

Laseri, fotonski snopovi

Hrvoje Skenderović, Institut za fiziku, Zagreb, hrvoje@ifs.hr

1.Uvod

1.1 Svjetlost

Svjetlost je stara koliko i svemir, i ona putuje kroz prostor još od “velikog praska”. Za vedrih noći na nebu se može vidjeti svjetlost koja je emitirana prije više od dva milijuna godina. Ipak, svjetlost koju stvaramo umjetno bit će iskorištena u malom djeliću mikrosekunde od trenutka svog stvaranja. Na taj način, čini se da je svjetlost i vječna i prolazna. U svakom slučaju svjetlost je intrigirajuća pojava, a njena priroda je stoljećima predstavljala enigmu.

Jedan od prvih ljudi koji si je dao u zadatak rješavanje te enigme je bio grčki filozof *Empedokle*, (490 – 435 pr. K.), koji je prvi primjetio da svjetlost ima konačnu brzinu gibanja.

Puno vremena kasnije, 1666. godine svestrani znanstvenik Isaac Newton je u svom velikom radu *Optika* detaljno opisao svoje eksperimente sa svjetlošću i zaključke do kojih je došao o prirodi svjetlosti. Prema Newtonu svjetlost se ponaša kao da se sastoji od bestjelesnih čestica koje putuju brzinom svjetlosti.

Postoje razne vrste čestica koje odgovaraju različitim bojama u spektru, i sve se gibaju u praznom prostoru. Opisao je razlaganje bijele svjetlosti na boje pomoću prizme i zaključio da se pri razlaganju bijele svjetlosti javljaju posebne boje koje se uvijek prostiru od plave na jednom kraju do crvene na drugom.

Boja , frekvencija i valna duljina svjetlosti, tipične vrijednosti			
	Frekvencija /10 ¹⁴ Hz	Valna duljina / nm	Energija fotona/ 10 ⁻¹⁹ J foton ⁻¹
ULTRALJUBIČASTA	10	300	6.6
VIDLJIVA SVJ.			
ljubičasta	7.1	420	4.7
plava	6.4	470	4.2
zelena	5.7	530	3.7
žuta	5.2	580	3.4
narančasta	4.8	620	3.2
crvena	4.3	700	2.8
INFRACRVENA	3.0	1000	1.9

Iako je Newton opisao i pojavu Newtonovih prstenova koja može poslužiti kao dobar primjer valne prirode svjetlosti, tvrdoglavo je ustrajao na tvrdnji o korpuskularnoj prirodi svjetlosti. Drugo shvatanje o prirodi svjetlosti zastupao je Christian Huygens koji je svjetlost shvatao kao valove. Govoreći o valu moramo razlikovati širenje vala od gibanja čestica materije kroz koje čine materijalnu sredinu kroz koju se val prostire. Vodene čestice kod vodenog vala gibaju se gore i dolje dok se val pruzrokovao bačenim kamenom u vodu širi radijalno od mjesta izvora.

Odlučujuću potvrdu o valnoj prirodi pružili su eksperimenti Thomasa Younga iz 1803. godine. o ogibu (difrakciji) svjetlosti. Kasniji radovi Fressnela i posebno teorija elektromagnetizma Jamesa Clerk-

Maxwella definitivno su doprinjeli uvjerenju da je svjetlost valne prirode. Maxwell je pokazao da se svjetlosna energija prenosi u obliku oscilirajućeg električnog i magnetskog poremećaja koji se može širiti kroz prazan prostor.

Elektromagnetski valovi su transversalni, što znači da je pravac titranja polja okomit na pravac prostiranja vala. Zvučni valovi su longitudinalni, odnosno titraju naprijed natrag u smjeru širenja. Razlika između zvučnih valova i svjetlosnih je i u tome da je za zvučne valove neophodan materijalni medij u kojemu se šire. Vidljiva svjetlost, skupa s infracrvenim i ultraljubičastim zračenjem predstavlja optički dio elektromagnetskog spektra.

1.2. Fotoni

I pored velikih uspjeha Maxwellove teorije polja jedan problem je ostao nerazjašnjen: zračenje crnog tijela. Ukratko; zagrijano tijelo emitira elektromagnetsko zračenje (ova emisija je temelj svjetlosti koje dobivamo iz žarne niti ili sa sunca). Na visokim temperaturama znatni dio ovog zračenja se pojavljuje u vidljivom dijelu spektra i što je viša temperatura tijela koje zrači veći je udio plavog dijela spektra u ukupnom zračenju. Ovu pojavu možemo učiti pri grijanju komada željeza. Povećanjem temperature užareno željezo se žari crvenom bojom a potom postaje sve više bijelo. Bijelu svjetlost opažamo jer se povećava udio plave svjetlosti pri grijanju, pa se dobiva vizualni utisak bijeloga. Ova pojava je opisana Wienovim zakonom pomaka (1893.) koji kaže da se s porastom temperature spektralno područje na kojem se nalazi maksimum zračenja pomiče prema kraćim valnim duljinama. Zračenje crnog tijela je pokušano biti objašnjeno kao zračenje beskonačno mnogo elektromagnetskih oscilatora koji zrače na svim mogućim frekvencijama. Neuspjeh klasične teorije u objašnjenju raspodjele zračenja crnog tijela poznat je pod imenom ultraljubičasta katastrofa.

Njemački fizičar Max Planck je 1900. uspio dobiti zakon koji je opisivao zračenje crnog tijela i odlično se slagao s eksperimentalnim opažanjima. U tome je uspio postulirajući dvije pretpostavke:

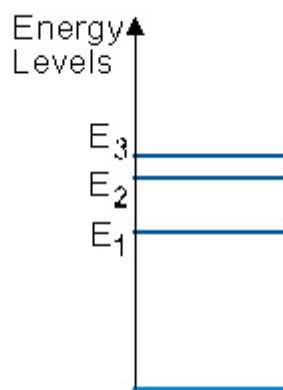
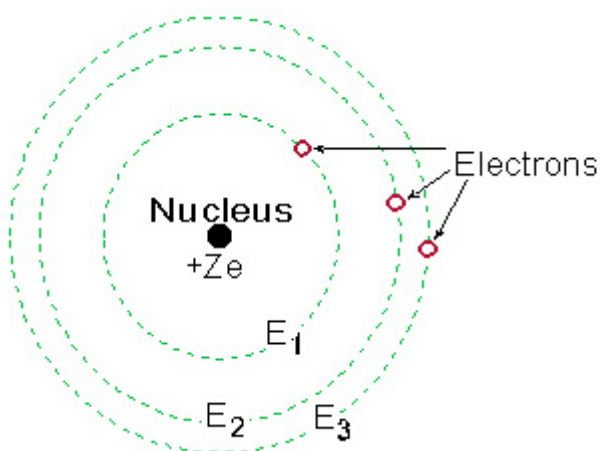
1. Energija elektromagnetskih oscilatora može se mijenjati samo za određeni, diskretni iznos, odnosno u **kvantima energije**.
2. Energija oscilatora s frekvencijom ν može se mijenjati samo za **cjelobrojni** iznos umnoška frekvencije i konstante h , $\Delta E = n h \nu$, gdje je n cijeli broj.

Razlog uspješnosti Planckovog modela je u sljedećem. U klasičnoj predodžbi svi elektromagnetski oscilatori su pobuđeni, čak i oni s velikom frekvencijom i tako se emitira i odgovarajući kratkovalni dio spektra. Prema kvantnoj predodžbi oscilator je pobuđen samo ako može primiti energiju najmanje jednaku $h\nu$. Na određenoj temperaturi ovaj minimum je suviše visok za pojedine visokofrekventne oscilatore, drugim riječima nema dovoljno energije u sustavu da bi ovi oscilatori bili pobuđeni. Na taj način visokofrekventni oscilatori ostaju nepobuđeni i veoma kratki valovi se ne emitiraju. Time je izbjegnuta ultraljubičasta katastrofa.

Planckova kvantizacija elektromagnetskog oscilatora dovela je do alternativnog gledanja na zračenje. Sada je moguće gledati na zračenje frekvencije ν kao na skupinu čestica s energijama $h\nu$. Ove čestice je kemičar G. N. Lewis prvi nazvao **fotonima**. Einstein je 1905. godine uspješno objasnio fotoelektrični efekt pomoću koncepta fotona, što mu je donijelo i Nobelovu nagradu. Ako svjetlost zamislimo kao val ne možemo objasniti fotoelektrični efekt, ako je zamislimo kao pljusak fotona energije $h\nu$, sve se slaže. Međutim, revitalizirajući Newtonovu čestičnu sliku, Einstein nije odbacio valnu sliku svjetlosti. Suština njegovog pogleda je u tome da se neke svjetlosne pojave mogu objasniti pomoću valne slike, ali neke druge pomoću čestične slike. Einsteinova interpretacija fotoelektričnog efekta je omogućila eksperimentalno određivanje vrijednosti Planckove konstante h , do tada nepoznate. Mulliken je 1915. uspio odrediti Planckovu konstantu za što je dobio Nobelovu nagradu.

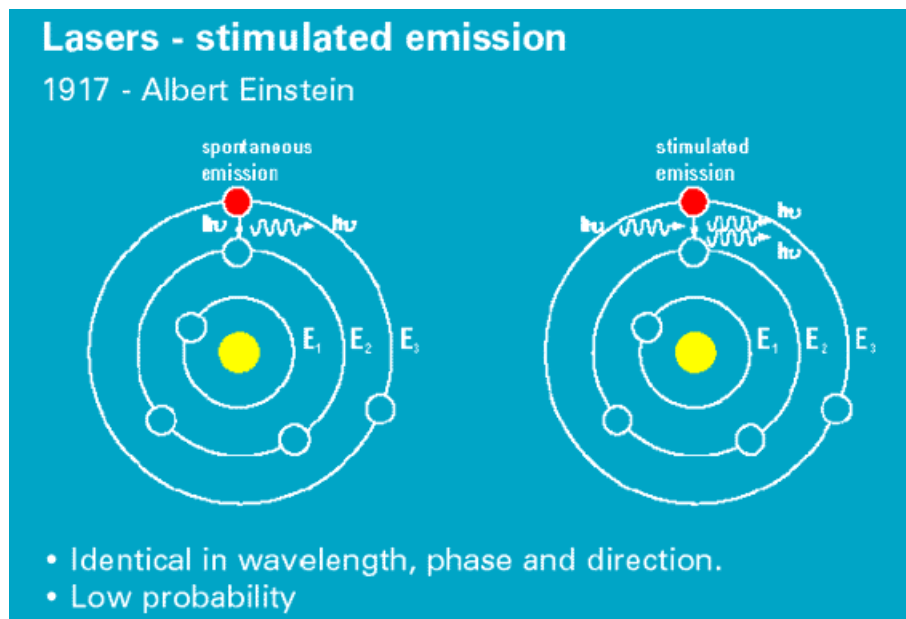
<i>Svjetlost opisana valnom i kvantnom teorijom</i>	
Valna teorija	Kvantna teorija
<i>Vidljivi spektar sadrži valove promjenljivih valnih duljine</i>	<i>Vidljivi spektar sadrži fotone različitih energija</i>
<i>Valna duljina crvenog kraj spektra je dva puta veća od valne duljine ljubičastog kraja</i>	<i>Energija fotona crvenog kraja spektra jednaka je polovici energije fotona ljubičastog kraja</i>
<i>Monokromatsko zračenje ima istu valnu duljinu</i>	<i>Monokromatsko zračenje sastoji se od fotona jednake energije</i>
<i>Svjetlosna energija određenog zračenja je srazmjerna kvadratu amplitude vala</i>	<i>Svjetlosna energija određenog zračenja je srazmjerna broju fotona i frekvenciji zračenja</i>

Proširujući kvantnu teoriju na strukturu materije, Bohr je 1913. predložio model atoma u kojemu su



elektroni u atomu raspoređeni po nizu diskretnih energetske stanja. Prijelaz elektrona iz jednog stanja u drugo može biti praćen emisijom ili apsorpcijom fotona. Pri tome energija fotona odgovara energijskoj razlici ta dva stanja. Bohrov model

predviđa samo proces *spontane emisije*, odnosno, atom u pobuđenom stanju, nakon nekog vremena, zračenjem fotona atom prelazi u u niže energetske stanje.



Einstein je 1917. u svome članku o kvantnoj teoriji zračenja uveo pretpostavku o mogućnosti **stimulirane** emisije. Stimulirana emisija je proces kada atom iz pobuđenog stanja prelazi u niže energetske stanje potaknut nazočnošću fotona koji ima upravo energiju jednaku razlici dva atomska stanja između kojih se događa

prijelaz. Pri tome atom emitira foton iste energije kao što je i upadni foton i istog pravca. Uz pretpostavku stimulirane emisije, Einstein je uspio izvesti Planckov zakon zračenja (do na multiplikativni faktor). Time je dokazao da takav proces doista postoji, a eksperimentalno je pokazana tek 1928. godine od Ladenburga. Potom je za dugi niz godina ovaj fenomen van interesa.

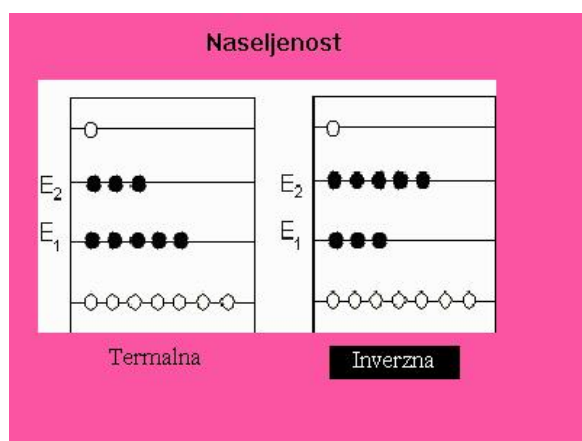
2. Stimulirana emisija, laseri

2.1 Stimulirana emisija

Stimulirana emisija je rijedak događaj zbog iste termodinamičke činjenice zbog koje je spontana emisija moguća: svaki sustav teži da zauzme minimum energije. U normalnoj situaciji, tj. elektrodinamičkoj ravnoteži naseljenost viših stanja opada s porastom energije stanja. To znači da će nadolazeći foton

vjerojatnije biti apsorbiran od donjeg stanja nego što će stimulirati atom u gornjem stanju da izrači foton. Pod ovakvim uvjetima spontana emisija dominira nad stimuliranom.

Da bi se dogodila stimulirana emisija potrebna je inverzija naseljenosti: Naseljenost gornjeg nivoa određenog prijelaza mora biti veća od naseljenosti donjeg nivoa. Tada je vjerojatnost da će nadolazeći foton inducirati stimuliranu emisiju biti veća od vjerojatnosti da će biti apsorbiran. Rezultat će biti pojačanje u svjetlosti,



odnosno povećani broj fotona s energijom prijelaza. Na ovoj ideji se zasniva rad lasera. Laser je akronim za *pojačanje svjetlosti pomoću stimulirane emisije zračenja*.

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

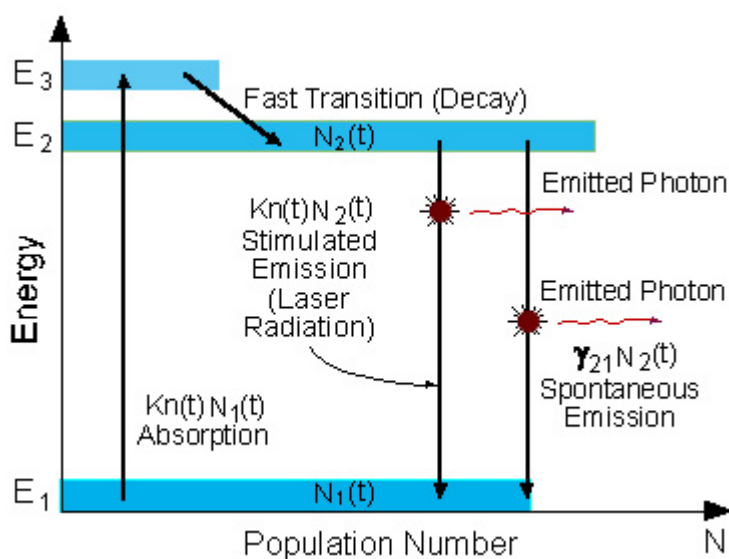
2.2. Princip rada lasera

Svaki laser se sastoji od tri glavna dijela: *Optičkog pojačala, optičkog rezonatora i energetske pobude sustava*.

Optičko pojačalo je zapravo medij u kojem se pojačava laserska svjetlost pri svakom prolazu. U aktivnom mediju pumpanjem iz vanjskog izvora energije postiže se inverzija naseljenosti između gornjeg i donjeg nivoa čiji prijelaz daje laserski snop. Postoje mnogi rasporedi energetske nivoa koji mogu osigurati

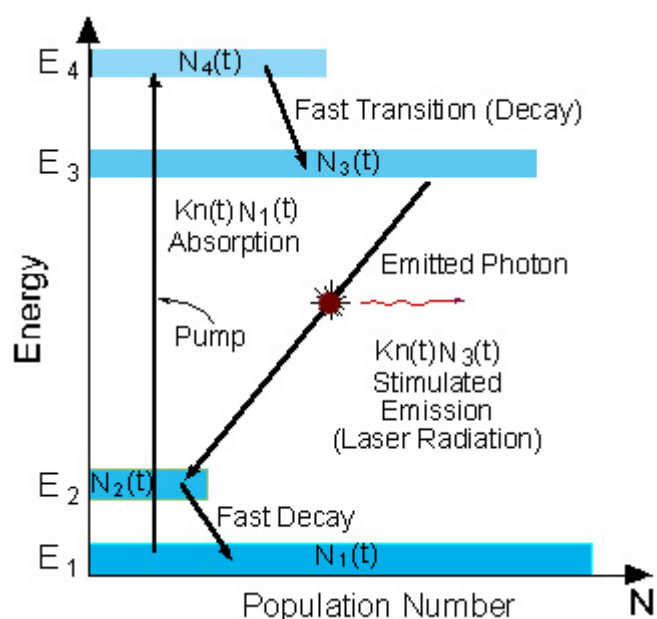
lasersko djelovanje. Opisat ćemo ukratko laser s tri nivoa i laser s četiri nivoa.

Kod sheme s tri nivoa, laserska svjetlost nastaje pri prijelazu s nivoa E_2 na nivo E_1 koji je je ujedno i osnovni nivo. Atomi se pumpaju na visokopobuđeni nivo E_3 s osnovnog nivoa. Na tome nivou ostaju u prosjeku 10^{-8} sekundi i potom prelaze (obično neradijativnim putem) na nivo E_2 koji je metastabilan. Budući da je vrijeme života metastabilnog nivoa relativno dugo, (reda veličine 10^{-3} sekundi) mnogo atoma ostaje u tome stanju. Ukoliko je pumpanje



dovoljno snažno, nakon jednog pulsa pumpanja više od 50% atoma će biti u stanju E_2 i lasersko djelovanje se može odvijati.

Laser s četiri energetska nivoa ima dodatni energetski nivo iznad osnovnog stanja. Ovaj dodatni nivo ima veoma kratko vrijeme života, odnosno donji nivo laserskog prijelaza se veoma brzo prazni što olakšava održanje inverzne naseljenosti. Zbog toga za lasersko djelovanje uz ovakvu shemu nisu potrebne velike snage pumpanja kao kod sustava s tri nivoa. Kod sustava s četiri nivoa moguće je lasersko djelovanje i kad se većina atoma nalazi u



osnovnom stanju. Zato se ovakva shema primjenjuje kod lasera koji rade u kontinuiranom režimu.

Drugi glavni dio svakog lasera je optički rezonator. Tipično se laserski rezonator sastoji od dva paralelna skoro ravna zrcala. Jedno od zrcala ima refleksivnost što bliže 100% za lasersku svjetlost, dok je refleksivnost drugoga nešto manja od 100% kako bi dio svjetlosti izišao van i tako tvorio laserski snop. Samo ona svjetlost koja putuje skoro okomito na zrcalnu ravninu ostaje unutar rezonatora i ima priliku da bude pojačana. Da bi takva svjetlost konstruktivno interferirala mora biti zadovoljen uvjet da je duljina rezonatora jednaka cjelobrojnom umnošku polovice valne duljine svjetlosti. Za različite vrijednosti cijelog broja m dobivaju se različite valne duljine, odnosno frekvencije pojedinih *modova* laserskog rezonatora. Zbog toga spektralni laserskog svjetla izgleda kao serija uskih vršaka koji su međusobno razmaknuti za $c/2L$ na frekventnom spektru, gdje je c brzina svjetlosti, a L razmak između zrcala.

Kao energetska pobuda medija može poslužiti apsorpcija fotona, sudari između elektrona ili iona i aktivnih molekula odnosno atoma koji emitiraju lasersko svjetlo, sudari između samih aktivnih atoma odnosno molekula, rekombinacija slobodnih elektrona, rekombinacija nositelja naboja u poluvodiču, kemijska reakcija koja stvara pobuđene molekule ili atome.

Na kraju, možemo ponoviti kako dolazi do laserskog svjetla. Vanjska pobuda dovede do inverzije naseljenosti u aktivnom mediju. Ovi atomi spontano emitiraju fotone koji zatim induciraju stimuliranom emisijom dodatne fotone. Neki od ovih fotona se vraćaju u medij djelovanjem rezonatora i stvaraju lavinu fotona u istom pravcu. Konačno se stvara ravnotežno stanje u kojemu veliki broj fotona putuje naprijed-natrag u rezonatorskoj šupljini po osi, dok mali dio fotona izlazi kroz zrcalo i daje laserski snop.

2.3. Karakteristike laserskog svjetla

Laseri su korisni zbog svojih jedinstvenih karakteristika, **monokromatičnosti, usmjerenosti, velikog sjaja i velike koherencije.**

Pod monokromatičnošću lasera podrazumijevamo da laser emitira skoro samo jednu valnu duljinu. Dok je spektralna širina zračenja dobivena spontanom emisijom s jednog prijelaza reda veličine $10^{-12} - 10^{-10}$ m, kod laserskog svjetla širina može biti i tek 10^{-20} m. Ovakva mala širina je posljedica činjenice da laserski rezonator može osigurati da skoro sva svjetlost dolazi stimuliranom emisijom koja potječe od svega nekoliko početnih, sličnih fotona.

Budući da je skoro sva laserska svjetlost rezultat fotona koji putuju po pravcu paralelnom s osi rezonatora u osnovi bi laserski snop trebao biti savršeno kolimiran. Međutim, snop se širi zbog difrakcije jer je transverzalna dimenzija rezonatora konačna. Tipični kutovi divergencije laserskog snopa su manji od 1 miliradiana odnosno 0.05° .

Spektralni sjaj je optičko svojstvo koje je ujedno mjera monokromatičnosti i usmjerenosti izvora svjetlosti. Spektralni sjaj je definiran kao svjetlosna snaga izračena u jedinični prostorni kut u jedinični valni interval po jediničnoj površini. Možemo usporediti spektralni sjaj sunca i tipičnog He-Ne lasera. Na tipičnoj vidljivoj valnoj duljini od 500 nm, spektralni sjaj sunca iznosi $7 \cdot 10^{12} \text{ Wm}^{-3}\text{sterad}^{-1}$. Spektralni sjaj 1mW He-

Ne lasera na valnoj duljini 632,8 nm koji daje snop promjera 0,5 mm iznosi $5 \cdot 10^{23} \text{ Wm}^{-3}\text{sterad}^{-1}$, znači 10 milijardi više od sunčevog.

Koherencija se definira kao mjera korelacije faza između različitih točaka vala. Iako je to osobina putujućeg vala, koherencija je direktno vezana uz osobine izvora vala. Slikovito se koherencija može shvatiti uz pomoć slike dva čepa koji plutaju na površini vode. Neka je izvor valova kamen bačen u vodu daleko od čepova. Tada ćemo imati savršenu korelaciju u gibanju dva čepa. Oni ne moraju biti u fazi, odnosno jedan se može gibati gore dok drugi ide dolje, ali će relativna faza između položaja dva čepa u vremenu ostati konstantna. Ovdje imamo savršenu koherenciju jer je izvor točkasti. Zamislimo sada da su izvori valova kišne kapi koje nasumce padaju na vodu. Val je u svakoj točki superpozicija valova nastalih od svih kišnih kapi. Budući da kišne kapi nasumce pogađaju različita mjesta na vodi u nasumičnim vremenskim trenucima, ne možemo očekivati da će faza vala na jednom mjestu biti korelirana s fazom na drugom mjestu. Čepovi sad skaču gore dolje bez ikakvog međusobnog odnosa u njihovim gibanjima. U ovom slučaju izvor valova je jako nekoherentan.

Žarulja sa žarnom niti je vrlo nekoherentan izvor svjetla. Od nje možemo načiniti koherentniji izvor stavljajući prostorni i kromatski filter. Međutim, na taj način odbacujemo veoma veliki dio svjetla. Kao mjera prostorne koherencije služi koherentna duljina. Koherentna duljina je maksimalna udaljenost između dvije točke po pravcu prostiranja snopa, za koju su te dvije točke u konstantnom faznom odnosu. Duljina koherencije za He-Ne laser može iznositi od 10 cm do 100 m, dok je duljina koherencije tipičnog termalnog izvora oko 1 mikrona.



3. Vrste lasera

VRSTA LASERA	VALNO PODRUČJE	VALNA DULJINA
<i>Ekscimerski plinski laseri</i>		
<i>Argon Fluorid</i>	UV	193 nm
<i>Kripton klorid</i>	UV	222 nm
<i>Kripton Fluorid</i>	UV	248 nm
<i>Ksenon klorid</i>	UV	308 nm
<i>Ksenon fluorid</i>	UV	351 nm
<i>Plinski laseri</i>		
<i>Dušikov</i>	UV	337 nm
<i>Helij kadmij</i>	UV	325 nm
	Ljubičasto	441 nm
<i>Argonski</i>	Plavo	488 nm
	Zeleno	514 nm
<i>Kriptonski</i>	Plavi	476 nm
	Zeleni	528 nm
	Žuti	568 nm
	Crveni	647 nm
<i>Ksenonski</i>	Bijelo	Multimodan
<i>Helij neon</i>	Crveno	633 nm
	NIR	1152 nm
	MIR	3390 nm
<i>Ugljični dioksid</i>	FIR	10600 nm
<i>Laser s metalnim parama</i>		
<i>Bakreni</i>	Zeleno	510 nm
	Žuto	570 nm
<i>Zlatni</i>	Crveno	627 nm
<i>Laseri čvrstog stanja</i>		
<i>Duplicirani Nd:YAG</i>	Zeleno	532 nm
<i>Nd:YAG</i>	NIR	1064 nm
<i>Erbium:YAG</i>	MIR	2940 nm
<i>Krom safir (Rubinski)</i>	Crveno	694 nm
<i>Titan safir</i>	NIR	840 – 1100 nm
<i>Poluvodički laseri</i>		
<i>Galij arsenid</i>	NIR	840 nm
<i>Galij aluminij arsenid</i>	Crveno/NIR	635 – 830 nm

Literatura:

Jeff Hecht, The Laser Guidebook, McGraw-Hill, 1992.

Peter Milonni, Joseph Eberly, Lasers, Wiley, 1988.

P. W. Atkins, Physical Chemistry, Oxford University Press 1992.

A. Roy Henderson, A Guide to Laser safety, Chapman & Hall 1997.

Leopold Infeld, Albert Einstein, His Work, and its Influence to Our World, 1963.

A. Einstein, Physikalische Zeitschrift **18**, 121, 1917.

<http://lightcraft.mech.e.rpi.edu/Research/LaserPropulsion/>

<http://www.ilt.fhg.de/e/lasertutorial/>

<http://www.rli.com/tutor1.html>

<http://www.reed.edu/~rsavage/contents.html>