

LASERSKO OSVETLJEVANJE

MATJAŽ ŠUBIC

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Lasersko osvetljevanje se uporablja na mnogih področjih kot sta na primer industrija in medicina. Zadnja leta pa so vse bolj pogoste raziskave, kako lasersko svetlobo uporabiti kot izvor svetlobe v zaslonih in projekcijskih sistemih. V primerjavi s sedaj uporabljenimi žarnicami, laserji ponujajo veliko boljši barvni obseg, večjo moč svetlobe in precej daljšo življenjsko dobo. Lasersko osvetljevanje lahko uporabimo tudi pri slikanju hitro gibajočih se predmetov. S hitrimi in močnimi laserskimi sunki lahko zamrznemo sliko in posnamemo ostro sliko predmeta. Zaradi laserskega osvetljevanja bo kvaliteta slike odvisna od dolžine in intenzitete laserskega sunka. Z laserskim osvetljevanjem lahko slikamo vroče predmete, ki oddajajo energijo v obliki svetlobe. Ker ima laserska svetloba ozek spekter, lahko s pasovno prepustnim filtrom na kamero prepustimo samo svetlobo v spektralnem območju laserja. Posledično dobimo sliko predmeta brez toplotne svetlobe. Največja težava laserskega osvetljevanja so pege, ki se kažejo kot nezaželen zrnast vzorec na osvetljeni površini in zmanjšajo kvaliteto slike. Z različnimi metodami lahko zmanjšamo kontrast peg pod 1 %.

LASER ILLUMINATION

Laser illumination is used in many different fields such as industry and medicine. In recent years, there are more and more studies on how to use laser light as a light source in screens and projection systems. Compared to the currently used light sources, lasers offer a much better color gamut, higher light output, and a much longer lifespan. Laser lighting can also be used to capture fast-moving objects. With fast and powerful laser pulses, we can freeze the image and take a sharp image of the object. Due to laser illumination, the image quality will depend on the length and intensity of the laser pulse. With laser illumination, we can shoot hot objects that emit energy in the form of light. Because the laser light has a narrow spectrum, with the use of a band-pass filter only the light in the spectral range of the laser will reach the camera sensor. As a result, we get an image of an object without thermal light. The biggest problem with laser illumination are speckles, which appear as an unwanted grainy pattern on the illuminated surface and reduce the image quality. Various methods can reduce the contrast of speckles below 1 %.

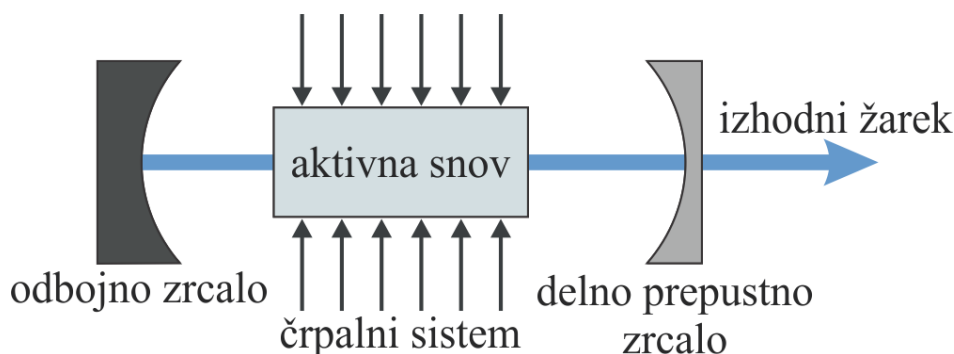
1. Uvod

Danes poznamo več vrst izvorov svetlobe. Žarnice so prvi odkriti električni izvor svetlobe, ki se uporabljajo še danes. Žarilna nitka v svetilki pretvori električno energijo v svetlobno s pomočjo segrevanja kovinske nitke do zelo visokih temperatur. Ker imajo žarnice slab izkoristek energije, jih iz trga vse bolj izpodrivajo LED žarnice. Čeprav oddana svetloba ni tako močna, je svetlobni žarek bolj usmerjen. Tretji zelo pogost izvor svetlobe pa je laser. Laserska svetloba je koherentna, ima značilno valovno dolžino in veliko intenziteto. Laser tako izgleda kot odlična izbira za izvor svetlobe za osvetljevanje. Čeprav se koherentnost laserske svetlobe sprva zdi kot pozitivna lastnost, se pri laserskem osvetljevanju izkaže prav nasprotno. Pri osvetljevanju z laserjem pride do interference svetlobe, tako da bomo na osvetljeni površini opazili minimume in maksimume intenzitete svetlobe. Takemu zrnatemu vzorcu pravimo pege in močno pokvarijo kvaliteto slike dobljene z laserskim osvetljevanjem. Poraja se torej vprašanje, ali je mogoče zmanjšati koherentnost laserske svetlobe, da ne pride do nezaželenih zrnatih vzorcev na sliki. Z rešitvijo bi odklenili vrsto aplikacij laserskega osvetljevanja, ki do sedaj niso mogoče.

Znotraj članka si bomo ogledali, kateri tipi laserjev so najbolj primerni za lasersko osvetljevanje, ter predstavili nekaj tehnik za zmanjševanje kontrasta peg. Čeprav je v zadnjih letih na to temo vse več raziskav z pozitivnimi rezultati, obstaja še mnogo odprtih vprašanj. Eden glavnih vprašanj je, kako narediti kompakten in univerzalen sistem, ki bo ne glede na tip laserja zmanjšal pegasti kontrast pod mejo, ki jo človeško oko na sliki ne bo opazilo.

2. Delovanje laserja

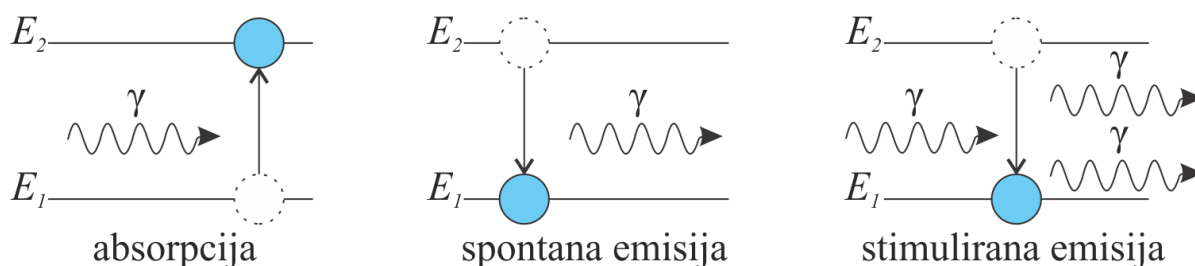
Laser je naprava, ki oddaja usmerjeno, močno, enobarvno in koherentno svetlobo. Sestavljen je iz aktivne snovi, resonatorja in črpalnega sistema. Aktivna snov oziroma medij je lahko v obliki kapljčevine ali trdnine in ima nalogo, da generira svetlobo. Danes so nepogrešljivi predvsem polprevodniški laserji, kjer je aktivno sredstvo polprevodnik. Laser za delovanje potrebuje zunanji izvor energije, ki ga predstavlja črpalni sistem. Resonator je po navadi sestavljen iz dveh odbojnih elementov, v primeru trdninskega laserja na sliki 1 konkavnih zrcal, med katerima se nahaja aktivna snov. Eno zrcalo je povsem odbojno, medtem ko je drugo delno prepustno.



Slika 1. Skica sestave laserja.

Znotraj črpanega laserja potekajo procesi, kjer elektroni v atomu prehajajo med orbitalami oziroma energijskimi nivoji, kot prikazuje slika 2. Sistemu z dvema energijskima nivojema, kjer je lahko atom v osnovnem ali vzbujenem stanju, pravimo dvonivojski sistem. Energija osnovnega stanja naj bo E_1 in energija vzbujenega stanja E_2 , pri čemer naj bo E_1 manjša od E_2 . Razliko med energijama nivojev zapišemo kot:

$$E_2 - E_1 = \hbar\omega_0. \quad (1)$$



Slika 2. Na levi skici atom preide iz osnovnega stanja E_1 v vzbujeno stanje E_2 z absorpcijo fotona γ . Pri spontani emisiji atom preide v osnovno stanje E_1 z izsevanjem fotona γ . Na desni skici pa foton γ stimulira vzbujeni atom, da preide v osnovno stanje E_1 in odda foton γ .

2.1 Absorpcija fotona

Pri absorpciji fotona atom preide v višje stanje, tako da sprejme ustrezno energijo $\hbar\omega_0$ v obliki fotona (slika 2). Takrat atomu rečemo, da je v vzbujenem stanju. Več kot je fotonov pri frekvenci prehoda ω_0 , več se jih lahko absorbira in večja je verjetnost za prehod atoma v vzbujeno stanje. Razmerje med verjetnostjo za prehod na časovno enoto in gostoto energije fotona opišemo s koeficientom B_{12} , ki je eden od Einsteinovih koeficientov [1].

2.2 Spontana emisija

Spontana emisija je prehod vzbujenega atoma v nižje stanje, ko pri tem izseva foton (slika 2). Pri spontani emisiji ima foton energijo enaki razliki energijskih nivojev E_1 in E_2 (enačba (1)). Smer izsevane svetlobe je poljubna, v odsotnosti zunanega polja je poljubna tudi polarizacija izsevane svetlobe. Verjetnost za prehod na časovno enoto označimo z Einsteinovim koeficientom A_{21} . Karakteristični (naravni) razpadni čas vzbujenega stanja vpeljemo kot $\tau = 1/A_{21}$ [1].

2.3 Stimulirana emisija

Tretji pojav je prehod atoma iz vzbujenega stanja v osnovno stanje zaradi interakcije s fotonom. Ko na vzbujeni atom vpadne foton, se atom vrne v osnovno stanje in pri tem izseva foton, ki je povsem enak vpadnemu (slika 2). Temu procesu pravimo stimulirana emisija. Kadar pride do stimulirane emisije, se število atomov v vzbujenem stanju zmanjša, število fotonov v stanju, ki je prehod povzročilo, pa se poveča. Pri tem je ključnega pomena, da je foton, ki nastane pri stimulirani emisiji, enak vpadnemu fotonu. Izsevana svetloba ima tako enako fazo, frekvenco, polarizacijo in smer potovanja kot vpadna. Razmerje med verjetnostjo za stimulirano emisijo na časovno enoto in gostoto energije fotona nam podaja Einsteinov koeficient B_{21} . Poznamo tudi zvezo med Einsteinovimi koeficienti:

$$A_{21} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} B_{12}, \quad (2)$$

$$B_{12} = B_{21}^1. \quad (3)$$

V enačbi 2 je ω frekvenca fotona in c hitrost svetlobe v mediju [1].

2.4 Črpanje laserja

Za delovanje laserja mora biti v aktivni snovi več atomov v vzbujenem stanju oziroma zgornjem laserskem nivoju kot jih je v spodnjem laserskem nivoju. Tako stanje imenujemo inverzna zasedenost, ki jo dosežemo s črpanjem aktivne snovi. Pri črpanju lahko dovajamo energijo aktivni snovi z električnim tokom, lahko pa aktivno snov osvetljujemo z nekim drugim laserjem in tako zagotovimo energijo potrebno za črpanje atomov v vzbujeno stanje. Ker pri laserju atome intenzivno črpamo iz spodnjega nivoja (na primer E_1) v zgornji nivo (E_2), jih je sedaj več v stanju z energijo E_2 , kot jih je v stanju z energijo E_1 . Posledično poteka stimulirana emisija in elektroni preidejo v osnovno stanje.

V resonatorju se svetloba ojača, saj se od zrcal odbija in večkrat preide aktivno snov. Začetni foton nastane pri spontani emisiji in vsi naslednji fotoni, ki jih atom odda pri stimulirani emisiji, so enaki po frekvenci, fazi in polarizaciji. V resonatorju so mogoče izgube svetlobe in pogoj za kontinuiteto delovanje laserja je ravnovesje med notranjimi izgubami, ojačenjem in izgubami fotonov.

2.5 Koherentnost laserske svetlobe

Laserska svetloba je koherentna, kar je zelo pomemben pojem za nastanek interference. Svetlobno polje je koherentno, ko je fazna razlika električnega valovanja na različnih mestih ali ob različnih časih konstanta. Pri superpozicij koherentnih valovanj dobimo značilni konstruktivni ali destruktivni interferenčni vzorec, medtem ko pri superpoziciji nekoherentnih valovanj ne dobimo interferenčne slike. Ločimo dve vrsti koherence, prostorsko in časovno koherenco. Prostorska koherenca označuje konstantno fazno razliko med električnimi polji na različnih mestih znotraj svetlobnega žarka. Velika prostorska koherenca je ena od glavnih razlik med lasersko svetlobo in sevanjem ostalih svetlobnih

¹Zveza velja le v primeru nede generiranih stanj. V realnih sistemih so stanja pogosto degenerirana in je treba gornjo enačbo ustrezno poravnati $B_{21}/B_{12} = g_1/g_2$, kjer sta g_1 in g_2 degeneriranosti stanj.

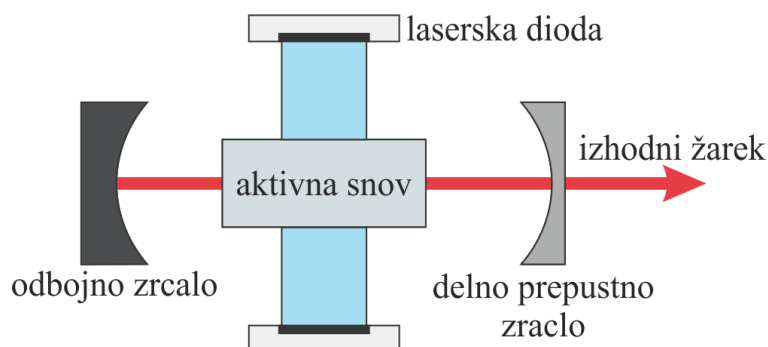
izvirov. Posledično se laserski žarek širi pod majhnim kotom in svetlobo lahko zberemo v zelo majhni točki. Časovna koherenca predstavlja korelacijo med električnimi polji na enem mestu, vendar ob različnih časih. Povedano drugače, časovna koherenca pove, kako dobro električno valovanje interferira samo s seboj ob različnih časih. Laserska svetloba ima zelo veliko časovno koherenco, saj električno polje svetlobe niha sinusno in lahko napovemo razvoj valovanja po času.

3. Tipi laserjev primerni za osvetljevanje

Z laserji lahko dobimo svetlobo v skoraj poljubni valovni dolžini in moči, zato so uporabni na mnogih raziskovalnih in industrijskih področjih. Ideja o uporabi laserjev kot izvoru svetlobe za osvetljevanje je že zelo stara. V primerjavi z žarnicami, imajo laserji veliko daljšo življenjsko dobo, večjo moč in boljši barvni razpon. Da pa dosežemo velik barvni razpon potrebujemo laserje, ki oddajajo spektralno čisto rdečo, modro in zeleno svetlobo. Za množično proizvodnjo laserskih sistemov želimo imeti tudi čim bolj kompakten, enostaven laserski izvor z dobrim izkoristkom moči. Ogleдали si bomo nekaj tipov laserskih izvorov, ki bi bili primerni za lasersko osvetljevanje.

3.1 Diodno črpani trdninski laserji

Že po poimenovanju laserja lahko sklepamo, da je aktivni medij trdna snov. Najbolj pogosto aktivno sredstvo je neodim itrij aluminijev granat (*Nd:YAG*), ki proizvede svetlobo valovne dolžine 1064 nm. To svetlobo nato pošljemo skozi nelinearen kristal, da se frekvenca podvoji. Dobimo svetlobo valovne dolžine 532 nm, ki se pogosto uporablja za izdelavo zelenih laserskih kazalnikov. *Nd:YAG* ima spektralni črti tudi pri valovni dolžini 946 nm ter 1320 nm, ki sta dosegljivi pri veliko večji črpalni moči. Po podvajanju frekvence dobimo modro svetlobo valovne dolžine 473 nm oziroma rdečo svetlobo pri valovni dolžini 660 nm [2]. Pri takih laserjih aktivno snov črpamo optično, kjer izvor energije predstavlja laserska dioda. Sestavo diodno črpanega trdninskega laserja prikazuje spodnja slika 3.

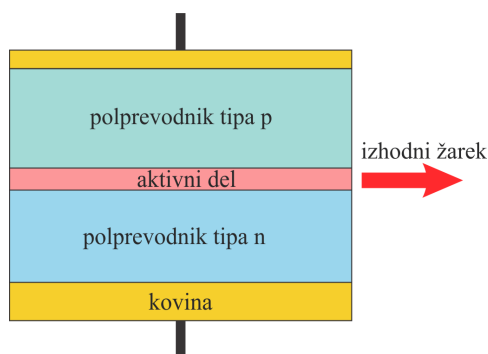


Slika 3. Diodno črpan trdninski laser, ki ga z lasersko diodo črpamo s strani.

Ena od prednosti takih laserjev je velika izhodna moč svetlobe, ki doseže vrednosti do nekaj 10 W. Povprečni izkoristek diodno črpanih laserjev je okoli 20 %. To pomeni, da če za črpanje uporabljamo infrardečo lasersko diodo moči 2 W, dobimo izhodno moč 0.4 W. Da bi bili diodno črpani laserji uporabni kot izvor svetlobe za zaslone in projektorje, potrebujemo rdeče-zelen-modre (RGB) laserski sistem. Izdelava takih sistemov je draga in zahteva zapleteno optično postavitve za pretvorbo frekvenc svetlobe.

3.2 Mejno sevajoče laserske diode

Pri laserskih diodah je aktivna snov polprevodnik, ki določa barvo oziroma valovno dolžino svetlobe. Ko skozi polprevodnik teče tok v prevodni smeri, se rekombinirajo elektroni in vrzeli ter pri tem oddajo energijo v obliki fotona. V primerjavi s svetlečimi diodami pri laserskih diodah prevladuje stimulirano sevanje in dobimo koherentno svetlobo. Optični resonator je ponavadi kar sprednja in zadnja stena polprevodnika. Lomni količnik polprevodnika je blizu 4, zato je odbojnost stene dovolj velika za delovanje laserja. Na sliki 4 lahko vidimo, da pri mejno sevajoči laserski diodi laserska svetloba izstopa pravokotno na normalo polprevodnika.



Slika 4. Prikaz smeri izhoda laserskega žarka pri mejno sevajoči laserski diodi. Svetloba izhaja v smeri pravokotno na normalo p-n stika.

Polprevodniški laserji oddajajo svetlobo v infrardečem, vidnem in tudi ultravijoličnem delu spektra. Barva izsevane svetlobe je odvisna od širine energijske reže polprevodnika. Najbolj uporabne so spojine III. skupine (Al, Ga, In) in V. skupine (P, As, Sb), kjer so vrednosti energijskih rež v območju $E_g = (0.10, 2.50)$ eV. Slabosti mejno sevajočih laserskih diod sta nefokusiran laserski žarek in nizka izhodna moč, ki doseže le nekaj 100 mW. Večje moči lahko dosežemo z več zaporednimi diodami, vendar moramo z različnimi tehnikami poskrbeti za enakomerno osvetljevanje. Prednost laserskih diod pa je kompaktnost in diode so enostavno modulirane v časovnem območju.

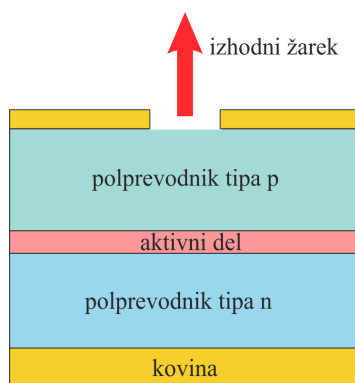
3.3 Površinsko sevajoči polprevodniški laserji

Površinsko sevajoči laserji so polprevodniški laserji, kjer svetloba izhaja v smeri normale na p-n stik kot prikazuje slika 5. Z običajnimi polprevodniki ne moremo hkrati doseči velike izhodne moči in dobre kvalitete žarka. S temi laserji lahko dosežemo boljši okroglo-centriran žarek, vendar pri nizki moči. Ponovno lahko vzamemo več laserjev za močnejšo moč žarka in paralelno sestavimo sliko. S tem ne potrebujemo več enega močnega izvora.

Svetlobo valovne dolžine od 650 nm do 1300 nm lahko dobimo s površinsko sevajočimi laserji, kjer je aktivno sredstvo galijev arzenid ($GaAs$). Ta polprevodnik ima direktno energijsko režo, kar zelo poveča izkoristek laserja. Za zaslone in projektorje je najbolj pomembna rdeča, zelena in modra svetloba. Z aktivnim sredstvom indijev galijev arzenid ($InGaAs$) lahko dobimo vidno svetlobo pri valovnih dolžinah 615 nm (rdeča), 532 nm (zelena) in 465 nm (modra) pri moči okoli 100 mW.

3.4 Optično črpani polprevodniški laserji

Za razliko od mejno in površinsko sevajočih laserskih diod, pri optično črpanih polprevodniških laserjih energijo dovajamo z osvetljevanjem aktivnega sredstva z lasersko diodo. Z optičnim črpanjem dosežemo inverzno populacijo v aktivnem sredstvu in posledično pride do rekombinacije elektronov in vrzeli v polprevodniku. Optično črpani polprevodniški laserji oddajajo močno svetlobo in imajo



Slika 5. Prikaz smeri izhoda laserskega žarka pri površinsko sevajoči laserski diodi. Svetloba izhaja v smeri na normalo p-n stika.

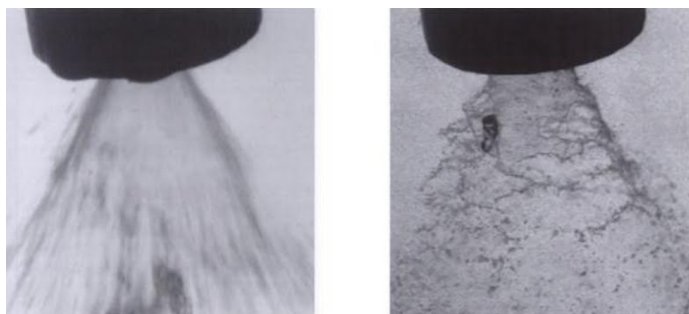
dobro kvaliteto žarka, zato so zelo zanimivi za izdelavo laserskih projektorjev. Za polprevodniške laserje je značilno, da lahko dobimo svetlobo različnih valovnih dolžin. Pri optično črpanih laserjih ni nič drugače in to dosežemo z različnimi aktivnimi sredstvi ali s pomočjo metode podvajanja frekvence svetlobe. Izkoristek optično črpanih polprevodniških laserjev za svetlobo v vidnem spektru je do 20 %.

4. Uporaba laserskega osvetljevanja

Lasersko osvetljevanje se ne uporablja samo za projektorje, ampak poznamo aplikacije tudi v industriji in znanosti. S pomočjo močnih ter hitrih laserskih sunkov lahko zamrznemo sliko in s kamero posnamemo hitro gibajoče se predmete. Lahko se znebimo tudi svetlobe, ki jo telesa oddajajo zaradi toplote ali drugih fizikalnih procesov. S kombinacijo laserskega osvetljevanja in hitre kamere je mogoče dobiti najboljšo možno kvaliteto slike.

4.1 Hitro slikanje

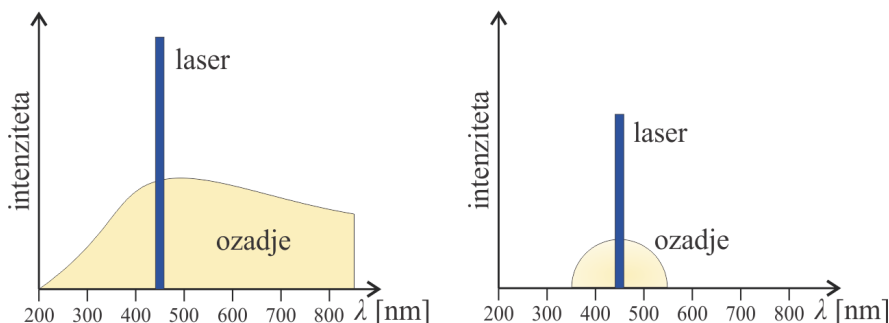
Pri slikanju eksplozij ali izstrelkov po navadi dobimo zamegljeno sliko, saj se predmeti gibljejo prehitro. Na detektor kamere se odbije premalo svetlobe, da bi lahko dobili ostro sliko gibajočih se predmetov. Tipičen pristop za zajemanje slike v čim krajšem času je, da zmanjšamo čas osvetljevanja kamere. Navadne kamere imajo čas osvetljevanja v območju mikrosekund in z njimi lahko na primer posnamemo ostro sliko avtomobila, ki je dolžine nekaj metrov, če se avto giblje s hitrostjo 200 km/h. Če pa bi hoteli slikati izstrelak dolžine 2 cm, ki se giblje s hitrostjo 1000 m/s, bi za ostro sliko morali imeti kamero s časom osvetljevanja nekaj 100 nanosekund. V tem časovnem območju mora na detektor kamere priti dovolj svetlobe. Mogoče je narediti kamero z velikimi in zelo občutljivimi piksli, vendar bi bil celoten sistem drag in velik. Drugi način za zajemanje hitro gibajočih se predmetov pa je s pomočjo laserskega osvetljevanja. S kratkim in intenzivnim laserskim pulzom posvetimo na opazovani predmet v času, ko je zaslonka kamere odprta in na detektor kamere se bo zapisala odbita laserska svetloba. Sistem za hitro slikanje ne bo več toliko odvisen od občutljivosti detektorja ter hitrosti zaslonke kamere, ampak od dolžine ter jakosti laserskega pulza. Ker so lahko laserski pulzi kratki tudi do reda pikosekund in v tem časovnem oknu zagotovijo dovolj svetlobe, dobimo ostre slike hitro gibajočih se predmetov. Poleg slikanja eksplozij in izstrelkov se ta metoda uporablja tudi za slikanje tokov kapljev in plinov. Lahko se spremlja gibanje posamičnih kapljic (slika 6), mešanje različnih kapljev, vbrizg plina itd., kar koristi pri analizi majhnih in hitrih delcev.



Slika 6. Obe sliki prikazujeta pršenje tekočine in sta bili posneti z isto kamero pri enakem času osvetljevanja. Leva slika je bila narejena ob neprekinjeni osvetlitvi s halogeno žarnico, medtem ko je na desni sliki za izvor svetlobe uporabljen 25 ns dolg laserski pulz. Posledično je desna slika bolj ostra, vidne so tudi posamezne kapljice. Vir: [3]

4.2 slikanje vročih predmetov

Še ena zelo uporabna lastnost laserjev je ozek spekter oddane svetlobe. Telesa pri zelo visoki temperaturi ponavadi oddajajo energijo v obliki svetlobe v širokem spektralnem območju. Z laserskim osvetljevanjem se lahko znebimo svetlobe, ki pride od toplotnega sevanja ali eksplozij. To dosežemo tako, da na kamero namestimo pasovno prepustni filter v območju laserske svetlobe. Filter bo na detektor kamere večinoma prepustil samo svetlobo iz laserja, ki ima znotraj filtra veliko večjo intenziteto od ostale svetlobe, ki v tem primeru predstavlja motnjo. Princip delovanja filtra prikazuje slika 7. Metoda se uporablja pri opazovanju obdelovanja vročih površin, ko predmet žari in ne moremo jasno videti površine. Z laserskim osvetljevanjem preprečimo, da bi žar nasičil senzor kamere in posledično dobimo sliko, kot da bi bil predmet hladen.



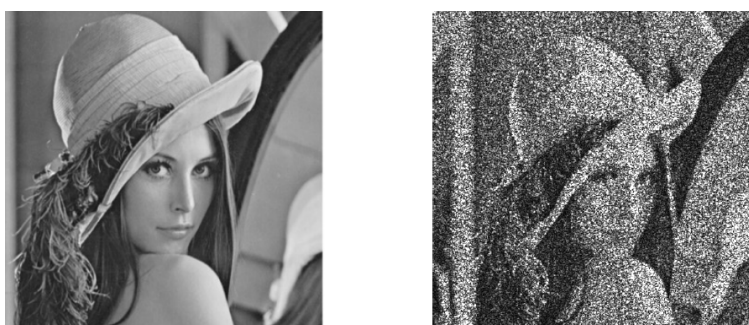
Slika 7. Spekter valovne dolžine svetlobe ozadje, ki ga izseva na primer vroč predmet, in laserske svetlobe. Na levi sliki pri normalnih pogojih ter na desni z uporabo ozkega pasovno prepustnega filtra.

4.3 Projekcijski sistemi

Že od šestdesetih let 20. stoletja, ko so odkrili laserje, so bili ti predvideni kot izvor svetlobe za projekcijske sisteme. Zaradi različnih ovir pa laserski projektorji še danes niso prišli v redno proizvodnjo in prodajo. Za izvor svetlobe v projektorjih se uporabljajo žarnice in svetlobno sevaajoče diode (angl. *Light Emitting Diode* oz. LED), ki so oboje cenovno ugodnejše od laserjev. Danes je večina projektorjev zgrajena na osnovi žarnic. Ksenonske žarnice imajo dober barvni obseg ter so zelo močne in se zato uporabljajo za boljše filmske projektorje. Življenjska doba takih žarnic je ocenjena na 10,000 ur. Z LED lahko dosežemo širši spekter valovnih dolžin, vendar je izhodna moč zelo omejena. Svetlost takih projektorjev je premajhna za uporabo v kinih. Življenjska doba LED je okoli 20,000 ur. V nasprotju z žarnicami in LED se laserska svetloba ne razprši, zato

lahko z laserji dosežemo svetlejšo sliko. Glavna prednost laserskih projekcijskih sistemov je uporaba laserjev z določeno valovno dolžino. Ker lahko z laserji pokrijemo ključne komponente vidnega spektra, dobimo zelo dober razpon barv. Življenjska doba laserjev je veliko daljša in lahko preseže 50,000 ur.

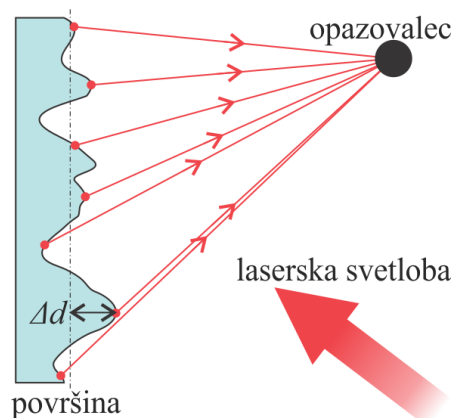
Pri uporabi laserjev je potrebno paziti na varnost. Laserska svetloba lahko pri direktnem pogledu v žarek poškoduje vid. Zato je pomembno, da je laserska postavitve varno zaprta in ni direktnega dostopa do laserskega sevanja. Aplikacija laserskega osvetljevanja pa je predvsem omejena zaradi prisotnosti peg. Pega je modulacija jakosti svetlobe, ki nastopi ob osvetljevanju hrapave površine s koherentno ali delno koherentno svetlobo. Jakostna modulacija nastane zaradi konstruktivne in destruktivne interference med laserskimi žarki, ki se odbijejo na osvetljeni površini. Posledica peg je zrnata slika, ki je pogosto nerazločna. Slika 8 prikazuje vpliv peg na projekcijski sliki.



Slika 8. Na levi je originalna slika brez peg, na desni je slabo razvidna slika zaradi peg. Vir: [4]

5. Pege in zmanjševanje pegastega kontrasta v sliki

Ovira za uporabo laserjev kot izvor svetlobe za osvetljevanje predstavljajo pege, ki pa so posledica velike koherence laserske svetlobe. Slika 9 ilustrira nastanek peg. Koherentni laserski žarek vpada na opazovani predmet oziroma projekcijski zaslon, ki v merilu optične valovne dolžine velja za hrapavo površino. Slednja povzroči razlike med potmi posameznih žarkov, ki sovpadajo s faznimi razlikami razpršene svetlobe. Na površini predmeta nastane interferenčni porazdelitev električnega polja. Ko opazovalec pogleda na lasersko osvetljeno površino, se porazdelitev električnega polja preslika na očesno mrežnico, kjer nastane interferenčni vzorec. Opazovalec bo zato na načrtovani sliki opazil naključne temne in svetle pike.



Slika 9. Koherentna laserska svetloba vpada na hrapavo površino in se odbije do opazovalca oziroma na detektor.

Za vrednotenje fluktuacije jakosti vzorca peg se uporablja količina, imenovana pegasti kontrast C . Definirana je kot razmerje med standardno deviacijo σ_I in povprečjem intenzitete svetlobe \bar{I} , kot prikazuje spodnja enačba. Vir: [5]

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} = \frac{\sqrt{\bar{I}^2 - \bar{I}^2}}{\bar{I}}. \quad (4)$$

Vrednost pegastega kontrasta je lahko med 0 in 1. Nižja vrednost C predstavlja manjši vpliv peg na sliko. Slika s konstantno intenziteto ima kontrast enak 0. Popolnoma razvita pega pa ima kontrast $C = 1$ in jo je mogoče ustvariti z osvetljevanjem zadosti hrapave površine s koherentno in polarizirano svetlobo. Človeško oko loči vzorec peg s kontrastom več kot 4 %.

Za praktično uporabo laserjev za osvetljevanje je zato zelo pomembno, da je šum peg manjši od meje, ki jo človek še zazna. To se lahko doseže na dva različna načina. Pega je posledica koherentne lastnosti laserske svetlobe, zato pri prvem načinu zmanjšanja pegastega kontrasta odpravimo prostorsko in časovno koherenco svetlobe. Drugi način pa se imenuje časovno povprečenje in temelji na hitrem spreminjanju vzorca peg. Oko oziroma kamera izpovpreči različne vzorce in tako dobimo nižji kontrast peg. Odzivni čas človeškega očesa je okoli 30 ms in vzorec peg se mora spreminjati hitreje, če želimo na sliki videti manj peg. Pri obeh načinih obstaja vrsta metod, s katerimi lahko zmanjšamo pegasti kontrast. Kontrast se manjša kot [6]:

$$C = \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (5)$$

kjer je N število inkohherentnih in neodvisnih vzorcev peg z enako povprečno intenziteto svetlobe.

5.1 Zmanjševanje koherence laserske svetlobe

Za lasersko osvetljevanje lahko vpeljemo faktor redukcije peg R , ki je sestavljen iz produkta treh podfaktorjev [5]:

$$R = R_\lambda R_\sigma R_\Omega = \frac{1}{C}. \quad (6)$$

R_λ predstavlja redukcijski faktor zaradi razlik v valovni dolžini, R_σ je faktor zaradi raznolikosti polarizacije svetlobe in R_Ω faktor zaradi kotnih razlik.

Redukcijski faktor zaradi raznolikosti valovne dolžine laserske svetlobe je določen z obliko spektra laserske svetlobe in hrapavosti površine osvetljenega objekta. Enačba za izračun R_λ je definirana kot [5]:

$$R_\lambda = \sqrt{\frac{\Delta\lambda \cdot 2\Delta d}{\lambda^2}}, \quad (7)$$

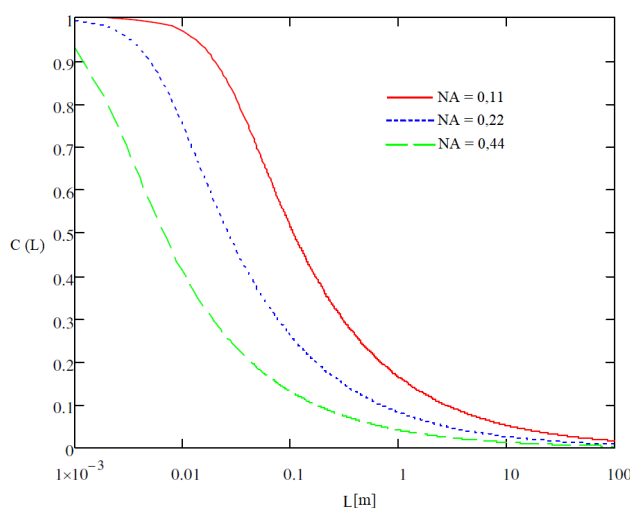
kjer je λ valovna dolžina laserja, $\Delta\lambda$ spektralna širina laserja in Δd povprečna razlika v višini profila površine (glej sliko 9). Zgornjo enačbo za R_λ lahko zapišemo še malo drugače. Časovna koherenca laserja je karakterizirana s koherentno dolžino L_c . Definirana je kot razdalja, pri kateri koherentno valovanje še ohrani določeno stopnjo koherence. Koherentna dolžina je določena z valovno dolžino svetlobe, ki jo laser oddaja, in spektralno širino te svetlobe $L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$ [5]. Torej lahko enačbo 7 prepišemo z uporabo koherentne dolžine laserja L_c [5]:

$$R_\lambda = \sqrt{\frac{2\Delta d}{L_c}}. \quad (8)$$

V primeru, da je koherentna valovna dolžina laserske svetlobe L_c krajša od povprečne hrapavosti osvetljene površine $2\Delta d$, se kontrast peg znatno zmanjša, saj se zmanjša fazna odvisnost in žarki ne morejo več interferirati. Koherentna dolžina bele oziroma sončne svetlobe je okoli $1 \mu\text{m}$, svetlobe, ki jo oddaja laserska dioda, je med $500 \mu\text{m}$ in 1mm , medtem ko je koherentna dolžina laserja s plinskim aktivnim sredstvom nekaj 100m . Dolga koherentna dolžina vodi do več peg na osvetljeni površini.

Najenostavnejši način odpravljanja peg sledi iz enačbe (7). Koherentna dolžina bo krajša za lasersko svetlobo s širokim spektrom. Zeleno svetlobo s spektrom širine do 6.5nm lahko dobimo z diodno črpanimi trdninskimi laserji. Modro in rdečo lasersko svetlobo širine okoli 3.5nm pa dobimo s polprevodniškimi diodami.

Časovno koherenco laserske svetlobe pa lahko pokvarimo s pomočjo večrodovnih optičnih vlaken. Svetlobo speljemo v večrodovno vlakno, kjer se razširi potovalni čas svetlobe in posledično se razširi tudi svetlobni žarek. Na izhodu vlakna zato dobimo manj koherentno svetlobo. Kontrast peg je odvisen od dolžine večrodovnega vlakna L in se z dolžino manjša. Slika 10 prikazuje odvisnost pegastega kontrasta od dolžine večrodovnega optičnega vlakna za različne numerične aperture vlakna. Numerična apertura nam pove, pod kolikšnim maksimalnim kotom lahko svetloba še vstopi ali izstopi v optično vlakno. Za zmanjševanje pegastega kontrasta so bolj primerna večrodovna optična vlakna kot enorodovna vlakna, saj imajo večjo numerično aperturo.

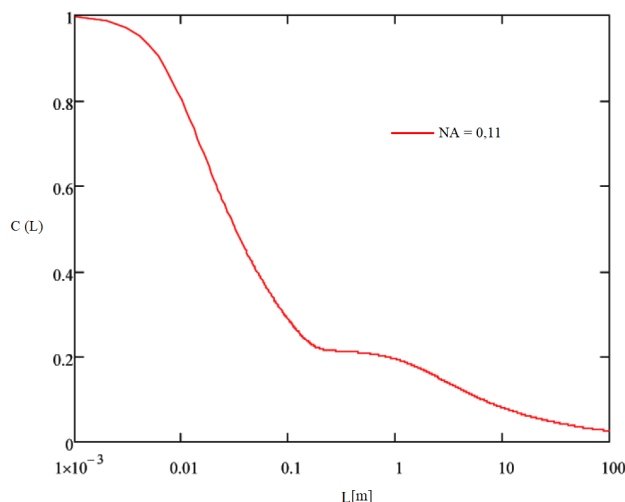


Slika 10. Odvisnost pegastega kontrasta C od dolžine večrodovnega optičnega vlakna L za različne numerične aperture vlakna. Vir: [5]

Svetlobo z več spektralnimi črtami lahko speljemo po večrodovnem vlaknu. Pegasti kontrast v odvisnosti od dolžine optičnega vlakna postane odvisen tudi od razmerja širine posameznih spektralnih črt $\Delta\lambda$ in razdalje med njimi $\Delta\lambda_s$. Na sliki 10 kontrast monotonno padal z dolžino vlakna, medtem ko za določene vrednosti razmerja $\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_s}$ kontrast neha padati, ampak je skoraj konstanten pri daljšanju vlakna (glej sliko 11). Konstantno območje se pojavi, ker je spektralna širina $\Delta\lambda$ dosti manjša od razdalje med posameznimi spektralnimi črtami. Prisotnost konstantnega dela poveča potrebno dolžino vlakna, da dosežemo željeno majhno vrednost pegastega kontrasta. Avtorji članka [3] so iz meritev za večrodovna optična vlakna dobili mejno vrednost razmerja širine spektralnih črt in razdalje med njimi pri kateri se na grafu $C(L)$ ne pojavi konstantno območje [4]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_s} \geq 0,25. \quad (9)$$

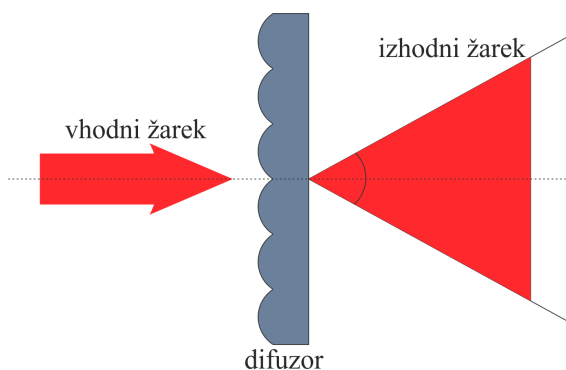
Lasersko osvetljevanje



Slika 11. Manjšanje pegastega kontrasta z daljšanjem večrodovnega optičnega vlakna. Pri vlaknih daljših od 0.1 m je manjšanje pegastega kontrasta pohlevnejše. Vir: [5]

5.2 Časovno povprečenje

Bolj pogosti način zmanjševanja peg je s pomočjo hitro spreminjajočega vzorca peg, ki ga detektor ali oko izpovpreči. Spreminjajoči vzorec peg dobimo s premikanjem difuzorja ali premikanjem osvetljene površine. Difuzor je hrapavo prepustno steklo, ki razkloni vpadno svetlobo pod različnimi koti, kot prikazuje slika 12.



Slika 12. Skica razpršitve laserskega žarka po prehodu skozi difuzor.

Manjši pegasti kontrast dosežemo z difuzorji, ki imajo večji divergenčni kot. Difuzor tudi razprši svetlobo v dve pravokotni polarizaciji tako, da dobimo redukcijski faktor zaradi raznolikosti polarizacije. Težava pri povprečevanju vzorcev peg je lahko prepočasno premikanje optičnih elementov, kot bi si pri določeni aplikaciji želeli. Premikanje difuzorja je omejeno s hitrostjo mehanizma, ki difuzor premika, in je lahko počasnejše od hitrosti vzorčenja sensorja ter moduliranja laserske svetlobe. Če bi torej želeli s kamero posneti let izstrelka s pomočjo laserskega osvetljevanja, bi dobili zrnato sliko zaradi peg. Na trgu ni mehanizma, ki bi lahko premikal difuzor hitreje, kot pa je hitrost izstrelka in zato ne dobimo zadostnega števila vzorcev peg, katere bi detektor povprečil.

Ta metoda zmanjševanja peg ni povsem praktična na področju laserskega osvetljevanja, saj želimo žarnice kot izvor svetlobe neposredno zamenjati z laserji. Posledično tudi ni zaželeno, da bi v laserskih sistemih imeli dodatne premikajoče se optične komponente. Na splošno želimo narediti kompakten sistem, ki bi oddajal lasersko svetlobo z zelo majhnim kontrastom peg in bi lahko ne-

posredno nadomestil ostale izvore svetlobe. Raziskave so pokazale [5], da je z razlikami v valovni dolžini in kotnimi razlikami mogoče sestaviti laserski sistem, ki prikazuje sliko s pegastim kontrastom okoli 1 %. Tako nizko vrednost je mogoče doseči s pravo kombinacijo načrtno zasnovanega izboljševalnika pegastega kontrasta, pri katerem je laserska svetloba sklopljena v večrodovno vlakno, ki je odvisno od spektra laserske svetlobe. Zelo nizka vrednost pegastega kontrasta je odvisna tudi od polmera leče in efektivne hrapavosti osvetljene površine oziroma zaslona.

6. Zaključek

Lasersko osvetljevanje je metoda, ki prinaša veliko raznolikost aplikacije. Močan in hiter laserski sunek lahko nadomesti funkcijo bliskavice pri kamerah. Navadna bliskavica ne zagotovi dovolj svetlobe, čas sunka svetlobe pa je predolg, da bi dobili ostro sliko hitro gibajočega se predmeta, zato si lahko pomagamo z laserskim osvetljevanjem. Zadnjih nekaj let so vse pogostejše raziskave o uporabi laserjev kot izvoru svetlobe v projekcijskih sistemih in zaslonih. Laserska svetloba je intenzivnejša in ima boljši barvni obseg v primerjavi z do sedaj uporabljenimi žarnicami v filmskih projektorjih. Težave pri laserskem osvetljevanju nastanejo po odboju svetlobe na površini predmeta ali projekcijskega zaslona, saj zaradi velike koherentnosti laserske svetlobe na detektorju kamere oziroma očesni mrežnici nastane interferenčni vzorec, ki pokvari sliko. Interferenčnim vzorcem pravimo pege in poznamo vrsto metod, s katerimi lahko kontrast peg zmanjšamo. Različne raziskave so pokazale, kako doseči pegasti kontrast pod 1 %.

LITERATURA

- [1] K. F. Renk. *Basics of Laser Physics; For Students of Science and Engineering*. Springer (2012). 83-95.
- [2] A.J. Antonczak. *Blue 473-nm solid state diode pumped Nd:YAG/BiBO microchip laser*. 2007 9th International Conference on Transparent Optical Networks (2007). 227-229.
- [3] C.E. Webb in J.D.C. Jones. *Handbook of Laser Technology and Applications, Volume III: Applications*. IoP (2004). 1919-1931.
- [4] T.T.K. Tran. *Speckle suppression in laser projection displays*. Buskerud and Vestfold University College. Horten (2015). 5.
- [5] J.G. Manni in J.W. Goodman. *Versatile method for achieving 1 % speckle contrast in large-venue laser projection displays using a stationary multimode optical fiber*. Optics Express Vol. 20 Issue 10 (2012). 11288-11315.
- [6] J.W. Goodman. *Some fundamental properties of speckle*. Journal of the Optical Society of America Vol. 66 Issue 11 (1976). 1145-1150.
- [7] *Imaging Electronics 101: Understanding Camera Sensors for Machine Vision Applications*. Edmund Optics. Spletna stran: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-camera-sensors-for-machine-vision-applications/> [ogled 29.6.2021].
- [8] *Cavitar Applications*. Cavitar. Spletna stran: <https://www.cavitar.com/applications/> [ogled 27.6.2021].
- [9] K.V. Chellappan, E. Erden in H. Urey. *Laser-based displays: a review*. Applied Optics Vol. 49 Issue 25 (2010). 79-98.