



LASER – DOZE, RIZICI, POSLEDICE

Rade R. Babić^{1,2}, Aleksandra Pavlović-Radojković⁵, Aleksandar Veselinović³, Marko Zlatanović³, Maja Živković³, Marija Cvetanović³, Branislav Tomašević³, Jovica Mršić³, Aleksandra Marjanović⁴, Strahinja Babić⁴

¹Centar za radiologiju KC Niš

²Visoka zdravstvena škola strukovnih studija "Hipokrat" Bujanovac

³Klinika za očne bolesti KC

⁴Medicinski fakultet Univerziteta u Nišu

⁵Unimed Pharma

Laser je izvor elektromagnetnih talasa (svetlosti) koji emituje koherentan snop fotona u infracrvenom i vidljivom delu spektra elektromagnetnog zračenja, dok je laserska svetlost monohromatska, koherentna i širi se u istom smeru. Reč laser je nastala od početnih slova engleskih reči "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", u prevodu "pojačanje svetlosti pomoću stimulisane emisije zračenja". U radu je dat prikaz stimulisane emisije, gradje lasera, podele lasera, primene lasera u medicini, delovanja lasera na biološko tkivo i interakcije lasera sa biološkim tkivom. Autori ističu da u radu sa laserom operator i medicinsko osoblje treba da primene odgovarajuće mere zaštite očiju, dok oboljenja izazvana laserskim zračenjem nalaze se na Listi profesionalnih oboljenja. Zaključuje se da navedena saznanja o biološkom delovanju lasera ohrabljaju, ali istovremeno primoravaju da upotreba lasera treba da bude ograničena na one bolesnike kod kojih postoji čvrsta medicinska indikacija za primenu. U skoroj budućnosti možemo očekivati lasere nove generacije koji će pružiti neslućene mogućnosti istraživanja do sada neispitanih fizičkih fenomena lasera. *Acta Ophthalmologica 2015;41(1):29-39.*

Cljučne reči: laser, zračenje, medicina, oftalmologija, doze, rizici, posledice

Uvod

Laser je izvor elektromagnetnih talasa (svetlosti) koji emituje koherentan snop fotona u infracrvenom i vidljivom delu spektra elektromagnetnog zračenja. Laser je kao izvor svetlosti stabilan po frekvenciji, talasnoj dužini i snazi. Laserska svetlost je monohromatska tj. samo je jedne talasne dužine, odnosno jedne je boje, uvek je usmerena u uskom, koherentan snopu,

što znači da su elektromagnetni talasi međusobno u istoj fazi i šire se u istom smeru.

Snaga zračenja lasera kreće se od nekoliko milivata ($1\text{mW}=10^{-3}\text{W}$) do nekoliko desetina gigavata ($1\text{GW}=10^9\text{W}$), dok laseri nove generacije imaju snagu od jednog i više teravata ($1\text{TW}=10^{12}\text{W}$). U skoroj budućnosti možemo očekivati lasere snage od milijardu gigavata, čime će se pružiti neslućene mogućnosti istraživanja do sada neispitanih fizičkih fenomena lasera.

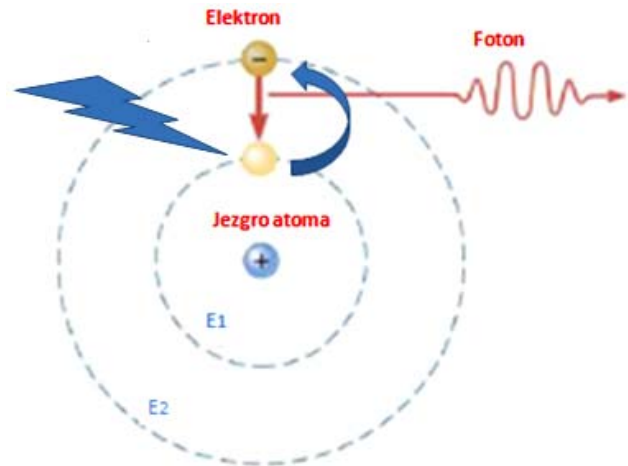
Reč laser nastala je od početnih slova engleskih reči "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", u prevodu "pojačanje svetlosti pomoću stimulisane emisije zračenja" (1-13).

Razvoju lasera doprineo je Alber Ajnštajn (nemački: Albert Einstein 14. mart 1879. g., Ulm, Nemačka–18. april 1955. g. USA) koji je pretpostavio da se u atomu može javiti stimulisana emisija (1,5,10).

Fizika lasera

Za razumevanje rada lasera neophodno je poznavanje fizičkog fenomena – stimulisana emisija (Slika 1) (1,2,3,7,11). Prema Bronovom (danski: Nies Henrik David Bohr 7. oktobar 1885. g. Kopenhagen – 18. novembar 1962. g. Kopenhagen, Danska) modelu strukture atoma, atom se sastoji od jezgra i odgovarajućeg broja elektrona koji kruže oko jezgra po odredjenim putanjama, obrazujući elektronski oblak. Svaki elektron poseduje odredjenu količinu energije karakterističnu za putanju u kojoj se nalazi, kreće se svojom orbitom i ne zrači energiju. Atom se nalazi u stabilnom, stacionarnom stanju, u neograničenom vremenu.

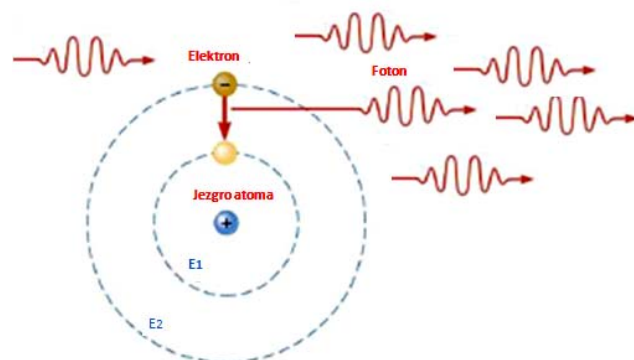
Ako atom apsorbuje energiju, npr. energiju dobijene pod dejstvom visoke temperature, električnog pražnjenja i sličnog, onda elektroni koji su apsorbovali energiju prelaze iz elektronske putanje bliže atomskom jezgru u dalju putanju tj. elektroni prelaze iz nižeg u viši energetski nivo, a to ima za posledicu da se atom prevodi iz stacionarnog stanja u pobuđeno (ekscitirano) stanje, koje traje kratko vreme, oko 10^{-8} sekundi. U tom vremenskom periodu (10^{-8} sekundi) prebačeni elektroni se iz višeg energetskog nivoa vraćaju u svoje prvobitne putanje, uz oslobađanje višaka energije u vidu fotona (kvanta energije), čija je frekvencija proporcionalna razlici energije između pojedinih nivoa (elektronskih putanja). Ova pojava poznata je pod nazivom "spontana emisija". U spontanoj emisiji fotoni (svetlost) su različitih frekvencija, energija i talasnih dužina i prostiru se u svim pravcima. Takvo zračenje svetlosti (fotona) predstavlja nekoherentno zračenje.



Slika 1. Spontana emisija. U spontanoj emisiji fotoni su različitih frekvencija, energija i talasnih dužina, i prostiru se u svim pravcima. Takvo zračenje svetlosti predstavlja nekoherentno zračenje

Ako se na ekscitirani atom spolja dejstvuje fotonom iste frekvencije koju ima i foton koji je nastao pri spontanom povratku pobuđenog elektrona u osnovno stanje, doći će do emisije dva ili više fotona iste energije (Slika 2). Dakle, zračenje se pojačava. Svi izlazni fotoni imaju isti pravac, istu polarizacionu ravan i nalaze se vremenski i prostorno u istoj fazi, sačinjavajući uski snop zračenja koji predstavlja zbir svih pojedinačnih zračenja, zbog čega su oni koherentni, a to je laserski zrak.

Laserski zrak se može proizvesti jedino ako je stimulisana emisija izraženija u odnosu na apsorpciju i spontanu emisiju zračenja. Dakle, broj atoma u pobuđenom stanju mora biti veći od broja atoma u osnovnom stanju.



Slika 2. Nastanak koherentne svetlosti (lasera). Ako se na ekscitirani atom spolja dejstvuje fotonom iste frekvencije koju ima i foton koji je nastao pri spontanom povratku pobuđenog elektrona u osnovno stanje, doći će u isto vreme do emisije dva ili više fotona iste energije, zbog čega su oni koherentni, a to je laserski zrak

Karakteristika laserskog zračenja

Karakteristike laserskog zračenja su monohromatičnost, koherentnost, visoka usmerenost i intezitet zračenja (1,11).

Monohromatičnost laserskog zračenja zasniva se na uski frekventni interval laserskog snopa, odnosno na određenu talasnu dužinu. Kod laserskih uređaja koji emituju vidljivu svetlost monohromatičnost se odnosi na boju laserskog zraka, koja je karakteristična za određenu vrstu lasera.

Koherentnost laserskog zračenja je svojstvo laserskog snopa u kome se svi talasi održavaju u strogo određenom međusobnom odnosu. Oni se vremenski i prostorno nalaze u istoj fazi. Zahvaljujući koherentnosti i monohromatičnosti, laserski zrak može da se fokusira na vrlo malu površinu, što je od velikog značaja u praktičnoj primeni laserskih uređaja.

Visoka usmerenost laserskog zračenja zasniva se na vrlo maloj divergenciji snopa, čime se omogućuje prenos energije na velika rastojanja.

Intezitet laserskog zračenja predstavlja gustinu snage ili gustinu energije laserskog snopa, koja se zasniva na stimulisanoj energiji. Može da ima različite vrednosti u zavisnosti od vrste i režima rada laserskog uređaja. Intzitet lasera može da iznosi od milivata do gigavata po jedinici površine za kontinualne lasere ili od milidžula do gigadžula po jedinici površine, za impulsne lasere. Spontana emisija može da bude u kontinualnim talasima, gde vreme ekspozicije varira od milisekunde do sekunde, minuta ili duže, ili u impulsnim talasima, gde vreme ekspozicije može da bude pikosekund.

Snaga lasera koji rade u kontinualnom režimu izražava se u vatima (W).

Gustina snage lasera se izražava u vatima po centimetru kvadratnom (W/cm^2), i ona je u vremenu konstantna.

Energija lasera koji rade u impulsnom režimu izražava se u džulima (J).

Gustina energije lasera se izražava u džulima po metru kvadratnom (J/m^2) ili u džulima po centimetru kvadratnom (J/cm^2).

Gradnja i rad lasera

Laser se sastoji iz tri osnovna elementa (Slika 3):

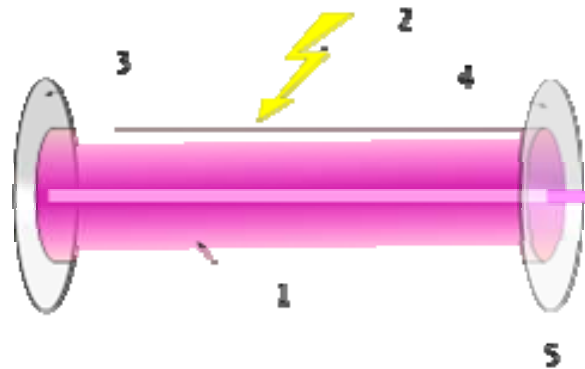
- aktivna sredina (medij) - materijal u kojem dolazi do pobude fotona;
- sistem pobude - izvor energije koji daje potrebnu energiju za pobudu;
- rezonator - oscilatorski prostor koji se sastoji od dva ogledala od kojih se svetlost

odbija tako da se reflektuju samo zraci (fotoni) koji putuju duž istog pravca.

Jedno od ogledala u oscilatorskom prostoru je delomično prozirno (polutransparentno) i dopušta izlaz manjem broju fotona iz oscilatorskog prostora. Od propuštenih fotona se formira laserski zrak.

Rad lasera započinje aktivacijom izvora energije npr. električna energija. Električna energija ulazi u aktivni medij npr. ugljendioksid (CO_2), argon (Ar) i dr. Za pogon mogu da se koriste i snažne lučne sijalice, kao što je slučaj kod Nd:YAG lasera (Nd:YAG laser je tip čvrstotelnog lasera koji kao izvor zračenja koristi matricu itrijum-aluminijum-granata-YAG, dopiranu atomima neodijuma - Nd, dok aktivnu sredinu ovog lasera predstavljaju trostruko jonizovani atomi neodijuma - Nd⁺³).

Iz aktiviranog medija isijavaju fotoni. Fotoni udaraju u jedno od ogledala oscilatorskog prostora, vraćaju se nazad u aktivni medij i postižu novu stimulisiranu emisiju. Fotoni nastali stimulisiranom emisijom putuju u istom smeru kao matični (primarni) fotoni. Zbog ogledala, ti se fotoni ponovno vraćaju u aktivni medij. Tako se stvaraju novi fotoni, identični matičnom fotonu. Ovaj proces se ponavlja dok se ne proizvede dovoljan broj fotona, koji će da daju laserski zrak.



Slika 3. Shema lasera: 1) aktivni medij; 2) sistem pobude - energija za pobuđivanje medija; 3) reflektirajuće ogledalo; 4) polutransparentno ogledalo; 5) laserski zrak

Podela lasera

Postoji nekoliko klasifikacija lasera.

Prema vrsti materijala od kojeg je napravljen laser razlikuju se čvrstotelni laseri, gasni laseri, poluprovodnički laseri, tečni laseri, hemijski laseri, laseri na bojama, laseri na parama metala i laseri na slobodnim elektronima.

Prema režimu rada razlikuju se kontinualni laseri i impulsni laseri.

Prema vrsti pumpe (pobuda radne zapremine) koja se koristi za rad lasera razlikuju se optički pumpani laseri, laseri pumpani električnim putem (koji mogu biti u vidu jednosmernog napona, naizmjeničnog napona i električnog pražnjenja), laseri pumpani hemijskim reakcijama i nuklearno pumpani laseri (α -čestice, β -čestice, produkti nuklearnih reakcija, γ -zračenje i neutroni).

Prema svetlosti koju emituju laseri mogu biti laseri u delu vidljive svetlosti, laseri u bliskom infracrvenom delu spektra elektromagnetnog zračenja, laseri u dalekoj infracrvenoj oblasti elektromagnetnog zračenja i X-laseri (zračenje u X-zračenju spektru elektromagnetnih talasa).

Primena lasera u medicini

Svetlost kao oblik terapije, postala je jedna od suverenih i dominantnih metoda lečenju oftalmologiji i dermatologiji, pa ne iznenađuju činjenice da se laser prvi put praktično primjenjuje baš u te dve discipline (1-13). Brojna istraživanja sprovedena od 1965. godine do 1980. godine rezultirala su otkrivanjem novih lasera i novih primenalasera. Danas laser predstavlja dokazan i pouzdan alat u medicini, koji se i daljerazvija i usavršava.

U oftalmologiji laser je našao praktičnu primenu u fotokoagulaciji mrežnjače oka – laser fotokoagulacija (1,6,7,8,11). Rad prvih lasera zasnovanih narubinu imali su ekstremno kratak puls delovanja, bili su preskupi ipreteški za rukovanje, pa se nisu pokazali pogodnim za tunamenu. Do preokreta dolazi sredinom šezdesetih godina XX veka sa pojavom argonskog lasera, od kada laser postaje sastavni deo oftalmološke prakse. Cilj laserskog lečenja je sprečiti stvaranje patoloških krvnih sudova, pojave krvarenja iz već stvorenih patoloških krvnih sudova retine i dr (Slika 4). Danas se laser fotokoagulacija radi laserima specijalne talasne dužine (Eye Lite Laser). U primeni su laserski zraci, vrlo visoke energije, koji se fokusiraju na oštećenu retinu (Slika 5). Tako npr. za lečenje progredijentne dijabetične retinopatije koristi se argonski laser, dok se kod ablacije retine koristi rubinov laser kojim se pomoću impulsa mrežnjača tačkasto prilepljuje za sudovnjaču (1-13).

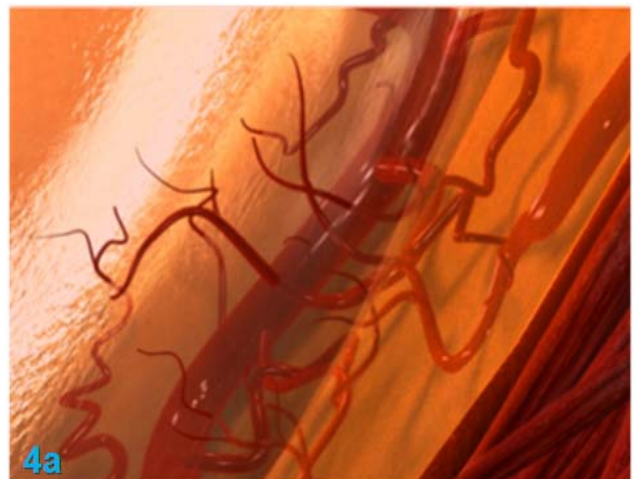
Laser fotokoagulacijom tretiraju se bolesna mesta, uz maksimalnu štednju zdravog tkiva retine (Slika 6 i 7). Laserom tretirana bolesna mesta na retini ostavljaju trag koji se zove laserski pečat. Laserskim pečatima uništavaju se patološki krvni sudovi, sprečavaju se krvarenja

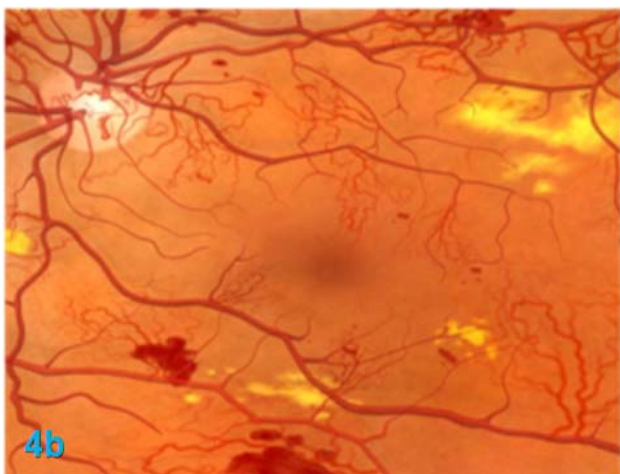
i otok i dr. Laser fotokoagulacijom stvara se minimalno potreban broj laserskih pečata. Intervencija je kratkotrajna, bezbolna i obavlja se ambulantno. Poželjno je laser fotokoagulopatiju primeniti u ranoj fazi bolesti kada nema novostvorenih patoloških krvnih sudova, patoloških promena na žutoj mrlji kod šećerne bolesti i dr. Ukoliko je bolest zahvatila veliki segment retine, sa pojavom mnogobrojnih krvnih sudova i sl. radi se opsežna laserska intervencija – panretinalna laser fotokoagulacija. Cilj ove intervencije je da se unište novostvoreni krvni sudovi na periferiji mrežnjače i da se posle nekoliko meseci potpuno izgube (Tabela 1). Pošto laserski zraci ne uništavaju samo patološke krvne sudove već i tkivo mrežnjače nakon ovako opsežnih tretmana dolazi do gubitka perifernog dela vidnog polja. Nekada se tretman mora raditi u više navrata (Slika 8). Kod makularnog edema primenjuje se usmerena (fokalna) ili mrežasta fotokoagulacija (Tabela 2).

U hirurgiji laser služi kao "optički skalpel" za obavljanje bezkrvnih operativnih zahvata (Slika 9). Za operatora, laser je samo hirurški instrument, kojim se reže, koagulira i vaporizira tkivo putem fotona tj. svetlosti koja je koherentna (svetlosni talasi su u fazi tj. usklađeni), monohromatska (iste talasne dužine - λ , odnosno boje) i paralelna (svi fotoni se kreću uporedo u istom smeru).

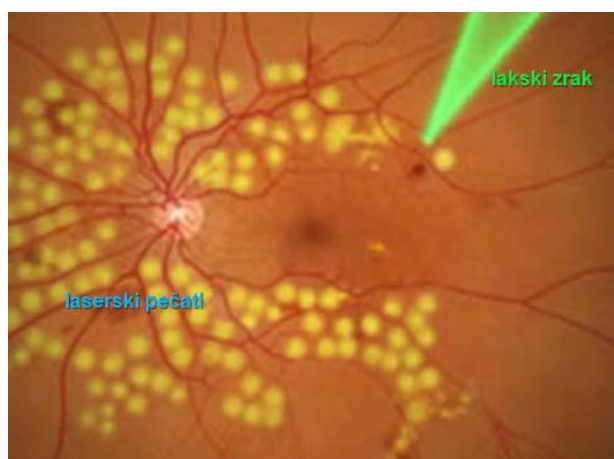
Laser je našao primenu u dermatologiji za otklanjanje tetovaže na koži, tretiranju teleangiektatičkih nevusa i dr., u onkologiji za tretiranje malignih alteracija na koži, u fizioterapiji za stimulaciju bržeg saniranja dekubitusa, u laboratoriji za analizu katjona i intracelularnih struktura, u stomatologiji za lečenje karijesa, paradentopatije (Slika 10) i dr. (1,2,3,7,11).

U primeni je i laserski mikroskop za izučavanje ćelija i njenih intracelularnih struktura.





Slika 4. Proliferativna dijabetična retinopatija. U mrežnjači zbog smanjene cirkulacije krvi formiraju se novi krvni sudovi na površini mrežnjače i optičkog diska (a) Novoformirani krvni sudovi su slabog zida pa često krvare (b). Kasnije na mestima krvarenja formiraju se ožiljci, koji povlače i deformišu mrežnjaču remeteći vid. Dijabetična retinopatija dovodi do slepila



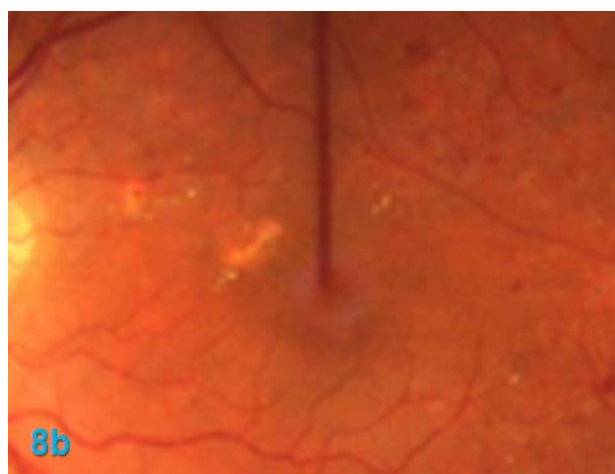
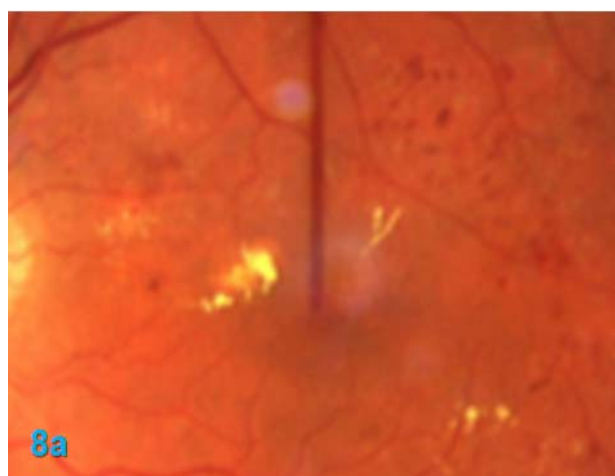
Slika 5. Laser fotokoagulacija. Laser fotokoagulacijom tretiraju se bolesna mesta, uz maksimalnu štednju zdravog tkiva retine. Laserom tretirana bolesna mesta na retini ostavljaju trag - laserski pečati



Slika 6. Lokalizovana laser fotokoagulacija. Lokalizovani laser pečati oko žute mrlje



Slika 7. Panretinalna laser fotokoagulacija. Mnogobrojni laser pečati po periferiji retine



Slika 8. Dijabetična retinopatija: a) pre primene laserske terapije - novoformirani krvni sudovi sa mnogobrojnim tačkastim krvarenjima; b) posle primene laserske terapije - tačkasta krvarenja i novoformirani krvni sudovi tretirani laserom

Tabela 1. Parametri za panretinalnu fotokoagulaciju

| Parametri | Karakteristike |
|------------------|--|
| Veličina | 500 mikrona (μ) |
| Trajanje | 0,1 - 0,5 sekunde (s) |
| U krajnjoj tački | Umereno intezivna sivo-bela opekotina |
| Razmak | Pojedinačne odvojene opekotine |
| Veličina | U obliku dva diska prečnika od gore do dole, i na rastojanju od centra makule po 500 μ od ivica diska, koji se protežu do ekvatora ili izvan njega |
| Talasna dužina | Argon-zelena |

Tabela 2. Parametri za usmerenu (fokalnu) fotokoagulaciju

| Parametri | Karakteristike |
|------------------|---|
| Veličina | 50–100 mikrona (μ) |
| Trajanje | 0,1 sekunda (s) |
| U krajnjoj tački | Jedva vidljiva promena boje |
| Veličina | Sve propuštajuće mikroaneurizme između 500–3.000 μ od centra makule |
| Talasna dužina | Argon-zelena |

Najvažniji medicinski laseri

U medicinskoj primeni su excimer laser, argon jon laser, laser u boji, aleksandrit laser, neodimium:YAG (Nd:YAG) laser, holmij:YAG (Ho:YAG) laser, erbij:YAG (Er:YAG) laser i ugljen-dioksid (CO₂) laser (11).

Excimer laser je gasni laser koji zrači u ultravioletnom spektru, od 157-351nm. Naziv je dobio kombinacijom dveju engleske riječi – excited (srpski: uzbuđen) i dimer (srpski: dve komponente). Našao je primenu u proizvodnji mikroelektronskih uređaja, mikromašinstvu i operaciji oka. U excimer laseru aktivni medij je smesa inertnog gasa (argon, kripton ili ksenon), halogena (hlor ili fluor) i takozvanog “zaustavljajućeg” (buffer) gasa (helijum ili neon). Inertni halogeni gas označen je kao prigušivač. Različite talasne dužine postižu se različitim odnosom mešanja inertnih plinova i halogena. Excimer laser radi na 2-3 bara ukupnog pritiska i na frekvenciji do 1.000Hz. Kod excimer lasera trajanje impulsa je u rasponu od 10-100 nanosekundi (ns). Excimer laserom je moguće postići snagu

do 200W. U zavisnosti od učestalosti korištenja laserski medij se mora menjati. Punjenje mešavinom ksenona i hlora, čija je talasna dužina 308nm, traje približno 107 pulseva. U stvarnim uslovima korišćenja, 107 pulseva odgovara oko 15 dana, ako se laser koristi po 4 sata dnevno na frekvenciji od 30Hz. Međutim, punjenje mešavinom argona i fluora čija je talasna dužina 193nm dovoljno je za samo jedan dan korištenja u istim uslovima rada. U praksi, stepen promenljivosti talasne dužine je prilično ograničen.

Argon jon laser, kako mu i ime kaže, kao medij služe mu joni argona. U osnovi čini ga staklena cev napunjena argonom. Iskoristivost argonskog lasera manja je od ugljendioksid (CO₂) lasera zbog činjenice da laserski medij sačinjavaju joni argona, a ne sam gas argona. Rezultat toga je da struja električnog pražnjenja koja služi za jonizaciju atoma argona mora biti vrlo visoka, pa su i karakteristike električnog priključka izuzetno zahtevne (trofazna struja, 380V, 30-60A). Argonski laser radi na dve talasne dužine, u plavom spektru na 488nm i u zelenom spektru na 514nm.

Laser u boji (engleski: dye laser) kao pojačavajući medij služe fluorescentne boje poput rodamina i stilbena. Glavna razlika između ovih i ostalih lasera je da oni nisu ograničeni na određenu talasnu dužinu, već su podesivi u širokom spektru. Najbolja iskoristivost se postiže u narandžasto-crvenom području spektra sa rodaminom. Zavisno od energetskog izvora svaki laser u boji može se koristiti kontinuirano ili impulsno.

Aleksandrit laser je laser koji kao medij koristi aleksandrit kristal. Laserski zrak je talasne dužine od 725-800nm (skoro infracrvena svetlost) sa glavnom linijom od 755nm. Spada u grupu kratko-pulsnih lasera. Glavna osobina aleksandritnog lasera je da trajanje pulsa postaje kraće sa povećanjem energije. Klinički sistemi aleksandrit laseri rade u rasponu snage od 1-10W, sa učestalošću od 10Hz. Zbog svoje visoke snage, aleksandritni laser je pogodan za lasersku litotripsiju. U litotripsiji se osim njega koriste i drugi kratko-pulsni laseri kao što su u dye, excimer i solid state laseri.

Neodimium:YAG (Nd:YAG) laser, kao laserski medij služe atomi neodimiuma. Ovi se atomi ugrađuju u itrij-aluminijum-garnet kristal (YAG). Ovaj laser čine rezonantna optička šupljina sa dva ogledala, šipka od Nd:YAG kristala i svetiljka visoke snage postavljena duž kristala. Nd:YAG laser emituje infracrvenu nevidljivu svetlost talasne dužine 1,064 mikrona, a u posebnim

modelima i 1,32 ili 1,44 mikrona. Snaga hirurških Nd:YAG lasera u kontinuiranom režimu rada je do 120W.

Modificirani Nd:YAG laseri se izrađuju (ili im se dodaje) od Q-prekidača, kojim se mogu proizvesti kratki i snažni pulsevi. Laseri ovog tipa uglavnom se koriste u oftalmologiji i litotripsiji.

Holmij:YAG (Ho:YAG) laser je čvrsto telni laser koji emituje svetlo talasne dužine 2,1 mikrona, sa trajanjem pulsa u rasponu od 150-500 μ s. Kao aktivni laserski medij služi redak hemijski element holmij, dok je kristal YAG (itrij-aluminijum-garnet). Laserska šipka se obasjava učestalošću od 10Hz. Srednja snaga lasera je do 10W, što odgovara energiji pulsa od 1J pri 10Hz. Teoretska dubina prodiranja Ho:YAG laserskog zračenja je do 500 mikrona zavisno od zastupljenosti vode (H₂O) u tretiranom tkivu. Ho:YAG laser se koristi ako je željena dubina prodiranja manja od one koju ima Nd:YAG laser.

Erbij:YAG (Er:YAG) laser je čvrsto telni laser koji emituje svetlost talasne dužine od 2,94 mikrona sa trajanjem pulsa u rasponu od 150 - 500 mikrosekundi (μ s). Za aktivni laserski medij se koristi redak hemijski element erbij. Laserska šipka je izrađena od YAG kristala (itrij-aluminijum-garnet). U radu se obasjava učestalošću do 10Hz. Najveća dubina prodiranja ovog lasera je svega nekoliko mikrona, a razlog tome je što se talasna dužina Er:YAG lasera maksimalno apsorbuje u vodi. To je ujedno i razlog za visoku učestalost ljuštenje tkiva koje sadrži vodu. Upravo ta osobina Er:YAG lasera predstavlja problem prilikom prenosa laserske radijacije. Zato, uobičajena kvarcna vlakna nisu upotrebljiva u Er:YAG laseru, jer sadrže vodu. Jedini način prenosa koji se do sada pokazao pouzdanim, je putem zglobnog sistema ruku. Er:YAG laser se koristiti za ljuštenje (ablaciju) tvrdog tkiva (kost, dentin) i rezanje mekog tkiva.

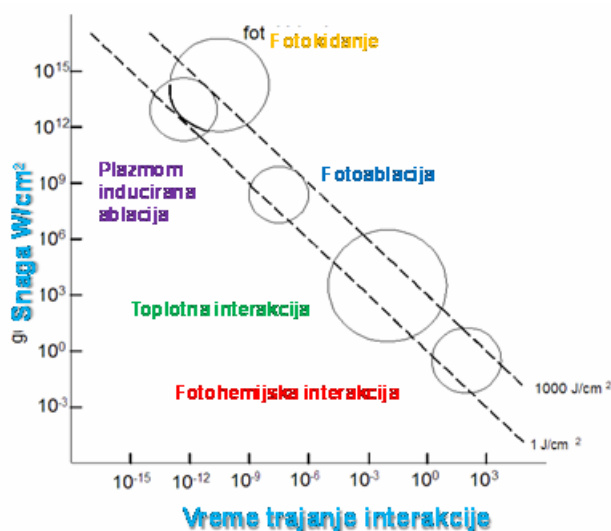
Ugljen-dioksid (CO₂) laser kao laserski medij koristi ugljen-dioksid (CO₂). Laser emituje zrake infracrvene svetlosti talasne dužine od oko 10,6 mikrona. Ugljen-dioksid laser čini staklena cev sa dva visoko reflektirajuća ogledala, koja oblikuju rezonantni optički prostor. Laserski gas čini mešavinu ugljen-dioksida (CO₂-5%), azota (N₂-15%) i helijuma (He-80%), koja se u cevi nalazi pod pritiskom od 20–3mbar. Talasna dužina laserskog svetla leži u nevidljivom delu spektra elektromagnetnog zračenja blizu infracrvenog područja (toplotno zračenje), i oko 20 puta je veća od talasne dužine vidljivog svetla.

Biofizika - delovanje lasera na biološko tkivo

Kada se posmatraju međusobna delovanja između laserskog svetla i biološkog tkiva, parametri laserskog svetla moraju biti u skladu sa fizikalnim parametrima biološkog tkiva (1-13). Stepem i domet dejstva lasera zavisi od osobina tkiva, određene njegovom strukturom, udelom vode i cirkulacijom krvi (apsorpcija, prodiranje, refleksija, provodljivost toplote, kapacitet toplote i gustoća) i od geometrije laserskog zraka (gustina, energija, talasna dužina).

U zavisnosti od vremena delovanja laserskog zraka na tkivo i od laserskog isijavanja po površini ili u dubinu tkiva (stvarna gustina energije), razlikujuju se tri vrste interakcije (učinka) lasera sa tkivom (Tabela 1):

- fotohemijski učinak (10-1.000s; 10 W/cm²);
- fototermički učinak (1ms–100s; 1-10⁶ W/cm²);
- fotojonizujući učinak (10ps–100ns; 10⁸–1.012W/cm²).



Grafikon 1. Prikaz međudelovanja lasera i tkiva u zavisnosti od svojstva laserske svetlosti

Fotohemijski učinak lasera rezultat je aktivacije molekula određenih hemijskih jedinjenja koja su apsorbirali laserske zrake. Javlja se kod ekstremno duge izloženosti tkiva laserskim zracima male snage. Primer je fotoosetljiva oksidacija, koja se javlja usled kombinovane upotrebe laserskog svetla i ubrizganog fotoosetljivog sredstva (derivat hematoporphrin - HpD), koja inicira citotoksični proces, gde većina tkiva prožetog fotoosetljivim sredstvom biva uništeno nakon osvetljavanja laserom. Laserom stimulirano fotoosetljivo sredstvo uzrokuje seriju hemijskih reakcija koje dovode

do oksidacije različitih komponenti ćelije (1,2,3,11).

U fotohemijjski učinjak lasera spada i biostimulacija koja se koristi uglavnom za lečenje rana i smanjenja bolova.

Primarni fotohemijjski učinjak lasera ogleda se u stimulaciji oslobađanja hemijjskih medijatora (serotonin, bradikinin, histamin), ubrzanoj sintezi vitamina - A i - D; aktivaciji sistema DNK i RNK, stimulaciji razmnožavanja ćelija, stimulaciji pretvaranja ADP u ATP na nivou mitohondrija čime se povećava intracelularna energija (tzv. primarni fotoenergetski efekat), ubrzanom ćelijskom metabolizmu, inhibiranju sinteze prostaglandina, stvaranju jakog električnog polja oko laserskog zraka koje dovodi do normalizacije potencijala ćelijske membrane nervnih vlakana i onemogućavanju normalnog odvijanja procesa depolarizacije (blokada kalijum-natrijumove pumpe i prenos jona natrijuma i hlora s jedne i kalijuma s druge strane, tako da se prekida prenos nervnih impulsa) i dr. Ova klinička zapažanja još nemaju potvrđeno objašnjenje.

Sekundarni fotohemijjski učinjak lasera ogleda se u stimulaciji:

- Ćelijskog metabolizma – prikazuje se u ubrzanoj ćelijskoj razmeni materija, deobi i diferencijaciji ćelija, povećanoj intracelularnoj energiji u obliku ATP, povećanom prilivu kiseonika (posledica pojačane mikrocirkulacije), koji stimuliše ćelijsko disanje, kao unošenje hranljivih materija i eliminacija toksičnih materija;
- Mikrocirkulacije – koja oslobađa histamin, koji parališe prekapilarni sfinkter, što za posledicu ima arteriolarnu dilataciju. Ovaj efekat se ne zasniva na lokalnom povećanju temperature tkiva, već na minimalno povećanje temperature tkiva, do fizioloških granica, posledica toga je pojačan ćelijski metabolizam i vazodilatacija krvnih sudova. U tome se i ogleda prednost lasera u odnosu na druge fizikalne metode (infra-crveno zračenje, ultra-violetno zračenje, diatermija itd.) jer laser svoj terapijski efekat ostvaruje bez termičkog dejstva, te se može slobodno koristiti u inficiranom tkivu.

Fotohemijjski efekat lasera prikazuje se i u vidu analgetičkog, antiinflamatornog, antiedematoznog i biostimulativnog efekta.

Analgetički efekat lasera nastaje kao posledica fotoelektričnog dejstva, stabilizacije ćelijske membrane neurona (blokada prenosa nervnih impulsa), brže resorpcije zapaljenjskog eksudata što smanjuje pritisak na periferne nervne završetke, vazodilatacije koja stvara uslove za

bolju ishranu i regeneraciju oštećenih nerava, povećane produkcije endomorfinu u likvoru i serumu, hiperpolarizacije ćelijske membrane koja izaziva centralnu i perifernu akciju na neurohumoralne hemijjske medijatore i sintezu endogenih peptide i dr.

Antiinflamatorni efekat lasera ogleda se u stimulaciji fagocitne aktivnosti neutrofilnih leukocita, mikrofaga i makrofaga, mitotske aktivnosti makrofaga, a sveukupno u stimulaciji celularnog i humoralnog imuniteta. Efekat lasera na inflamaciju sastoji se u stimulaciji nespecifične humoralne odbrane i porastu sinteze komplemenata, lizozoma i interferona. Zatim, stimulacijom makrofagalnog sistema aktivira se i imuno-kompetentni sistem (T - i B - limfociti) sa kojim nastupa specifična imunološka odbrana.

Antiedematozni efekatlasera ogleda se u ubrzanoj regeneraciji limfnih i venskih sudova i smanjenju intrakapilarnog pritisaka, izazivajući bržu eliminaciju edema.

Biostimulativni efekat lasera ogleda se u stimulaciji rasta i reprodukciji fibroblasta i osteoblasta, sintezi kolagenih vlakana, regeneraciji nervnih, endotelnih i epitelnih ćelija, mitotskoj aktivnosti makrofaga i enzimskoj aktivnosti ćelija.

Fototermički efekat lasera nastaje kao posledica pretvaranja svetlosne energije lasera u toplotnu energiju. Toplotni učinjak lasera se široko koristi u hirurgiji za rezanje i koagulaciju tkiva. Stepem i obim toplotnog delovanja lasera zavisi s jedne strane od optičkih i toplotnih osobina tkiva, a s druge strane od snage laserskog svetla. Razlika u apsorpciji laserskog zraka uslovljava i različito prodiranje laserskog zračenja u tkivo. Fototermički efekat lasera se postiže skraćivanjem vremena delovanja lasera i povećanjem snage lasera.

Laserom stvorena toplota izaziva povećanje temperature u ozračenom tkivu u kome lako može da dođe do koagulacije belančevina. Porast temperature i njena raspodela u tkivu izloženom laserskom zračenju zavisi od apsorbovane energije u volumenu tkiva i od termičkih osobina tkiva. U zavisnosti od temperature, u tkivu nastaju promene kao što su promena boje, koagulacija, skupljanje, karbonizacija i/ili isparavanje.

Dubina prodiranja laserskog zraka određena je osim osobinom tkiva i talasnom dužinom tj. bojom laserskog svetla. Kombiniranjem ta dva parametra moguće su različite reakcije tkiva.

Laserom stvorena toplota u tkivu može da dovede do isparavanja tkivnih tečnosti i nastajanje pare. Mehanički pritisak koji stvara para može da dovede do prskanja ćelije i mehaničkog

razaranja ćelije. Stvorene para može u zatvorenim tkivnim šupljinama kao što su očna duplja ili lobanja da dovedu do njihovog prskanja (1,2,3,11).

Najvažniji optički parametar predstavlja stepen apsorpcije bioloških molekula koja zavisi od talasne dužine laserskog svetla. Najveća apsorpcija bioloških molekula javlja se kod laserskog zračenja talasne dužine kraće od 280 nm. Visoki udio vode (od 60%) u većini tkiva dovodi do apsorpcije infracrvenog spektra zračenja.

Osim apsorpcije, u obzir treba uzeti i rasipanje svetla kao sledeći optički parametar tkiva. Tkivo kao visokostrukturirani medij usled direktne optičke radijacije potpuno se menja u svom prostornom širenju zbog refleksije, refrakcije i difrakcije. Efekt rasipanja laserskog svetla javlja se kod slabe apsorpcije medija.

Kod CO₂-lasera apsorpcija tkiva je izuzetno jaka, dok je rasipanje zanemarljivo. Zbog toga se energija svetla na površini tkiva potpuno pretvara u toplotnu energiju. Zato se CO₂-laser pokazao kao izvrstan alat za rezanje, a osobina da malo prodire u dubinu čini ga idealnim za rezanje i uklanjanje tkiva.

Apsorpcija zračenja argonskog lasera je slabija od CO₂-lasera. Rasipanje zračenja argonskog lasera je malo. Prodiranje je ograničeno zahvaljujući selektivnoj apsorpciji hemoglobina i melanina. Zbog toga je primena argonskog lasera ograničena na indikacije kada je potrebno istovremeno rezanje uz ograničenu koagulaciju.

Nd:YAG-laser emituje svetlost boje bliske infracrvenom spektru. Kod talasne dužine od 1,064nm, apsorpcija zračenja u tkivu je niska. Rasipanje je zbog toga naglašeno i rezultira ravnomernom raspodelom zračenja na tkivo. Sporo zagrijavanje velikog volumena tkiva na i oko tačke primene laserskog zračenja, sledi dubinska koagulacija koja sporo napreduje. Skupljanje tkiva kombinirano sa jednolikom koagulacijom, rezultira zatvaranjem krvnih i limfnih sudova. Arterije do 1,5mm i vene do 3mm zatvaraju se brzo i pouzdano. Kod izlaganja tkiva Nd:YAG laserskom zračenju, koagulacijski volumen ili oštećena zona zavisi od intenziteta zračenja, pa na površini tkiva dolazi do karbonizacije i isparavanja.

Fotojonizacijski učinak lasera javlja se u trenutku kada se premaši gustina snage od 107 W/cm². Time se energija laserske svetlosti pretvara u kinetičku energiju, a u ozračenom tkivu dolazi do jonizacije.

Velika gustina fotona uzrokuje povećanu apsorpciju i direktno beztermičko kidanje međumolekularnih veza. Ta pojava se naziva

fotoablacija. Fokusirani i kratkotrajni, ali izuzetno snažni impulsi (gustoće snage od 1010W/cm² za nanosekundne pulseve i 1012W/cm² za pikosekundne pulseve), generiraju tako snažna električna polja (106-107V/cm), koja indukuju spontanu jonizaciju slobodnih elektrona i joniziranih atoma (plazma ćelije). Kada se postigne određeni stepen jonizacije sledi porast temperature plazme. U plazmi zatim dolazi do iznenadne ekspanzije koju prati mehaničko-akustični udarni talas, koji kida strukturu tkiva (fotodisrupcija) ili dovodi do dezintegracije materije (fotofragmentacija). Ovi jonizirajući efekti se najčešće koriste u oftalmologiji i mikrokirurškim zahvatima, na i u oku, bez oštećivanja zdravog tkiva.

Interakcija laserskog zračenja sa živim tkivom

Različiti mehanizmi interakcije laserskog zračenja sa živim tkivima još uvek nisu u potpunosti rasvetljena. Najugroženiji organi i tkiva na kojima lasersko zračenje ispoljava svoje štetno dejstvo su oko i koža, a zatim krvni sudovi, nervno i mišićno tkivo (1-13).

Primarni biološki efekat lasera najizraženiji je na oku (Tabela 3) i koži.

Tabela 3. Biološki efekti lasera na oku

| Opseg talasne dužine | Patološke promene |
|----------------------|--------------------------------|
| 180 - 315 nm | Fotokeratitis |
| 315 - 400 nm | Fotohemijska katarakta |
| 400 - 780 nm | Fotohemijsko oštećenje retine |
| 780 - 1400 nm | Katarakta, Retinalna opekotina |
| 1,4 - 3,0 μm | Vodeni flare, Katarakta |
| 3,0μm - 1 m | Opekotina rožnjače |

Sekundarni biološki efekat lasera obuhvataju mogućnost nastajanja električnog šoka i masivnih opekotina pri manipulaciji nedovoljno izolovanim delovima laserskih uređaja koji rade pod visokim naponom, stavranja parazitnog X-zračenja u radu sa visokonaponskim uređajima, iznad 15.000V, u radu sa laserima velike snage moguće je stvaranje ozona usled električnog praženjenja ili jonizacije vazduha, dejstvo kriogenih gasova u tečnom stanju, kao što su tečni azot i tečni vodonik, koji služi za hlađenje odgovarajućih delova laserskog uređaja, koji pri kontaktu sa kožom mogu da izazovu opekotine, dok isparenjem u zatvorenoj prostoriji kontinuiraju vazduh, izazivaju požar pri kontaktu zapaljivih

tečnosti ili drugih zapaljivih materijala laserskim snopom i dr.

Sigurna upotreba lasera u medicini

Većina oftalmologa koji koriste laser u svom svakodnevnom radu uglavnom su upoznati i svesni rizika ozleda oka (1-13). U radu treba uvek primeniti odgovarajuće mere zaštite očiju (operatora). Kod otvorenih zahvata treba koristiti zaštitne naočare s filterima koji odgovaraju talasnoj dužini korištenog lasera. Svo medicinsko osoblje unutar zone primene lasera treba osigurati zaštitu očiju. Svaki proizvođač lasera obično navodi potrebne karakteristike zaštitne opreme u uputstvu za korištenje uređaja. Kod endogenih zahvata, zaštita očiju je potrebna svima koji direktno gledaju na mesto zahvata uz pomoć optičkog sistema, kao što je npr. endoskop. Osobe koje operaciju prate preko monitora ne treba da nose zaštitne naočare, jer se nalaze izvan opasne zone. Zaštita očiju za vrijeme laparaskopskih zahvata sastoji se od dodavanja filtera između oka i laparaskopa. Obično postoji i zaštitni mehanizam koji onemogućuje aktivaciju lasera na otvorenom (izvan cevi laparaskopa, odnosno trbušne šupljine). Međutim, preterana zaštita očiju može onemogućiti sigurno i pravilno izvođenje hirurškog zahvata.

Do određenog nivoa snage, sve talasne dužine lasera su bezopasne, jer lasersko svetlo nije jonizirajuće zračenje poput X-zraka. Opasnost postoji samo kod izlaganja laserskom svetlu velike snage.

Kod laparaskopskih zahvata, nominalna opasna zona se nalazi unutar abdomena.

Najveći rizik povezan sa laserskim uređajima je rizik od strujnog udara. U normalnim uslovima održavanja i korištenja, taj je rizik zanemarljiv. Međutim, opasnost nastaje kod otvaranja uređaja. Laserske uređaje, kao i ostale električne medicinske uređaje sme otvarati i popravljati samo ovlašćen i edukovan serviser.

Vatra je sljedeći rizik u korištenju lasera. Laser se sme aktivirati tek kada je pravilno usmeren na ciljano tkivo. Kada se ne koristi, laser treba isključiti, odnosno za vreme pauze u

radu treba ga postaviti u stanje čekanja (standby mod). Platno koje okružuje operaciono polje treba prekriti vlažnim peškirimima.

Poslednji rizik je onaj od oštećenja kože. Ako se koža ozrači laserskim zrakom velike snage ($>1\text{W}/\text{mm}^2$), obično će doći do opekotine. Duže izlaganje kože ultravioletnom laserskom svetlu manje snage rezultira simptomima sličnim opekotinama od sunca.

Dobra međusobna komunikacija je osnova sigurnog radnog okruženja. Do većine nezgoda prilikom korištenja laserskih uređaja upravo dolazi zbog loše komunikacije i (ili) needukovanosti korisnika. Sva komunikacija među osobama koje sudeluju pri operaciji treba biti dvosmerna. Ništa se ne sme prepustiti slučaju ili pretpostavkama.

Američka Food and Drug Administration (FDA) klasificira sve lasere koji su snažniji od 500mW, kao lasere IV klase, tako da se u istoj grupi nalaze laseri koji su namenjeni za uništavanje tenkova na bojištu (od nekoliko gigavata) i hirurški laseri (od 20-tak vata).

Oboljenja izazvana laserskim zracima nalaze se na Listi profesionalnih oboljenja.

Zaključak

Laser je postao jedan od suverenih i dominantnih metoda lečenja oftalmologiji i drugim granama medicine. Svoju suverenost i dominantnost laser je stekao osobinama da je kao izvor svetlosti stabilan po frekvenciji, talasnoj dužini i snazi, laserska svetlost je uvek monohromatska, koherentna i usmerena u uskom snopu, dok parametri laserskog svetla moraju biti u skladu sa fizičkim parametrima biološkog tkiva. U tkivu organizma laserski zraci ispoljavaju fizička, hemijska i biološka dejstva. Ova saznanja o biološkom dejstvu lasera još uvek nemaju potvrđena klinička objašnjenja. Sva navedena saznanja o biološkom delovanju lasera ohrabljaju, ali nas istovremeno primoravaju da upotreba lasera bude ograničena na one bolesnike kod kojih postoji čvrsta medicinska indikacija za primenu. U skoroj budućnosti možemo očekivati lasere snage od milijardu gigavata, čime će se pružiti neslućene mogućnosti istraživanja do sada neispitanih fizičkih fenomena lasera.

Literatura

1. Jeremić M. Nejonizujuća zračenja i zaštita. Medicinska knjiga Beograd; 1995.
2. Jovanović G, Burić N, Krnić N. Biophysics of laser – Part I. Acta Stomatologica naissi 2006; 22(54): 643-52.
3. Jovanović G, Burić N, Krnić N. Biophysics of laser – Part II. Acta Stomatologica naissi 2007;23(55): 679-84.
4. Krešimir Č. Fotokoagulacija. Laser u oftalmologiji. Zrinski - Čakovec Zagreb; 1979.

5. Lončarek K. Nacrt priručnika oftalmologije za medicinare. 2008. www.medri.uniri.hr (poslednje otvaranje jun 2014)
6. Mitrović M, Džamić M. Laser u medicine. "Bakar Bor". Medicinska knjiga Beograd/Zagreb. 1983.
7. Puđa N. Upotreba lasera u savremenoj medicine Vršac; 2005.
8. Refrakciona hirurgija – Laser (LASIK, PRK). Miloš klinika specijalna bolnica za oftalmologiju. milosklinika.com (poslednje otvaranje: jun 2014)
9. Stokić M: Obrada laserom. 2011. LASERI-seminarskirad.pdf (poslednje otvaranje: jun 2014)
10. Teodorović S: Istorija razvoja lasera. Diplomski rad. Univerzitet u Novom Sadu Prirodno-matematički fakultet Departman za fiziku. Novi Sad. 2004.
11. Primena lasera u medicine. Martin. www.hilus.hr (poslednje otvaranje: jun 2014)
12. Senčanić I, Stamenković M, Babović S, Jovanović V, Jakšić V: Korelacija centralne debljine rožnjače sa sistemskim i okularnim faktorima kod obolelih od dijabetes melitus. Acta Ophthalmologica 2014; 40 (1):5-10
13. Zlatanović G, Veselinović D, Jovanović P: Oftalmologija. Galaksija – Niš. Niš. 2011.

LASER – DOSE, RISKS AND CONSEQUENCES

Rade R. Babić^{1,2}, Aleksandra Pavlović-Radojković⁵, Aleksandar Veselinović³, Marko Zlatanović³, Maja Živković³, Marija Cvetanović³, Branislav Tomašević³, Jovica Mršić³, Aleksandra Marjanović⁴, Strahinja Babić⁴

¹Centar for Radiology, CC Niš

²High Medical School "Hipokrat" Bujanovac

³Ophthalmology Clinic, Clinical Center Niš

⁴University of Nis, Faculty of Medicine, Niš,

⁵Unimed Pharma

Laser is a source of electromagnetic waves (light) emitted by a coherent beam of photons in the infrared and visible spectrum of electromagnetic radiation, while the laser light is monochromatic, coherent and spread in the same direction. The word laser is formed from the initial letters of the English words Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. This paper gives an overview of stimulated emission, the laser material, laser classifications, laser application in medicine, effects of laser on biological tissue and the interaction of laser with biological tissue. The authors point out that, while working with the laser, the operator and medical personnel should implement appropriate measures to protect the eyes. They also emphasize that diseases caused by laser radiation are on the list of occupational diseases. It is concluded that the specified information on biological action of laser is encouraging, but at the same time obliging, meaning that only the patients with strong medical indication should be considered candidates for laser treatment. In the near future we can expect a new generation of lasers that will provide immense opportunities to explore so far untested physical phenomena of laser. *Acta Ophthalmologica 2015;41(1):29-39.*

Key words: laser, radiation, medicine, ophthalmology, dosage, risks, consequences

Kontakt: Prof. Rade R. Babić, radiolog
Centar za radiologiju KC Niš
Bulevar dr Zorana Đinđića br. 48
18000 Niš, Srbija
e-mail: gordanasb@open.telekom.rs