

OPTIKA U BIOMEHATRONICI

UVOD

Svetlost, kao deo spektra nejonizujućeg elektromagnetnog zračenja, jeste jedna od prvih fizičkih pojava sa kojima se čovek u životu sreće i živi i ima veliki značaj bar sa dva aspekta :

- prvi aspekt se odnosi na upotrebu svetlosti u medicinskoj dijagnostici i terapiji,
- drugi aspekt se odnosi na fiziku oka i procesa viđenja, koji predstavlja jedan od osnovnih vidova komunikacije čoveka sa okolinom.

STRUKTURA ATOMA I MOLEKULA - ENERGETSKI NIVOI

Savremena teorija o strukturi atoma i molekula zasniva se na eksperimentalno dokazanoj činjenici da su u mikrosvetu energije vezanih čestica (na primer, elektrona u atomu i molekulu) *kvantovane*, tj. mogu imati samo tačno određene vrednosti. Najjednostavnija kvantna teorija o strukturi atoma je ona koju je formulisao Nils Bor. Bor je pošao od pretpostavke da elektroni pri kretanju po stacionarnim putanjama (određenim energetske nivoima) ne emituju niti apsorbuju energiju.

STRUKTURA ATOMA I MOLEKULA

- ENERGETSKI NIVOI

Energetski nivoi atoma. Mada je struktura energetskih nivoa elektrona u atomu veoma složena, za naše potrebe će biti dovoljno ako je predstavimo sa dva Borova postulata:

Prvi Borov postulat tvrdi da se elektron može kretati u atomu samo po putanjama određenog poluprečnika za koje važi uslov da je moment količine kretanja elektrona L jednak celobrojnom umnošku veličine $h/2\pi$, tj.

$$\mathbf{L} = \mathbf{m}_e \mathbf{v}_n \mathbf{r}_n = n \frac{\mathbf{h}}{2\pi}$$

STRUKTURA ATOMA I MOLEKULA

- ENERGETSKI NIVOI

$$L = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

Ovde je:

m_e masa elektrona,

v_n je njegova brzina,

r_n je poluprečnik orbite po kojoj se elektron kreće,

h je Plankova konstanta,

n je ceo broj i naziva se *glavni kvantni broj*.

Pri kretanju po ovakvoj orbiti elektron poseduje stalnu energiju E_n , koja odgovara stacionarnom stanju elektrona, čime su definisani energetske nivoi atomskog omotača.

STRUKTURA ATOMA I MOLEKULA

- ENERGETSKI NIVOI

Drugi Borov postulat objašnjava prelazak elektrona sa jednog na drugi energetski nivo. Pri prelasku elektrona sa nivoa energije E_n na nivo energije E_m elektron apsorbira (prelaz sa nižeg na viši energetski nivo) ili emituje (prelaz sa višeg na niži energetski nivo) kvant elektromagnetnog zračenja, čija je energija jednaka razlici energija ta dva stacionarna energetska nivoa:

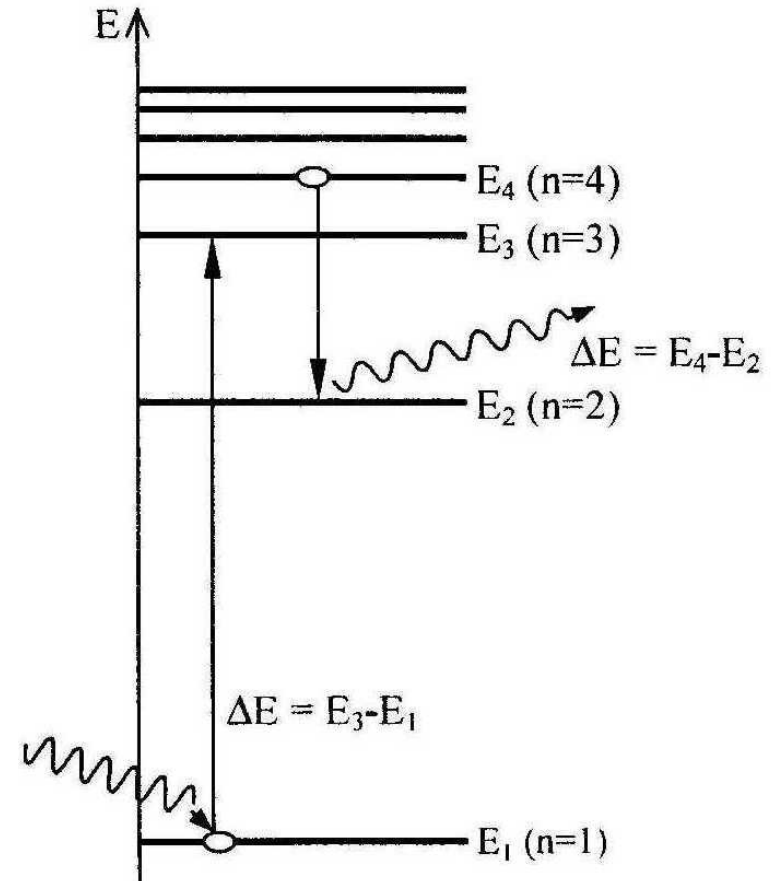
$$\Delta E = h\nu = E_n - E_m$$

STRUKTURA ATOMA I MOLEKULA

- ENERGETSKI NIVOI

Struktura atomskog omotača i raspored energetskih nivoa prikazani su na slici. Treba obratiti pažnju na činjenicu da je, mada je rastojanje između energetskih nivoa sve veće, energetska razlika između susednih nivoa sve manja ukoliko se udaljavamo od jezgra atoma (energija je obrnuto srazmerna kvadratu glavnog kvantnog broja - n^2). Zato će se pri prelazu elektrona na susedni nivo emitovati ili apsorbovati kvant veće energije i manje talasne dužine ako su nivoi bliži jezgru i obrnuto.

Biomehatronika



STRUKTURA ATOMA I MOLEKULA

- ENERGETSKI NIVOI

Energija elektrona se najčešće izražava u elektronvoltima (eV). To je jedinica energije, čija se vrednost dobija na sledeći način:

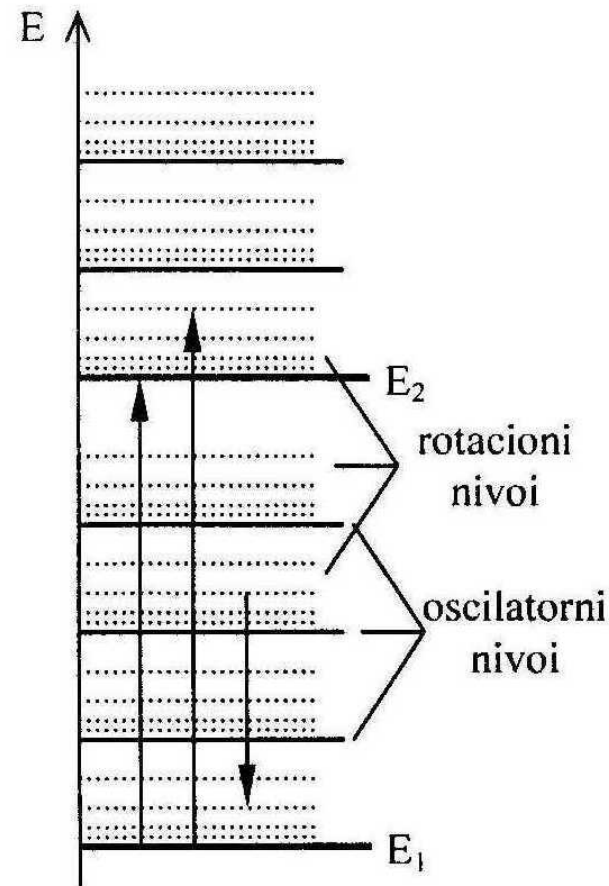
$$1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{Cx} \frac{\text{J}}{\text{C}} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{J}$$

STRUKTURA ATOMA I MOLEKULA

- ENERGETSKI NIVOI

Energetski nivoi molekula.

Energija molekula se sastoji od energije elektrona, energije oscilovanja atoma i molekula i energije rotacije molekula. Zbog toga je energetski spektar molekula komplikovaniji od energetskog spektra atoma. Na slici su prikazani energetski nivoi dvoatomnog molekula.



STRUKTURA ATOMA I MOLEKULA - ENERGETSKI NIVOI

Razlika energija dva nivoa se sastoji od tri energetska dela:

$$\Delta E = \Delta E_e + \Delta E_o + \Delta E_r$$

gde je

ΔE_e - razlika energija elektrona,

ΔE_o - razlika energija oscilovanja atoma i molekula i

ΔE_r - razlika energija rotacije molekula.

Frekvencija kvanta elektromagnetnog zračenja koji se emituje pri prelazu elektrona sa višeg na niži energetski nivo biće

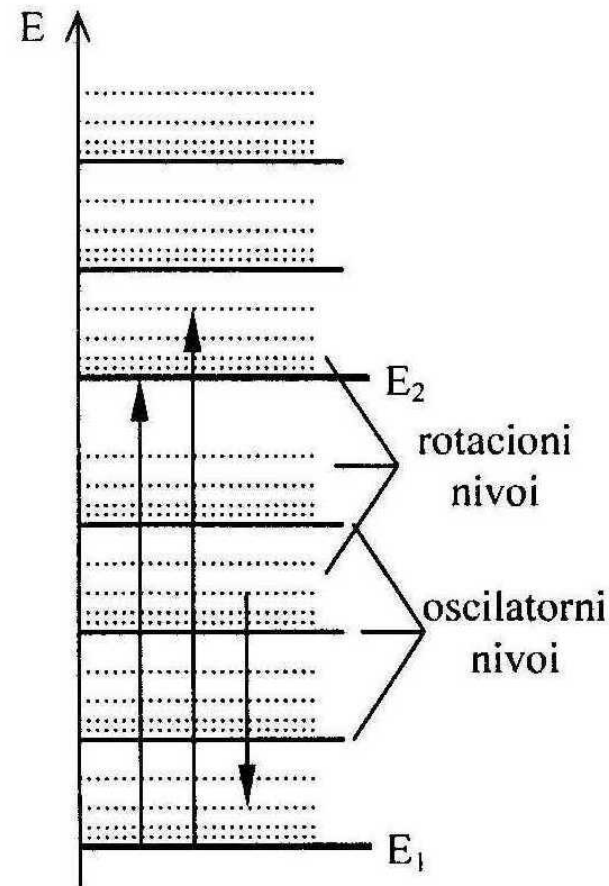
$$\nu = \frac{1}{h} (\Delta E_e + \Delta E_o + \Delta E_r)$$

STRUKTURA ATOMA I MOLEKULA

- ENERGETSKI NIVOI

Zbog velikog broja mogućih prelaza (veliki broj energetskih nivoa), frekvencije pojedinih spektralnih linija mogu biti veoma bliske, zbog čega se kod molekula umesto linijskog spektra dobijaju trake od gusto poredanih linija - trakasti spektri. Zavisno od talasne dužine kvanta, elektromagnetno zračenje će pripadati oblastima od ultraljubičaste do infracrvene.

Biomehatronika



Optika u biomehatronici

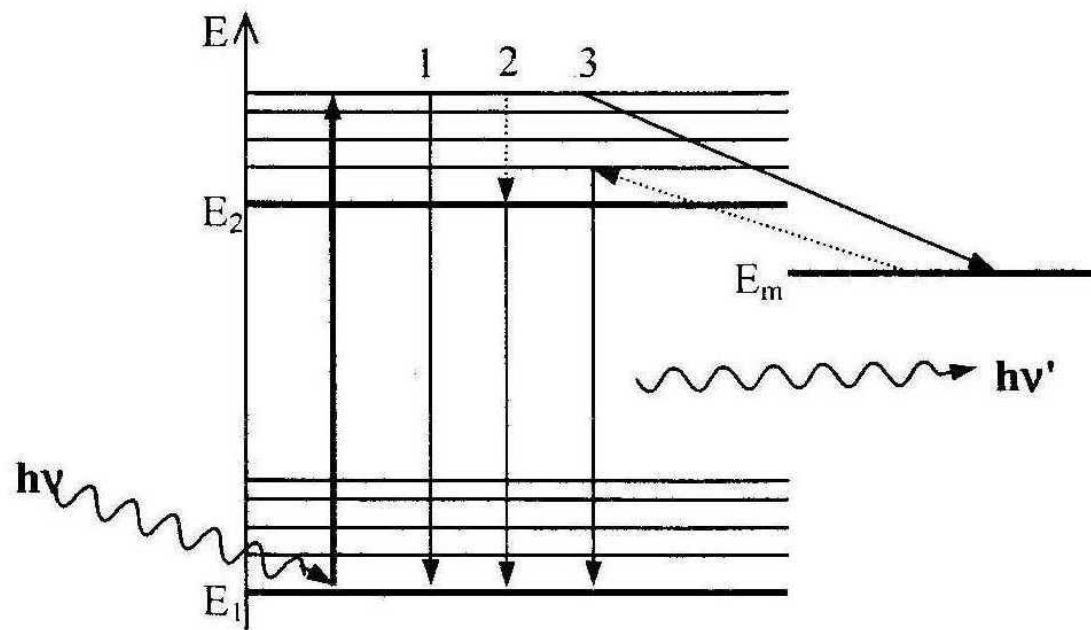
11

FLUORESCENCIJA I FOSFORESCENCIJA

Cepanje energetskih nivoa molekula usled oscilacija atoma u molekulu i oscilacije i rotacije samog molekula omogućuju elektronske prelaze kojih ih nema u atomima. Posmatraćemo dva susedna energetska nivoa molekula (sa energijama E_1 i E_2) i njihove podnivoje, koji nastaju usled oscilatornog kretanja. Između svih podnivoa ova dva energetska nivoa može doći do prelaza elektrona. Neka se elektron nalazi na osnovnom (oscilatornom) stanju nivoa energije E_1 . Ako se tom elektronu saopšti energija $E = h\nu$, dovoljna da elektron pređe na viši energetski nivo, on se može vratiti na nivo na kome je bio na tri načina:

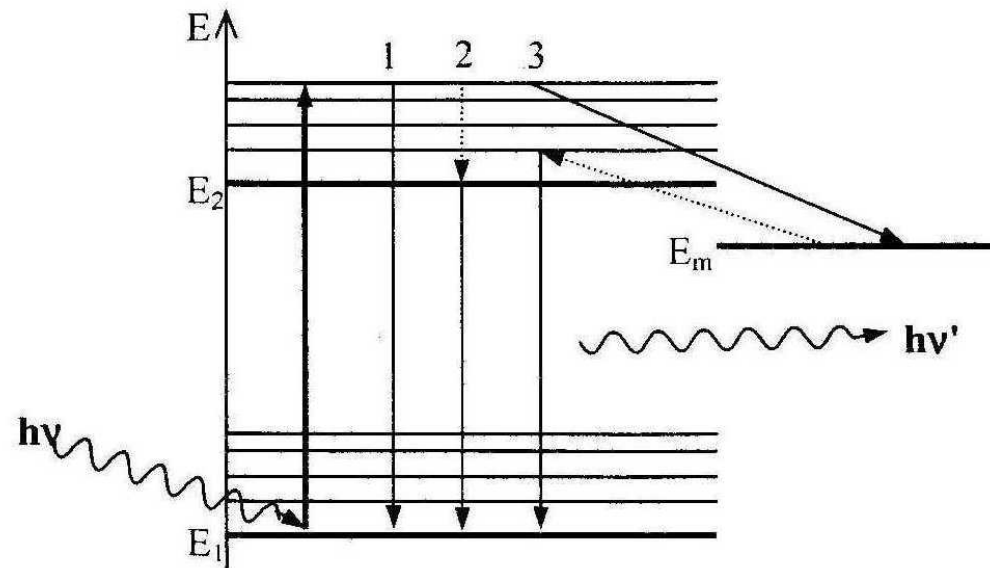
FLUORESCENCIJA I FOSFORESCENCIJA

1. Elektron se vraća direktno na početni nivo i pri tome emituje kvant zračenja iste energije E . Ovaj prelaz se odvija za veoma kratko vreme reda veličine 10^{-15} do 10^{-8} sekundi.



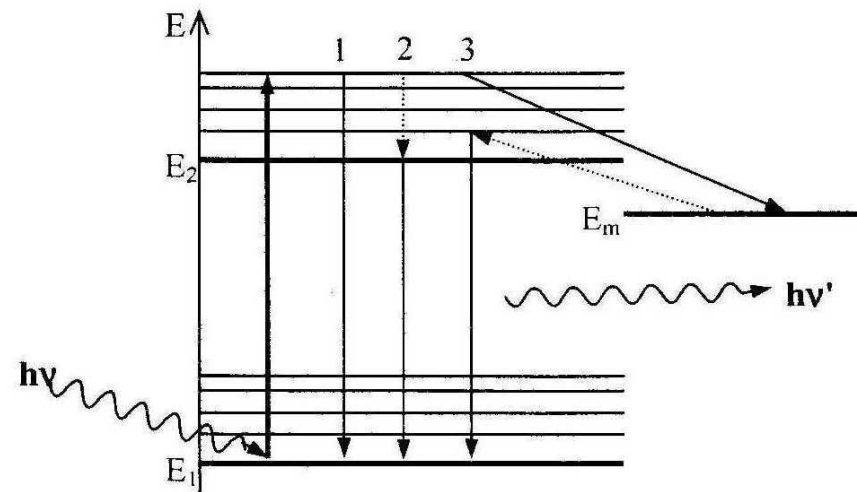
FLUORESCENCIJA I FOSFORESCENCIJA

2. Elektron može da pređe prvo na osnovno stanje energetskog nivoa E_2 , a zatim na nivo E_1 . Kvant elektromagnetnog zračenja će se emitovati samo pri drugom prelazu. Za ovaj proces je potrebno nešto duže vreme reda veličine 10^{-8} do 10^{-4} sekundi. Energija emitovanog kvanta je manja od energije upadnog kvanta.



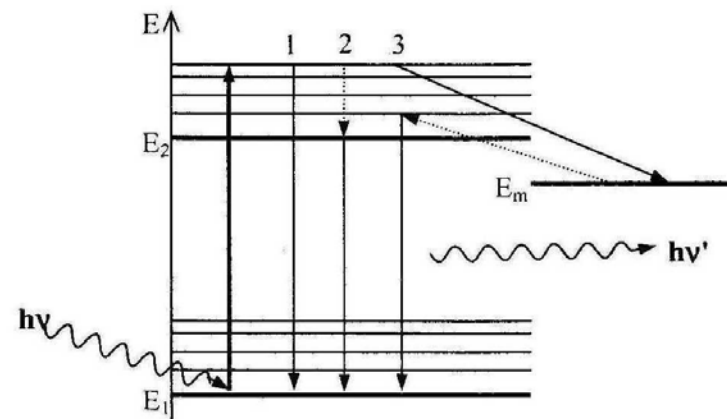
FLUORESCENCIJA I FOSFORESCENCIJA

Pogodnim izborom jedinjenja na ovaj način se može nevidljivo elektromagnetno zračenje (rendgensko i gama zračenje) prevesti u zračenje koje pripada vidljivom delu spektra. Najpogodniji materijali su fluori, zbog čega se ovaj proces emisije vidljive (ili ultraljubičaste) svetlosti pod dejstvom upadnog zračenja manje talasne dužine naziva *fluorescencija*.



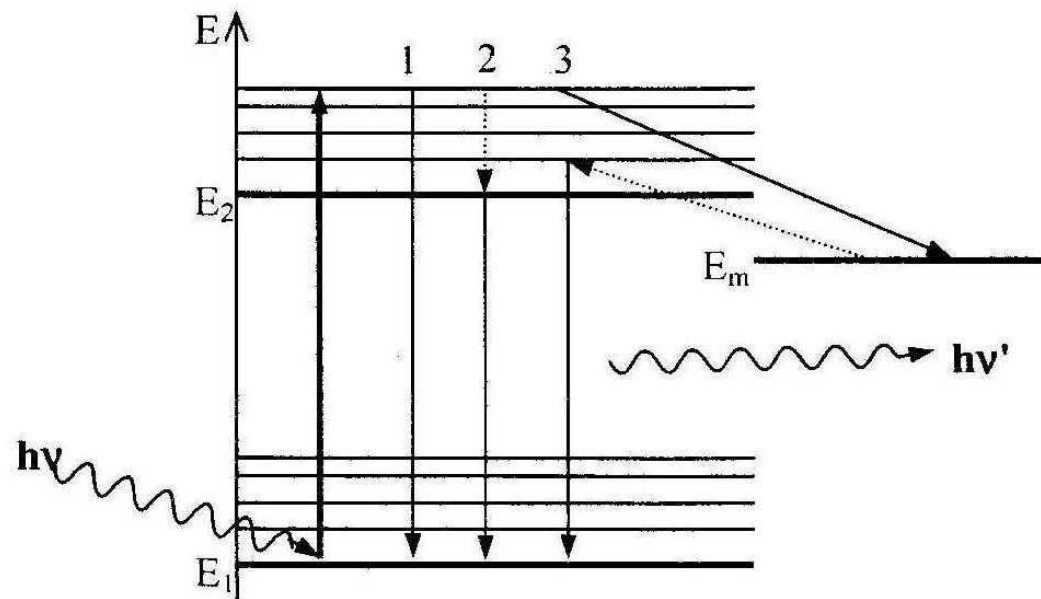
FLUORESCENCIJA I FOSFORESCENCIJA

3. Ako se između dva elektronska nivoa nalazi još jedan metastabilni nivo energije E_m , koji obično potiče od drugog molekula, elektron pri povratku sa nivoa E može da pređe prvo na njega najčešće bez emitovanja energije (energija se oslobađa u nekom drugom vidu, recimo u vidu toplote). Verovatnoća prelaza elektrona sa metastabilnog nivoa na osnovni nivo je mala. Elektron se mora vratiti na viši energetska nivo E_2 , a tek odatle na nivo E_1 .



FLUORESCENCIJA I FOSFORESCENCIJA

Vreme potrebno za ceo proces je reda veličine 10^{-4} do 1 sekunde, a može nekad biti i znatno duže. Energija kvanta zračenja, koji se dobija u ovom procesu nazvanom fosforescencija, manja je od energije upadnog kvanta i odgovara energiji vidljive svetlosti.

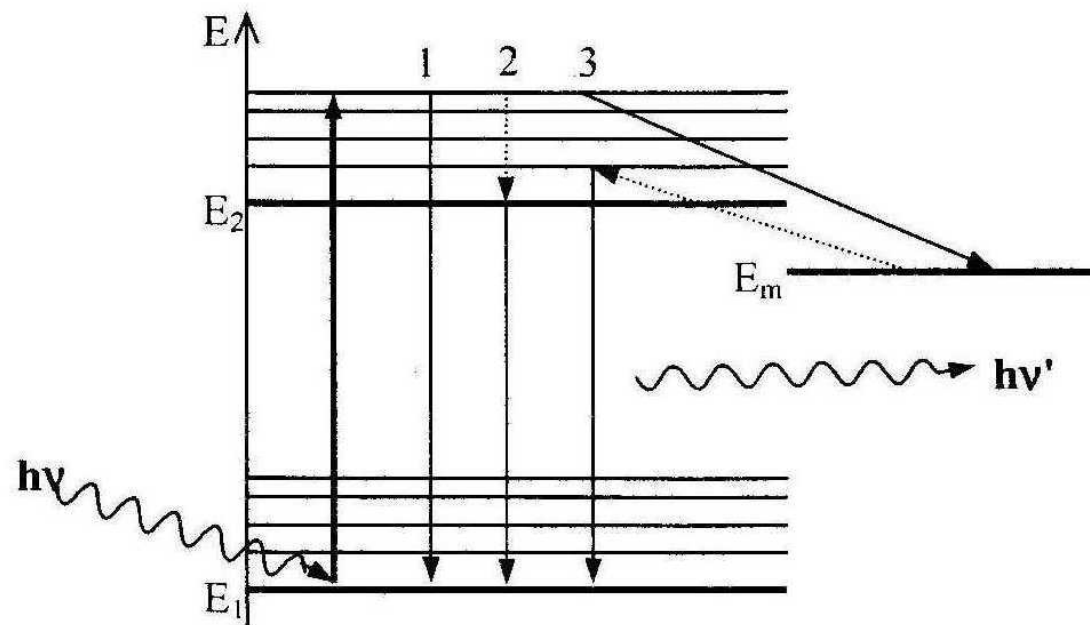


FLUORESCENCIJA I FOSFORESCENCIJA

Za emitovano zračenje dobijeno u sve tri vrste procesa važi Stoksov zakon, koji kaže da je energija kvanta emitovanog zračenja manja ili jednaka energiji apsorbovanog zračenja:

$$h\nu \geq h\nu'$$

$$\nu \geq \nu' \quad \lambda \leq \lambda'$$



FLUORESCENCIJA I FOSFORESCENCIJA

Fluorescencija ima veliku primenu u medicini. Koristi se, pre svega, za vizuelizaciju slike u radiodijagnostici. Na ekran rendgenskog aparata nanosi se sloj fluorescentnog materijala u kome se nevidljiva rendgenska slika strukture ispitivanog dela tela pretvara u vidljivu sliku. Osim toga, analizom fluorescentnih spektara može se ispitivati struktura makromolekula, fluorescentni materijali se koriste za bojenje nekih preparata i sl.

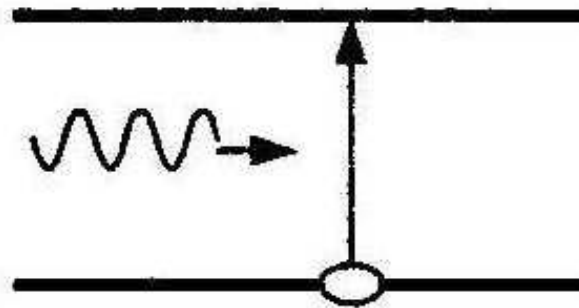
Osobina fosforescencije nekih vrsta kristala koristi se u termoluminiscentnim dozimetrima, koji se mogu pozicionirati na mesta izložena zračenju pri radiološkoj terapiji i meriti direktno dozu zračenja.

STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

LASERI

Prelaz elektrona sa jednog na drugi energetski nivo može se vršiti u dva smera, sa nižeg energetskog nivoa na viši i sa višeg na niži. Šta izaziva prelaz elektrona?

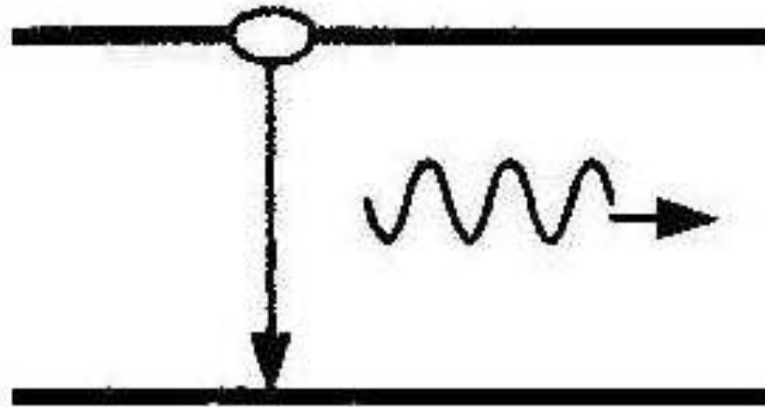
U slučaju prelaza na viši nivo elektron mora apsorbovati energiju koja je jednaka razlici energija dva nivoa; taj proces se zove *stimulisana apsorpcija*.



STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

LASERI

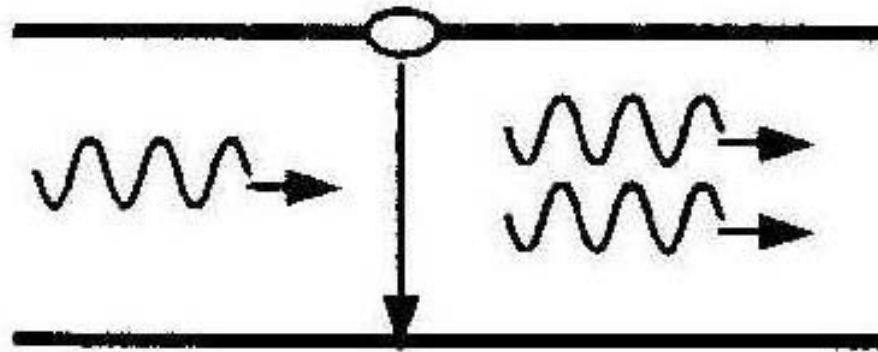
Za većinu prelaza elektrona sa višeg na niži nivo nije potreban poseban uzrok. Elektron može spontano da pređe na niži energetska nivo pri čemu se emituje kvant zračenja; takav proces se naziva *spontana emisija*.



STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

LASERI

1917. godine Ajnštajn je otkrio treću mogućnost: pobuđeni atom može biti stimulisan da pređe u *niže* energetska stanje upadnim fotonom, čija je energija jednaka energiji prelaza. Foton emitovan u ovom procesu ima istu energiju i fazu kao i stimulišući foton i kreće se u istom pravcu. Ovaj proces je nazvan *stimulisana emisija*.



STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

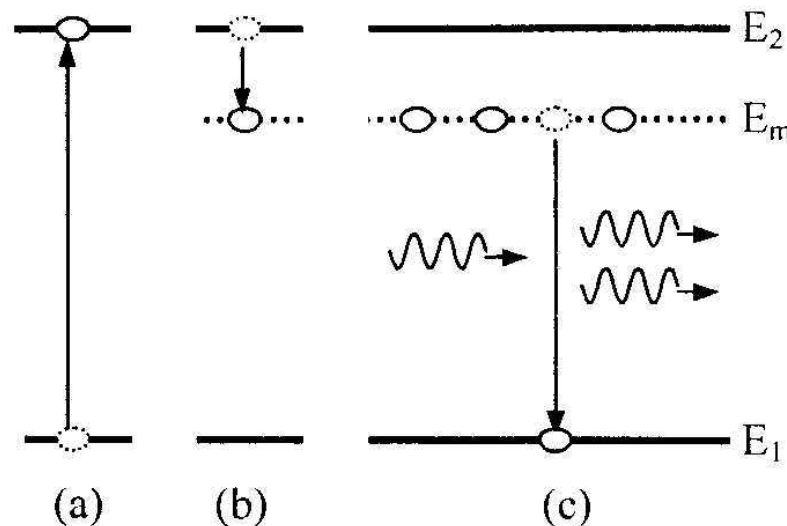
LASERI

Osnovni uslov za stimulisanu emisiju je dobijanje materijala u kome se atomi duže zadržavaju u pobuđenom stanju, što znači da se elektroni nalaze na višem energetske nivou. Kako se atomi normalno nalaze u osnovnom stanju, u kome elektroni popunjavaju najniže energetske nivoe, pobuđeno stanje se naziva inverzna populacija. Inverzna populacija se dobija postupkom koji se zove optičko pumpanje, a predstavlja izlaganje materijala snopu fotona čija energija odgovara nekom elektronskom prelazu.

STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

LASERI

Elektroni koji su optičkim pumpanjem prešli sa osnovnog na viši energetska nivo (slika a), a zatim neemisionim prelazom na metastabilni nivo, sa koga nije dozvoljen spontani prelaz u osnovno stanje, čine inverznu populaciju (slika b). Prelaz elektrona sa metastabilnog u osnovno stanje dešava se samo ako je elektron stimulisan i praćen je emisijom fotona (slika c).



STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

LASERI

Stimulisana emisija je osnova jednog važnog tehnološkog izuma - lasera, čije je ime izvedeno iz *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)*. U laserskom uređaju se može dobiti svetlosni snop izvanrednih karakteristika, zbog čega su laseri našli široku primenu u svim oblastima uključujući medicinu.

Osnovne karakteristike laserske svetlosti su:

- svetlosni snop je *monohromatski* - svi talasi imaju istu energiju i istu talasnu dužinu,
- svetlosni snop je *koherentan* - svi talasi su u fazi, što omogućuje dobijanje veoma uzanog snopa koji može da pređe veliku daljinu sa malim osipanjem,
- zahvaljujući prethodno navedenim osobinama, laserski snop može biti veoma *snažan* i izvanredno *kolimisan*.

STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

LASERI

Snaga laserskog snopa se kreće od nekoliko mW do 1 MW, a u pulsним laserima i do 100 MW, dok veličina spota ima dijametar od 0,1 - 1 mm.

Opseg talasnih dužina laserskog snopa je veliki i zavisi od materijala u kome se dešava stimulisana emisija. Taj materijal se naziva *radno telo lasera*.

Kao primer možemo uzeti *rubinski laser*, čije je radno telo kristal rubina (Al_2O_3) koji sadrži 0,05% hroma (Cr). Ovakva kombinacija daje energetski prelaz pri kome se emituje elektromagnetno zračenje talasne dužine 694,3 nm u crvenoj oblasti vidljivog dela spektra.

Drugi tip lasera je *gasni helijum-neonski (He-Ne) laser*.

Pored navedenih, postoje laseri čija su radna tela ugljendioksid, argon, kripton itd.

STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

LASERI

| Radno telo lasera | Talasna dužina | Tipična snaga | Dijametar spota | Oblast primene |
|-------------------|--------------------|---------------------------|-----------------|---|
| CO ₂ | 10,6 μm | 25 W | 0,75 mm | ginekologija |
| Argon | 488 nm 514,5 nm | 3 W 10 W | 0,1 mm | oftalmologija gastroenterologija |
| Kripton | 647,1 nm | 1 W | 0,1 mm | oftalmologija |
| Nd - YAG | 1064 nm | 70 W | 0,3 mm | gastroenterologija |
| Rubin | 694,3 nm | 3 J u 30 ns ili 200 μs | 0,25 mm | dermatologija oftalmologija |
| He - Ne | 632,8 nm | 1 mW | 1 mm | optičko podešavanje aparata u radioterapiji |

STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

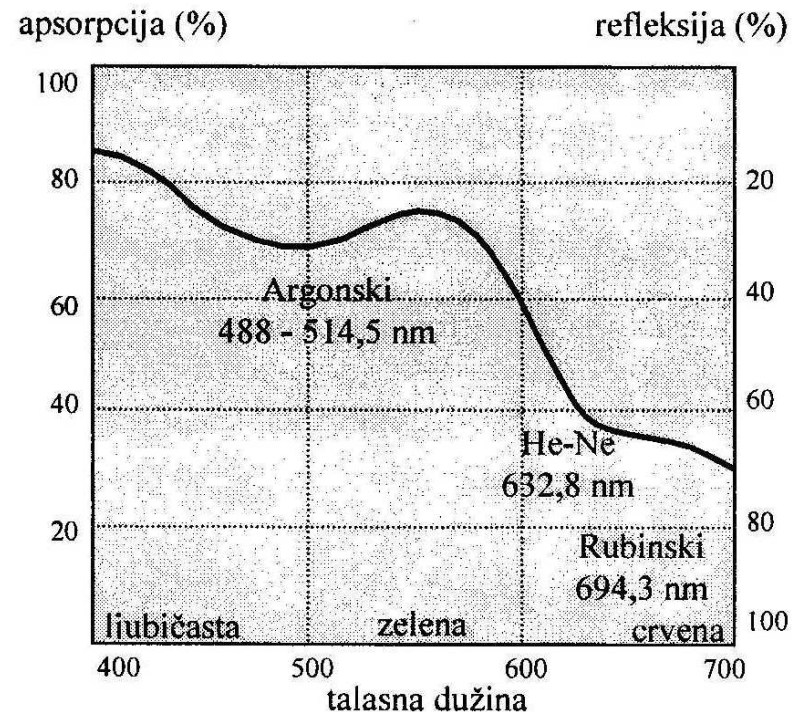
LASERI

Laseri se koriste u razne svrhe. Zahvaljujući dobro kolimisanom snopu mogu se koristiti za merenje velikih rastojanja (udaljenost Meseca od Zemlje); velika snaga i dobro fokusiranje koriste se u metalurgiji za sečenje metala; poznata je upotreba u laserskim štampačima, za očitavanje cena na proizvodima u supermarketima, "light show", za dekodiranje signala u telefonskim centralama i dr. Koriste se mnogo u naučnim istraživanjima za analizu materijala, precizna merenja, dobijanje holograma - rekonstrukciju trodimenzionalne slike (na primer, slika unutrašnje šupljine želuca), separaciju izotopa radijuma, merenje brzine fluida (na primer, krvi) na bazi Doplerovog efekta i u mnogim drugim oblastima.

STIMULISANA EMISIJA SVETLOSTI.

LASERI

Lasери se primenjuju u skoro svim oblastima medicine. S obzirom da je njihova upotreba primarno bazirana na predavanju energije tkivu, talasna dužina laserske svetlosti se mora birati tako da njena apsorpcija od strane tkiva bude što veća. Grafik, pokazuje odnos apsorpcije i refleksije snopa laserske svetlosti na površini kože u zavisnosti od talasne dužine. Laserska svetlost manje talasne dužine biti uvek znatno bolje apsorbovana.



VRSTE LASERA I PRIMENA U MEDICINI

Podela lasera prema vrsti radnog tela:

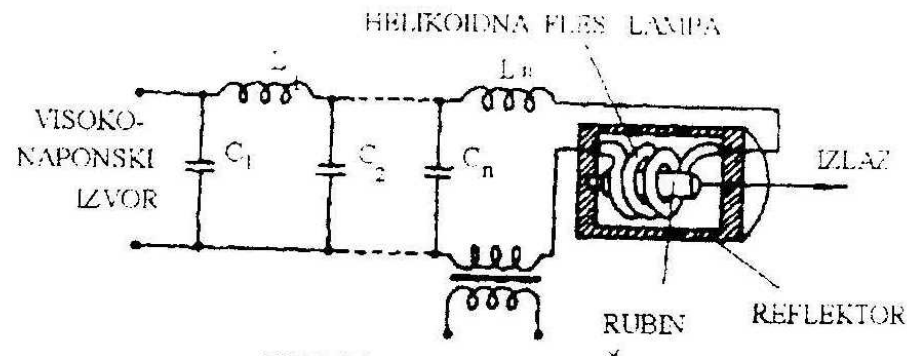
- čvrstotelni laseri,
- poluprovodnički laseri,
- gasni laseri.

Podela lasera prema tipu zračenja:

- laseri sa kontinualnim zračenjem (He-Ne, Kr, CO₂, Ar) ,
- impulsne (rubin, neodijumsko staklo)

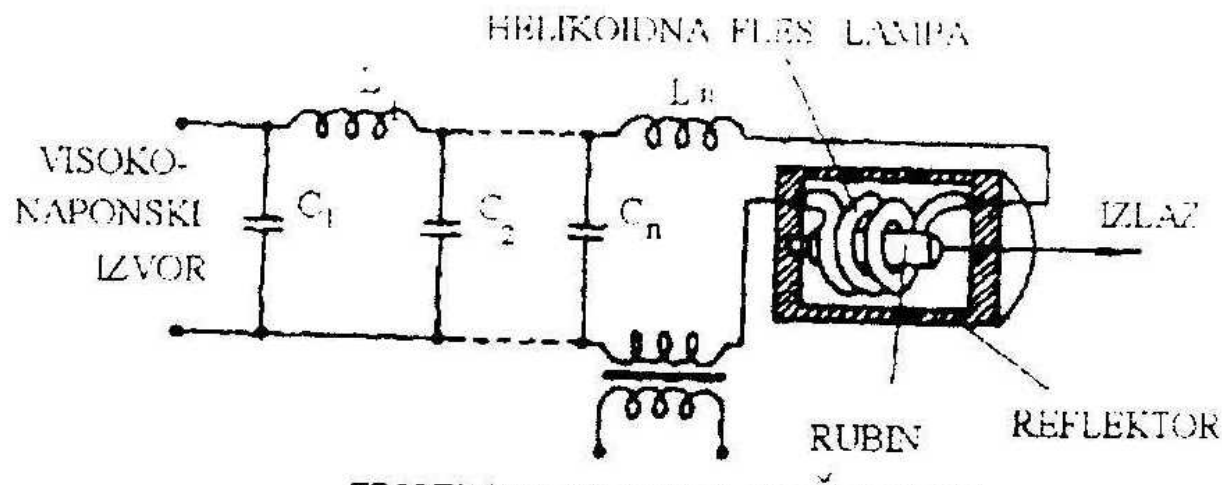
VRSTE LASERA I PRIMENA U MEDICINI

Rubinski (čvrstotelni) laser je prvi put prikazan 1961. godine (T.H.Maiman). Aktivna sredina je aluminijum trioksid u kome oko 0.05% atoma aluminijuma zamenimo atomima hroma (Cr). Na slici je šematski prikazan princip konstrukcije ovakvog lasera. Primenjeni napon za pobudjivanje je 4000 do 10000 V. Preko kondanzatorske mreže ovaj napon se vodi na ksenonsku lampu koja je helikoidalnog oblika oko rubinskog štapa. Ksenonska cev fokusira svoje zračenje, koje pobudjuje atome hroma.



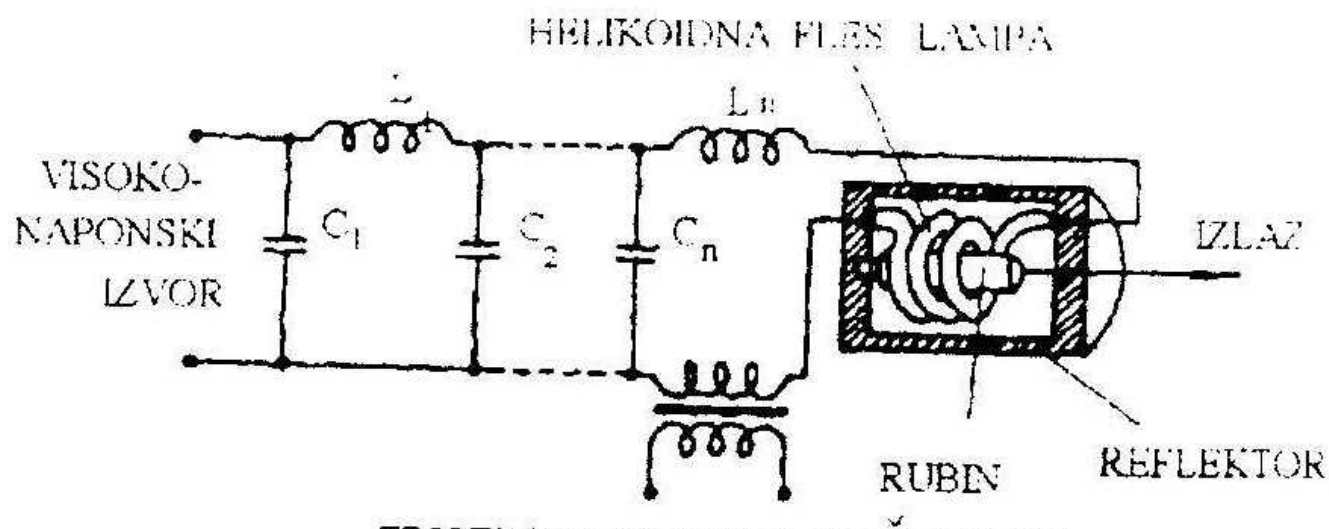
VRSTE LASERA I PRIMENA U MEDICINI

Pobudjeni atomi hroma se zaustavljaju na metastabilnom nivou, i uz primenu rezonatora zrače koherentnu svetlost ($\lambda = 0.6943 \mu\text{m}$). Ovaj laser radi u "burst" režimu (kratki intervali rada), da bi se sprečilo zagrevanje kristala rubina i ne bi poremetila struktura kristala. Trajanje impulsa je reda μs , a maksimalna snaga koja se postiže je reda 15000 J/cm^2 .



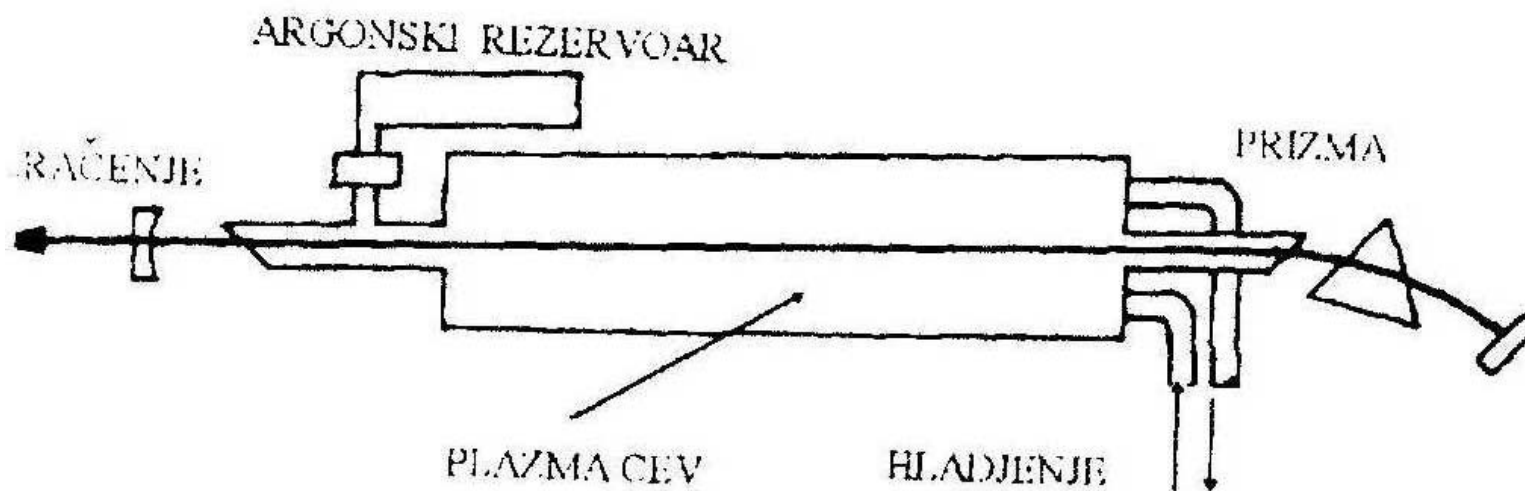
VRSTE LASERA I PRIMENA U MEDICINI

Ovaj laser se koristi vrlo efikasno za hirurgiju u oftamologiji, naročito u slučajevima retinopatija, odnosno uklanjanja krvnih sudova koji ugrožavaju normalne funkcije na retini (deo oka).



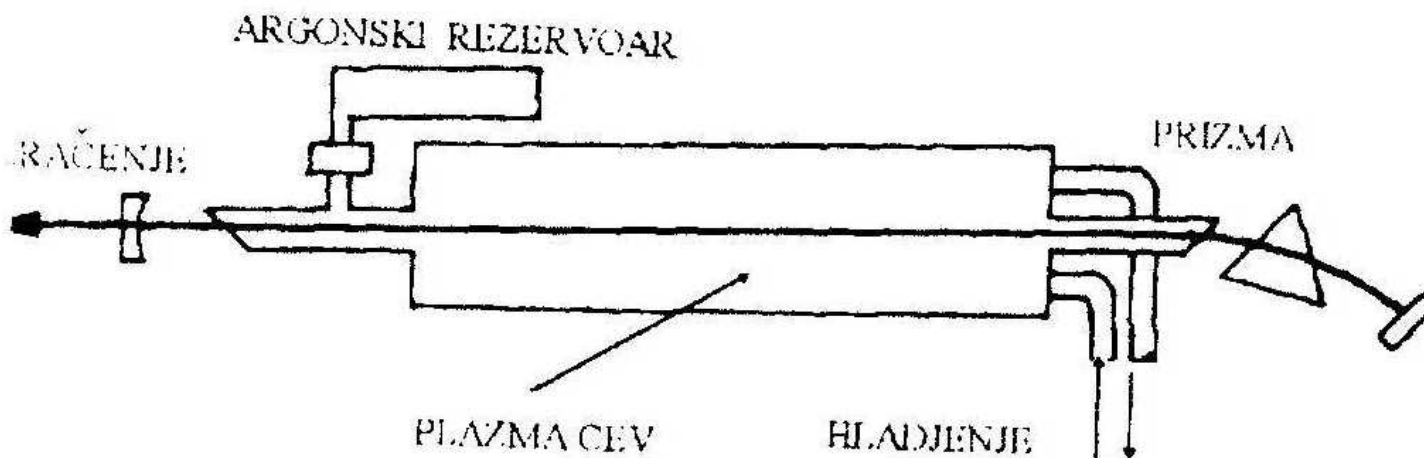
VRSTE LASERA I PRIMENA U MEDICINI

U gasnim laserima aktivna sredina je gas. Argonski laser radi na principu jonizacije i pobudjivanja atoma argona. Plazma cev dovodi do jonizacije i do spontanog zračenja u oblasti vidljive svetlosti. Ovaj sistem zahteva hladjenje, i snaga napajanja je 38 kW, za izvor zračenja snage 18 W.



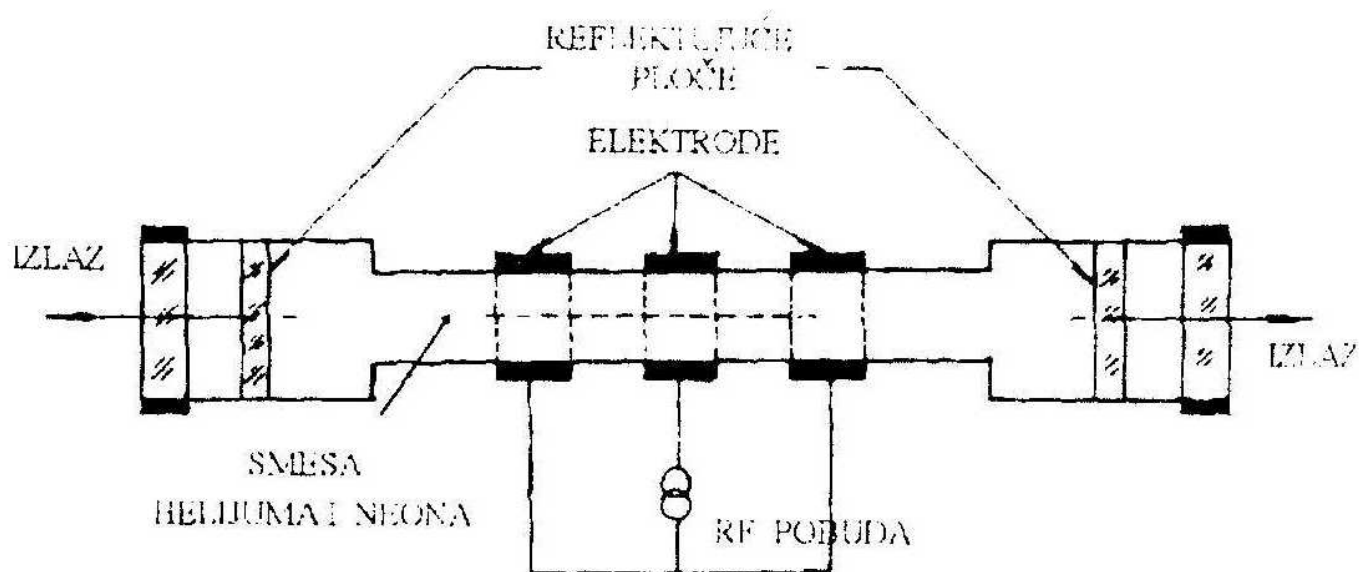
VRSTE LASERA I PRIMENA U MEDICINI

Zračenje je u opsegu od 0.458 do 0.515 μm . S obzirom na talasnu dužinu lako zaključujemo da ovo zračenje absorbuju crvena tela. Ova absorpcija ide u toplotu, pa se taj fenomen koristi za fotokoagulaciju krvi. Ovaj uređaj se koristi i za gastroenterološke namene.



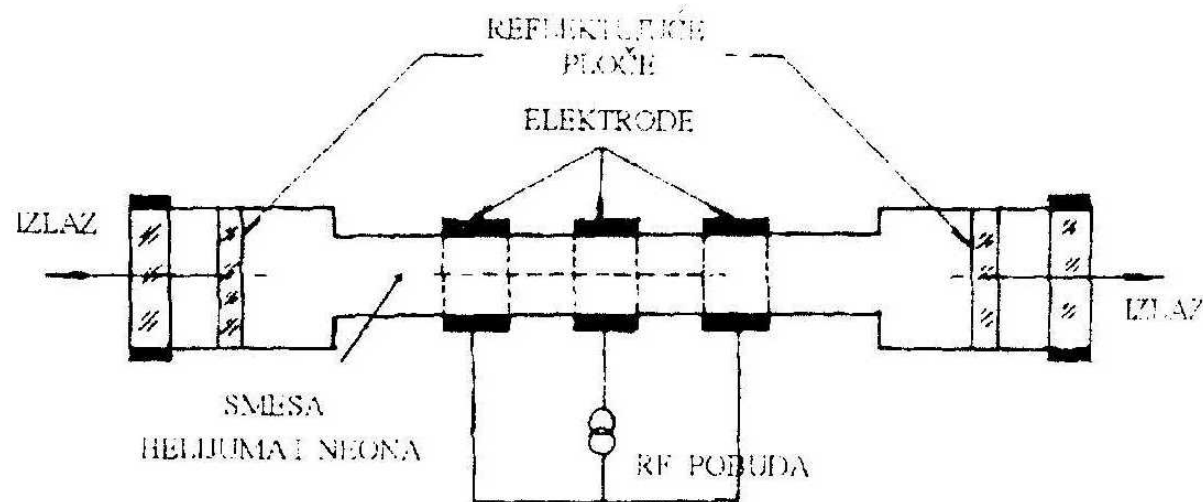
VRSTE LASERA I PRIMENA U MEDICINI

U helijum-neonskom laseru u sudarnom procesu atoma dva gasa se podiže energija. Na deset delova helijuma je jedan deo neona. U komori je nizak pritisak ($p = 1 \text{ mmHg}$). Za generisanje kontinualanog zračenja koristi se radiofrekvencijsko pobudjivanje.



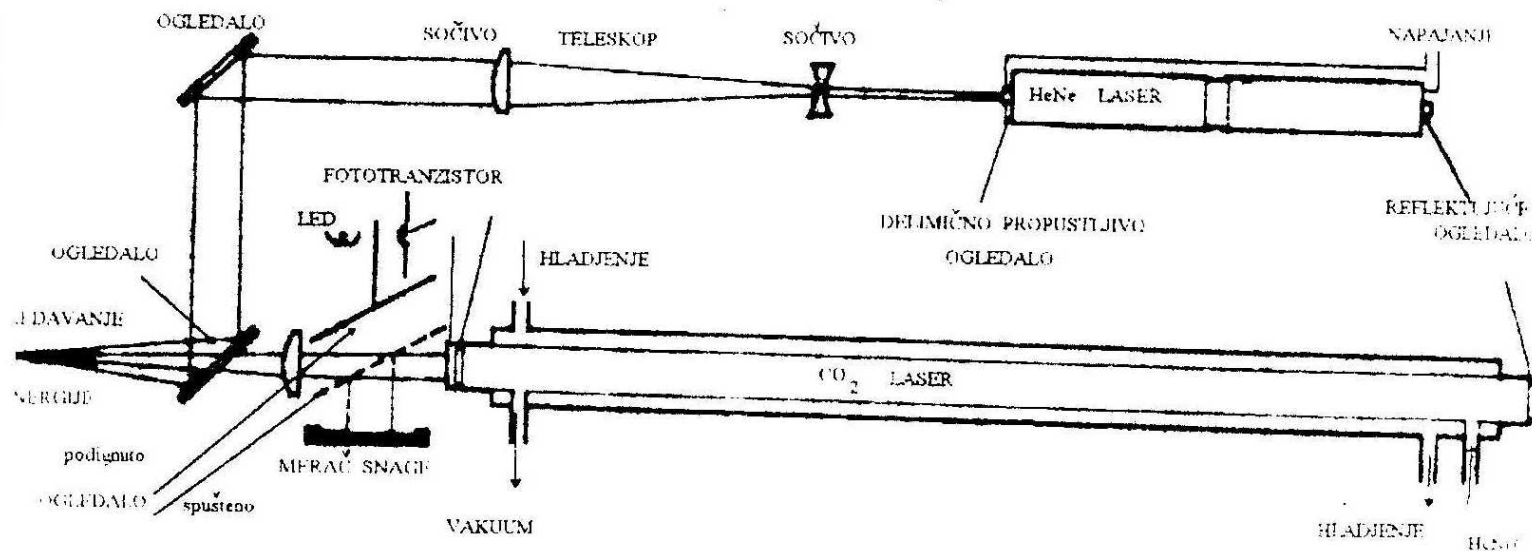
VRSTE LASERA I PRIMENA U MEDICINI

U slučaju ovog He-Ne lasera, dve elektrona u atomu helijuma imaju ili paralelne ili antiparalelne spinove. Ovi atomi u sudarnom procesu sa neonom pobudjuju neonske atome. Vraćanjem neona u nepobudjeno stanje emituje se koherentna svetlost. Energija zračenja je mala (reda mW), a mogu da rade na različitim učestanostima.



VRSTE LASERA I PRIMENA U MEDICINI

S obzirom da do koagulacije tkiva dolazi na relativno niskim temperaturama (manje od 100 °C), ne dolazi do oštećenja okolnog tkiva. CO₂ laser radi sa mešavinom ugljen dioksida, azota i helijuma. Ugljen dioksid je aktivni medijum. Efikasnost CO₂ lasera je oko 15%, i ovde treba hladiti sistem (vodom).

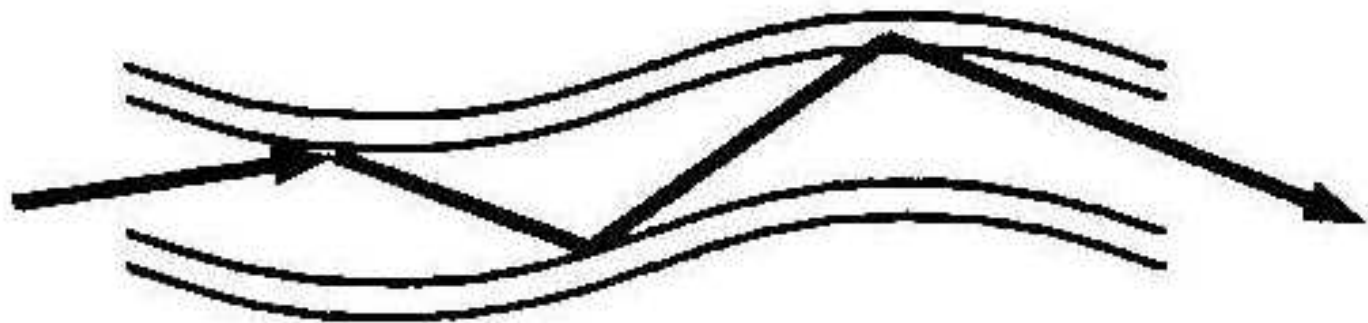


SVETLOVODNA OPTIKA

Refleksija i totalna refleksija su osnova svetlovodne optike. Ona je napravila revoluciju u telekomunikacijama, ali ima važnu primenu i u medicinskoj dijagnostici za direktno posmatranje nekih unutrašnjih šupljina u organizmu nedostupnih ljudskom oku. Vizuelna tehnika koja se bavi ispitivanjem zidova prirodnih šupljina u organizmu čoveka naziva se *endoskopija*, a aparat koji služi u te svrhe *endoskop*.

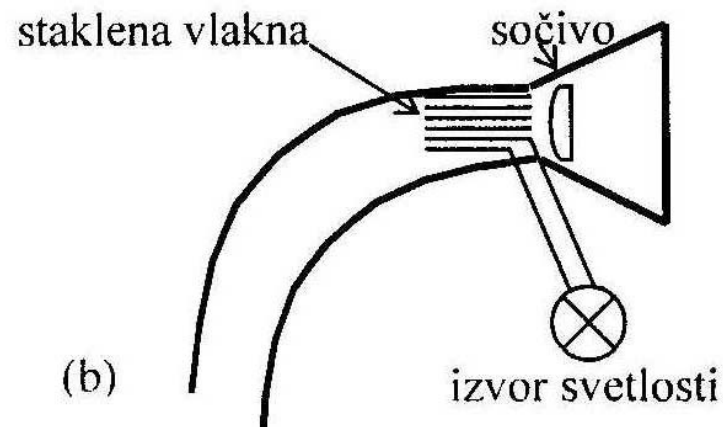
SVETLOVODNA OPTIKA

Osnovni deo endoskopa je svežanj od oko 200.000 elastičnih staklenih vlakana koja formiraju optički kabl. Tipično vlakno se sastoji od staklenog jezgra dijametra $8\ \mu\text{m}$, omotanog staklenim materijalom manjeg indeksa prelamanja u odnosu na jezgro. Svetlosni snop koji ulazi u vlakno totalno se reflektuje više puta na granici jezgra i omotača i stiže na drugi kraj vlakna praktično neizmenjen.



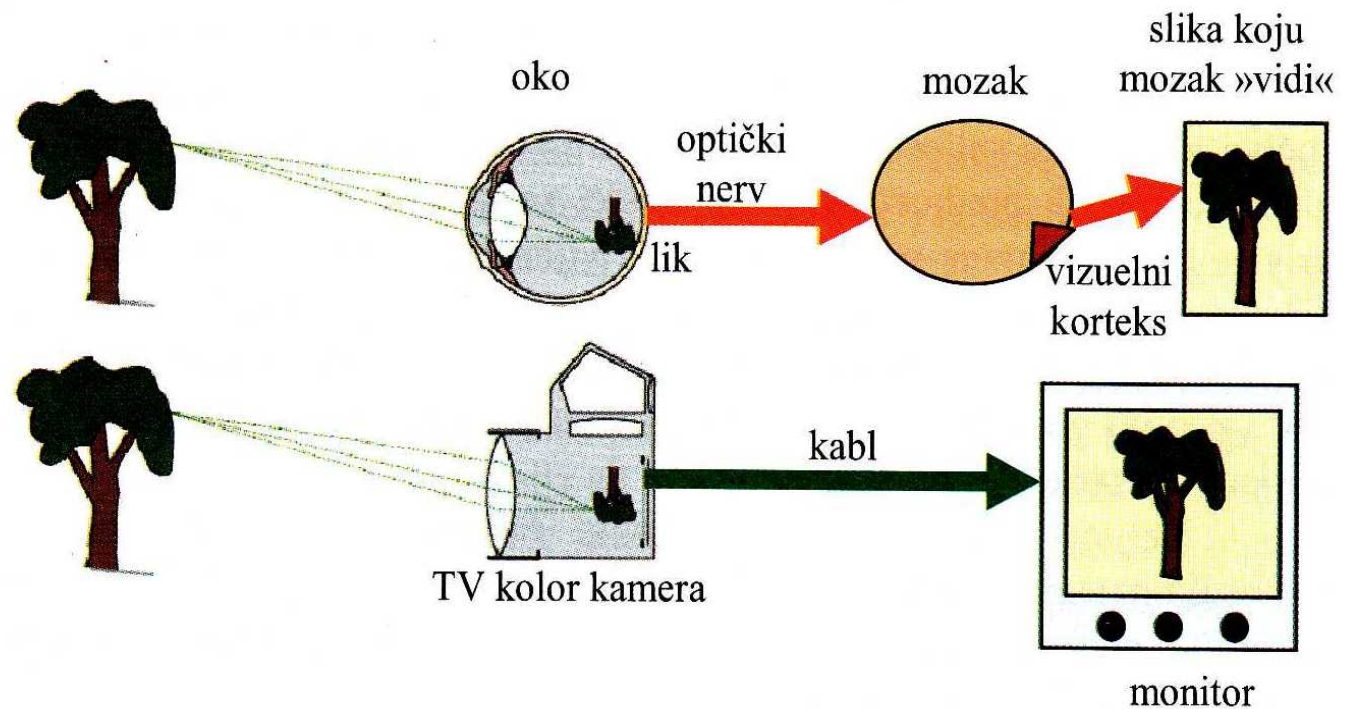
SVETLOVODNA OPTIKA

Endoskopi su napravljeni od svetlovodnog kabla, kome su dodati izvor svetlosti i sočivo (okular). Sve to se nalazi u dugačkim metalnim cevima dijametra 3-5 mm. Svetlost putuje prema posmatranom objektu spoljnim delom svežnja vlakana, difuzno se reflektuje na objektu i vraća unutrašnjim delom svežnja. Svako vlakno nosi sliku jednog detalja objekta, što znači da se slika dobija u vidu mozaika. Veća gustina vlakana daje oštriju sliku posmatrane površine.



OPTIČKI SISTEM OKA

Optički sistem oka sa vidnim putevima sličan je kameri sa pridruženim delovima. Na slici je dat uporedan šematski prikaz funkcionisanja oka i TV kamere. I jedan i drugi sistem sastoji se iz sledećih celina:



OPTIČKI SISTEM OKA

- Sistem sočiva kroz koje prolaze i prelamaju se svetlosni zraci,
- Dijafragma sa uskim kružnim otvorom, odnosno zenica, koja reguliše količinu primljene svetlosti,
- Mračna komora sa negativom, koji u oku predstavlja mrežnjača, koja prima svetlosne nadražaje,
- Optički nervi (kabl koji povezuje kameru sa monitorom), preko kojih se prenose svetlosni nadražaji ka vidnim centrima u mozgu; slika koju mozak "vidi" je obrnuta u odnosu na lik predmeta u oku i odgovara realnom predmetu.

