

LASERJI IN OPTIČNA PREKRITJA ZA LASERJE

A. Demšar, M. Lukač, Iskra Elektrooptika Ljubljana d.d., Stegne 7, 61210 Ljubljana

LASERS AND OPTICAL COATINGS FOR LASERS

ABSTRACT

Laser is becoming more and more indispensable in every day life. In this article, basic laser characteristics are described. Resonator is one of the important components of any laser. It consists of two mirrors (one highly reflective and one partially transmitting) which are manufactured using vacuum technologies to achieve the best durability and laser damage resistance.

POVZETEK

Laser postaja vedno bolj nepogrešljivo človekovo orodje. Članek opisuje osnove delovanja laserja. Pomemben del laserja je resonator, ki ga sestavljata dve zrcali narejeni z vakuumskimi tehnologijami tako, da sta čimbolj odporni na lasersko sevanje.

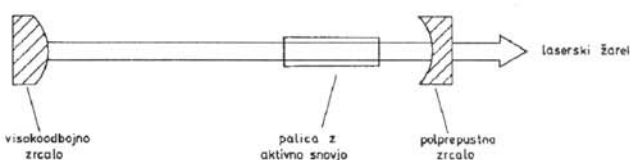
1 Uvod

Beseda "laser" je akronim za "light amplification by stimulated emission of radiation". Princip laserskega delovanja je izšel iz delovanja maserja, ki je ponovno akronim in sicer za "microwave amplification by stimulated emission of radiation". Pojem stimulirane emisije je uvedel Einstein, ko je leta 1917 izpeljal Planckov sevalni zakon. Potrebno je bilo kar 40 let od vpeljave tega zakona, da so raziskovalci spoznali, da se pojav stimulirane emisije lahko uporabi za izvir koherentnega mikrovalovnega in laserskega sevanja.

Maser so prvi predlagali Basov ter Prokhorov (1945-1955) in Townes (1954), ki je tudi prvi izvedel poskuse z maserjem. Razširitev maserskega principa v optično območje sta leta 1958 izpeljala Schawlow in Townes, ki sta za to delo tudi dobila Nobelovo nagrado. Pravzaprav pa je prvi predlagal uporabo stimulirane emisije že V.A. Fabrikant leta 1951. Toda, ker je bil predlog zapisan v ruskem patentu, je bil nepoznan. Danes si težko zamislimo področje našega življenja, ki ne bi bilo povezano z določeno vrsto laserja; postal je nepogrešljiv v znanosti, medicini, trgovini, komunikacijah in zabavi.

2 Laser: zgradba in delovanje /1/

V najpreprostejši izvedbi je laser naprava, sestavljena iz dveh zrcal (resonatorja), med katerima je aktivna snov, ki ojačuje svetlobo (slika 1). Curek laserja se odlikuje po tem, da je usmerjen - je prostorsko koherenten - in da ima izredno majhno spektralno širino - je časovno koherenten.



Slika 1: Preprosta shema laserja

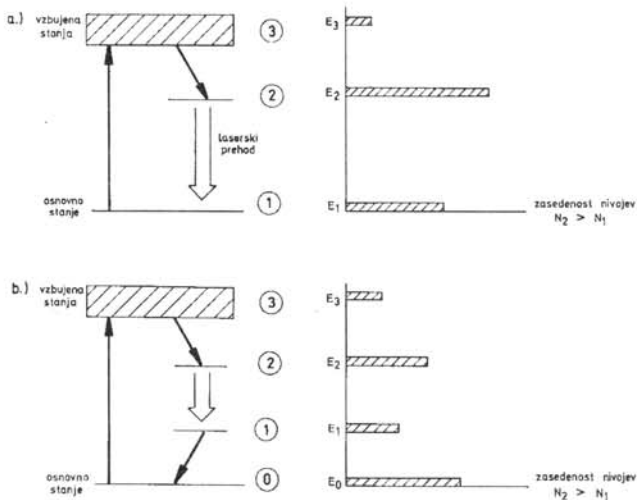
Resonatorji so votline, v katerih lahko nastane stoječe valovanje. Pri maserjih so votline reda velikosti valovne dolžine mikrovalov (torej nekaj centimetrov) in je v njih le nekaj vozelnih ploskev. Pri laserski svetlobi, kjer je valovna dolžina reda velikosti enega mikrometra, je ustrezno velika votlina premajhna, da bi vanjo spravili uporaben optični ojačevalnik. Navadno je potrebno vsaj nekaj centimetrov. V tako velikem resonatorju bi atomi, ki sevajo v frekvenčni pas 10 GHz, ojačevali okoli 10^{10} nihanj. Da dobimo koherenten izvir, pa moramo ojačevati le eno nihanje resonatorja. Če odstranimo stranske stene resonatorja, tako da ostane le dve vzporedni zrcali, so mogoča le še stoječa valovanja, ki so pravokotna na zrcali. Razdalja L med zrcaloma mora biti enaka večkratniku polovice valovne dolžine, tako da so mogoče frekvence $\nu = n c/2L$. Tukaj je c hitrost svetlobe in n je celo število, ki je navadno precej veliko, na primer 10^6 . Frekvenčni razmik med sosednjima nihanjima $c/2L$ je iste velikostne stopnje kot širina črte atomskih prehodov in je zato mogoče ojačevati posamezno lastno nihanje odprtega resonatorja.

Če naj imamo med zrcaloma stoječe valovanje, mora biti valovna ploskev po odboju taka kot pred njim. To pomeni, da mora imeti na zrcalu enako ukrivljenost kot zrcalo samo. Ker so valovne ploskve valovanja, ki je v prečni smeri omejeno, v splošnem ukrivljene, so tudi zrcala laserskih resonatorjev navadno nekoliko ukrivljena. Krivinska radija in razdalja med zrcaloma že določajo obliko stoječega valovanja. Divergenca izhodnega curka nastane zaradi uklona in je tem manjša, čim večji je premer curka a_0 v resonatorju. Velja divergenca $\vartheta = \lambda/a_0$, kjer je λ valovna dolžina laserske svetlobe.

Za delovanje laserja so zelo pomembne energijske izgube v resonatorju. Te izvirajo deloma od nezaželene absorpcije in sipanja na zrcalih in v resonatorju, deloma pa od tega, ker je eno od zrcal namenoma delno prepustno. Laser, ki bi imel obe zrcali povsem neprepustni, bi bil zaradi odsotnosti izhoda nekoristen. Vse izgube lahko opišemo s karakterističnim časom t_c , v katerem pade energija stoječega valovanja na $1/e$ začetne vrednosti, če mu ne dovajamo energije. Za energijo stoječega vala, ki ga vzbudimo in nato pustimo, da prosto zamre, velja $dW/dt = -W/t_c$. Če zanemarimo druge izgube, lahko čas dušenja izrazimo z odbojnostjo R izhodnega zrcala. Pri enem preletu vala čez resonator in nazaj (čas obhoda je $2L/c$) uide $(1-R)W$ energije. Delež izgub na enoto časa je zato $t_c = c(1-R)2L$. Za $R = 0,95$ in $L = 25\text{cm}$ je $t_c \approx 3 \times 10^{-8}\text{s}$. Dušenje določa tudi spektralno širino lastnega nihanja resonatorja. V navedenem primeru je ta 30 MHz.

Zamislimo si, da želimo narediti laser, ki bo deloval pri določeni valovni dolžini svetlobnega curka. Prvo kar moramo narediti je, da najdemo snov s takšno porazdelitvijo energijskih nivojev, da je energijska razlika ΔE med dvema nivojema (imenujemo ju zgornji laserski nivo 2 in spodnji laserski nivo 1) enaka $E_2 - E_1 = hc/\lambda$, kjer je h Planckova konstanta. Drugi pogoj je, da je možno doseči, da je zasedenost nivoja 2 večja od zasedenosti nivoja 1, torej, da je $N_2 > N_1$. Svetloba z valovno dolžino se v laserskem resonatorju lahko okrepi le, če je $(N_2 - N_1) > 0$. V termodinamskem ravnovesju je zasedenost zgornjega nivoja vedno manjša od spodnjega nivoja, zato snov v termodinamskem ravnovesju svetlobo absorbira. Da bi dosegli močnejšo svetlobo, moramo doseči ravno nasprotno, zato pogoj $(N_2 - N_1) > 0$ imenujemo inverzna zasedenost.

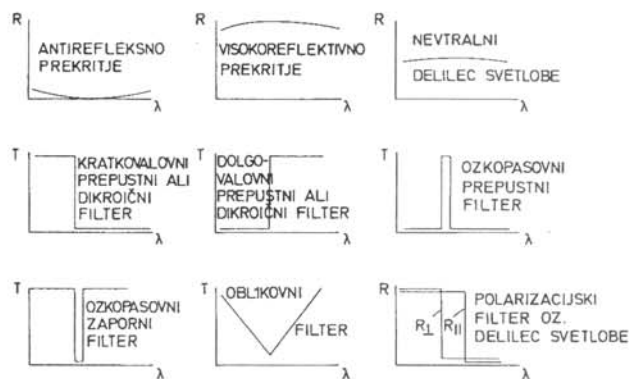
Snov, v kateri vzpostavljamo inverzno zasedenost v laserju, imenujemo aktivna ojačevalna snov. Zelo pogosto črpajo aktivno snov s svetlobo, katere frekvenca je večja od laserskega prehoda. Z absorpcijo se atomi vzbujajo v višja stanja, s katerih lahko zasedejo nižje lasersko stanje. Črpalno svetlobo dobimo na primer z močno ksenonsko lučjo, podobno onim, ki jih uporabljajo fotografi. Črpanje je neprekinjeno ali sunkovno, odvisno od zahtev in izbrane ojačevalne snovi. Ko vzpostavimo stanje, v katerem je $N_2 > N_1$, prevlada stimulirano sevanje nad izgubami v resonatorju. Energija izbranega stoječega valovanja začne naraščati in nastane lasersko delovanje (slika 2).



Slika 2: a) shema trinivojskega laserja, b) shema štirinivojskega laserja

3 Optična prekritja za laserje

Za uspešno delovanje laserja potrebujemo resonator, zanj pa potrebujemo visokoodbojna in polprepustna zrcala ter ustrezna antirefleksna prekritja; za uspešno delovanje sistema, v katerem je integralni del laser, pa rabimo še delilce laserskega snopa (polarizacijske, dikroične), filtre in zaščitna prekritja pred laserskim sevanjem (slika 3).



Slika 3: Shematični prikaz različnih prekritij

Kakovostne optične komponente za laserje [2,3] morajo imeti čim manjše izgube zaradi sipanja in absorpcije, ker se zaradi tega zmanjšuje izkoristek laserja in znižuje prag za poškodbe (še posebno pri tistih z velikimi močmi). Za izdelavo takih optičnih komponent (navadno narejenih iz različnih vrst stekla) moramo imeti vrhunsko tehnologijo za poliranje, čiščenje in vakuumsko nanašanje ustreznih prekritij, ki so večinoma dielektrična.

Kakovost optičnega prekritja - npr. laserskega zrcala - lahko določimo z dvema količinama: fineso F in učinkovitostjo η .

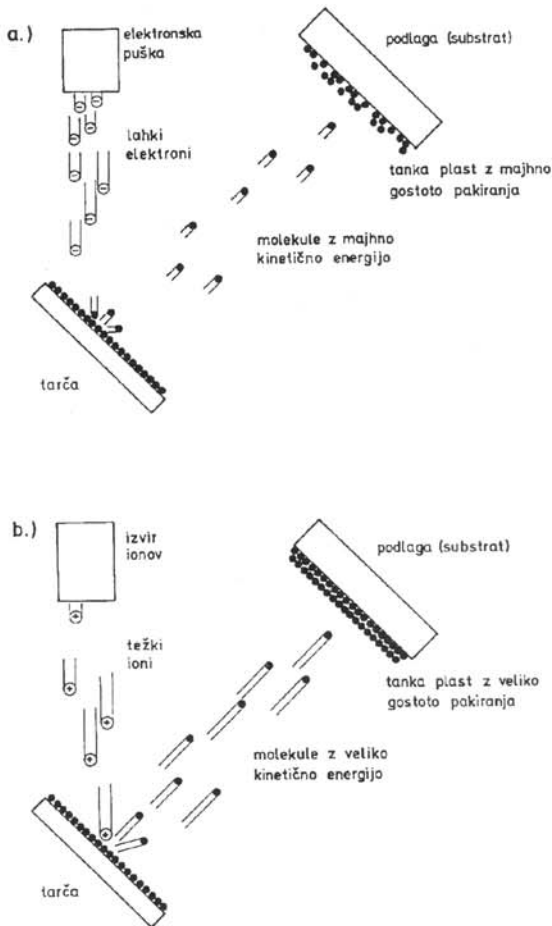
$$F = \pi / (1 - R)$$

$$\eta = (T / (T + A))^2$$

V zgornjih izrazih je R odbojnost, T prepustnost in A vpojnost.

Učinkovitost $\eta = 1$ pomeni, da prekritje nima izgub zaradi absorpcije. Finesa F pa je definirana kot povprečno število krožnih preletov fotona svetlobe v votlini - resonatorju predno se foton absorbira, siplje ali zapusti resonator. Tipično dielektrično zrcalo narejeno v vakuumu z elektronsko puško ima odbojnost $R > 99,7\%$ kar ustreza izgubam 3000 ppm. Boljša zrcala, narejena z drugačnimi tehnikami (na primer ion-beam sputtering, IBS), imajo izgube manjše kot 50ppm, kar pomeni ustrezno večjo (tudi 100x) fineso in odbojnost $R > 99,9\%$.

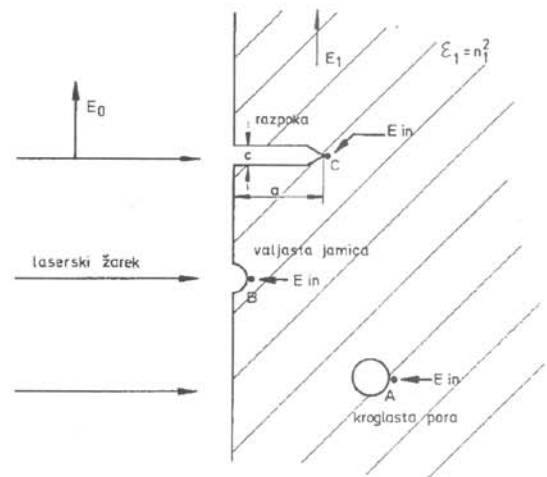
Pri klasičnem naparevanju z elektronsko puško segregiramo material z elektroni. Molekule, ki izparevajo, imajo relativno nizke energije (< 1 eV na molekulo) in s tem hitrosti. Molekule, ki prispejo, do substrata, se prilepijo nanj in zaradi njihove majhne površinske gibljivosti v nastajajoči plasti ostajajo praznine. Zrnata struktura plasti povzroča absorpcijo in sipanje ter posledično nižje pragove za laserske poškodbe. Pri novejših tehnologijah nanašanja tankih plasti (ion-beam sputtering, ion-plating) namesto elektronov prenašajo energijo na molekule, oz. pri tem pomagajo, ioni. V tem primeru imajo molekule višje energije (1-10eV), poveča se njihova gibljivost, ko se prilepijo na podlago in rastoča plast ima manj praznin. Dobimo bolj homogeno strukturo plasti, ki ima manjšo absorpcijo in sipanje ter seveda večji prag za laserske poškodbe (slika 4).



Slika 4: a) klasično naparevanje, b) nanašanje s pomočjo ionov

Osnovni vzrok za poškodbe prekritja [4], skozi katerega potuje laserski žarek, je kakovost polirane površine optičnega elementa na katerem je prekritje. Prag za poškodbe gole podlage laserske komponente je nižji od tistega za trden material. "Gladka" površina, ki jo dobimo z različnimi polirnimi postopki, je na mikroskopskem nivoju naključno posejana z razpokami, luknjami in ostanki polirnih smol ter materialov. Interakcija med laserskim električnim poljem in nepravilnostmi na površini povzroči ojačanje polja na teh mestih in s tem poškodbe površine zaradi absorpcije in/ali pospeševanja elektronov. Prekritje, ki ga nanese na tako površino, sledi obliki površine podlage in ravno tako na takih mestih čuti ojačano električno polje (slika 5).

Oba mehanizma poškodb (gretje in taljenje plasti zaradi absorpcije ter pospeševanje elektronov in nastanek plazme) sta funkciji električnega polja. Poznavanje porazdelitve polja po posameznih plasteh prekritja nam pomaga pri oblikovanju prekritja in pri napovedi velikosti praga za poškodbe. Prekritje (debeline posameznih plasti) mora biti oblikovano tako, da električno polje nima maksimalnih vrednosti na meji dveh plasti ali v plasti, ki ima več napak. Možna rešitev je tudi uporaba gradientnega lomnega količnika, kjer nimamo diskretnih prehodov iz plasti v plast in s tem problemov z električnim poljem.



$$\text{ojačanje električnega polja: } E_{in} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\epsilon} L} E_0$$

L je depolarizacijski faktor

A : krogla $\Rightarrow L = 1/3$

B : valj $\Rightarrow L = 1/2$

C : razpoka $\Rightarrow L = 1 - \frac{\pi}{2} \frac{\epsilon}{a}$

Slika 5: Interakcija električnega polja z napakami na površini podlage

4 Sklep

Eno najobetavnejših in hitro razvijajočih se področij je gotovo področje trdnih laserjev. Napredek pri resonatorjih trdnih laserjev, pri laserskih materialih in diodno črpanih laserjih z veliko močjo nakazuje novo obdobje na področju uporabe trdnih laserjev. Iskra Elektrooptika je vstopila v področje trdnih laserjev že razmeroma zgodaj (leta 1965) in danes zavzema pomembno mesto v svetovni laserski industriji. Največ je bilo narejenih laserjev Nd-YAG, ki delujejo pri $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$. Seveda pa razvoj poteka v smeri uporabe novih ojačevalnih snovi, ki sevajo pri drugih valovnih dolžinah. Zelo zanimiva sta dva nova erbijeva laserja, to sta Er-YAG ($\lambda = 2,94 \mu\text{m}$) in Er-steklo ($\lambda = 1,54 \mu\text{m}$). Laserja sta zanimiva zaradi posebnih lastnosti absorpcije svetlobe njihovih valovnih dolžin v vodi in organskem tkivu. Absorpcija v organskem tkivu je namreč največja pri $\lambda = 2,94 \mu\text{m}$. To omogoča zelo učinkovito uporabo laserja Er-YAG v medicini, še posebno v zobozdravstvu. Nasprotno pa je prag za poškodbo človeškega očesa najvišji v bližini $\lambda = 1,54 \mu\text{m}$. Ozek pas okoli te valovne dolžine je zato znan kot "varen za oči". Po standardih je v tem območju dovoljena javna raba svetlobnih sunkov z energijo do 8 mJ, medtem ko je pri $1,06 \mu\text{m}$ dovoljen le $1 \mu\text{J}$ svetlobne energije. Vse to kaže na obilico dela tudi na področju optičnih elementov in prekritij potrebnih za samo delovanje laserja in delovanje sistemov, v katerih je laser nepogrešljiv sestavni element.

5 LITERATURA

- 1/ W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1976 and 1988
- 2/ P. Amaya and C. Masser, Ultra-Low-Loss Optics, Lasers and Optronics, June 1992
- 3/ F. Reynard, Coatings with an F-number, lasers and optronics, June 1992
- 4/ B.E. Newnam, Damage resistance of coated optics for pulsed lasers, SPIE Vol. 140 Optical Coatings-Applications and Utilization II (1978)