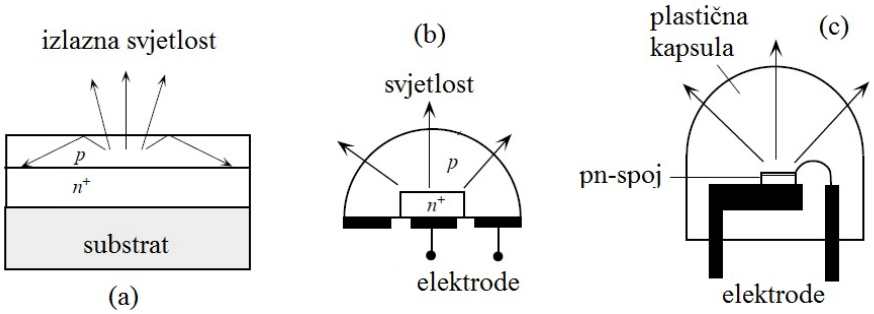
Emisija plave svjetlosti zahtijeva veliki energijski procjep što nije moguće ostvariti korištenjem iste tehnologije. Razvoj plavih svjetlećih dioda započinje korištenjem galijevog nitrida (GaN). To je materijal s direktnim energijskim procjepom od približno 3,4 eV što odgovara emisiji ultraljubičaste svjetlosti [11]. No problem je dopiranje GaN te ostvarivanje pn-spoja. Bitan korak u razvoju efikasnih plavih svjetlećih dioda bio je razvoj slitina AlGaN i InGaN s energijskim procjepom od 2,7 eV što odgovara emisiji plave svjetlosti [13].

Najjednostavnija konstrukcija svjetleće diode prikazana je na slici 3.5 (a). Svjetleće diode se proizvode tehnikom epitaksijalnog rasta dopiranih poluvodičkih slojeva na odgovarajućem supstratu. Supstrat je ujedno i mehanička potpora pn-spoju. Epitaksijalni sloj i supstrat obično imaju jednake parametre kristalne rešetke kako se ne bi pojavili kristalni defekti preko kojih se događa neradijativna rekombinacija elektrona i šupljina. Svjetlost se emitira iz p-sloja čija je debljina nekoliko μm kako bi fotoni napustili materijal prije ponovne apsorpcije. Da bi se rekombinacija događala u p-sloju, n-sloj je jače dopiran ($n^+$). P-sloj svjetleće diode moguće je ostvariti i tehnikom difuzije primjesa (npr. cinka (Zn)) u epitaksijalni sloj $n^+$, kao što je prikazano na slici 3.5 (b) [13].




Slika 3.5: Shematski prikaz tipične svjetleće diode: (a) dobivene tehnikom epitaksijalnog rasta , (b) sloj $n^+$ je dobiven tehnikom epitaksijalnog rasta, dok je p-sloj formiran tehnikom difuzije [13].

Prema Snellovom zakonu loma, svjetlost može prijeći iz medija većeg indeksa loma u medij manjeg indeksa loma, samo ako upada na površinu pod kutem manjim od graničnog kuta. Upravo se zbog totalne refleksije sve zrake s upadnim kutem većim od graničnog kuta reflektiraju prema unutrašnjosti materijala, kao što je prikazano na slici 3.6 (a). Za smanjenje gubitaka koriste se dvije metode prikazane na slici 3.6 (b) i (c) [13].

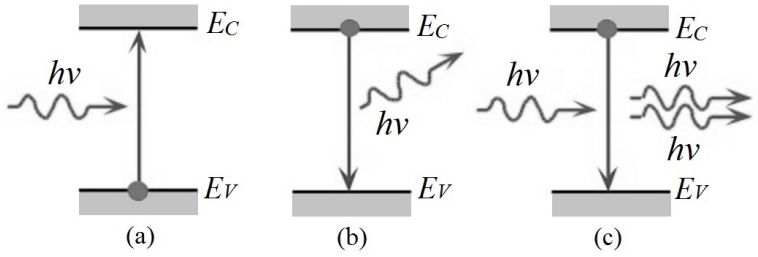



Slika 3.6: (a) Zbog totalne refleksije dio svjetlosti ne može napustiti materijal. Dvije metode koje se koriste za smanjenje gubitaka: (b) p-tip materijala je načinjen kao kupola, (c) pn-spoj je okružen plastičnom kapsulom koja ima veći indeks loma od zraka [13].

## 3.2 Laserske diode

Laser (akronim od engl. *Light Amplification by Stimulated Emission od Radiation*: pojačanje svjetlosti pomoću stimulirane emisije zračenja) je uređaj za stvaranje i pojačavanje koherentnog elektromagnetskog, najčešće monokromatskog, usko usmjerenog zračenja. Svaki laser se sastoji od medija, mehanizma pobude kojim se postiže inverzija naseljenosti, te optičkog rezonatora.

Na slici 3.7 (a) i (b) prikazani su, do sada već opisani, procesi apsorpcije (optička ekscitacija) i spontane emisije u poluvodičkom materijalu. No, ako je elektron već u pobuđenom stanju, odnosno u vodljivoj vrpci, upadni foton, energije jednake razlici energijskih razina, može potaknuti proces emisije. Takav proces se naziva stimulirana emisija, a prikazan je na slici 3.7 (c). Emitirani foton je u fazi s upadnim fotonom, ima jednaku polarizaciju, jednaku energiju te se kreće u istom smjeru [13].




Slika 3.7: Shematski prikaz tri osnovna procesa interakcije fotona i poluvodičkog materijala: (a) apsorpcija, (b) spontana emisija, (c) stimulirana emisija fotona [13].

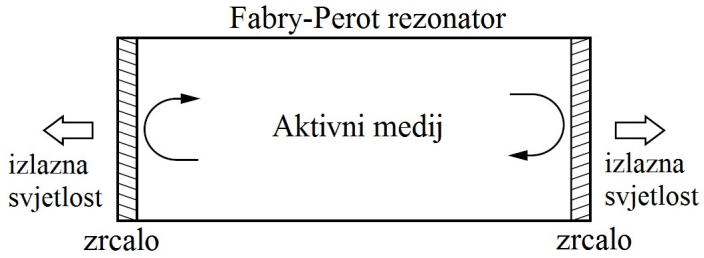
Budući da su fotoni jednaki, emitirano zračenje je koherentno i monokromatsko, što su bitna obilježja laserske svjetlosti. Proces stimulirane emisije zapravo dovodi do optičkog pojačanja svjetlosti pa je osnovni kriterij laserskog pojačanja veća učestalost rekombinacije stimuliranom emisijom, od rekombinacije spontanom emisijom [12]. Kako upadni foton ne bi bio apsorbiran, većina elektrona mora biti u pobuđenom stanju. Opisano stanje neravnoteže se naziva inverzija naseljenosti.

Da bi se ostvario laserski efekt, sustav s inverzijom naseljenosti nalazi se u rezonantnoj šupljini. Najjednostavnija forma šupljine, koja se sastoji od dvije planparalelne reflektirajuće površine, naziva se Fabry-Perot rezonator [2]. Shematski prikaz Fabry-Perot rezonatora je prikazan na slici 3.8.

Laserske diode su osnovni dio poluvodičkog diodnog lasera. Kao aktivni medij za ostvarivanje laserske akcije u laserskim diodama, koriste se poluvodički materijali koji se primjenjuju i za izradu svjetlećih dioda, ali za razliku od svjetlećih dioda, laserske diode proizvode koherentno elektromagnetsko zračenje [6] jer su ostvareni uvjeti za postizanje laserskog efekta.

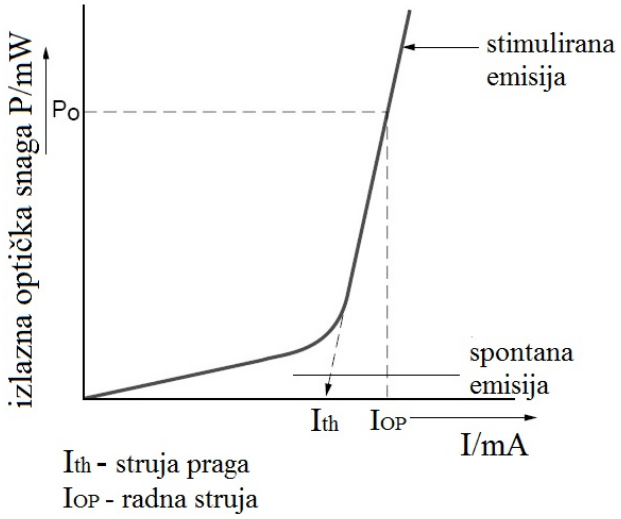
Inverzija naseljenosti u laserskim diodama postiže se jakim dopiranjem poluvodičkih materijala (Fermijev nivo n-tipa poluvodiča je unutar vodljive vrpce, dok

[6] koherentni valovi - valovi stalne razlike faza




Slika 3.8: Shematski prikaz Fabry-Perot optičkog rezonatora [14].

je Fermijev nivo p-tipa poluvodiča unutar valentne vrpce) i propuštanjem struje kroz uređaj. Na slici 3.9 prikazan je graf ovisnosti optičke snage izlazne svjetlosti o struji koja se propušta kroz uređaj. Ako je struja kroz uređaj manja od struje praga ($I_{th}$) potrebne za laserski efekt, emisija je spontana, kao i u slučaju svjetlećih dioda. Pritom se snaga izlaznog zračenja laserske diode povećava linearno s povećanjem struje, dok se ne postigne struja praga. Ako se struja nastavlja povećavati, budući da je postignuta inverzija naseljenosti, dolazi do stimulirane emisije i snaga izlaznog zračenja se ponovno povećava linearno s povećanjem struje, ali brže nego u slučaju spontane emisije [10].




Slika 3.9: Graf izlazne optičke snage u ovisnosti o struji kroz lasersku diodu [14].

Za ostvarivanje stimulirane emisije i optičkog pojačanja potreban je Fabry-Perot rezonator. Da bi se ostvario Fabry-Perot rezonator, poluvodički materijal se kala okomito na optičku os kristala pa se tako dobivaju "unutarnja zrcala". Zbog velikog indeksa loma ($n \approx 3.5$), refleksivnost površina dobivenih kalanjem je oko 30%. Veliko optičko pojačanje, kojim se ovaj laserski medij odlikuje, čak i sa zrcalima tako niske refleksije, omogućava laserski efekt. Refleksivnost se može dodatno mijenjati dodavanjem slojeva dielektrika [10]. "Unutarnja zrcala" vraćaju optički signal u aktivni medij mnogo puta te se signal pojačava tijekom svakog prolaska. Zrcala su djelomično propusna te laserska svjetlost može napustiti optički rezonator [14].

Poluvodičke diode je potrebno konstruirati tako da optičko pojačanje nadjača sve gubitke u rezonatoru (oni uključuju i gubitke zbog izlazne svjetlosti). Optičko pojačanje se definira kao relativna promjena optičke snage po jedinici duljine aktivnog medija:

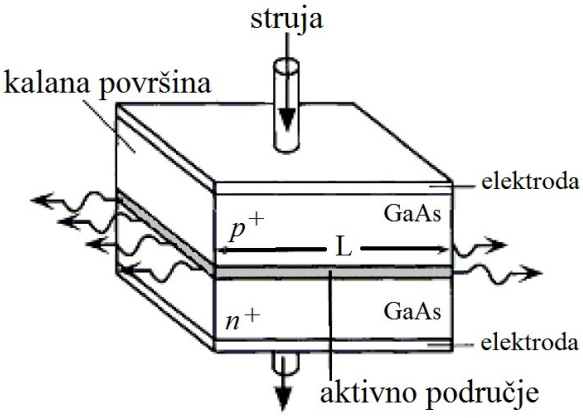
$$g = \frac{\Delta P}{P\,\Delta x}\,. \tag{3.2}$$

Minimalno pojačanje, odnosno pojačanje praga, potrebno da se ostvari laserska akcija iznosi:

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L}\ln\frac{1}{R_R\,R_F}\,, \tag{3.3}$$

pri čemu su $R_R$ i $R_F$ koeficijenti refleksije "unutarnjih zrcala", $L$ duljina aktivnog medija, a $\alpha_i$ koeficijent koji uzima u obzir sve gubitke unutar rezonatora, osim gubitaka zbog zrcala [10].

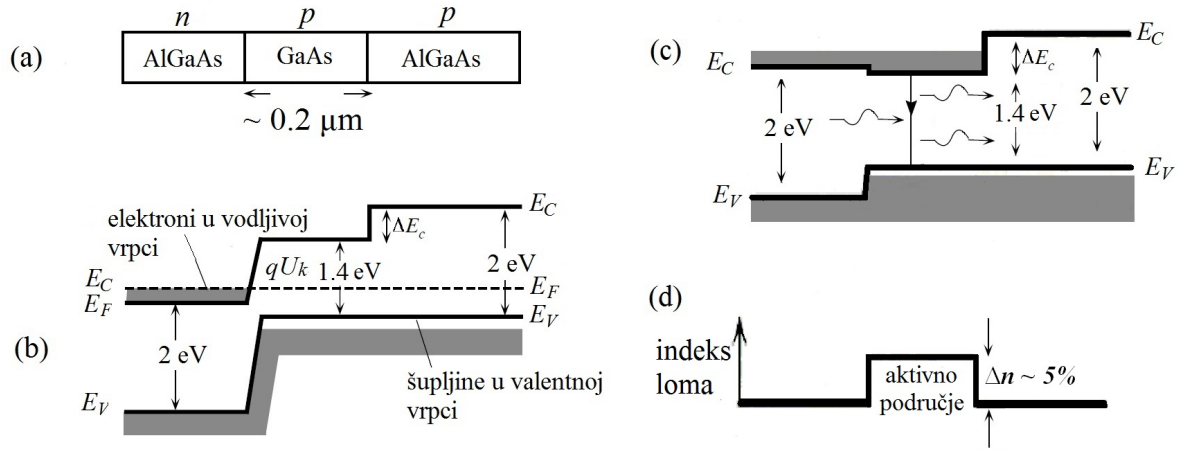
Najjednostavnija konstrukcija laserske diode prikazana je na slici 3.10. Budući da je u pn-spoj ostvaren između dva jednaka poluvodička materijala koja su različito dopirana, takav spoj se naziva homospoj (engl. homojunction), dok se takva vrsta laserske diode naziva homostrukturnom (engl. homostructure) [13]. Svjetleće diode, prikazane na slici 3.5, također su homostrukturne i mogu se izraditi od istih poluvodičkih materijala, ali razlikuju se od laserske diode po konstrukciji.




Slika 3.10: Shematski prikaz homostrukturne laserske diode. Kalane površine kristala se ponašaju kao zrcala [13].

Homostrukturne laserske diode karakterizirane su visokim strujama praga, od nekoliko desetaka ampera. Takve struje onemogućavaju kontinuiran rad na sobnim temperatura. Taj problem je riješen korištenjem heterostrukturnih laserskih dioda (engl. heterostructure) [12]. Ako se pn-spoj između dva jednaka materijala zamijeni pn-spojem između dva različita materijala (različit energijski procjep), dobiva se heterospoj (engl. heterojunction). Takav spoj je prikazan na slici 3.11 (a). Sastoji se od dva poluvodička materijala: AlGaAs s energijskim procjepom od $E_g$ = 2 eV te GaAs s energijskim procjepom $E_g$ = od 1.4 eV. Aktivno područje, u kojem se događa rekombinacija, širine je 0,1 - 0,2 $\mu$m. GaAs i p-tip AlGaAs su jako dopirani pa im

se Fermijev nivo nalazi unutar valentne vrpce. Pripadni energijski dijagram u stanju ravnoteže prikazan je na slici 3.11 (b). Primjenom dovoljnog napona propusne polarizacije, vodljiva vrpca n-tipa AlGaAs je na većoj energijskoj razini od vodljive vrpce p-tipa GaAs, što dovodi do velike injekcije nosilaca, kao što je prikazano na slici 3.11 (c). Nosioci su ograničeni na sloj p-tipa GaAs, gdje dolazi do rekombinacije i emisije fotona, jer između sloja p-tipa GaAs i p-tipa AlGaAs i dalje postoji energijska barijera $\Delta E_C$ zbog različite energije procjepa. Budući da je sloj p-tipa GaAs vrlo tanak, gustoća nosilaca se poveća vrlo brzo čak i pri manjim strujama. Zbog toga se smanjuje vrijednost struje praga potrebne za ostvarivanje inverzije populacije i optičkog pojačanja [13].

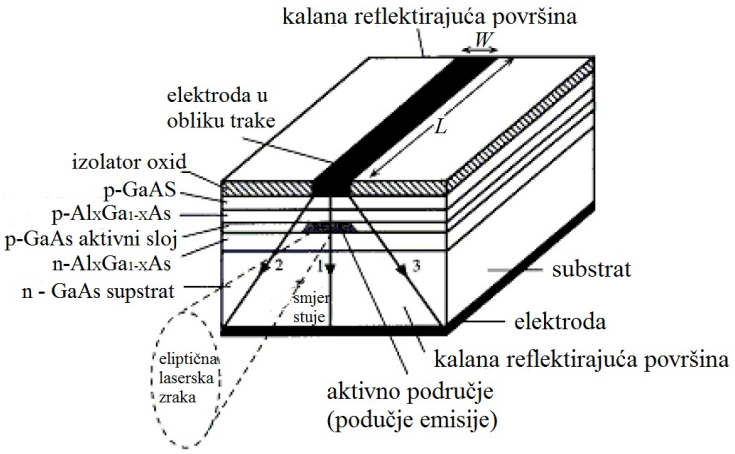



Slika 3.11: Primjer dvostruko heterostrukturne laserske diode: (a) shema, (b) energijski dijagram spoja u ravnoteži, (c) energijski dijagram uz napon propusne polarizacije. (d) Poluvodički materijali s većim energijskim procjepom imaju manji indeks loma [13].

Indeks loma poluvodičkog materijala ovisi o energijskom procjepu. Širi energijski procjep znači i manji indeks loma. Promjenom indeksa loma materijala, kao što je prikazano na slici 3.11 (d), dobiva se optički dielektrični valovod koji ograničava fotone na aktivno područje optičkog rezonatora te povećava njihovu koncentraciju. Povećana koncentracija fotona, povećava učestalost stimulirane emisije što dovodi do smanjenja struje praga te omogućuje konstrukciju laserskih dioda koje mogu raditi na sobnoj temperaturi [13]. Tipična struktura takve dvostruke heterostrukturne laserske diode prikazana je na slici 3.12.

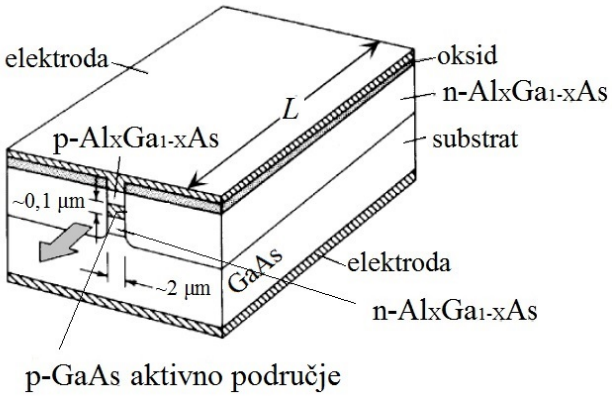
Dvostruki heterospoj, prikazan na slici 3.12, sastoji se od: slojeva n-AlGaAs, aktivnog sloja p-GaAs te p-AlGaAs. Dodatni sloj p-GaAs je kontaktni sloj. Slojevi mogu sadržavati različite udjele pojedinih elemenata te se tako može mijenjati valna duljina laserske svjetlosti. Prednost je heterospoja AlGaAs/GaAs vrlo dobro slaganje parametara kristalne rešetke. Osim laserskih, moguće je na sličan način ostvariti i

heterostrukturne svjetleće diode.




Slika 3.12: Shematski prikaz dvostruko heterostrukturne laserske diode s elektrodom u obliku trake. Primjer smanjenja aktivnog područja promjenom struje kroz pn-spoj. [13].

Kako bi se svjetlost ograničila i s bočnih strana (između ravnina okomitih na pn-spoj), koriste se dvije tehnike: prostorna promjena struje kroz pn-spoj (engl. gain guided) i prostorna promjena indeksa loma (engl. index guided). U prvom slučaju se minimizira područje u kojem teče struja, minimiziranjem električnog kontakta. Električni kontakt može biti tanka metalna vrpca iznad heterospoja, kao što je prikazano na slici 3.12, ili ravni jednolik sloj ispod kojeg se stavlja izolator, ostavljajući tako samo usku traku kroz koju može teći struja, kao što je prikazano na slici 3.13 [10]. Tako se smanjuje aktivno područje (usporedba slika 3.10 i 3.12) te iznos struje praga




Slika 3.13: Shematski prikaz dvostruko heterostrukturne laserske diode. Primjer smanjenja aktivnog područja promjenom indeksa loma [15].

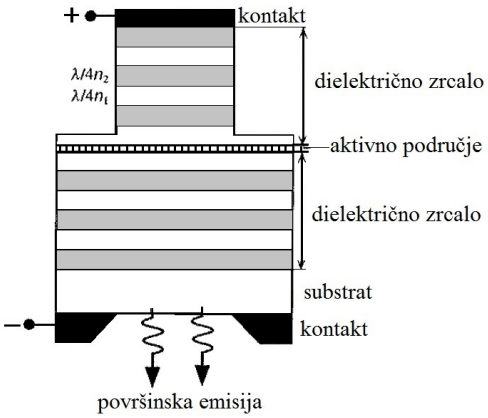
potrebne za laserski efekt. U drugom slučaju, aktivni sloj je omeđen s gornje i donje strane te s bočnih strana poluvodičkim materijalom većeg energijskog procjepa, odnosno manjeg indeksa loma, kao što je prikazano na slici 3.13. Takav materijal ograničava fotone na aktivno područje što dodatno smanjuje i aktivno područje i

struju praga. Zato takve laserske diode mogu proizvesti izlaznu svjetlost koju čini jedan transverzalni mod najnižeg reda (dodatak A). Heterostrukturne laserske diode bazirane na GaAs i AlGaAs emitiraju svjetlost valne duljine oko 900 nm. Za optičku komunikaciju potrebne su valne duljine između 1,3 i 1,5 μm pa se koriste heterostrukturne laserske diode sa slitinama InGaAsP i InP kao supstratom [13].

Aktivno područje se može dodatno smanjiti na dimenzije manje od 0.01 μm. Tako se povećava koncentracija nosilaca u aktivnom području što smanjuje struju praga za red veličine, ali dolaze do izražaja kvantni efekti pa se takve laserske diode nazivaju kvantne jame ili filmovi (engl. Quantum well laser diodes) [13].

Aktivno područje laserske diode je asimetrično. Debljina aktivnog područja GaAs laserske diode obično je oko 0,1 μm, no njegova širina može biti do nekoliko μm, zbog čega je izlazna zraka laserske diode eliptičnog oblika. Naime, što je dimenzija aktivnog područja manja, difrakcija zrake je u tom smjeru veća. Zato je vertikalna divergencija [7] obično nekoliko desetaka stupnjeva, dok je horizontalna nekoliko stupnjeva. Radi lakšeg fokusiranja zrake, ponekad je poželjno da je izlazna zraka kružnog oblika. Eliptičnost zrake moguće je ispraviti pomoću prizme. [12].

Zraka kružnog oblika može se postići pomoću laserskih dioda koje emitiraju svjetlost kroz gornju površinu poluvodičkog kristala (engl. surface-emitting), umjesto s ruba. S obzirom na tip diode koji koriste, takvi poluvodički laseri nazivaju se VCSEL (engl. Vertical Cavity Surface-Emitting Laser). U takvoj laserskoj diodi optički rezonator je postavljen vertikalno, tako da je os rezonatora paralelna sa smjerom kojim teče struja. Refleksija svjetlosti u rezonatoru postiže se dielektričnim zrcalima koja se sastoje od mnoštva $\lambda/4$ pločica različitog indeksa loma [14]. Shematski prikaz VCSEL-a prikazan je na slici 3.14. Osim što je zraka kružnog oblika, čini je jedan longitudinalni mod titranja [12].

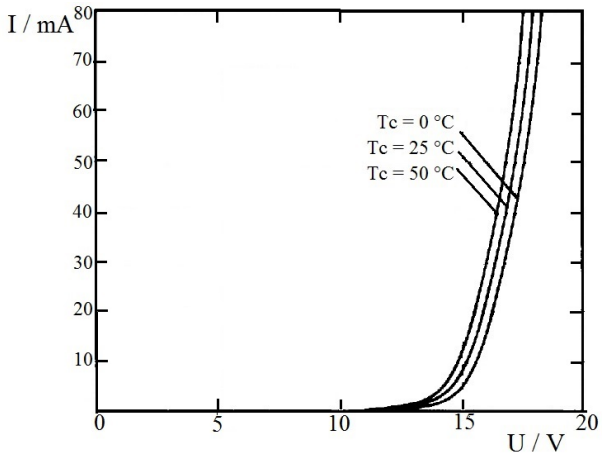



Slika 3.14: Shematski prikaz VCSEL [13].

[7] Divergencija - kutna mjera povećanja radijusa zrake s udaljenosti od optičke aperture

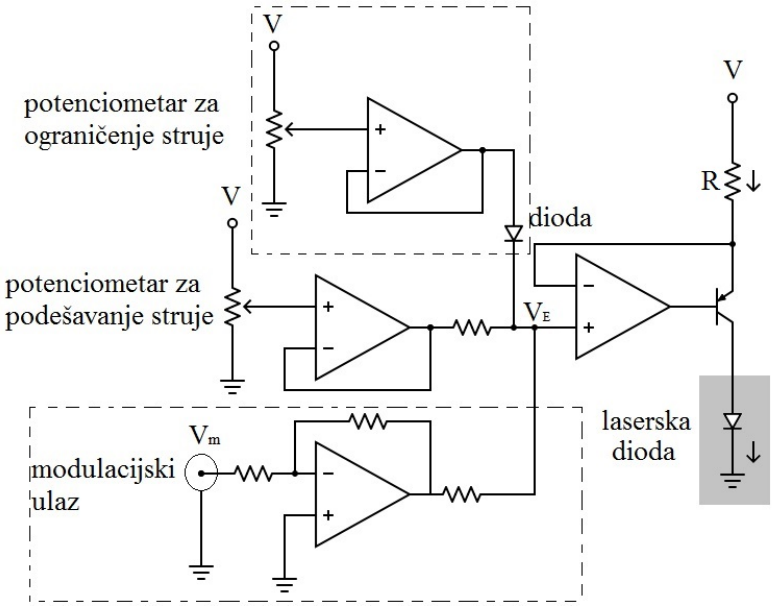
# 4 Optoelektroničke karakteristike poluvodičkog diodnog lasera

Rad laserske diode regulira se pomoću struje, koja prolazi kroz diodu, umjesto naponom jer male fluktuacije napona rezultiraju većim fluktuacijama struje, što je prikazano na slici 5.3.




Slika 4.1: Strujno-naponska karakteristika laserske diode [16].

Za rad laserske diode potreban je izvor struje koji može dati struju veću od struje praga. Takav izvor se može, u najjednostavnijem obliku, ostvariti pomoću operacijskog pojačala i BJT tranzistora. Međutim, čak i u najjednostavnijim primjenama potreban je upravljivi (podesivi) izvor struje, koji dozvoljava podešavanje struje, jer različite laserske diode imaju različite karakteristike. U najjednostavnijem slučaju

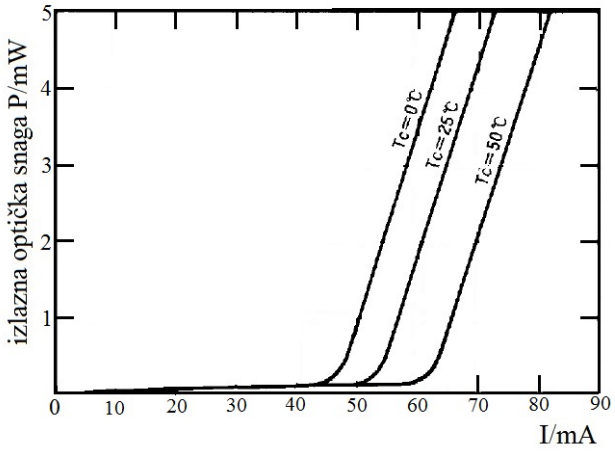



Slika 4.2: Shema izvora struje za lasersku diodu [17].

podešavanje struje kroz diodu može se postići korištenjem potenciometra, kao što je

prikazano na slici 4.2. Napon na otporniku R je fiksan i dovodi se na invertirajući ulaz operacijskog pojačala, dok je potenciometrom moguće mijenjati napon koji se dovodi na neinvertirajući ulaz. Tako se potenciometrom kontrolirano utječe na struju baze BJT tranzistora, kojom se kontrolira struja kroz tranzistor, a samim time i kroz diodu. No, mnoge primjene laserskih dioda zahtijevaju, osim podešavanja stalne vrijednosti struje, i mogućnost modulacije korištenjem naponskog signala. Naponski signal s modulacijskog ulaza i napon s potenciometra za podešavanje struje zbrajaju se na operacijskom pojačalu te zajednički upravljaju strujom kroz lasersku diodu. Kako bi se spriječila eventualna oštećenja zbog promjena u struji, dodaje se potenciometar za ograničenje struje kroz diodu. Gornju granicu struje moguće je podesti ovisno o tipu laserske diode koja se koristi.

Na rad laserske diode osim struje utječe i temperatura. Kako temperatura raste, uz konstantnu struju, izlazna snaga laserske diode se smanjuje, kao što je prikazano na slici 4.3. Naime, na višim temperaturama i intrinsična vodljivost postaje značajna pa je potrebna veća koncentracija elektrona u vodljivoj vrpci da bi se postigla jednaka efektivna inverzija naseljenosti [12].




Slika 4.3: Graf ovisnosti izlazne optičke snage o struji kroz lasersku diodu za različite temperature [16].

Valna duljina emitirane svjetlosti ovisi o temperaturi laserske diode. Promjenom temperature, mijenja se energija energijskog procjepa:

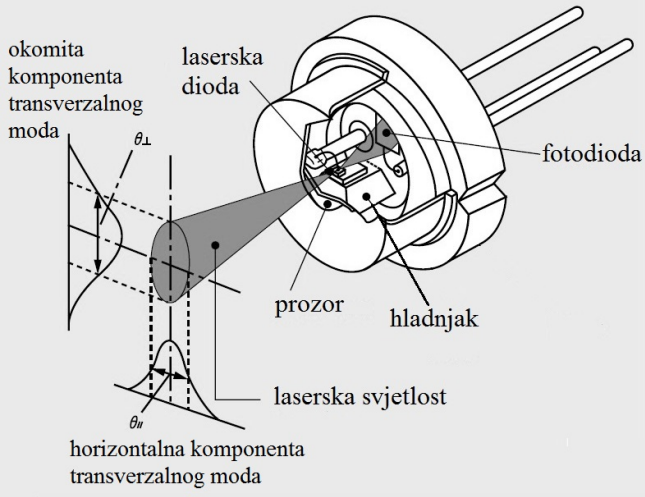
$$E_g(T) = E_g(T=0) - \alpha \frac{T^2}{T+T_0}, \tag{4.1}$$

pri čemu su $\alpha$ i $T_0$ konstante, a ovise o poluvodičkom materijalu. Povećanjem temperature, energija energijskog procjepa se smanjuje, a valna duljina emitirane svjetlosti se ,prema 3.1, povećava. Maksimum optičkog pojačanja se pomiče prema većim valnim duljinama.

Precizno ugađanje valne duljine vrši se promjenama struje, dok se temperatura drži konstantnom termoelektričnim hlađenjem. U tu svrhu koristi se Peltier-ov ele-

ment koji se sastoji od niza p i n-tipa poluvodiča povezanih u seriju preko metalnih kontakata. Ako se poluvodič zagrije na jednom kraju, poluvodič n-tipa na toplijem kraju ima manje negativnih slobodnih nosilaca, nego na hladnijem, dok poluvodič p-tipa ima na toplijem kraju manje šupljina. Pri prijelazu iz metala na topliju stranu p-tipa poluvodiča, elektroni se rekombiniraju sa šupljinama i pritom gube energiju u obliku topline. Pri prijelazu iz p-tipa poluvodiča u metal na hladnijoj strani, elektroni prelaze na višu energijsku razinu zbog čega apsorbiraju energiju. Promjenom struje kroz Peltier-ov element mijenja se i namjena uređaja (grijanje ili hlađenje) [17].

Na slici 4.4 prikazano je pakiranje laserske diode. Na stražnjoj strani laserske diode postavlja se fotodioda koja daje ostatku strujnog kruga povratnu informaciju o emitiranoj svjetlosti. Na izlazu pakiranja laserske diode tri su kontakta: jedan za lasersku diodu, drugi za fotodiodu, dok je treći zajednički laserskoj diodi i fotodiodi.



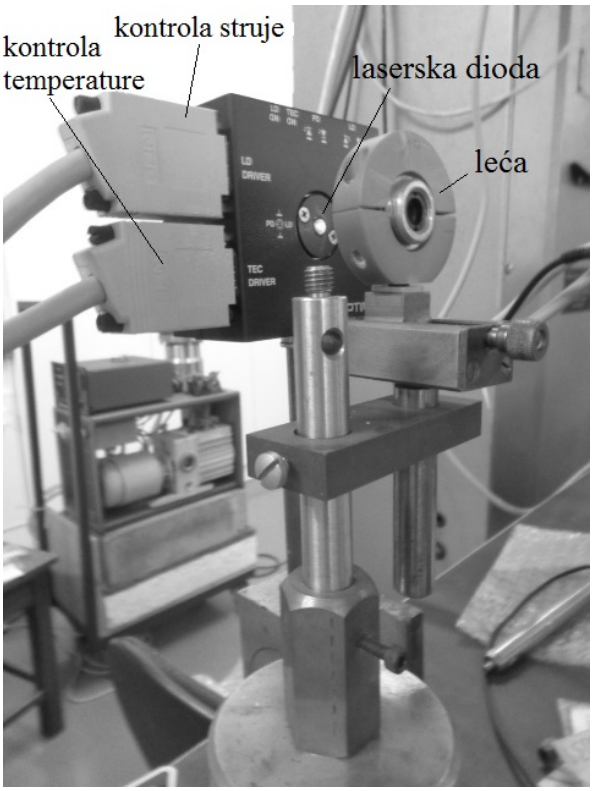

Slika 4.4: Prikaz pakiranja laserske diode [14].

Tako pakirana laserska dioda se umeće u sklop prikazan na slici 4.5 koji sa uređajima za kontrolu struje i temperature, prikazanim na slici 4.6, čini poluvodički diodni laser.

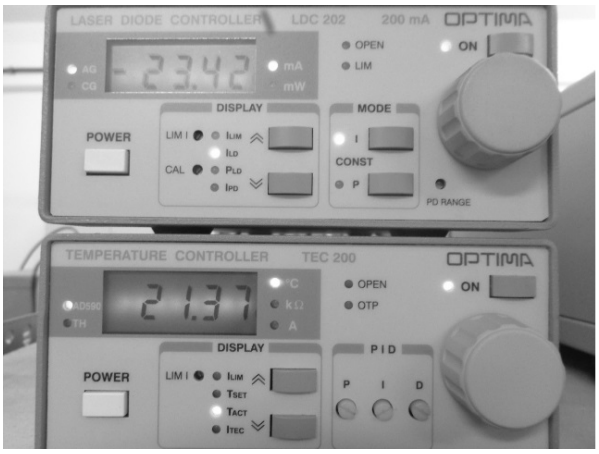
Spektar laserske diode ovisi o karakteristikama optičkog rezonatora koji je nužan za postizanje laserskih oscilacija. Duljina optičkog rezonatora $L$ određuje longitudinalne modove, dok ostale dimenzije rezonatora određuju transverzalne modove titranja. Ako su visina i širina rezonatora dovoljno male, laser može oscilirati samo u $TEM_{00}$ modu, no u spektru mogu postojati longitudinalni modovi ovisno o optičkom pojačanju pojedinog moda titranja [13]. Izlazni spektar laserske diode, pri struji manjoj od struje praga, prikazan je na slici 4.7 (c).

Na slici 4.8 prikazan je graf ovisnosti relativnog intenziteta o valnoj duljini diodnog lasera za različite vrijednosti optičke snage. Većoj optičkoj snazi odgovara i veća struja kroz diodu. Pri strujama većim od struje praga, emisija svjetlosti više nije spontana, već stimulirana te se smanjuje broj longitudinalnih modova u izlaznom spektru, kao što je prikazano na slici 4.8 [13].

Kada je spektar diode jednomodan, promjena temperature uzrokuje da laser "skače"

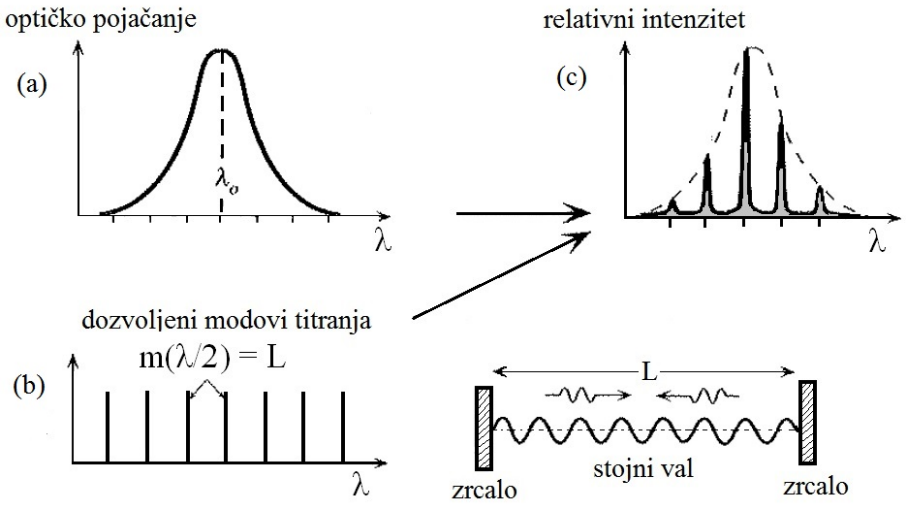



Slika 4.5: Poluvodički diodni laser.

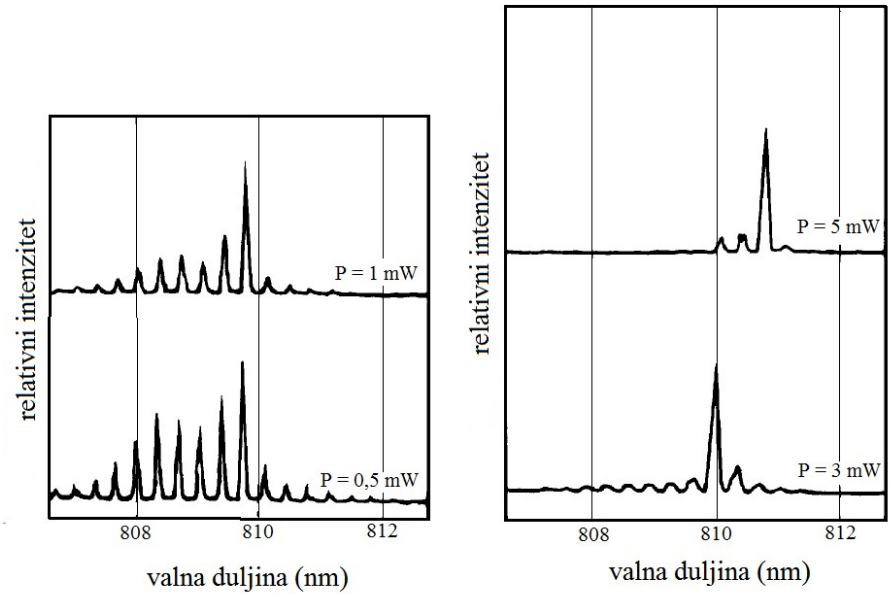



Slika 4.6: Uređaj za kontrolu: (a) struje kroz lasersku diodu, (b) temperature laserske diode.

između dopuštenih longitudinalnih modova (engl. mode hopping), kao što je prikazano na slici 4.9. Između skokova valna duljina se postepeno povećava [13]. Povećanjem temperature laserske diode, osim promjene energije energijskog procjepa koja utječe na maksimum optičkog pojačanja, također se mijenja i indeks loma poluvodičkog materijala te duljina optičkog rezonatora, a budući da valna duljina longitudinalnih modova u rezonatoru ovisi o tim veličinama (prema A.1), povećanjem temperature, povećava se i valna duljina longitudinalnih modova [12]. Nakon kontinuiranog ugađanja valne duljine, javlja se skok u valnoj duljini osciliranja jer se duljina rezonatora ne mijenja sinkronizirano s maksimumom profila zračenja. Pritom je




Slika 4.7: (a) Graf optičkog pojačanja u ovisnosti o valnoj duljini. (b) Dozvoljeni modovi titranja ovise od duljini optičkog rezonatora. (c) Izlazni spektar [13].

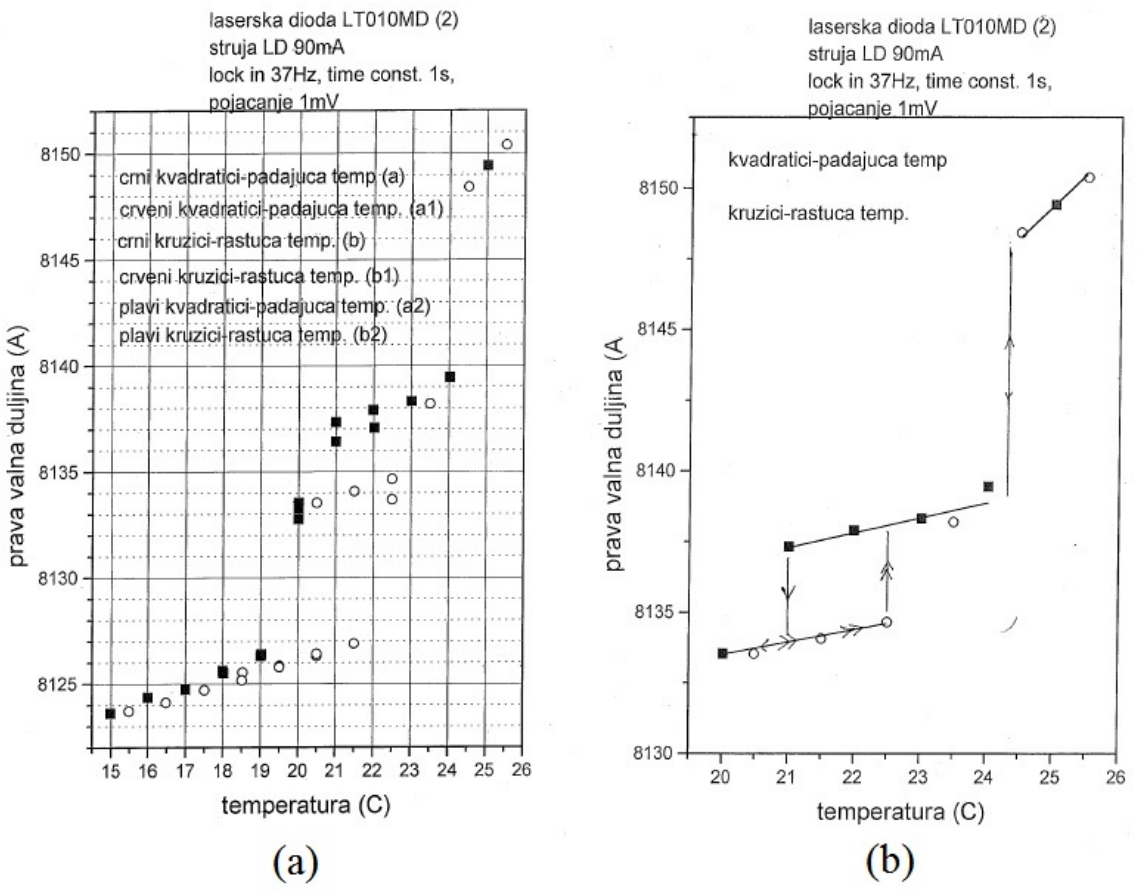



Slika 4.8: Graf ovisnosti relativnog intenziteta poluvodičkog diodnog lasera o valnoj duljini za različitu izlaznu optičku snagu [16].

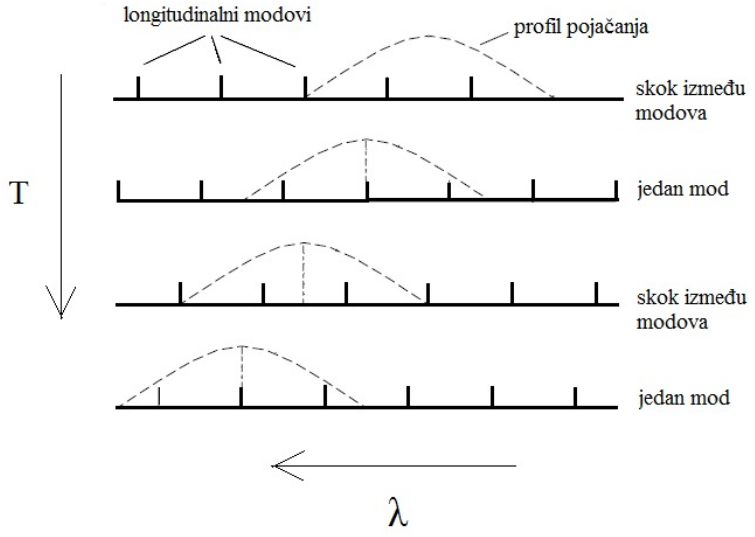
promjena valne duljine longitudinalnih modova s temperaturom 10-20 % promjene maksimuma pojačanja s temperaturom [18].

Kada je maksimum optičkog pojačanja centriran na jedan mod, laser radi u tom modu, a kada se nađe između dva longitudinalna moda titranja dolazi do skoka između modova te longitudinalni mod čija je valna duljina ”najbliža” valnoj duljini maksimuma pojačanja, lasira. Takvo ponašanje prikazano je na slici 4.10 [19].

Pri smanjenju temperature prijelazi između modova mogu biti drugačiji nego pri porastu temperature, kao što je prikazano na slici 4.9 (b).




Slika 4.9: Graf ovisnosti valne duljine poluvodičkog diodnog lasera o temperaturi.




Slika 4.10: Profil optičkog pojačanja i rezonantna valna duljina moda su temperaturno ovisni [19].

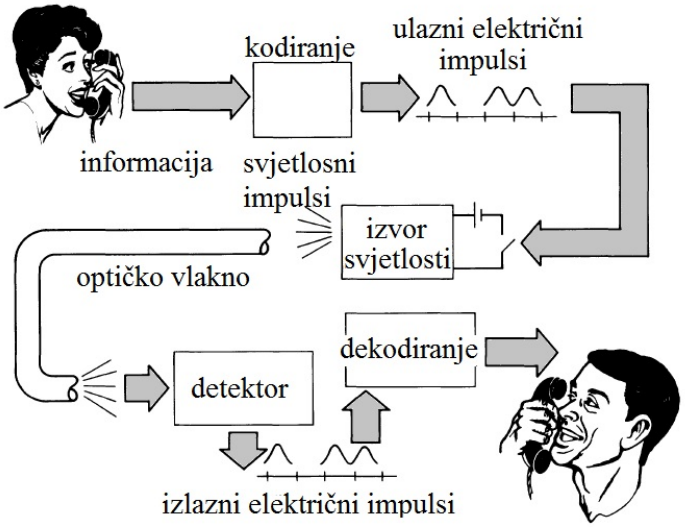
# 5 Primjene poluvodičkih izvora svjetlosti

Svjetleće diode se najčešće primjenjuju kao izvori svjetlosti. Koriste se kao senzori, optičke sklopke, kao signalizacija u prometu (znakovi opasnosti i obavještavanja na cestama, semafori, svjetla na vozilima), kao bljeskalica na fotoaparatu mobilnog uređaja, u izradi svjetlećih reklama pa i kao rasvjeta u stambenim prostorima. Njihova prednost u odnosu na ostale izvore svjetla je manja potrošnja električne energije, manje dimenzije te duži vijek trajanja. Nedostatak je mali intenzitet svjetlosti, no taj problem se rješava korištenjem više svjetlećih dioda.

Prednosti laserske diode su mnogostruke: to je monokromatski, koherentni i kolimirani izvor svjetla. Kompaktan je, dugog životnog vijeka, male potrošnje električne energije te pruža mogućnost direktnog moduliranja vrlo visokim frekvencijama.

## *5.1 Optička komunikacija*

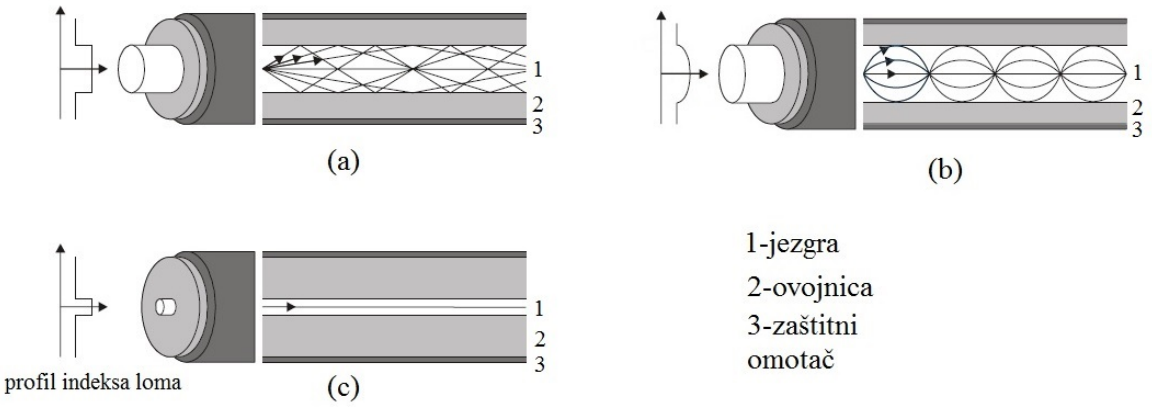
Osnova optičke komunikacije je prijenos svjetlosnih impulsa poluvodičkog izvora svjetlosti optičkim vlaknima. Na slici 5.1 prikazana je osnovna shema sustava za optičku komunikaciju. U slučaju prikazanom na slici, analogni signal se pretvara (kodira) u niz binarnih brojeva. Optički transmiter (izvor svjetlosti) pretvara električne impulse u impulse optičke snage koji putuju kroz optičko vlakno. Optički prijemnik/detektor pretvara primljene optičke impulse u električne te se oni ponovno dekodiraju u analogni signal. Kao optički detektor može se koristiti fotodioda [20].




Slika 5.1: Shematski prikaz sustava za optičku komunikaciju pomoću optičkih vlakana [20].

Optičko vlakno ili svjetlovod je prozirna nit, najčešće izrađena od vrlo čistog stakla ili polimernog materijala, kroz koju se prenosi svjetlost. Sastoji se od jezgre, ovojnice i zaštitnog omotača, kao što je prikazano na slici 5.2. Jezgra je većeg indeksa loma od omotača što omogućuje vođenje svjetlosti na principu totalne refleksije.

Tijekom propagacije svjetlosti kroz vlakno dolazi do gubitaka u obliku prigušenja ili atenuacije (zbog raspršenja ili apsorpcije energije u materijalu) te disperzije ili širenja impulsa. Uzrok širenja impulsa je činjenica da elektromagnetskim valovima različite valne duljine treba različito vrijeme da stignu do odredišta. To se može riješiti korištenjem vlakna s postepenom promjenom indeksa loma od jezgre prema ovojnici, umjesto skokovite promjene indeksa loma. Tako zrake, koje se propagiraju vlaknom, imaju spiralne putanje (odnosno sinusne u dvije dimenzije), kao što je prikazano na slici 5.2 (b). Optička vlakna mogu biti jednomodna i višemodna. Jednomodna vlakna imaju mali radijus jezgre koji je samo nekoliko puta veći od valne duljine svjetlosti koja se propagira vlaknom, kao što je prikazano na slici 5.2 (c). Jednomodnim vlaknima se prenosi samo jedna zraka (jedan mod) čime se također smanjuje širenje pulsa. Na slici 5.2 (a) i (b) prikazano je višemodno optičko vlakno. Radijus jezgre višemodnog optičkog vlakna je nekoliko puta veći od valne duljine svjetlosti koja se propagira vlaknom. [20].

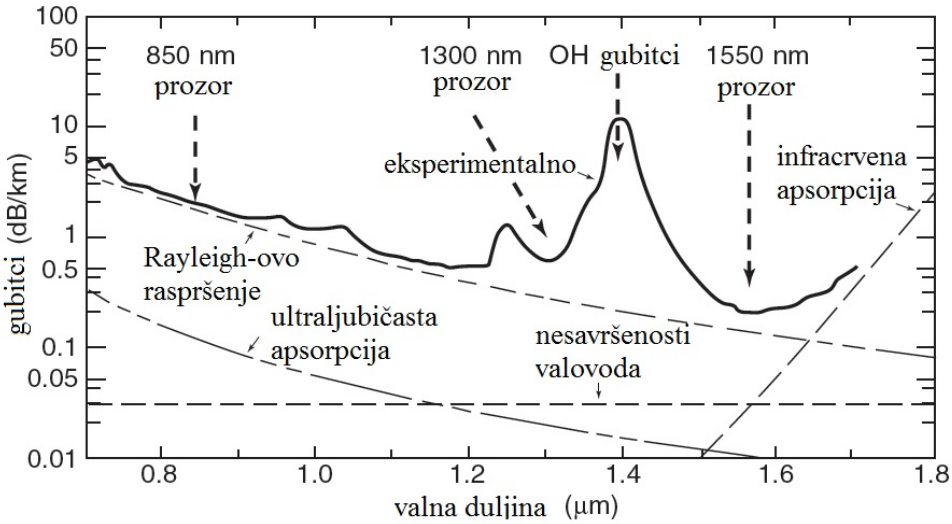



Slika 5.2: Višemodno optičko vlakno: (a) sa skokovitom promjenom indeksa loma, (b) s postepenom promjenom indeksa loma. (c) Jednomodno optičko vlakno [21].

Osnovne komponente optičkog transmitera su optički izvori svjetlosti i modulatori. Kao izvori svjetlosti u optičkim transmiterima, koriste se svjetleće diode i poluvodički laseri zbog prednosti kao što su: veličina, visoka efikasnost, pouzdanost, brzi odziv na električnu pobudu, odgovarajući raspon valnih duljina, malo područje emisije koje je kompatibilno s veličinom optičkih vlakna i mogućnost direktne modulacije signalom visoke frekvencije [21].

Pri proizvodnji optičkih vlakana koristi se silicijev dioksid ($SiO_2$), odnosno kvarc, ali kako bi se postigla odgovarajuća svojstva, dodaju se primjese : $Al_2O_3$, $B_2O_3$, $GeO_2$ i $P_2O_5$. Navedene primjese utječu na indeks loma čistog $SiO_2$. Na slici 5.3 prikazana je ovisnost gubitaka u vlaknu o valnoj duljini svjetlosti koja se prenosi vlaknom.

Gubitci su omeđeni dvjema asimptotama: ultraljubičastom i infracrvenom apsorpcijom, a u prozoru između 0,8 i 1,6 $\mu$m određeni su Rayleigh-ovim raspršenjem na atomskim dipolima čije su dimenzije manje od valne duljine svjetlosti. Prisutnost hidroksilne skupine OH, koja ulazi u staklo kroz vodenu paru, dodatno doprinosi gu-




Slika 5.3: Graf ovisnosti gubitaka o valnoj duljini za $SiO_2$ vlakna [22].

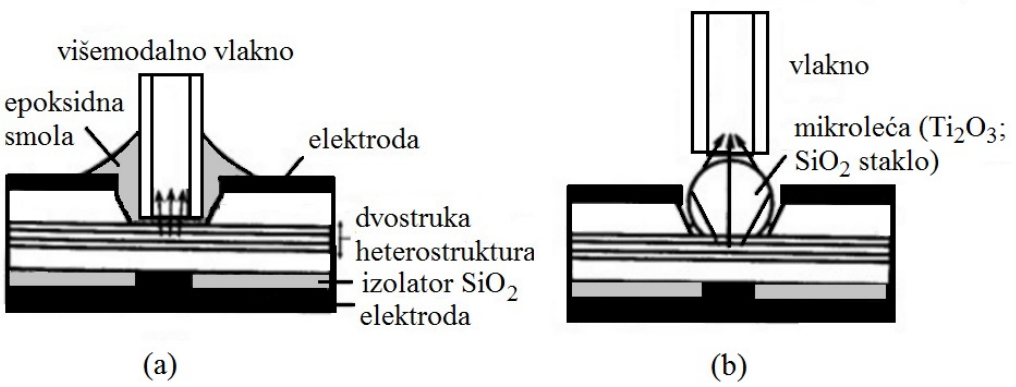
bitcima. Sa slike 5.3 vidljivo je kako su najmanji gubitci postignuti pri valnoj duljini od 1300 i 1550 nm. U početku razvoja optičke komunikacije bili su dostupni diodni laseri valne duljine 850 nm zbog čega su gubitci pri prijenosu signala bili veći. Kako bi se smanjili gubitci, razvijali su se diodni laseri valnih duljina 1300 i 1550 nm [22].

### 5.1.1 Primjena svjetlećih dioda u optičkoj komunikaciji

Svjetleće diode se, zbog manje izlazne optičke snage (nekoliko mW) te zbog veće širine spektra ($\Delta\lambda$ = 50-70 nm), koriste pri prijenosu manje količine podataka na kraće udaljenosti jer veća spektralna širina izlazne svjetlosti uzrokuje disperziju u optičkom vlaknu. Svjetleće diode obično imaju veće aperture [8] zbog čega se najčešće koriste u kombinaciji s višemodnim vlaknima. Kako su svjetleće diode ekonomičnije, manje osjetljive te traju duže, koriste se u lokalnim računalnim mrežama (LAN) ili pri povezivanju uređaja (npr. videonadzor). Obično rade na valnim duljinama od oko 850 nm i 1300 nm [23].

Na slici 5.4 prikazana su dva načina povezivanja svjetleće diode i optičkog vlakna. Optičko vlakno se postavlja što bliže aktivnom području kako se svjetlost ne bi ponovno apsorbirala prije nego što napusti diodu. Za povezivanje se koristi epoksidna smola. Takav tip strukture, prikazan na slici 5.4 (a), naziva se Burrus-ov tip strukture prema svom tvorcu. Za povezivanje svjetleće diode s optičkim vlaknom može se koristiti i sferna mikroleća velikog indeksa loma ($n$=1,9-2) kako bi se svjetlost fokusirala u jezgru optičkog vlakna, kao što je prikazano na slici 5.4 (b). Radi većeg intenziteta izlazne svjetlosti i manje divergencije zrake, češće se koriste svjetleće diode koje emitiraju svjetlost s bočne strane, odnosno s ruba kristala. Njihova struktura je slična strukturi laserske diode prikazane na slici 3.13 [13].

[8] apertura-maksimalni promjer snopa svjetlosti koji može proći kroz optički sustav




Slika 5.4: Tehnika povezivanja svjetleće diode s površinskom emisijom svjetlosti s optičkim vlaknom: (a) pomoću epoksidne smole, (b) pomoću mikroleće [13].

### 5.1.2 Primjena laserskih dioda u optičkoj komunikaciji

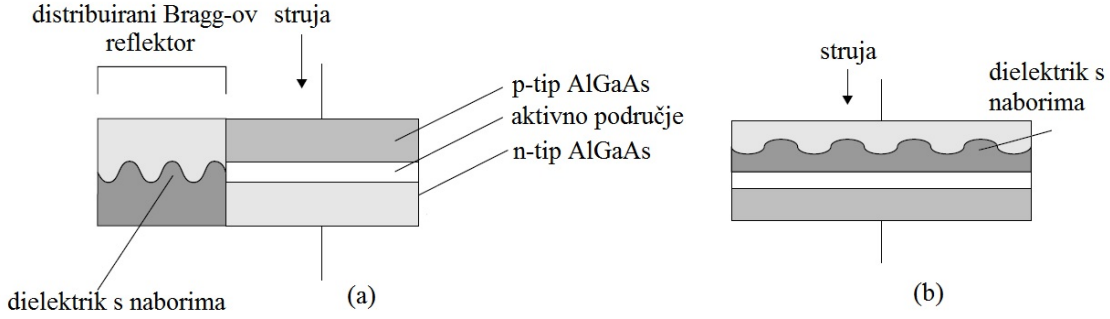
Laserske diode imaju veću izlaznu optičku snagu ($\approx 100$ mW) te uži izlazni spektar u odnosu na svjetleće diode. Vrijeme odziva, odnosno vrijeme koje je potrebno da se intenzitet izlazne svjetlosti poveća s 10% na 90% konačne vrijednosti, za laserske diode je manje od 1 ns. U slučaju svjetlećih dioda to vrijeme je između 5-20 ns pa se zbog navedenih svojstava laserske diode koriste pri prijenosu većeg broja podataka na veće udaljenosti [13]. Također, zbog male spektralne širine mogu se koristiti u kombinaciji s jednomodnim optičkim vlaknima. Njihov nedostatak je osjetljivost na promjene u temperaturi i struji, što utječe na amplitudu izlazne svjetlosti. To zahtjeva složeniju temperaturnu kompenzaciju i kontrolu snage zračenja. [23].

U slučaju laserskih dioda s Fabry-Perot rezonatorom, istovremeno postoji više longitudinalnih modova titranja različite valne duljine u izlaznoj svjetlosti. Taj efekt je nepoželjan jer može dovesti do proširenja optičkog impulsa. Izlaznu svjetlost VCSEL laserske diode čini jedan longitudinalni mod titranja, ali nedostatak takvih dioda je mala izlazna snaga od samo nekoliko mW. Zato se VCSEL diode mogu koristiti umjesto svjetlećih dioda za prijenos podataka na manje udaljenosti [21]. Kako bi se postiglo osciliranje jednog moda titranja u optičkoj šupljini, koristi se distribuirani Bragg-ov reflektor (engl. distributed Bragg reflector) na mjestu kalanih površina, kao što je prikazano na slici 5.5 (a). Bragg-ov reflektor je zrcalo napravljeno kao reflektirajuća difrakcijska rešetka. Djelomična refleksija valova na granici dvaju materijala različitog indeksa loma, dovodi do konstruktivne interferencije na točno određenoj valnoj duljini $\lambda_B$ određenoj udaljenosti između nabora strukture. Ta valna duljina naziva se Bragg-ova valna duljina i može se izraziti kao:

$$\lambda_B = \frac{2\,n\,\delta}{m}\,;\; m = 1, 2..., \tag{5.1}$$

pri čemu je $2\,n\,\delta$ razlika u optičkom putu dvije zrake koje se reflektiraju od rešetke. Budući da se ta svjetlost reflektira u rezonator, unutar rezonatora može oscilirati longitudinalni mod koji je unutar krivulje optičkog pojačanja valnom duljinom blizak $\lambda_B$.

Druga tehnika - distribuirana povratna veza (eng. distributed feedback) prikazana je na slici 5.5 (b). U tom slučaju Bragg-ov reflektor se nalazi iznad aktivnog područja i čini optičku povratnu vezu duž čitave duljine šupljine. Tipična spektralna širina takvih laserskih dioda je 0.1 nm [12]. Iako je tehnološka izrada kompleksna, takve laserske diode se koriste u većini optičkih komunikacija. Pritom je brzina prijenosa na valnoj duljini od 1550 nm čak 2.5 Gbit/s [21].

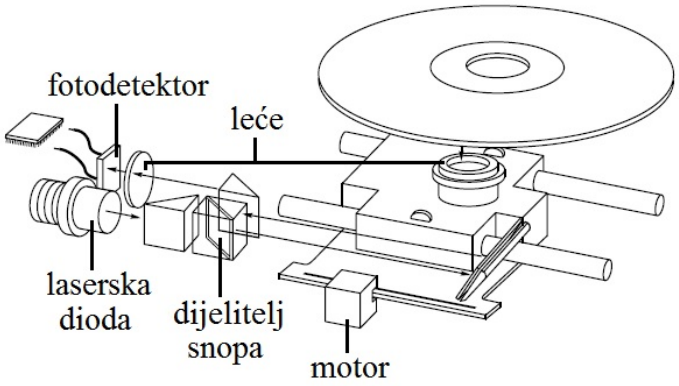



Slika 5.5: Laserska dioda s: (a) distribuiranim Bragg-ovim reflektorom, (b) distribuiranom povratnom vezom [12].

## *5.2 Optička pohrana podataka*

Laserske diode se koriste pri pohrani i čitanju podataka s diska, kao što su: kompaktni disk (CD), digitalni višenamjenski disk (DVD) te Blu-ray disk. Navedeni diskovi su se tim redom pojavili na tržištu, a razlikuju se prema detaljima tehnike zapisivanja te gustoći i kapacitetu zapisa. Proizvodnja komercijalnih diskova s tvornički snimljenim audiozapisom ili videozapisom započinje digitaliziranjem i pretvorbom električnog signala u laserske pulseve koje stvaraju udubine u fotootpornom sloju na staklenoj ploči. Od nje se izrađuje metalna matrica koja služi za izradu drugih diskova. Kako bi se omogućila refleksija laserske zrake, površina diska se metalizira i prevlači zaštitnim slojem. Pri čitanju kompaktnog diska, uski snop koherentne svjetlosti laserske diode, odnosno diodnog lasera, usmjerava se pomoću motora na određeni spiralni ”trag” s urezima. Kada laserski snop padne na mjesto na ”tragu” gdje nema skoka, reflektirani snop se usmjerava pomoću sustava leća i djelitelja snopa na fotodetektor koji ga pretvara u električni signal. Tomu se pridružuje logička nula. Visina izbočine na disku jednaka je četvrtini valne duljine lasera, koji se koristi za čitanje diska, pa kada laserski snop pada na mjesto skoka, snopovi reflektirani od dna i uzvišenog dijela ureza su u protufazi te dolazi do destruktivne interferencije. Tada je intenzitet reflektiranog snopa, koji pada na detektor, smanjen. Tome se pridružuje logička jedinica. Komponente CD čitača prikazane su na slici 5.6 [24].

Laserske diode su, i u ovom slučaju, povoljne za uporabu zbog svojih malih dimenzija, mogućnosti direktne modulacije snopa promjenom ulazne struje te mogućnosti fokusiranja izlaznog snopa na malu površinu. Izlazna zraka tipične laserske diode




Slika 5.6: Komponente CD čitača [24].

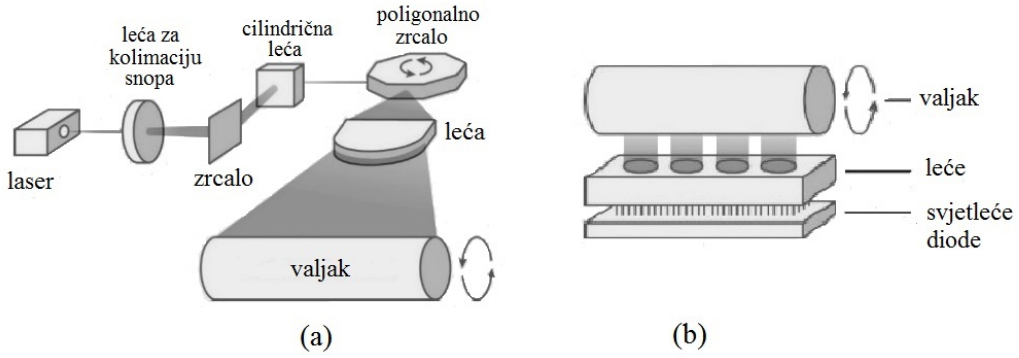
je eliptičnog oblika. Ona se zbog toga obično kolimira [9] pomoću leće te pretvara u kružni oblik pomoću prizme. Takva zraka se usmjerava na površinu diska pomoću još jedne leće-objektiva. Promjer zrake koja pada u fokus objektiva proporcionalan je valnoj duljini laserske svjetlosti. Pri optičkoj pohrani podataka poželjan je što manji promjer zrake jer je on direktno povezan s veličinom podatka, odnosno bita koji je reda veličine valne duljine svjetlosti. Tako se korištenjem lasera manje valne duljine na disk može pohraniti više podataka [25]. Za pohranu podataka na CD koristi se galij aluminij arsenid diodni laser (GaAlAs) čija je valna duljina 780 nm. Smanjenjem valne duljine lasera moguće je spremiti više podataka na disk. Tako se za pohranu podataka na DVD koristi aluminij galij indij fosfid poluvodički laser ($Al_yGa_xIn_{1-x-y}P$) valne duljine 650 nm, a u slučaju Blu-ray diskova koriste se galij indij nitrid diodni laseri (GaInN). Optička snaga lasera za čitanje je oko 5 mW te je manja od optike snage lasera koji se koriste za pohranu podatka. Njihova optička snaga je oko 400 mW. Kapacitet diska može se dodatno povećati višeslojnim zapisivanjem podataka [26].

## *5.3 Pisač*

Diodni laseri se primjenjuju i u laserskim pisačima. Laserski pisač se u osnovi sastoji od valjka (bubnja) i glave-nosača laserske zrake koja se može pomicati uzduž valjka. Valjak se prvotno električki nabije, a napravljen je od materijala koji se električki izbija fotonima svjetlosti. Kako se nabijeni valjak okreće, laser skenira dijelove valjka te se mjesta, koja trebaju ostati bijela, izbiju laserskom zrakom čime na valjku nastane latentna slika. Na valjak se nanosi boja suprotnog naboja koja se prihvaća na dijelovima na kojima naboj nije izbijen. Uz valjak se potom povlači električki nabijen papir na koji se prihvaćaju čestice boje. Prolaskom papira kroz par grijaćih valjaka, zbog njihova pritiska i povišene temperature boja se veže s podlogom. Za dobivanje ispisa u boji, opisani postupak se provodi za svaku od četiri boje. Na slici 5.7 (a) prikazana je shema laserskog sustava laserskog pisača. Svjetlost lasera prolazi kroz sustav leća

[9] kolimacija-oblikovanje paralelnog snopa elektromagnetskog zračenja

i zrcala zbog finog podešavanja koje je potrebno radi bolje kvalitete ispisa. Laserski pisači imaju rezoluciju ispisa do 1200 dpi.




Slika 5.7: Shematski prikaz: (a) laserskog pisača (b) pisača sa svjetlećim diodama [27].

Umjesto lasera mogu se koristiti svjetleće diode. Shematski prikaz pisača sa svjetlećim diodama prikazan je na slici 5.7 (b). Glava pisača se sastoji od niza svjetlećih dioda. Latentna slika nastaje blijeskom pojedinih dioda kako se valjak okreće. Iako je takav sustav jednostavniji i jeftiniji od laserskog, kvaliteta ispisa je manja. Rezolucija ispisa je ograničena brojem svjetlećih dioda tako da ona često nije više od 600 dpi. Zbog toga se posljednjih godina počelo raditi na poboljšanju kvalitete takvih uređaja [27].

## *5.4 Barkod čitači*

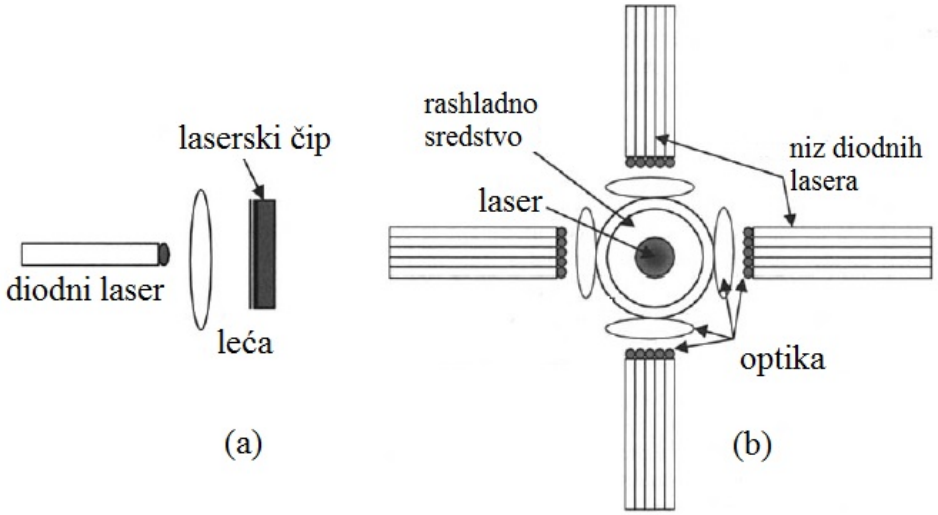
Barkod je niz paralelnih crta različite debljine koje nose neku informaciju, obično šifru proizvoda, inventarski broj ili sl. Barkod čitač se sastoji od tri osnovna dijela: sustava za osvjetljavanje, senzora/konvertera i dekodera. Barkod se osvjetljava crvenom svjetlošću te senzor, obično fotodioda, registrira intenzitet reflektirane svjetlosti. Generirani analogni signal se pretvara u digitalni u konverteru, a dekoder interpretira digitalni signal.

Kao sustav za osvjetljavanje, mogu se koristiti svjetleće diode. U slučaju da se za osvjetljavanje koristi manji broj svjetlećih dioda, čitač je potrebno povlačiti preko barkoda tako da je glava za osvjetljavanje u kontaktu s barkodom. Takav sustav se primjenjuje u čitačima kartica kroz koje se provlače kartice s barkodom. Prednost takvih čitača je niska cijena, ali se barkod i glava za osvjetljavanje mogu lako oštetiti jer je čitač u direktnom kontaktu s barkodom. Stavljanjem više svjetlećih dioda u niz, može se osvijetliti cijeli barkod. Takav se način osvjetljavanja koristi u kombinaciji s CCD detektorom linearnog tipa. Barkod se osvjetljava nizom svjetlećih dioda, a reflektirana svjetlost se registrira pomoću malih svjetlećih senzora. Za osvjetljavanje se mogu koristiti i crvene laserske diode. Pritom se točkasti snop izlazne svjetlosti lasera pretvara u liniju osciliranjem svjetlosti unutar nepomičnog zrcala. Zbog veće

usmjerenosti snopa, barkod čitač više ne mora biti u direktnom kontaktu s barkodom [28].

## 5.5 Optičko pumpanje lasera

Poluvodički diodni laser se koristi za optičko pumpanje lasera s čvrstom jezgrom (engl. solid-state laser) i to najčešće Nd:YAG lasera. Nd:YAG laser čini YAG kristal (itrij-aluminij granat) dopiran neodimijem. To je četverostupanjski laser. Tako pri optičkom pumpanju svjetlost pada na aktivno područje lasera, apsorbira se, a atomi prelaze na više energijske razine. Na toj razini ostaju u prosjeku $10^{-8}$ s i potom prelaze na nižu energijsku razinu koja je metastabilna. Laserska svjetlost nastaje pri prijelazu s metastabilne energijske razine na energijsku razinu iznad osnovne energijske razine. Slični laseri se izrađuju i od drugih materijala koji sadrže neodimij, npr. Nd:YLF i Nd:$YV0_4$. Za optičko pumpanje Nd:YAG i navedenih lasera koristi se diodni laser GaAlAs valne duljine od približno 808 nm. Yb:YAG je pumpan InGaAa laserima valne duljine 950 nm. Za optičko pumpanje, osim diodnih lasera, mogu se koristiti i lampe.

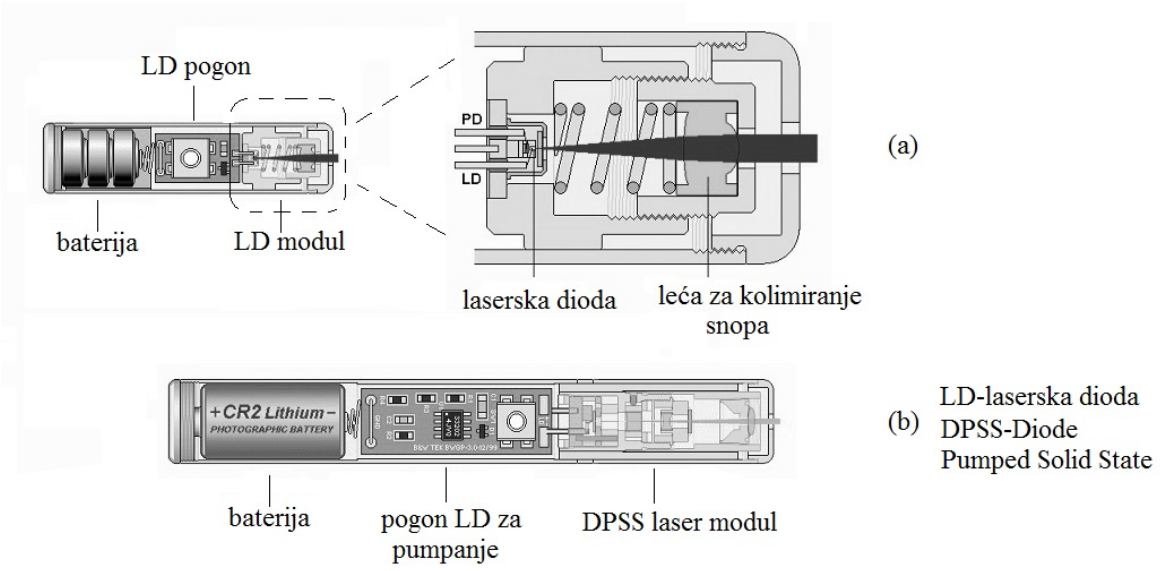



Slika 5.8: Laser s čvrstom jezgrom optički pumpan: (a) poluvodičkim diodnim laserom (b) nizom poluvodičkih diodnih lasera [29].

Prednost diodnog lasera u odnosu na lampe je njihova efikasnost i dulji vijek. Budući da je spektralna širina lampe puno veća od lasera, a Nd:YAG apsorbira uski spektar valnih duljina, većina svjetlosti lampe samo prođe kroz materijal bez apsorpcije. Zbog manje spektralne širine diodnog lasera, zagrijavanje materijala je manje zbog čega i laserski medij ima veću efikasnost jer ne dolazi do njegove distorzije. Jedini nedostatak pri korištenju diodnog lasera je njihova cijena. Za optičko pumpanje koriste se ili pojedinačni diodni laser, kao što je prikazano na slici 5.8 (a), ili niz diodnih lasera (eng. diode laser array) koji okružuju kristal, kao što je prikazano

na slici 5.8 (b). Druga konfiguracija se koristi u slučaju da je potrebna izlazna zraka veće optičke snage [29].

Nd:YAG emitira infracrveno zračenje valne duljine 1064 nm. Zraku iz ovog lasera moguće je usmjeriti u kristal s nelinearnim optičkim svojstvima, čime se dobiva laserska zraka s fotonima koji imaju dvostruko veću energiju od onih koji su upali na kristal te je tako valna duljina dobivene svjetlosti 532 nm, što odgovara zelenoj svjetlosti.



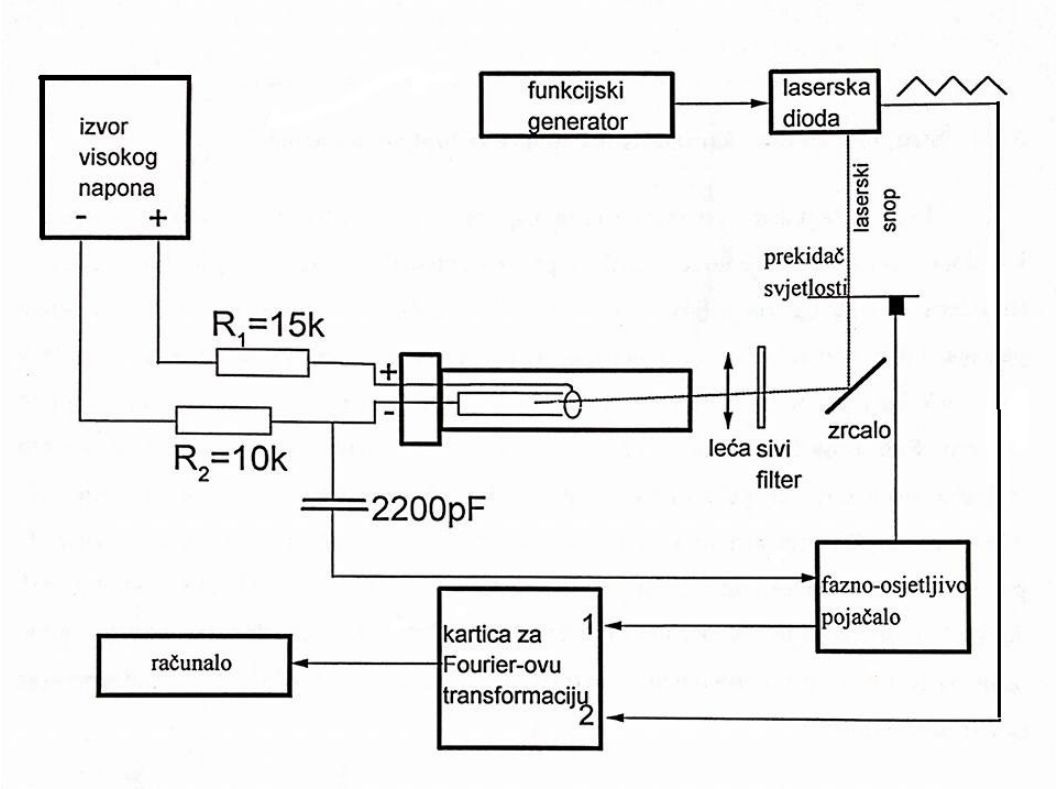

Slika 5.9: Shematski prikaz laserskih pokazivača ostvarenih: (a) diodnim laserom (b) optički pumpanim laserom s čvrstom jezgrom [30].

Na slici 5.9 (a) prikazan je shematski prikaz laserskog pokazivača ostvarenog pomoću laserske diode, dok je na slici 5.9 (b) shema laserskog pokazivača s optičkim pumpanim laserom s čvrstom jezgrom koji daje izlaznu svjetlost zelene boje. Njegov modul je nešto kompliciraniji jer se, osim laserske diode i leća za kolimiranje snopa, sastoji od lasera s čvrstom jezgrom, kristala s nelinearnim svojstvima te infracrvenog filtera.

## *5.6 Laserska spektroskopija s optogalvanskom detekcijom*

Poluvodički diodni laser se puno koristi u laserskoj spektroskopiji. Primjeri su mnogobrojni, a jedan od njih je laserska spektroskopija optogalvanskom detekcijom. Optogalvanski efekt je pojava promjene električne vodljivosti prilikom obasjavanja izboja plina ili pare (plazmenog medija), obično unutar šuplje katode, pomoću laserske svjetlosti određene frekvencije. Frekvencija laserske svjetlosti, koja pobuđuje plazmu, odgovara jednom prijelazu između energijskih razina $E_i \longrightarrow E_k$ atoma ili iona u plazmenom mediju. Zbog toga se mijenja gustoća naseljenosti tih stanja. Budući da su vjerojatnost ionizacije energijskih razina različite, promjena populacije izazvana laserskom svjetlošću, dovodi do promjene struje kroz medij. Promjene struje mogu biti

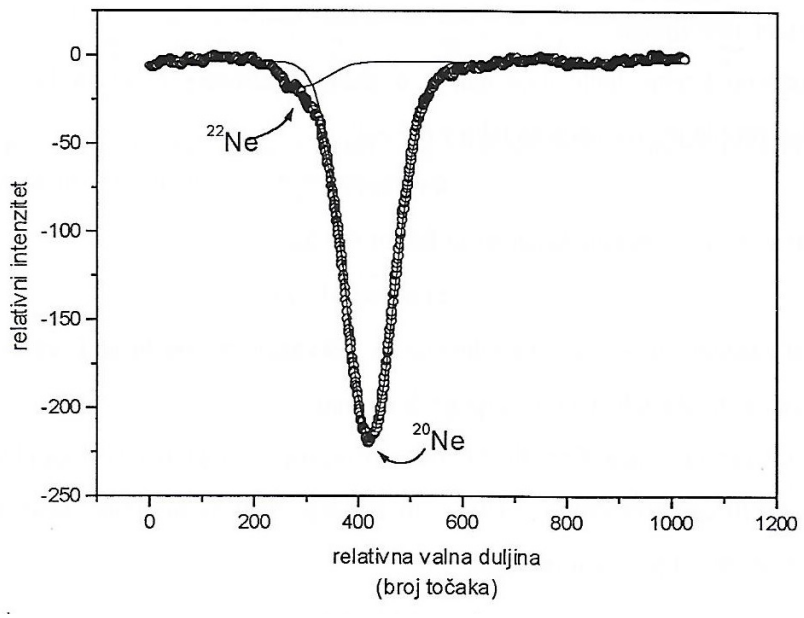
pozitivne i negativne, ovisno o vjerojatnosti ionizacije energijskih razina $E_i$ i $E_k$ koje su uključene u laserski induciran prijelaz [18].




Slika 5.10: Shema uređaja za ispitivanje izboja optogalvanskom detekcijom [31].

Shema uređaja za ispitivanje izboja optogalvanskom detekcijom prikazana je na slici 5.10. Sastoji se od disprozij-neon (Dy-Ne) sijalice sa šupljom katodom. Sijalica sa šupljom katodom je uređaj koji se sastoji od dviju elektroda zatvorenih u staklenoj cijevi koja je ispunjena plinom na niskom tlaku. Sijalica je spojena na stabilizirani izvor visokog napona preko otpora $R_1$ i $R_2$, koji služe radi ograničenja struje kroz sijalicu. Svjetlost poluvodičkog diodnog lasera fokusira se lećom u središte šuplje katode. Intenzitet laserske svjetlosti može se regulirati sivim filterom. Da bi se valna duljina laserske diode ugodila na točno određenu valnu duljinu, koja pobuđuje atomski prijelaz, diodni laser se spaja na funkcijski generator koji utječe na struju kroz diodu i kontinuirano mijenja valnu duljinu laserske svjetlosti. Promjena struje izboja mjeri se kao promjena napona na otporniku $R_2$ preko kondenzatora. Fazno-osjetljivo pojačalo mjeri onu komponentu signala koja ima istu fazu i frekvenciju kao i trokutasti signal modulacije s funkcijskog generatora. Signal s fazno-osjetljivog pojačala dovodi se na jedan ulaz kartice za brzu Fourier-ovu transformaciju ugrađene u računalu. Na drugi ulaz kartice se dovodi signal s funkcijskog generatora [31].

Na slici 5.11 prikazan je optogalvanski signal. Signal se sastoji od linija izotopa $^{20}$Ne i $^{22}$Ne i predstavlja promjenu (povećanje) struje izboja obasjanog svjetlom lasera rezonantnim s atomskim prijelazom $1s_4 \longrightarrow 2p_7$.




Slika 5.11: Optogalvanski signal [31].

## *5.7 Ostale primjene poluvodičkog diodnog lasera*

Poluvodički diodni laser se primjenjuje u medicinske svrhe pri operacijama, u dijagnostici, u stomatologiji itd. U stomatologiji se primjenjuju diodni laseri kraćih valnih duljina 655, 810 i 980 nm za operacije koje uključuju odstranjivanje mekog tkiva umjesto skalpela. Takvi laseri su obično povezani s optičkim vlaknima što omogućuje pristup, inače teže dostupnim mjestima u usnoj šupljini [26].

Poluvodički diodni laser se primjenjuje i u industriji za varenje. Iako je izlazna snaga tipičnog diodnog lasera nekoliko W, moguće je proizvesti više emitera na jednom supstratu pa takav laser ima snagu i do 100 W. Prednost diodnih lasera u odnosu na ostale lasere je i njihova veličina. Zbog male veličine, mogu se montirati na robotsku ruku. Također se pritom povezuju s optičkim vlaknima zbog bolje fleksibilnosti, što je važno u automobilskoj industriji [32].

# 6 Metodički dio

Tradicionalno je nastava fizike u školi predavačka i jednosmjerna, a njezin cilj je da učenik stekne deklarativno znanje o sadržajima koji su navedeni u školskom programu. Novo doba postavlja pred obrazovanje nove zahtjeve. Danas su promjene na tehnološkoj i društvenoj razini vrlo brze, a porast ukupnog znanja sve brži tako da se ne može predvidjeti kakve će probleme morati rješavati učenici već u bližoj budućnosti. Samo deklarativno znanje, tj. čista reprodukcija naučenog, ne može im poslužiti kao solidan temelj za suočavanje s novim problemima. Da bi učenici na kraju obrazovanja postali prirodoznanstveno pismeni, uz deklarativno znanje moraju posjedovati i proceduralno koje se može primijeniti na rješavanje problemskih situacija u novim, drugačijim okolnostima [33].

Danas se kao glavna zadaća podučavanja fizike, naglašava razvijanje kognitivnih sposobnosti učenika, konceptualnog razumijevanja i sposobnosti pristupanja novim problemskim situacijama. Stoga učenici moraju biti suočeni upravo sa situacijama koje im omogućuju analiziranje, uspoređivanje, zaključivanje i sveobuhvatnu uporabu njihovih intelektualnih sposobnosti [33]. Taj cilj se ostvaruje uvođenjem istraživački usmjerenog interaktivnog nastavnog procesa. Istraživački usmjerena nastava fizike jest oblik nastave u kojem se razvija razumijevanje fizike kroz kombiniranje znanja i znanstvenog razmišljanja i zaključivanja. Njezin zadatak je potaknuti smislenije i dublje učenje od čistog memoriranja. Učenici kroz takvu vrstu nastave uče i o znanstvenim metodama, a ne samo o znanstvenim rezultatima što odražava istraživački karakter fizike kao znanstvene discipline [34].

Motivacija ima bitnu ulogu u svakom istraživanju i u svakoj učionici. Stoga je važno da su pripremljeni takvi materijali i aktivnosti koji će izazvati znatiželju učenika. Istraživački usmjerena nastava fizike započinje upravo otvaranjem problema pitanjima ili pokusima što je izvrsna prilika za povezivanje nastavnog sadržaja sa životom i učeničkim prijašnjima znanjima. Znanje, kojim učenici već raspolažu, je temelj na koji će nadograđivati novo znanje. Zato je za nastavnika od iznimne važnosti da dobije određenu ideju o konceptima kojima učenici raspolažu i kako ih povezuju [33]. Posebno je važno da se identificiraju njihove pretkoncepcije kako bi se izbjeglo stvaranje različitih hibridnih modela i koncepcija. Nakon početne faze prikupljanja ideja i uvida u učeničke pretkoncepcije, slijedi upoznavanje nove pojave, najčešće kroz pokus. Potom se postavlja jedno ili više istraživačkih pitanja na koja učenici nastoje odgovoriti kroz vođeno istraživanje. Pritom oni predlažu pokuse, testiraju hipoteze, izvode pokuse ili ih promatraju, daju predviđanja, provode kontrolu varijabli, iznose ili zapisuju opažanja i analiziraju rezultate. Tako najvažniji doprinos raspravi daju sami učenici iznošenjem svojih ideja. Kroz razrednu raspravu, formuliraju se zaključci pomoću kojih se izgrađuje fizikalni model i njegov matematički opis. U završnom dijelu potrebno je evaluirati i primijeniti konstruirani model kroz konceptualna pitanja, jednostavne zadatke, aplikacijske pokuse i sl. Kroz navedene

aktivnosti učenici, osim gradiva, upoznaju i znanstvene procese te razvijaju brojne intelektualne sposobnosti kojima se potiče prelazak s konkretnog na formalni stadij razmišljanja [34].

Ozračje u učionici treba biti takvo da učenicima omogućuje aktivno učenje, tj. konstruktivno razmišljanje, osobno konstruiranje ideja i koordiniranu raspravu u kojoj se razmjenjuju mišljenja i postiže nekakav oblik konsenzusa. To se postiže korištenjem interaktivnih nastavnih metoda poput: usmjerene rasprave, konceptualnih pitanja s karticama, kooperativnog rješavanja zadataka, interaktivnog izvođenja pokusa te uporabom računala u nastavi u kombinaciji s prethodnim metodama. Kad je moguće, fizikalnu pojavu treba pokazati frontalnim demonstracijskim eksperimentom. Netom prije izvođenja eksperimenta, od učenika se može zatražiti da predvide što će se u eksperimentu dogoditi. To pojačava njihovu motivaciju i zanimanje za daljnji razvoj događaja. Nakon provedenog eksperimenta potrebno je od učenika tražiti da opišu što su opazili. Kada za to postoje mogućnosti, dobro je da učenici u grupama provode eksperiment i vrše mjerenja. Danas je nastavniku na raspolaganju sve više tehničkih pomagala kojima mogu vizualizirati i konkretizirati razmatranu fizikalnu situaciju, primjerice primjenom interaktivnih kompjutorskih simulacija. One mogu služiti produbljivanju i utvrđivanju učeničkih znanja ili omogućiti nastavniku demonstraciju određenih fizikalnih pojava za koje ne postoji mogućnost izvođenja eksperimenta u razredu. No, takvu nastavnu metodu nužno je upotrijebiti u kombinaciji s nekom drugom interaktivnom nastavnom metodom koja uključuje verbalizaciju ideja kako bi se postigla što veća učinkovitost [34].

U četvrtom razredu gimnazije učenici se upoznaju, kako s valnom tako i s čestičnom prirodom svjetlosti. Proučavanjem fotoelektričnog efekta, učenici mogu opisati koncept fotona i njegovu energiju. Učenici se također upoznaju s različitim vrstama spektara (linijski i kontinuirani). Nakon upoznavanja s modelima atoma, kako povijesnim tako i kvantno-mehaničkim, učenici mogu povezati emisijske i apsorpcijske spektre s prijelazima elektrona u atomu.

Od kada je 1960. godine izumljen, laser je našao brojene primjene u tehnici, medicini, telekomunikacijama, informatici itd. Kako se učenici s pojmom lasera susreću u svakodnevnom životu, poželjno je da se upoznaju s načinom rada lasera. Budući da je fizika lasera povezana s atomskim prijelazima i emitiranjem fotona, prirodno je nastavnu jedinicu o laseru obraditi nakon što su učenici već dobro svladali navedene koncepte.

Učenici bi nakon održanog sata trebali moći:

- opisati glavne značajke laserske svjetlosti i razlikovati ih od ostalih izvora svjetlosti
- opisati proces stimulirane emisije fotona
- opisati način rada lasera
- navesti važne primjene lasera

Tijekom sata učenici će razvijati sposobnost:

- verbalnog i pisanog izražavanja
- stvaranja pretpostavki
- apstraktnog razmišljanja
- logičkog mišljenja i zaključivanja,

a usvajat će i vrijednosti kao što su:

- tolerancija prema tuđem mišljenju
- aktivno sudjelovanje u raspravi
- izražavanje vlastitog mišljenja
- logičko mišljenje i zaključivanje
- motivacija za stjecanje novih spoznaja

## *6.1 Tijek sata [35], [36], [37]*

### 6.1.1 Uvodni dio

• Gdje ste se do sada susreli s laserima?
Učenici su imali priliku upoznati se s laserima u eksperimentima vezanim uz valnu optiku, a vjerojatno su im poznati i laserski pokazivači i neke druge primjene lasera u svakodnevnom životu.

• Što mislite po čemu su laseri drugačiji u odnosu na ostale izvore svjetlosti?
Učenici iznose svoje pretpostavke. Moguće je da će spomenuti boju lasera i uzak snop svjetlosti.

Pokus 1: Demonstrirati kako izgleda snop laserske svjetlosti, a kako snop svjetlosti iz džepne baterije.

Pokazati učenicima kako izgleda baterija, a kako laser. Uperiti laser u zid tako da učenici uoče da nije moguće izravno vidjeti laserski snop.
Moguće je vidjeti samo zrake svjetlosti koje ulaze u naše oko – bilo izravno iz izvora, bilo zrake koje su odbijene (reflektirane) od predmeta. Prema tome, lasersku zraku možemo učiniti vidljivom tako da je posipamo nekim prahom (npr. puderom) jer će se tako laserska svjetlost odbiti od ”makroskopskih” čestica pudera i dospjeti u naše oko.
Druga mogućnost je uzeti staklenu posudu i napuniti je vodom. U vodu se može dodati par kapi mlijeka. Kroz takvu otopinu moguće je propustiti laserski snop, ali i snop džepne svjetiljke. Izvor svjetlosti u svjetiljci je žaruljica sa žarnom niti.

• Koja je razlika između snopa laserske svjetlosti i snopa svjetlosti iz ručne svjetiljke?

Snop iz svjetiljke se vrlo brzo proširi. Laserski snop je usmjeren i uzak i takav ostaje čak i na velikim udaljenostima.

• Postoji li razlika u valnoj duljini svjetlosti iz promatranih izvora?
Snop laserske svjetlosti je monokromatski dok je bijela svjetlost polikromatska.

• Kako biste provjerili čini li snop laserske svjetlosti samo jedna valna duljina?
Učenici iznose prijedloge pokusa. Mogu se prisjetiti pokusa iz valne optike u kojima se propuštala svjetlost kroz difrakcijsku rešetku.

Pokus 2: Propušta se bijela, pa laserska svjetlost kroz optičku rešetku.

Učenici iznose svoja opažanja. U slučaju laserske svjetlosti vidjeli su pruge jedne boje, dok su u slučaju propuštanja bijele svjetlosti mogli uočiti obojene pruge.

• Na današnjem satu htjeli bismo istražiti kako proizvesti lasersku svjetlost.

### 6.1.2 Središnji dio

Istraživačko pitanje: Kako radi laser?

• Sredstvo u kojem se događa laserska emisija naziva se aktivno sredstvo. Ono može biti plin, tekućina ili čvrsta tvar. Što se mora dogoditi u atomima tog sredstva da bi oni emitirali svjetlost?
Učenici su se do sada upoznali s modelima atoma i povezali nastanak emisijskog i apsorpcijskog spektra s prijelazima elektrona između energijskih razina atoma, odnosno s pobuđivanjem atoma. Također učenicima je poznato da valna duljina emitiranog fotona ovisi o razlici energijskih razina atoma između kojih elektroni prelaze. Što je razlika između energijskih razina veća, valna duljina emitiranog fotona je manja.
Učenici skiciraju i tumače proces spontane emisije fotona pri prijelazu elektrona s više na nižu energijsku razinu.
Na slici 6.1(a) prikazan je proces spontane emisije.

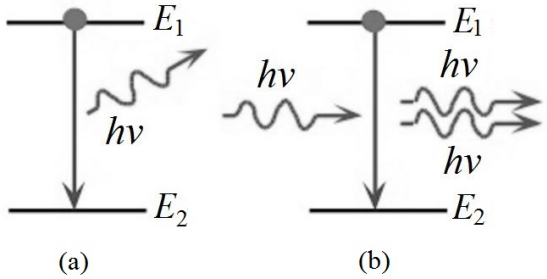
• Da bi se mogla emitirati svjetlost moramo dovesti atome sredstva u pobuđeno stanje. Na koje bismo sve načine mogli pobuditi atome u aktivnom sredstvu lasera?
Učenicima je poznato da je atome moguće pobuditi na različite načine, primjerice sudarima pri termičkom grijanju, naponom, apsorpcijom fotona.

• Kakva će biti emitirana svjetlost ako atome pobudimo na različite energijske razine?
Emitirat će se fotoni različite energije ovisno o razlikama energijskih razina između kojih elektron prelazi te izlazna svjetlost neće biti monokromatska.

• Kako onda postići emisiju monokromatske svjetlosti?
Trebalo bi pobuditi atome na istu energijsku razinu.

• Zamislimo sljedeću situaciju: imamo puno pobuđenih atoma na istoj energijskoj razini. Jedan od pobuđenih atoma prešao je u osnovno stanje i emitirao se foton. Taj foton nalijeće na drugi pobuđeni atom. Što bi se sada moglo dogoditi?
Učenici daju i raspravljaju svoje pretpostavke.

• Foton koji nalijeće na pobuđeni atom, čija je energija jednaka razlici između pobuđenog i osnovnog stanja, stimulira prijelaz atoma u osnovno stanje. Budući da se atom nije spontano vratio u osnovno stanje, već je taj povratak na neki način stimuliran, takav se proces naziva stimuliranom emisijom.
Proces stimulirane emisije je prikazan na slici 6.1 (b).




Slika 6.1: Energijski dijagram procesa: (a) spontane emisije, (b) stimulirane emisije [13].

• Koliko ćemo u tom slučaju imati emitiranih fotona?
Dva, jedan upadni i jedan emitirani pri prijelazu elektrona između energijskih razina.

• Što možemo zaključiti o svojstvima emitiranih fotona?
Učenici mogu zaključiti da su fotoni istih energija.

• No, posebnost je ovoga procesa u tome što su emitirani fotoni, osim što su jednakih energija i gibaju se u istom smjeru, posve jednakih svojstava. Što predviđate da će se dogoditi u aktivnom sredstvu kad ovi fotoni nalete na druge atome, koji su u istom pobuđenom stanju?
Učenici predviđaju da će se proces stimulirane emisije nastaviti te će se uskoro stvoriti mnoštvo identičnih fotona.

• Proces stimulirane emisije osnova je rada lasera, no ostaju još neka neriješena pitanja:

1. Kako dovesti puno atoma u isto pobuđeno stanje i zadržati ih ondje dovoljno dugo?
2. Kako što bolje potaknuti proces stimulirane emisije u aktivnom sredstvu?

• Da bismo odgovorili na ta pitanja i istražili što nam je sve potrebno da konstruiramo laser, koristit ćemo računalnu simulaciju.

Postavke simulacije: Otvoriti simulaciju PhET- Laser [38]; prozor-više atoma

• Na simulaciji možete vidjeti kružiće na kojima su napisani brojevi? Što bi oni mogli predstavljati?
Kružići predstavljaju atome u aktivnom sredstvu.

• Na desnoj strani je prikazan energijski dijagram. Što predstavljaju sivi kružići na energijskom dijagramu? Kako su oznake energijskih razina povezane s brojem označenim na atomima?
Brojevi su povezani s onim stanjima atoma koja su naznačena na energijskom dijagramu i to tako da broj naznačen na atomu predstavlja energijsku razinu na kojoj se atom, odnosno elektron u atomu nalazi. Na dijagramu se može vidjeti prijelaz elektrona između energijskih razina atoma.

• Što je nužno da bi se ostvarila stimulirana emisija?
Da bi se ostvarila stimulirana emisija fotona, nužno je da je mnoštvo atoma u pobuđenom stanju.

• Ako je mnoštvo atoma u pobuđenom stanju, ostvarena je inverzija naseljenosti.

• Kako ostvariti inverziju naseljenosti?

• Za što nam služe lampe u simulaciji? Kako ih možemo iskoristiti?
Lampe se mogu iskoristiti za pobuđivanje atoma fotonima.

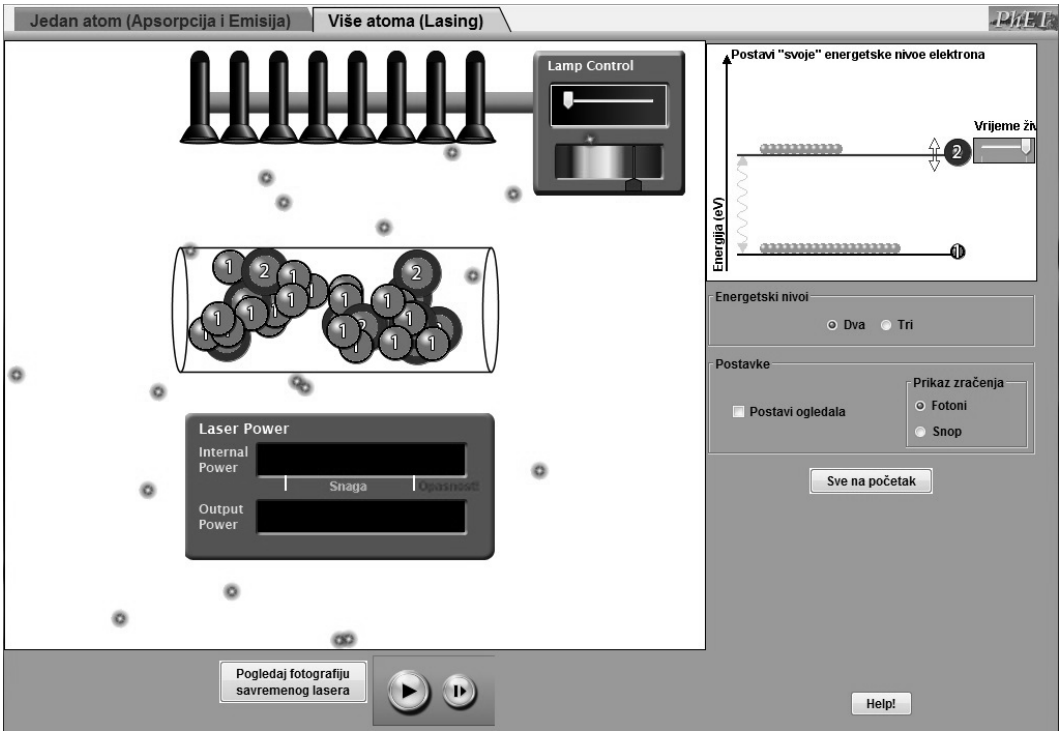
• Primijetite da je na simulaciji moguće mijenjati valnu duljinu svjetlosti i intenzitet svjetlosti.

Postavke simulacije: prozor-više atoma; lampa-plava svjetlost, dvije energijske razine, energijske razine ostaju na početno zadanim vrijednostima.

• Obasjavamo atome plavom svjetlosti. Zašto nema emisije svjetlosti? Kako je postići?
Energija upadnih fotona ne odgovara razlici energija energijskih razina pa nema apsorpcije fotona. Potrebno je promijeniti valnu duljinu svjetlosti ili razliku energijskih

razina.

Postavke simulacije: prozor-više atoma; lampa-crvena svjetlost, mali intenzitet svjetlosti, dvije energijske razine, energijske razine ostaju na početno zadanim vrijednostima (slika 6.2).




Slika 6.2: Prikaz simulacije rada lasera [38].

• Što se događa kada se pošalju fotoni iz lampe? Kako to vidimo na energijskom dijagramu?
Atomi prelaze iz osnovnog u pobuđeno stanje, a onda se vraćaju u osnovno uz emisiju svjetlosti.

• Kakva je emisija svjetlosti? Možete li na simulaciju uočiti stimuliranu emisiju?
Događa se i spontana i stimulirana emisija svjetlosti. U slučaju spontane emisije emitira se jedan foton, a u slučaju stimulirane na simulaciji se mogu uočiti dva fotona koja putuju u ”paru”.

• Je li je postignuta inverzija naseljenosti? Kako to vidite?
Inverzija naseljenosti još uvijek nije postignuta jer je duže vremena više atoma, odnosno elektrona na energijskom dijagramu u osnovnom stanju.

• Što se događa kako povećavamo intenzitet svjetlosti?
Povećava se broj elektrona na energijskoj razini dva, u odnosu na energijsku razinu

jedan.

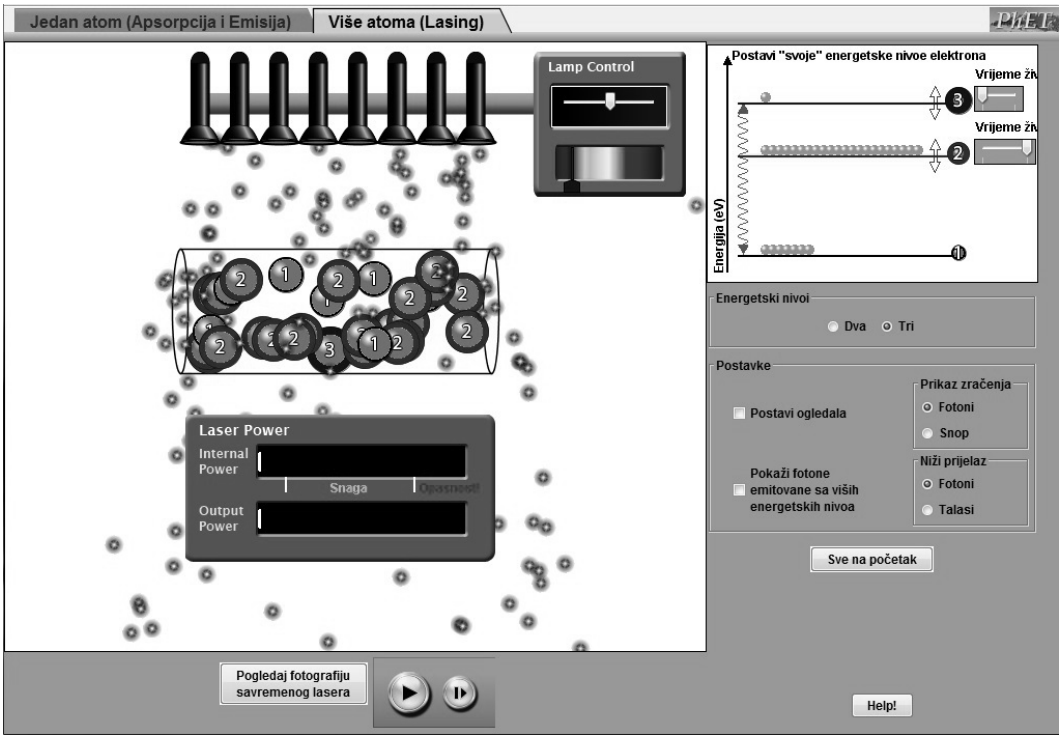
• Uočite da je moguće mijenjati vrijeme života, odnosno vrijeme koje atom ostaje u pobuđenom stanju prije nego dođe do spontane emisije. Što mislite kako će vrijeme života utjecati na inverziju naseljenosti?
Ako su atomi vrlo kratko u pobuđenom stanju, neće se moći ostvariti inverzija naseljenosti i stimulirana emisija.

• Što zaključujete kako se ostvaruje inverzija naseljenosti?
Potreban je izvor, npr. izvor svjetlosti kojim se atomi pobuđuju. Također, atomi moraju duže vremena boraviti u pobuđenom stanju.

• Pobuđeno stanje u kojem atomi borave dulje vremena naziva se još i metastabilno stanje. U njemu atomi ostaju mnogo duže (oko $10^{-3}$ s) nego u drugim pobuđenim stanjima koja tipično napuštaju za mnogo kraće vrijeme (oko $10^{-8}$ s).

• Laser je lakše ostvariti pomoću tri energijske razine. Na simulaciji možemo promotriti takvu situaciju.

Postavke simulacije: prozor-više atoma; lampa-plava svjetlost, tri energijske razine, energijske razine ostaju na početno zadanim vrijednostima




Slika 6.3: Prikaz simulacije rada lasera s tri energijske razine. Laserska akcija nije postignuta [38].

• Atome osvjetljavamo plavom svjetlošću. Što se sada događa s atomima?
Fotoni pobuđuju atome u pobuđeno stanje označeno brojem tri, a atomi brzo prelaze u pobuđeno stanje dva, a zatim se događa spontana ili stimulirana emisija na osnovno stanje.

• Što očekujete kako će promjena vremena života energijske razine 2 ili 3 utjecati na inverziju naseljenosti?
Učenici iznose pretpostavke.
Učenici mogu uočiti da smanjenjem vremena života na energijskoj razini dva nije postignuta inverzija naseljenosti, ali je postignuta smanjenjem vremena života na energijskoj razini tri, kao što je prikazano na slici 6.3.

• Zašto je bitno da je većina atoma u pobuđenom stanju označenom brojem dva?
Tako ćemo moći ostvariti stimuliranu emisiju.

• Na simulaciji postoji mogućnost uključivanja zrcala.

• Što opažate? Što se događa kada uključimo zrcala?
Fotoni se reflektiraju nekoliko puta kroz aktivni medij.

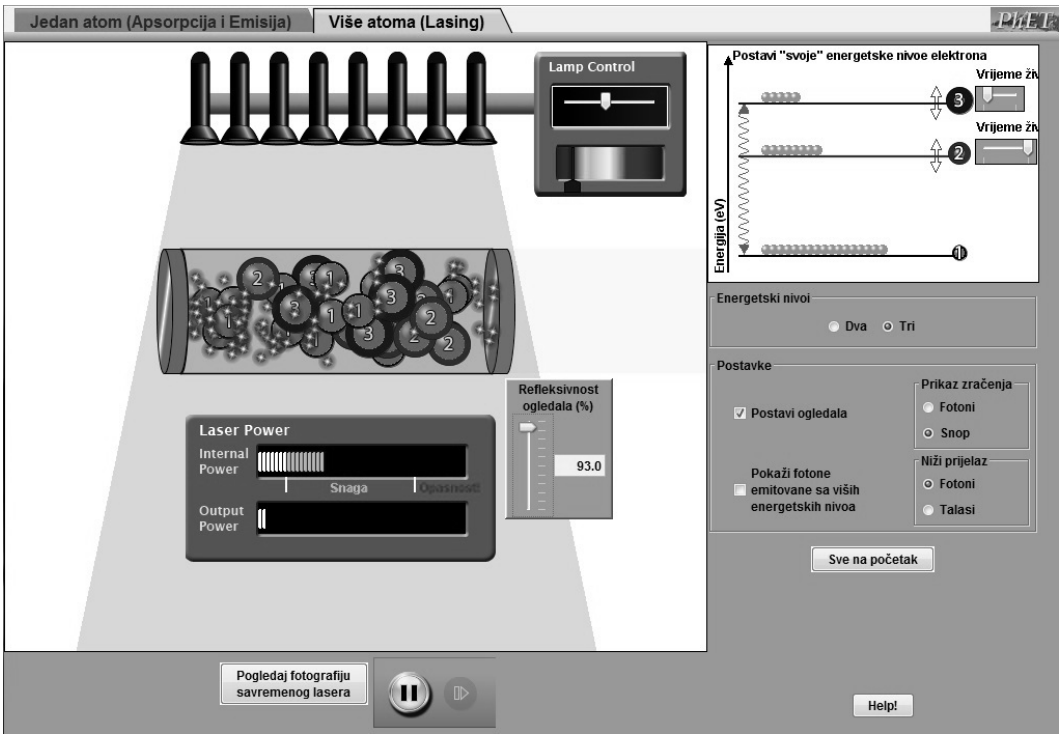
• Zašto su nam potrebna zrcala?
Budući da se fotoni reflektiraju kroz aktivni medij nekoliko puta, mogu više puta izazvati stimuliranu emisiju svjetlosti.

• Osim što ih dulje zadržavaju u sredstvu, zrcala i rezonantna šupljina lasera povećavaju i koherentnost laserske svjetlosti. Sad kad smo dobili lasersku svjetlost, moramo joj još omogućiti da izađe iz lasera, pa ćemo jedno od zrcala učiniti polupropusnim.

Postavke simulacije: prozor-više atoma; lampa-plava svjetlost, tri energijske razine, energijske razine ostaju na početno zadanim vrijednostima, prikaz zračenja-snop (slika 6.4).

• Moguće je mijenjati refleksivnost desnog zrcala. Što trebamo učiniti kako bismo dobili izlazni snop svjetlosti?
Potrebno je smanjiti refleksivnost kako bismo dobili izlazni snop.

• Napišite što nam je sve potrebno da bismo ostvarili laser.
Potreban je izvor kojime ćemo pobuditi atome u aktivnom sredstvu. Atomi u aktivnom sredstvu imaju mnoštvo energijski razina, ali potrebno je elektrone u atomu pobuđivati na energijsku razinu koja je određena vrlo kratkim vremenom života. S te energijske razine elektroni brzim prijelazima prelaze na energijsku razinu koja je




Slika 6.4: Prikaz simulacije rada lasera. Postignuta je laserska akcija [38].

metastabilana pa se tako lakše ostvaruje inverzija naseljenosti. Također potrebno je koristiti zrcala kako bi isti fotoni mogli više puta izazvati stimuliranu emisiju, a jedno od zrcala mora biti djelomično propusno kako bi se dobio izlazni snop svjetlosti.

• Je li vam je poznato što znači akronim laser?
To su početna slova engleskog naziva Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

• Kako biste sada objasnili svojstva lasera koja smo promatrali u prvom dijelu sata?
Snop laserske svjetlosti je monokromatičan (jedne valne duljine) jer svi emitirani fotoni imaju jednaku energiju. Izlazni snop je uzak jer se svi fotoni nakon izlaska iz aktivnog medija gibaju u istom smjeru; nisu emitirani u svim smjerovima kao u slučaju ostalih izvora svjetlosti.

• Osim što je snop uzak i monokromatičan, elektromagnetski valovi koji čine laserski snop su u fazi. Kako nazivamo takav snop svjetlosti?
Učenicima su iz valne optike poznati koherentni izvori svjetlosti pa mogu zaključiti da je takav snop svjetlosti koherentan.

### 6.1.3 Završni dio

• Znate li koje sve vrste lasera postoje? Što mislite po čemu bi se one mogle razlikovati?

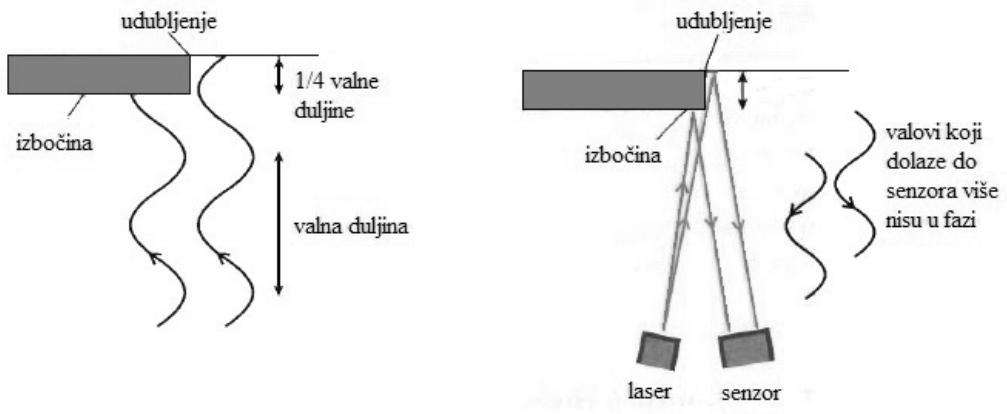
Učenici su možda čuli da postoje plinski laseri, poluvodički laseri, laseri s čvrstom jezgrom i sl., ako ne pitati ih što misle što bi sve mogli iskoristiti kao aktivno sredstvo.

• Možda ste čuli da se pomoću lasera može vrlo precizno izmjeriti udaljenost od Zemlje do Mjeseca? Što mislite na koji način? Zašto se ne upotrebljava neki drugi izvor svjetlosti?
Na Mjesec je postavljeno zrcalo prema kojem se može poslati laserski snop. Mjerenjem vremena potrebnog da se laserski snop vrati na Zemlju i poznavanjem brzine svjetlosti, moguće je odrediti udaljenost do Mjeseca. Primjena drugih izvora svjetlosti ne bi bila prikladna jer bi se bi se do Mjeseca znatno proširili.

• Je li vam je poznata još neka primjena lasera?
Učenici daju prijedloge pa se po potrebi može detaljnije u svakoj od njih raspraviti. Učenicima je vjerojatno poznata primjena u laserskim pisačima, pri snimanju podataka na CD ili DVD, primjena u trgovinama ili primjena u optičkoj komunikaciji.

Primjena lasera pri čitanju podataka s diskova:

• Je li vam je poznato u kojem obliku se pohranjuju podaci na diskove?
Učenicima je poznato iz informatičkih kolegija da se podaci pohranjuju u obliku izbočina i udubina koje se povezuju s logičkim nulama i jedinicama.




Slika 6.5: Shematski prikaz čitanja podataka s CD-a [39].

• Rekli smo da se za čitanje podataka na diskovima koristi laser. Je li vam je poznato na koji način računalo povezuje izbočine i udubine s nulama i jedinicama?
Kada laserski snop padne na mjesto gdje nema skoka, tomu računalo pridružuje logičku nulu. Izbočine na disku takve visine da kada snop padne na mjesto skoka, snopovi reflektirani od dna i uzvišenog dijela ureza su u protufazi i dolazi do destruktivne interferencije. Tada je intenzitet reflektiranog snopa smanjen. Tomu se pridružuje logička jedinica.

Princip rada prikazan je na slici 6.5.

• Zašto se za čitanje primjenjuje laser, a ne neki drugi izvor svjetlosti?
Zato što je laserski snop vrlo uzak i može se lako fokusirati na malu površinu diska.

• Zašto se na blu-ray disk može pohraniti više podataka nego na CD?
Veličina podatka na disku je povezana s valnom duljinom lasera koji se koristi za zapis podataka. Budući da se pri zapisu podataka na blu-ray disk koristi laser plave svjetlosti koji je manje valne duljine, na disk se može pohraniti više podataka.

# 7 Zaključak

Laser je uređaj koji na principu stimulirane emisije svjetlosti stvara i pojačava koherentno, monokromatsko i usmjereno zračenje. Poluvodički diodni laser proizvodi se vrlo složenim fizičko-kemijskim postupkom od kombinacija poluvodiča čime se ostvaruje poluvodički optički oscilator. Prednosti poluvodičkog lasera su mnogostruke: to je monokromatski, koherentni koliminirani izvor svjetla, kompaktan je, lagan, dugog životnog vijeka te male potrošnje električne energije. Zbog toga je našao primjenu u mnogim područjima znanosti i tehnologije od laserske spektroskopije i medicine do primjene pri optičkoj pohrani podataka, optičkom pumpanju drugih lasera te u laserskim pisačima. Jedna od najvažnijih primjena poluvodičkog diodnog odnosi se na optičke komunikacije bez kojih se ne bi mogao osigurati brz protok informacija.

# Dodaci

## Dodatak A Modovi optičkog rezonatora

### *A.1 Longitudinalni modovi titranja*

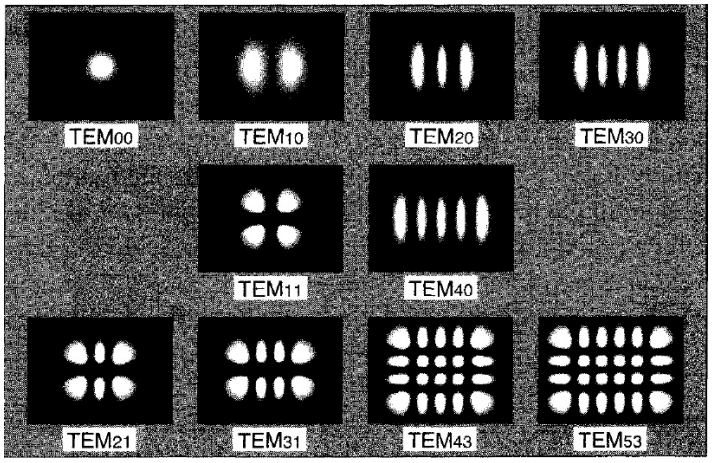
Budući da je udaljenost između reflektirajućih ploha optičkog rezonatora mnogo veća od valne duljine emitirane svjetlosti, unutar rezonatora može postojati mnoštvo modova titranja koji se nazivaju longitudinalni modovi titranja. No, stojni valovi postoje samo za frekvencije za koje je udaljenost između reflektirajućih ploha jednaka cijelom broju valnih duljina:

$$L = \frac{\mathrm{m}\,\lambda_m}{2\,n}\,, \tag{A.1}$$

pri čemu je $L$ duljina šupljine, $n$ indeks loma pri valnoj duljini $\lambda$, a m prirodni broj [14].

### *A.2 Transverzalni modovi titranja*

Elektromagnetski valovi mogu oscilirati i okomito na os rezonatora, odnosno okomito na os propagacije. Takvi modovi titranja nazivaju se transverzalni. Neki transverzalni modovi titranja prikazani su na slici A.1.

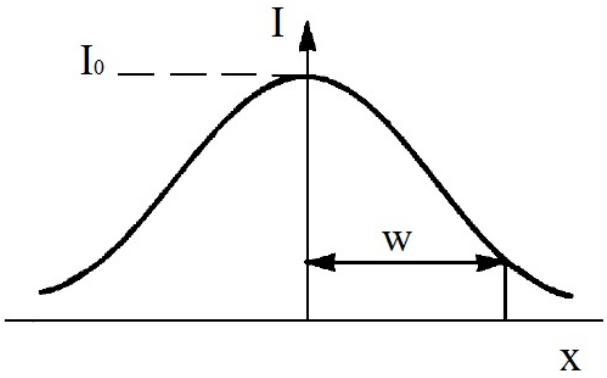



Slika A.1: Intenzitet transverzalnih modova titranja u optičkom rezonatoru. Indeksi označavaju broj čvorova u smjerovima okomitim na os rezonatora [10].

Za mnoge primjene u tehnologiji važno je da laser oscilira samo u $\mathrm{TEM}_{00}$ modu. Taj mod titranja se naziva još i osnovni mod titranja odnosno, Gauss-ov mod titranja. Laseri koji reproduciraju više modove titranja obično su veće snage. Intenzitet Gaussove zrake može se izraziti kao:

$$I = I_0\,\mathrm{e}^{-2x^2/w^2}\,, \tag{A.2}$$

pri čemu je $I_0$ maksimalni intenzitet, $x$ udaljenost od središta zrake te $w$ radijus emitirane zrake [29].




Slika A.2: Intenzitet Gauss-ove zrake u ovisnosti o udaljenosti od središta zrake [29].

# Literatura


[1] E-škola, Laseri i komunikacije, (07.07.2000), Fizika dvadesetog stoljeća, http://eskola.hfd.hr/laseri/paper1/b-d4.htm, 14.05.2016.

[2] Lugomer, S.; Stipančić, M. Laser : fizikalne osnove, konstrukcija i primjena. Sarajevo : IGKRO "Svjetlost", 1977.

[3] Šips, V. Uvod u fiziku čvrstog stanja : udžbenik fizike za studente Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu. 2 izdanje. Zagreb : Školska knjiga, 2003.

[4] Young, H. D.; Freedman, R. A. Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics. 12th ed. : Pearson, 2006.

[5] Sadoway, D. Introduction to Solid State Chemistry: Bonding in Metals, Semiconductors and Insulators - Band Structure. MIT OpenCourseWare, 2010.

[6] Kittel, C. Introduction to Solid State Physics. 8th ed. California : John Wiley and Sons, Inc., 2005.

[7] Butković, Ž.; Pukšec, J. D.; Barić, A. Elektronika 1 : I dio. Zagreb : Fakultet elektronike i računarstva: Zavod za elektroniku, mikroelektroniku, računalne i inteligentne sustave, 2006.

[8] Kachhava, C. M. Solid State Physics: Solid State Devices and Electronics. New Age International, 2003.

[9] Joshi, A. M.; Olsen, G. H. : Photodetection. // Handbook of Optic: Fundamentals, Techniques and Design. 2nd ed. Vol. 1, 1995, str. 685-706.

[10] Silfvast, W. T. Laser fundamentals. 2nd ed. Cambridge university press, 2004.

[11] Haitz, R. H; Craford, M. G.; Weissman, R. H. : Light-Emitting Diodes. // Handbook of Optic: Fundamentals, Techniques and Design. 2nd ed. Vol. 1, 1995, str. 463-502.

[12] Csele, M. Fundamentals of Light Sources and Lasers. New Jersey : John Wiley and Sons, Inc., 2004.

[13] Kasap, S. O. Optoelectronics and Photonics : Principles and Practices . 3rd ed. New Jersey : Prentice Hall, 2001.

[14] Visible Laser Diodes: Product Guide, (02.09.1998), Toshiba, http://www.ele.uva.es/~pedro/optoele/lasers/VLDs_Toshiba.pdf, 22.02.2016.

[15] Yariv A. Quantum Electronics. 3rd eg. John wiley and Sons, 1989.

[16] Laser Diodes User's Manual: LT010 Series Characteristics Diagrams, Sharp Corporation, 1992.

[17] Melles-Griot Catalog 1995/96

[18] Demtröder, W. Laser Spectroscopy : Basic Concepts and Instrumentation. 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 1981.

[19] Mode Hopping in Semiconductor Lasres : Application Note, (12.03.2012), Optoelectronic Devices, http://www.ele.uva.es/~pedro/optoele/lasers/LD_parameters_Newport.pdf, 13.04.2016

[20] Personick, S. D. Fiber Optics : Technology and Applications. 1st ed. New York : Springer Science + Business Media, 1985.

[21] Optical Fibers, Cables and Systems : ITU-T Manual, (10.09.2009), International Telecommunication Union, https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf, 03.03.2016.

[22] Hadjifotiou T. : Optical Fibers. // The Cable and Telecommunications Professionals' Reference. 3rd ed. Vol. 2, Focal Press, 2008., str. 111-144.

[23] SPIE, (10.02.2004), Fundamentals od Photonics, Module 1.8 : Fiber Optic Telecommunication, http://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2008.pdf, 03.03.2016.

[24] Mueller, S. Upgrading and Repairing PCs. 15th ed. Indianapolis : Que, 2004.

[25] Mansuripur, M. : Principles of Optical Disk Data Storage. // Handbook of Optic: Fundamentals, Techniques and Design. 2nd ed. Vol. 1, 1995, str. 1170-1202.

[26] Diels, J. C.; Arissian, L. Lasers : The Power and Precision of Light. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2011.

[27] The Reinvention of LED Printing : Xerox HiQ LED delivers colorful, high-resolution output, (02.10.2014.), Xerox, http://www.office.xerox.com/latest/W74WP-01U.pdf, 13.03.2016.

[28] How Barcode Scanners Work, (14.03.2016), Carolina Barcode inc., https://www.carolinabarcode.com/how-barcode-scanners-work-a-69.html, 14.03.2016.

[29] Hitz, B.; Ewing, J. J.; Hecht, J. Introduction to Laser Technology. 3rd ed. New York : IEEE Press, 2001.

[30] Sam's Laser FAQ, (08.12.2015), Samuel M. Goldwasser, http://www.repairfaq.org/sam/laserioi.htm, 06.04.2016.

[31] Dumanić, E. Optogalvanska spektroskopija izboja u neonu. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 1999.

[32] Welding with diode lasers, (16.03. 2016), The Fabricator, http://www.thefabricator.com/article/laserwelding/welding-with-diode-lasers, 16.03.2016.

[33] Krsnik, R. Suvremene ideje u metodici fizike: sveučilišni udžbenik. Zagreb : Školska knjiga, 2008.

[34] Planinić, M. Istraživački usmjerena interaktivna nastava fizike. Predavanja iz metodike nastave fizike 1. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2015.

[35] Paar, V. Fizika 4: udžbenik za 4. razred gimnazije. 4. izdanje. Zagreb: Školska knjiga, 2008.

[36] Labor, J. Fizika 4: udžbenik za 4. razred gimnazije. Zagreb: Alfa, 2008.

[37] Krsnik, R. Fizika 4: udžbenik za 4. razred gimnazije. Zagreb: Školska knjiga, 2010.

[38] Phet Interactive Simulations, (08.05.2016), Lasers, https://phet.colorado.edu/en/simulation/lasers, 08.05.2016.

[39] Digital Technology, (03.06.2016), Applications of Digital Signals, https://www.patana.ac.th/secondary/science/anrophysics/ntopic14/commentary.htm#apps_of_digital , 14.01.2009.