

Prijenos električne energije korištenjem lasera

Hirš, Jurica

Undergraduate thesis / Završni rad

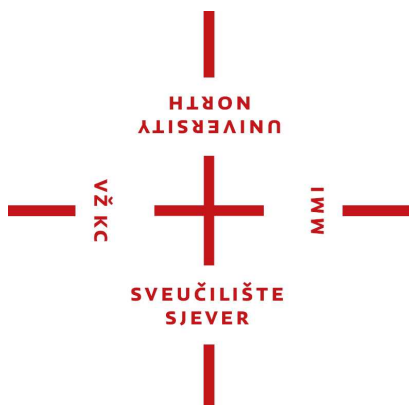
2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:400435>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

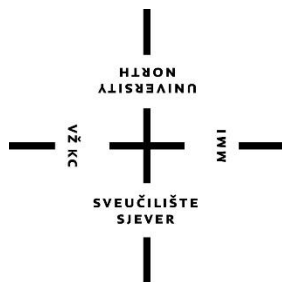
Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





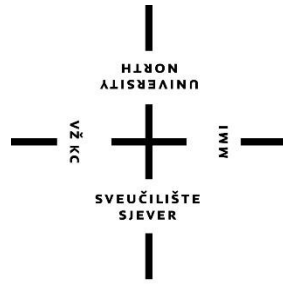
**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 439/EL/2018

Prijenos električne energije korištenjem lasera

Jurica Hirš, 3256/601

Varaždin, rujan 2018. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za Elektrotehniku

Završni rad br. 439/EL/2018

Prijenos električne energije korištenjem lasera

Student

Jurica Hirš, 3256/601

Mentor

Stanko Vincek, struč.spec.ing.el.

Varaždin, rujan 2018. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

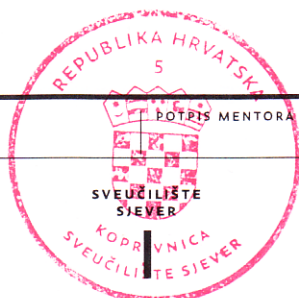
| | | | |
|-----------------------------|---|--------------|--------------------------|
| ODJEL | Odjel za elektrotehniku | | |
| PRISTUPNIK | Jurica Hirš | MATIČNI BROJ | 3256/601 |
| DATUM | 11.09.2018. | KOLEGIJ | Osnove elektrotehnike II |
| NASLOV RADA | Prijenos električne energije korištenjem lasera | | |
| NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU | Transfer of electric power using a laser | | |
| MENTOR | Stanko Vincek, struč.spec.ing.el. | ZVANJE | Predavač |
| ČLANOVI POVJERENSTVA | 1. mr.sc. Ivan Šumiga (predsjednik) | | |
| | 2. Stanko Vincek, struč.spec.ing.el (mentor) | | |
| | 3. dr.sc. Dunja Srpak (član) | | |
| | 4. dipl.ing. Miroslav Horvatić (zamjenski član) | | |
| | 5. _____ | | |

Zadatak završnog rada

| | |
|------|--|
| BROJ | 439/EL/2018 |
| OPIS | <p>U uvodu je potrebno sažeto opisati zašto je bežični prijenos električne energije važan i objasniti principe bežičnog prijenosa. U nastavku je potrebno navesti i opisati vrste lasera i na koji način se upotrebljavaju za bežični prijenos električne energije. Potrebno je navesti performanse i ograničenja lasera te kroz primjere iz prakse prikazati upotrebu laserskog prijenosa električne energije. U završnom djelu je potrebno opisati u kojem će smjeru ići budući razvoj tehnologije bežičnog prijenosa električne energije.</p> |

ZADATAK URUČEN

18.09.2018



Signature

Sažetak

U današnje vrijeme se sve više počinje razmatrati bežični prijenos električne energije zbog nedostataka vezanih uz korištenje žica. Iako ideja bežičnog prijenosa energije postoji već skoro 200 godina, dosada se zbog nedostatka tehnologije ideja minimalno primjenjivala. Sada kada je svijet suočen s energetsom krizom, važnije je nego ikad razviti tu tehnologiju jer će omogućiti prijenos energije iz svemira na Zemlju i ujedno prijenos energije između različitih svemirskih postrojenja, što će jako olakšati sve buduće projekte u svemiru. Jedan od mogućih načina bežičnog prijenosa energije je korištenjem lasera. Pomoću lasera se fokusira elektromagnetsko zračenje i tako se može prenositi kroz zrak, vakuum ili optički kabel na velike udaljenosti. Premda se još nije dostigla jednaka korisnost kod prijenosa energije laserom kao kod mikrovalova, ona se polako dostiže, a osim toga laseri imaju neke važne prednosti naspram mikrovalova. NASA i druge agencije razmatraju korištenje lasera u svemiru za prijenos energije između satelita i Zemlje, Mjeseca, Marsa i ostalih planeta, za napajanje svemirskih postaja, pokretanje svemirskih liftova i pokretanje svemirskih letjelica.

Ovaj rad će prvo ukratko opisati povijest bežičnog prijenosa energije, prije nego se prijeđe na korištenje lasera za prijenos energije. Objasnit će se što je laser, kako funkcionira, kakve vrste lasera postoje i koja vrsta je najbolja za bežični prijenos energije. Opisat će se koje prednosti ima korištenje lasera za prijenos energije u odnosu na druge tehnike, koji problemi postoje kod te tehnologije i kako bi ih se moglo riješiti. Na kraju će se navesti neke postojeće primjene ove tehnologije i planovi za buduće primjene i budući razvoj.

Popis korištenih kratica

| | |
|------------|---|
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| SHARP | Stationary High Altitude Relay Platform |
| Nd:YAG | Neodymium-doped yttrium aluminum garnet |
| InGaAs | Indij Galij Arsen |
| DNK | Deoksiribonukleinska kiselina |
| SAD | Sjedinjene Američke Države |
| JAXA | Japan Aerospace Exploration Agency |
| Nd:Cr:GSGG | Neodymium and chromium doped Gadolinium scandium gallium garnet |

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1. Uvod..... | 1 |
| 2. Prijenos električne energije pomoću lasera..... | 2 |
| 2.1. Bežični prijenos energije | 2 |
| 2.1.1. Početak razvoja bežičnog prijenosa energije | 2 |
| 2.1.2. Prijenos energije mikrovalovima | 3 |
| 2.1.3. Novije tehnologije: korištenje lasera | 3 |
| 2.2. Opis lasera | 6 |
| 2.2.1. Vrste lasera..... | 8 |
| 2.3. Upotreba lasera za bežični prijenos energije | 10 |
| 2.3.1. Foto ćelije..... | 10 |
| 2.3.2. Geometrija prijavnika | 11 |
| 2.3.3. Optimalna valna duljina lasera..... | 11 |
| 2.3.4. Odabir lasera | 12 |
| 3. Performanse i ograničenja | 14 |
| 3.1. Ograničenja..... | 14 |
| 3.2. Prednosti korištenja lasera nad drugim tehnologijama..... | 15 |
| 3.3. Problemi kod primjene tehnologije | 16 |
| 3.4. Sigurnost tehnologije | 16 |
| 4. Primjene laserskog prijenosa energije..... | 18 |
| 4.1. Postojeće primjene..... | 18 |
| 5. Budući razvoj tehnologije | 21 |
| 6. Zaključak..... | 25 |
| 7. Literatura..... | 26 |

1. Uvod

U današnje doba, većina uređaja u svijetu rade zahvaljujući električnoj energiji. Električna energija se dovodi od izvora do potrošača preko vodiča, koji su najčešće ostvareni u obliku žica. Ponekad bi bilo efikasnije kada bi se električna energija mogla dovesti do potrošača bez korištenja žica, a u nekim slučajevima je to čak i jedini način. Bežični prijenos energije kao ideja postoji već dulje vrijeme i u povijesti je bilo mnogo pokušaja da se ostvari pomoću različitih vrsta tehnologije. Iako je mnogo puta dokazano da je bežični prijenos energije moguć, nikada nije dosegnuta željena razina praktične primjene. Kako je u svijetu sve više ljudi, potražnja za energijom je sve veća, a količina fosilnih goriva, koja su nam trenutno glavni izvor energije, je sve manja. Jedno od mogućih rješenja za tu energetska krizu bi bilo skupljanje solarne energije u svemiru pomoću satelita, no bez bežičnog prijenosa energije nebi bilo moguće dovesti tu energiju na Zemlju. Tehnologija koja se do nedavno najviše proučavala za bežični prijenos energije je bila prijenos energije mikrovalovima, no sada u zadnja dva desetljeća se počinje pojavljivati novi način za bežični prijenos energije, a to je korištenje lasera.

Laseri postoje već dulje vrijeme i imaju jako puno primjena u industriji, medicini, komunikaciji, instrumentima i znanstvenim eksperimentima, ali do nedavno se nisu razmatrali kao moguća tehnologija za bežični prijenos energije. Razlog za to je da su do nedavno imali previsoku cijenu i mnogo manju korisnost kod pretvorbe energije od mikrovalova, ali to se sada počinje mijenjati.

2. Prijenos električne energije pomoću lasera

2.1. Bežični prijenos energije

Bežični prijenos energije je revolucionarni koncept čiji potpuni potencijal još nije ostvaren, iako je ideja bežičnog prijenosa energije stara skoro 200 godina. Bežični prijenos energije zahtjeva instalacije samo na mjestu gdje se odašilje energija te na mjestu gdje se prima energija i ne zahtjeva nikakve instalacije između njih. Prijamnik se može odneti na drugu lokaciju bez utjecaja na cijenu instalacije. Bežični prijenos energije bi omogućio napajanje bespilotnih vozila i letjelica ili prijenos energije između satelita i Zemlje, gdje bi satelit pomoću solarnih ćelija skupljao električnu energiju i bežičnim prijenosom slao tu energiju na Zemlju. Prednost tog sistema u odnosu na običnu solarnu elektranu bi bila u tome da bi se tako moglo skupljati mnogo više solarne energije, jer u svemiru Sunce nikada nebi bilo blokirano oblacima, ostalim vremenskim prilikama i reljefom pa bi dan trajao dulje što je satelit u višoj orbiti, jer bi manje vremena provodio u Zemljinoj sjeni. Jedan način na koji bi se mogla prenositi električna energija na tako velike udaljenosti bez korištenja žica bi bio pomoću lasera.

2.1.1. Početak razvoja bežičnog prijenosa energije

Prvi razvoj tehnologije za bežični prijenos energije se javlja u prvoj polovici devetnaestog stoljeća, nakon izuma elektromagneta i otkrića elektromagnetske indukcije i elektromagnetskog zračenja. [1]

Bežični prijenos energije se dijeli u dvije kategorije: ne-radijativna i radijativna.

Kod ne-radijativne tehnike, energija se prenosi pomoću magnetskih polja, korištenjem elektromagnetske indukcije. Ta tehnika se koristi za prijenos energije preko malih udaljenosti. Neke od primjena su punjenje prenosivih elektroničkih uređaja kao što su mobiteli, punjenje implantiranih medicinskih uređaja kao što su pacemaker i punjenje električnih vozila.

Kod radijativne tehnike, energija se prenosi pomoću zrake elektromagnetskog zračenja, a to mogu biti mikrovalovi ili laserske zrake. Ovom tehnikom se može prenositi energiju na velike udaljenosti, ali se mora usmjeriti izvor energije prema prijamniku. Ovo je novija tehnologija od ne-radijativne, ali ima već mnogo predloženih primjena kao napajanje bespilotnih letjelica ili prijenos energije između satelita i Zemlje.

2.1.2. Prijenos energije mikrovalovima

Ideja korištenja mikrovalova za bežični prijenos energije se prvi put javlja nakon drugog svjetskog rata. 1964. William Brown je demonstrirao maketnog helikoptera koji je bio napajan mikrovalnom zrakom. Na helikopteru se nalazio uređaj koji je bio kombinacija antene i ispravljača. Taj uređaj je pretvarao mikrovalove u električnu energiju s velikom korisnošću – u optimalnim uvjetima čak preko 90%. Kasniji eksperimenti su postigli bežični prijenos energije pomoću mikrovalova na većoj skali, gdje je 30 kW snage uspješno preneseno preko jedne milje pomoću mikrovalova s korisnošću od 84%. Nakon toga je u SHARP-u tehnologija uspješno primjenjena za bežično napajanje cijelog aviona, prikazanog na slici 2.1, bez dodatnog goriva. [2] [3]



Slika 2.1 SHARP-ov avion koji je napajan mikrovalovima [4]

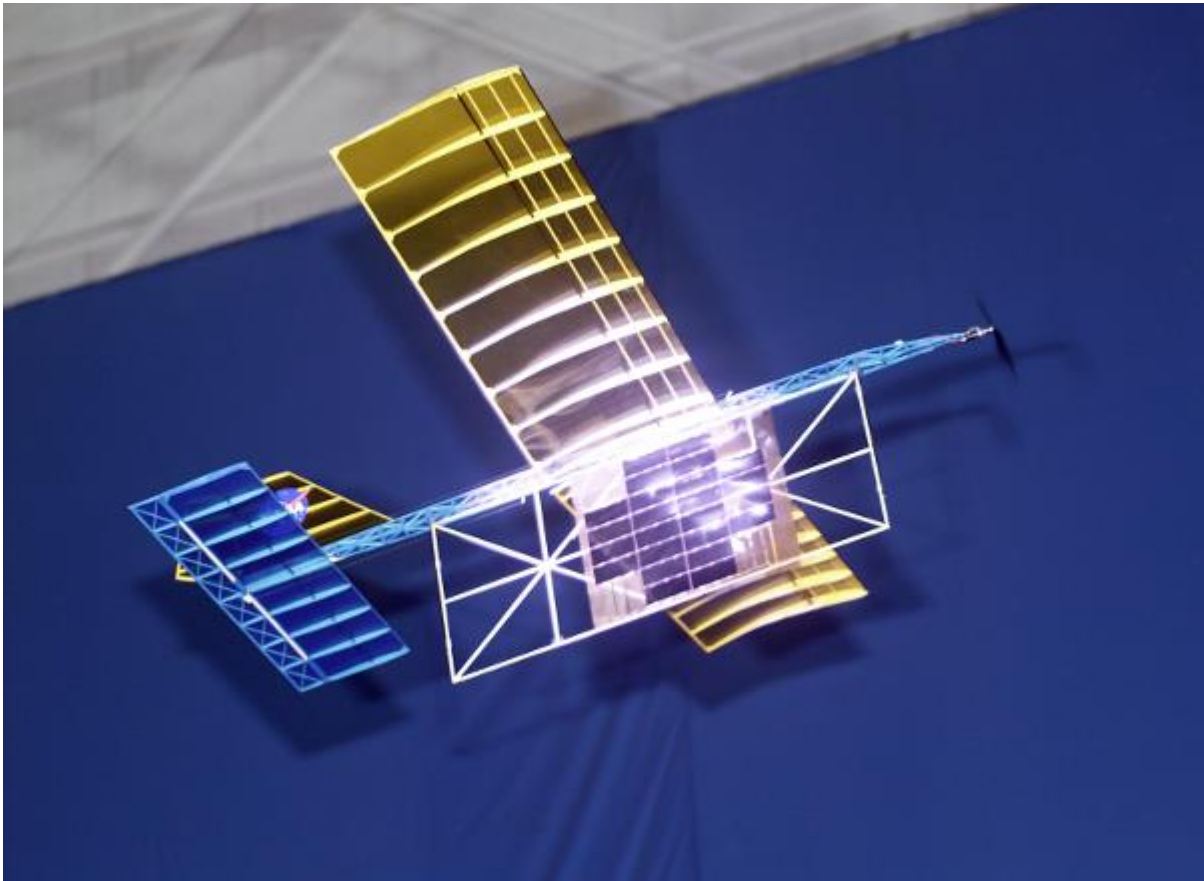
2.1.3. Novije tehnologije: korištenje lasera

Korištenje lasera za bežični prijenos energije se do sada nije razmatralo jer su tehnologije koje koriste mikrovalove imale veći postotak korisnosti, a razvoj tehnologije lasera i solarnih ćelija je bio pre skup, ali prednost ove tehnologije je što se i laseri i solarne ćelije konstantno unapređuju za primjenu u drugim područjima.

Jedna tehnologija trenutno u razvoju je PowerSphere. Prototip je sagrađen od 22 silicijskih foto ćelija koje se nalaze na unutrašnjoj površini sfere i čija je ukupna korisnost trenutno 14%. Namjenjena je za snage od 1 kW do 100 kW, a trenutno funkcioniра sa snagama od 100 W do

200 W. Koristi se Nd:YAG laser s valnom duljinom 1064 nm. Da bi se ovaj prototip optimizirao potrebno je savršeno uskladiti energetska procjep foto ćelija s frekvencijom lasera, smanjiti reflektivnost ćelija i povećati populacijsku gustoću ćelija. [5]

Isto kao i napajanje bespilotne letjelice mikrovalovima, napravljen je i pokus s laserom 2003. u NASA-inom centru za svemirski let (Marshall Space Flight Center). Mali avion od 312 grama je opremljen solarnim ćelijama, na koje je usmjerena laserska zraka snage 1.5 kW i valne duljine 940 nm sa prosječne udaljenosti od 15 metara, kao što prikazuju slika 2.2 i slika 2.3. Postignuta korisnost prijenosa energije kod ovog pokusa je 17.7%. Kod novijeg pokusa je korišten laser za napajanje mini rovera, gdje je napravljen sustav za automatsko ciljanje tako da je laser uvijek uperen u foto ćelije. Kod tog pokusa je energija prenesena pomoću lasera preko udaljenosti od 250 metara. [6] [7]



Slika 2.2 NASA-in avion napajan laserom u letu [8]



Slika 2.3 NASA-in zaposlenik usmjerava laser prema avionu [9]

2.2. Opis lasera

Laser (eng. light amplification by stimulated emission of radiation) je uređaj koji emitira koherentnu svjetlost, što znači da sva svjetlost koju emitira ima istu frekvenciju. Za razliku od ne koherentnih izvora svjetlosti kod kojih se svjetlost emitira u svim smjerovima, laser emitira svu svjetlost u jednom smjeru. To omogućava fokusiranje velike količine svjetlosti na malu površinu preko velikih udaljenosti.

Prvi laser je konstruirao 1960. godine Theodore H. Maiman baziran na teoretskom radu Charles Hard Townes-a i Arthur Leonard Schawlow-a. To je bio pulsni laser koji je emitirao svjetlost valne duljine 694 nm. Prvi laser koji je mogao kontinuirano emitirati svjetlost su konstruirali kasnije te godine Ali Javan, William R. Bennett i Donald Herriott. [10] [11] [12]

Laseri imaju jako mnogo primjena u industriji, medicini i znanstvenim istraživanjima gdje god je potrebno fokusirati mnogo energije na malu površinu, jer ostalim elektromagnetskim izvorima nije moguće ostvariti toliku preciznost. Zbog toga su se u novije vrijeme laseri počeli razmatrati za bežični prijenos energije.

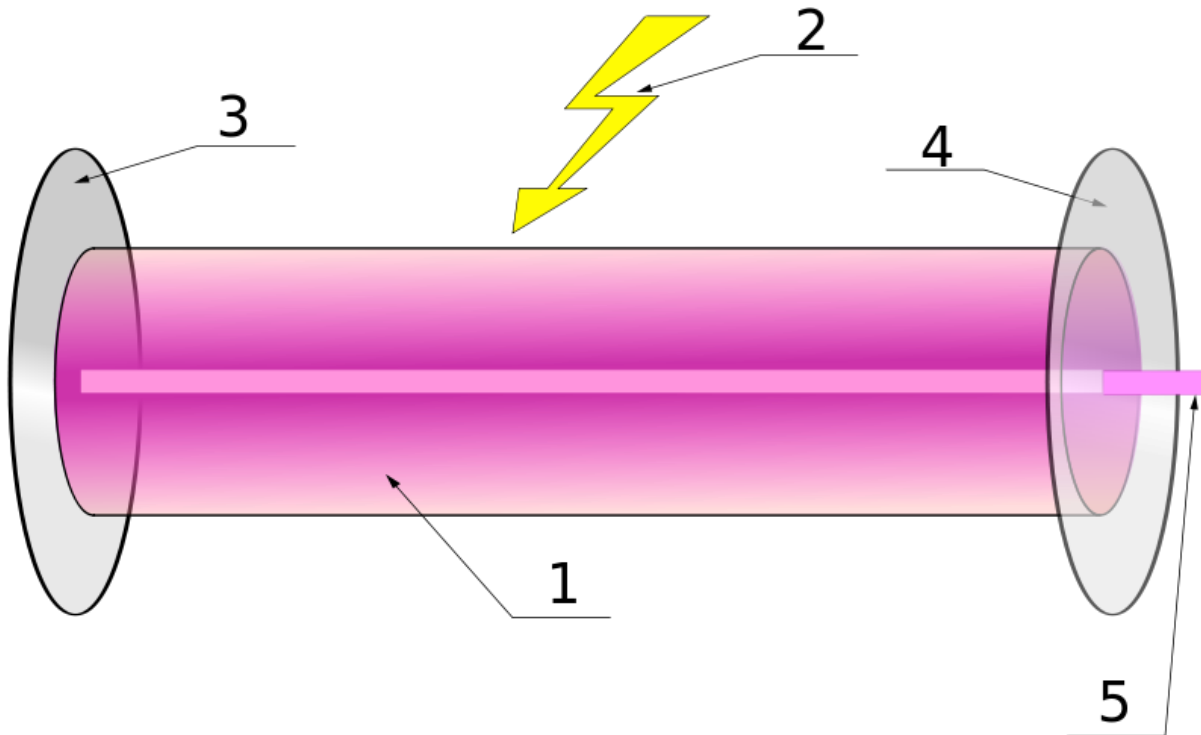
Princip rada lasera se zasniva na stimuliranoj emisiji elektromagnetskog zračenja. To se događa kada se na atom u pobuđenom stanju djeluje dodatnom energijom (pomoću svjetlosti ili elektromagnetskog polja).

Laser se sastoji od laserskog medija, mehanizma za pobuđenje laserskog medija i optičkih reflektora (slika 2.4).

Laserski medij još zvan i aktivni medij lasera, može biti plin, kristal ili plazma. To mora biti tvar kod koje postoji metastabilno stanje atoma. Svjetlost određene valne duljine koja prolazi kroz laserski medij se pojačava.

Mehanizam za pobuđenje laserskog medija opskrbljuje laserski medij energijom u obliku svjetlosti. To su najčešće ksenonske lampe ili slično, koje stvaraju vrlo jaku svjetlost.

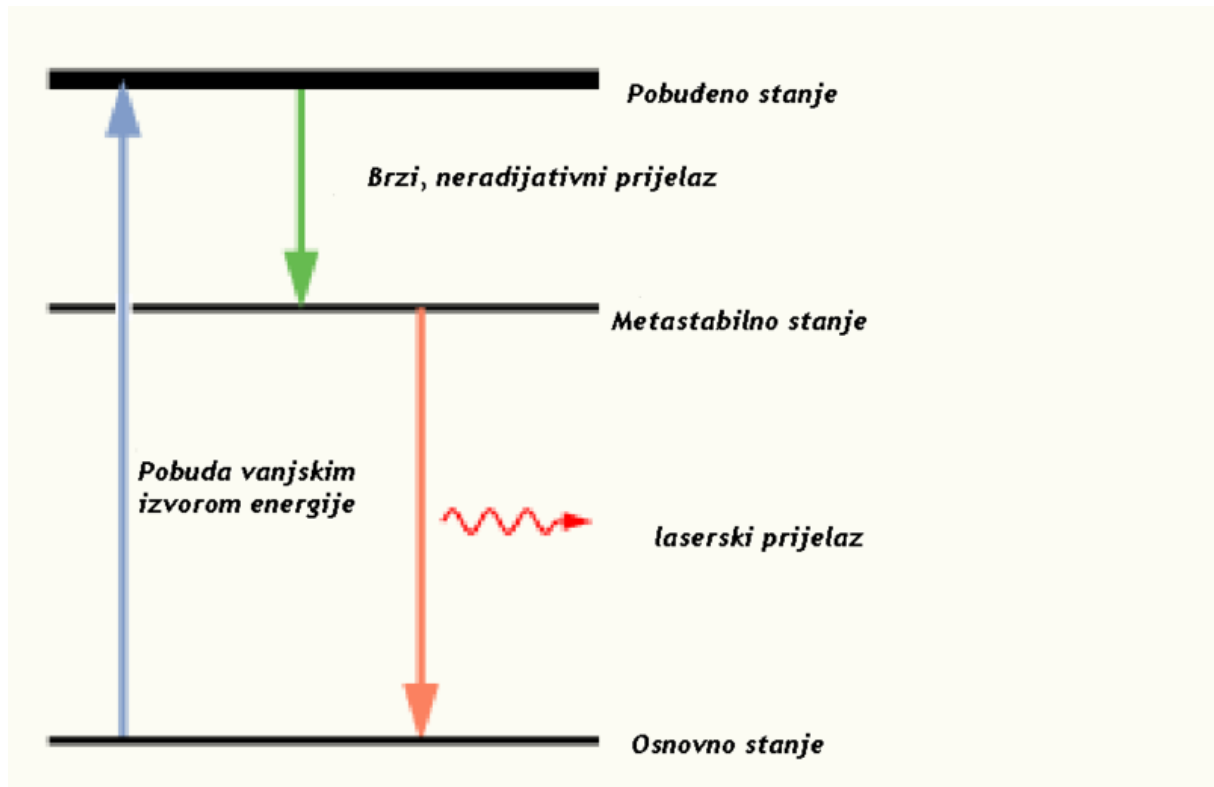
Za optičke reflektore se najčešće koriste 2 paralelna zrcala od kojih jedno reflektira svu svjetlost, a drugo je djelomično prozirno tako da dio svjetlosti prolazi kroz njega. Ta svjetlost je laserska zraka.



Slika 2.4 Komponente lasera (1-laserski medij, 2-energija za pobuđenje laserskog medija, 3-neprozirno zrcalo, 4-dijelomično prozirno zrcalo, 5-laserska zraka) [13]

Da bi došlo do stimulirane emisije fotona, trebaju biti zadovoljena dva uvjeta. Prvi uvjet je takozvani “Bohrov uvjet” koji zahtijeva da laserski medij sadržava energetske razine koje odgovaraju energiji emitiranih fotona. Drugi uvjet je da većina atoma unutar laserskog medija bude u pobuđenom stanju. Zbog toga se za laserski medij koriste tvari kod kojih postoji metastabilno stanje jer se u tom stanju pobuđeni atomi zadržavaju mnogo dulje nego u normalnim pobuđenim stanjima pa je moguće većinu atoma dovesti u pobuđeno stanje. Laserski medij se nalazi između dva paralelna zrcala i kada se pobudi, atomi prelaze u pobuđeno stanje te nakon kratkog vremena prijelaze u nešto niže metastabilno stanje. Metastabilno stanje je više od osnovnog energetskog stanja i u tom se stanju atomi zadržavaju. Dok foton određene frekvencije prolazi blizu atoma u metastabilnom stanju, atom će prijeći u osnovno energetsko stanje i emitirati foton iste frekvencije, smijera i usmjerenja kao prvi foton. Kao što je prikazano u slici 2.5, prijelaz iz metastabilnog stanja u osnovno energetsko stanje se zove laserski prijelaz. Ti fotoni su u istom kvantnom stanju i ponašaju se kao jedan foton. Kako se ti fotoni odbijaju između zrcala, prolazit će pokraj drugih atoma u metastabilnom stanju, koji će emitirati još fotona u istom kvantnom stanju. Što je više fotona

u istom kvantnom stanju, veća je vjerojatnost da će im se još fotona pridružiti. Jedno od zrcala je djelomično prozirno i napravljeno je tako da propušta samo koherentnu svjetlost. Pošto su ti fotoni u istom kvantnom stanju, kroz zrcalo će proći ili svi ili nitijedan.



Slika 2.5 Prijelaz između energetske stanja u laseru [14]

2.2.1. Vrste lasera

Postoji više načina na koje se mogu podjeliti laseri. Osnovna podjela je na pulsne lasere i lasere s kontinuiranom zrakom.

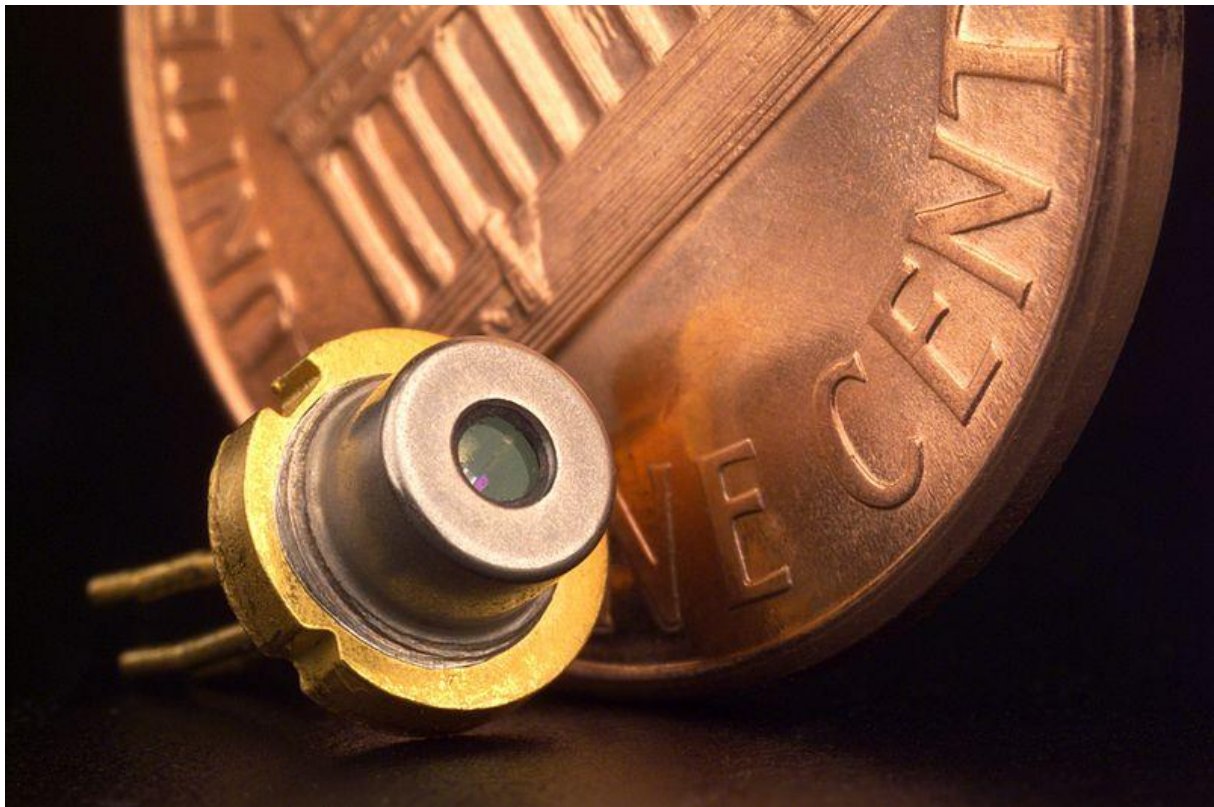
Pulsni laseri su laseri kod kojih se ne emitira kontinuirana zraka svjetlosti, nego se emitira u kratkim pulsevima koji obično traju samo nekoliko nanosekundi, a mogu trajati i samo nekoliko femtosekundi.

Laseri s kontinuiranom zrakom emitiraju svjetlost bez prekidanja. Takvi laseri su bolji za primjenu kod bežičnog prijenosa energije.

Još jedna važna podjela lasera, koju treba razmotriti kod odabira lasera za bežični prijenos energije, je podjela po valnim duljinama emitirane laserske zrake. Pošto laser emitira svjetlost samo jedne valne duljine, potrebno je odabrati laser valne duljine koja će se najučinkovitije iskoristiti u pretvorbi natrag u električnu energiju kod solarnih ćelija. U

lasersko zračenje se ubraja infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost i ultraljubičasto zračenje, a to obuhvaća valne duljine od 10 nm do 1.000.000 nm (1 mm). Za korištenje lasera za prijenos energije se najviše razmatraju infracrveni laseri s valnim duljinama oko 1000 nm. Da bi se dobila željena valna duljina, treba odabrati pripadajući laserski medij. Svaki materijal emitira određenu valnu duljinu dok se koristi kao laserski medij, tako da pri izboru valne duljine se zapravo bira materijal koji će se koristiti za laserski medij.

Pošto laserski medij može biti kristal, plin ili plazma, laseri se još dijele na lasere s čvrstom jezgrom, plinske lasere, poluvodičke lasere, kemijske lasere, lasere s bojilima i lasere sa slobodnim elektronima. Za primjenu kod bežičnog prijenosa energije se najviše razmatraju poluvodički laseri, još zvani i diodni laseri. Laserska dioda koja se koristi u najviše diodnih lasera je 5.6 mm dioda prikazana na slici 2.6. Poluvodički laseri obuhvaćaju mnogo različitih laserskih dioda, koje se izrađuju od različitih kombinacija poluvodiča i drugih kemijskih elemenata. U tu kategoriju spadaju laseri s valnim duljinama od 375 nm sve do 3500 nm. Za valne duljine oko 1000 nm, optimalne za foto ćelije se koriste InGaAs diode.



Slika 2.6 5.6 mm laserska dioda [15]

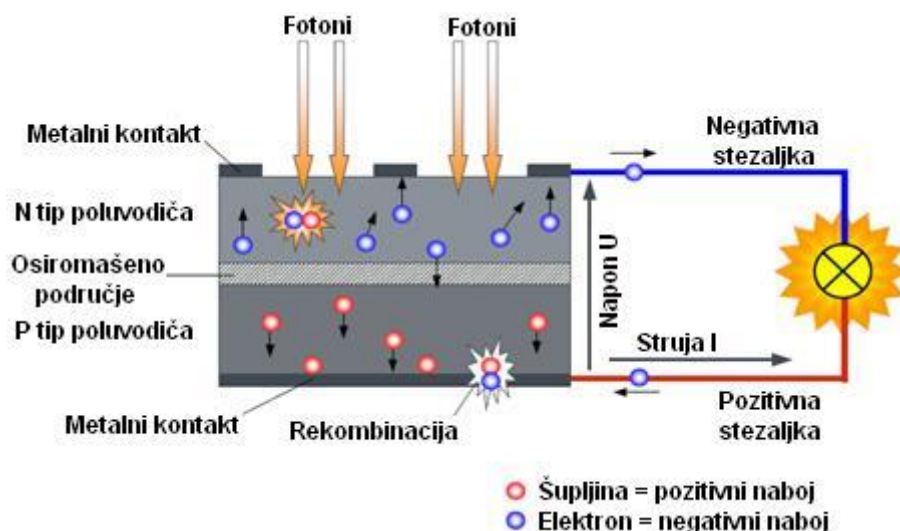
2.3. Upotreba lasera za bežični prijenos energije

Prijenos električne energije laserom “Laser power beaming” šalje koncentriranu energiju kroz zrak ili optički kabel pomoću lasera do udaljenog prijammnika koji pretvara svjetlosnu energiju u električnu. To funkcionira slično kao solarna energija, gdje solarne ćelije pretvaraju energiju Sunca u električnu, ali umjesto toga se koriste laseri jakog intenziteta i specijalizirane foto ćelije koje pretvaraju lasersku energiju u električnu. Pošto laseri emitiraju svu svjetlost u jednom smjeru, ta svjetlost se može fokusirati na jednu točku. Glavne razlike od solarne energije su da se s laserima mogu postići mnogo veće gustoće energije od sunčeve svjetlosti, može se usmjeriti bilo gdje dok god je čista linija od odašiljača do prijammnika i može raditi 24 sata na dan.

Laser se napaja električnom energijom i generira svjetlosnu energiju u obliku laserske zrake. Laserska zraka se oblikuje pomoću seta leća da bi se dobio željeni oblik zrake kod prijammnika. Zraka tada putuje kroz zrak, vakuum u svemiru ili optički kabel dok ne dođe do prijammnika. Kod prijammnika se nalaze foto ćelije koje pretvaraju svjetlosnu energiju lasera natrag u električnu.

2.3.1. Foto ćelije

Foto ćelija je uređaj koji pretvara energiju svjetla direktno u električnu energiju. Izrađuju se od poluvodiča i to najčešće silicija. U silicij se dodaju boron i fosfor da se dobije P-sloj i N-sloj. Najjednostavnija izvedba foto ćelije je P-N spoj s metalnim kontaktima na obje strane gdje prednji kontakt samo djelomično prekriva N-sloj da fotoni mogu ući u materijal. Kada fotoni koji imaju dovoljnu energiju uđu u N-sloj, oni će pobuditi elektrone. Jedan foton će podići jedan elektron na višu energetska razinu i on će prijeći u vodljivi pojas. To će ostaviti šupljinu u valentnom pojasu, koja će prijeći u P-sloj. Elektroni i šupljine ne mogu više preći kroz granicu između P-sloja i N-sloja, jer bi se to protivilo polju. Migracija elektrona u jednom smjeru i šupljina u drugom stvara razliku potencijala i s time električni napon. Kada se na metalne kontakte spoji potrošač, kroz njega će teći električna struja kao što prikazuje slika 2.7.



Slika 2.7 Kako funkcionira foto ćelija [16]

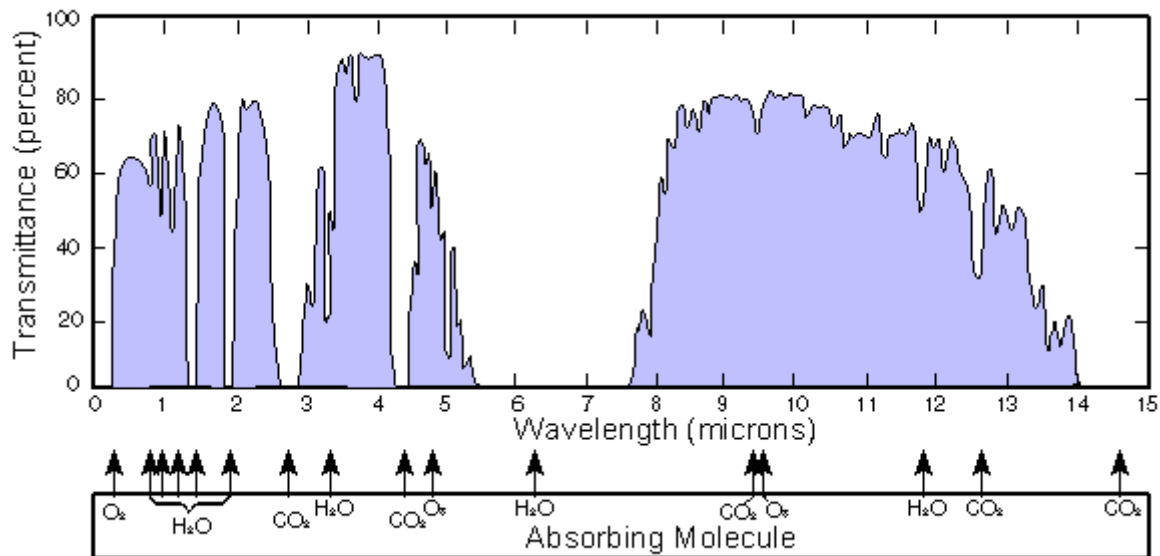
2.3.2. Geometrija prijmnika

Kod izgradnje laserskog prijmnika, važno je razmotriti geometriju foto ćelija. Eksperimentalno je dokazano da zvijezdasto postavljanje ćelija, tako da su sve orijentirane prema centru daje bolje performanse nego kada su postavljene u kvadrat. Razlog tome je da kada se centrira laserska zraka na njih, Gaussov profil zrake će se protezati po duljini svakog P-N spoja, a ne poprečno. To rezultira podjednakom prosječnom iluminacijom pojedinačnih ćelija. [17]

2.3.3. Optimalna valna duljina lasera

Kada laser velike snage obasijava solarne ćelije, dolazi do promjene svojstva materijala ćelija. Kod poluvodičkog materijala, iznad određene valne duljine lasera koeficijent absorpcije naglo pada. Ovisno o dubini poluvodičkog materijala može se dogoditi da fotoni ne prodiru dovoljno duboko da bi došlo do fotoelektrične pretvorbe i dolazi do zasićenja. Još jedan moguć problem je povećanje valne duljine lasera dok prolazi kroz poluvodič zbog posrednih kolizija. U oba slučaja će doći do povećanja zagrijavanja i smanjenja korisnosti.

Eksperimentima je utvrđeno da je optimalna valna duljina za laser u ovoj primjeni 976 nm, iako je u eksperimentima laser valne duljine 808 nm imao najveću korisnost kod manjih snaga lasera, ona naglo opada kod većih snaga. Laser valne duljine 976 nm, osim što ima najveću korisnost pretvorbe u električnu energiju kod foto ćelija, ima i dobru propusnost kroz atmosferu oko 70 %, prikazano na slici 2.8. [17]



Slika 2.8 Propusnost atmosfere za različite valne duljine elektromagnetskog spektra [18]

2.3.4. Odabir lasera

Kod odabira vrste lasera za primjenu kod prijenosa energije, potrebno je uzeti u obzir efikasnost proizvodnje lasera, efikasnost absorpcije lasera i korisnost pretvorbe laserske energije u električnu. Za upotrebu u svemiru kod prijenosa energije od satelita do Zemlje ili između više satelita potrebno je uzeti u obzir i masu uređaja, jer će se laser nalaziti na satelitu pa je poželjno da mu masa bude što manja da se smanji cijena. Što se tiče efikasnosti absorpcije lasera i korisnosti pretvorbe laserske energije u električnu, utvrđeno je da su najbolji infracrveni laseri valne duljine oko 976 nm. Postoji više vrsta lasera koji mogu proizvesti tu valnu duljinu, no najbolji što se tiče mase, cijene proizvodnje i korisnosti kod pretvorbe električne energije u laser su diodni laseri.

Što se tiče primjene u svemiru potrebno je razmotriti i direktno solarno pobuđene lasere. To su laseri kod kojih se solarna energija koristi direktno za pobuđenje laserskog medija. Kod normalnih lasera napajanih solarnom energijom se solarna energija prvo pretvara u električnu koja onda napaja mehanizam za pobuđenje laserskog medija, što znači da postoje gubici kod pretvorbe solarne energije u električnu i onda opet kod pretvorbe električne energije u laser. Za usporedbu sustav s direktno solarno pobuđenim laserom koji ima korisnost pretvorbe solarne energije u laser od samo 15% je jednako učinkovit kao sustav s solarnim ćelijama i laserom koji ima 30% korisnost pretvorbe solarne energije u električnu i 50% korisnost pretvorbe električne energije u laser. Osim toga što bi ovakav sustav eliminirao jedan korak

kod pretvorbe energije, pošto na tom satelitu nebi opće bilo pretvorbe energije u električnu, to bi eliminiralo većinu elektroničkih komponenti koje bi inače trebale biti na satelitu, što znači da bi bile manje šanse da dođe do kvara. Da bi se postigla potrebna snaga za proces inverzije napućenosti, potrebno je povećati koncentraciju solarne energije, koja je na udaljenosti jedne astronomske jedinice od Sunca 1387 W/m^2 , 200 do nekoliko tisuća puta ovisno o laserskom mediju. Da bi se izbjegla potreba za solarnim koncentratorima vrlo velikih površina treba koristiti lasere kojima netreba mnogo energije za inverziju napućenosti i treba imati vrlo efikasan sustav za uklanjanje neželjene topline. Većina novijih istraživanja se fokusira na izradu laserskih medija od poluvodičkih materijala. Izlazna snaga direktno solarno pobuđenog lasera ovisi o preklapanju spektra Sunčevog svjetla i absorpcijskog spektra lasera. Jedan od najvećih problema je dizajn sustava za uklanjanje neželjene topline. Sva svjetlost koja se ne iskoristi kod pretvorbe u laser će stvarati neželjenu toplinu koja će negativno utjecati na rad lasera. Pošto bi izgradnja uređaja za odvod topline dodala mnogo mase, pogotovo u vakuumu gdje je jedini način odvoda topline zračenjem, potrebno je umjesto toga dizajnirati sustav tako da se dijelovi Sunčevog spektra koji ne doprinose izlaznoj snagi lasera filtriraju i ne dođu do laserskog medija. [19]

3. Performanse i ograničenja

Kod uređaja gdje je nemoguće dovoditi energiju žicom, treba koristiti baterije, gorivo ili bežično dovođenje energije. Kada se koristi gorivo, potrebno je imati motor koji će pretvarati to gorivo u energiju, što dodaje dodatnu masu vozilu. Kod bežičnog dovođenja energije, izvor energije se ne nalazi na vozilu što znači da je vozilo lakše pa mu treba i manje energije da se kreće. Kod solarne energije je potrebno koristiti baterije da bi uređaj mogao nastaviti raditi po noći, zbog toga ti sustavi neće moći raditi beskonačno dugo nego će biti ograničeni brojem punjenja i pražnjenja koje baterija može podnijeti. Kod prijenosa energije laserom su isto potrebne baterije u slučaju da dođe do prekida laserske zrake, ali za razliku od solarne energije, laser može nastaviti raditi i po noći tako da će se baterije mnogo manje koristiti. Za sve uređaje su važna specifična snaga (W/kg) i gustoća energije (J/kg). LaserMotive je demonstrirao sustave za bežični prijenos energije s specifičnom snagom na prijammniku od 800 W/kg, za usporedbu s litij-ionskim baterijama koje se koriste u malim bespilotnim letjelicama, koje imaju specifičnu snagu 200-500 W/kg. Trenutno energija koja se može prenositi je ograničena brzinom hlađenja foto ćelija i ona iznosi do preko 6 kW/m². Atmosferski uvjeti mogu utjecati na laser i smanjiti korisnost prijenosa energije, ali kod mnogo aplikacija je laserska zraka dovoljno visoko iznad tla da bi se smanjili atmosferski uvjeti. Postojeći diodni laseri se mogu iskoristiti za prijenos energije na daljinu od oko 10 km. Neke druge vrste lasera bi mogle postići veće domete, ali uz manju korisnost i veću cijenu.

3.1. Ograničenja

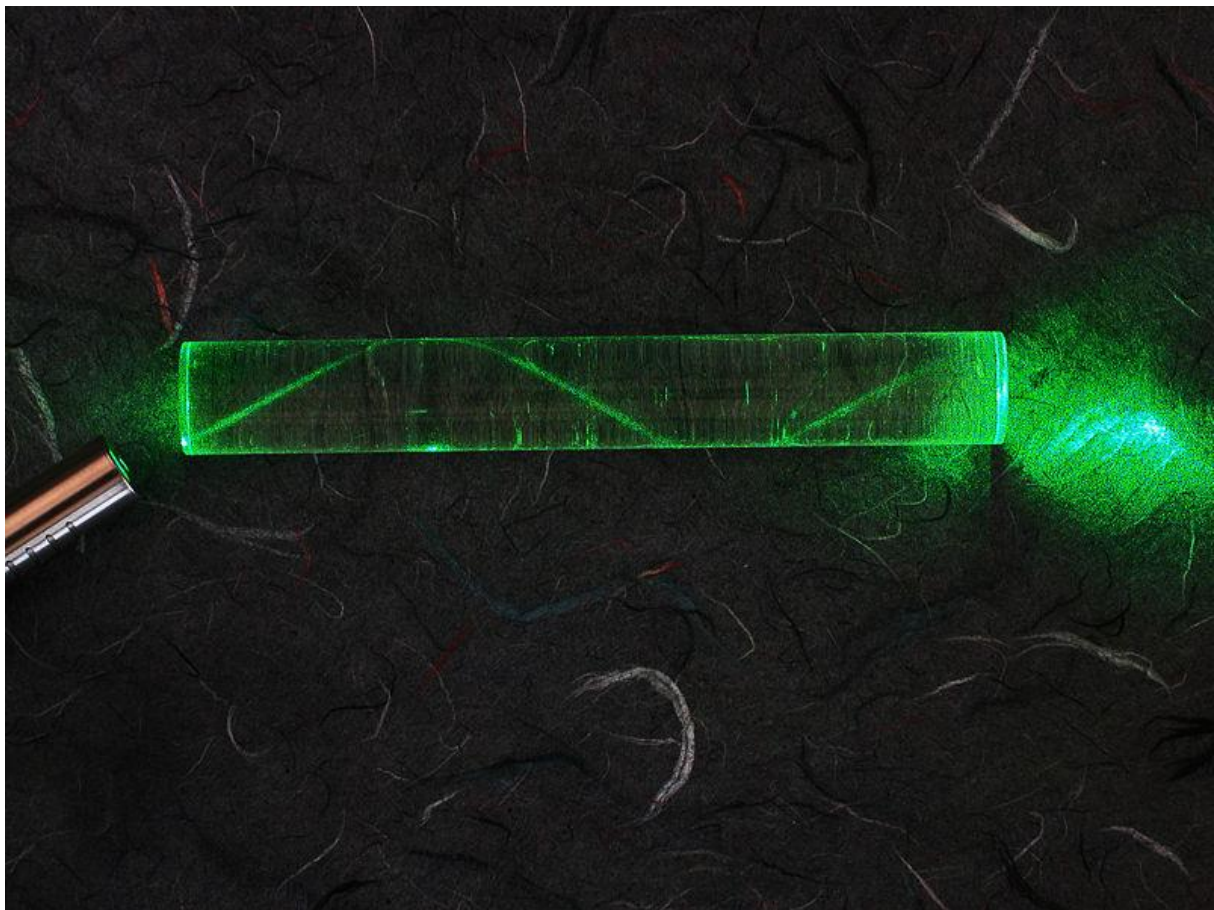
Najveće ograničenje kod prijenosa energije laserom je da mora postajati direktna neprekinuta linija između odašiljača i prijammnika i atmosferske prilike mogu oslabiti ili čak prekinuti lasersku zraku. Ukupna efikasnost sustava može iznositi 25%, ali u praksi je bliže 20%. Laserske diode uglavnom imaju korisnost pretvorbe električne energije u svjetlost od ~60%, a najveća postignuta korisnost ikad je 85%. Foto ćelije imaju korisnost pretvorbe svjetlosne energije u električnu od ~50% u najboljem slučaju. Očekuje se da će ukupna korisnost sustava porasti iznad 30% za nekoliko godina i na posljetku doći do 50%. [20]

3.2. Prednosti korištenja lasera nad drugim tehnologijama

Glavna prednost korištenja lasera za bežični prijenos energije nad korištenjem mikrovalova je manja valna duljina lasera u odnosu na mikrovalove, što znači da laseri imaju manju difrakciju (širenje zrake) i to znači da će kod prijenosa energije preko velikih udaljenosti biti potreban mnogo manji prijamnik, nego kakav bi trebao za mikrovalove. Pošto će prijamnik biti manji, bit će ga lakše integrirati u manje uređaje.

Prijenos energije laserom neće stvarati radio frekventnu interferenciju bežičnom internetu ni mobilnim telefonima, za razliku od ne radijativnih metoda prijenosa energije i mikrovalova.

Za razliku od mikrovalova, laserska zraka se može prenositi pomoću optičkog kabla, kao što prikazuje slika 2.9, što znači da se zraka može dovesti i na mjesta do kojih nema neprekinutu zračnu liniju.



Slika 3.1 Laserska zraka putuje kroz optički kabel [21]

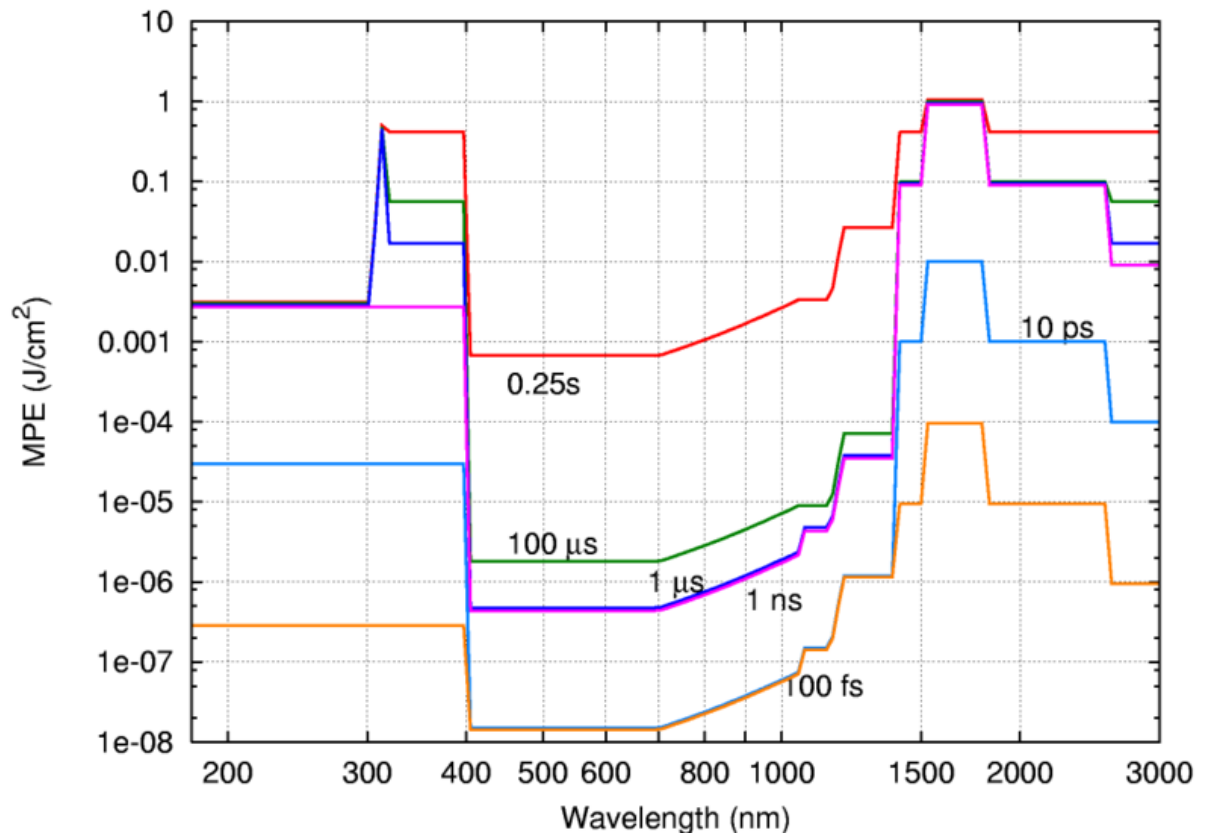
Još jedna važna prednost ove tehnologije je što nije potrebno veliko zasebno ulaganje u razvoj ove tehnologije, jer se tehnologije lasera i foto ćelija koje se koriste u ovoj primjeni, cijelo vrijeme razvijaju za primjene u drugim granama.

3.3. Problemi kod primjene tehnologije

Glavna ograničenja kod prijenosa električne energije pomoću lasera su gubici kod pretvorbe električne energije u svjetlosnu kod lasera i gubici kod pretvorbe svjetlosne energije natrag u električnu kod foto ćelija. Kod pretvorbe električne energije u lasersku najveća postignuta korisnost ikad je 85 %, za razliku od iznad 90 % kod mikrovalova. No mnogo veći problem je kod pretvorbe laserske zrake u električnu energiju, gdje je korisnost samo 50 %. Pošto su foto ćelije, koje se koriste za pretvorbu lasera u električnu energiju, tehnologija koja se stalno unaprijeđuje zbog korištenja za skupljanje solarne energije, očekuje se da će postotak njihove korisnosti nastaviti rasti.

3.4. Sigurnost tehnologije

Infracrveno zračenje nije ionizirajuće zračenje, što znači da nema dovoljno energije da izbije elektron iz orbite i s time ošteti DNK, ali u velikim koncentracijama može uzrokovati toplinsko oštećenje. Kod prijenosa energije se koriste dovoljno velike koncentracije da uzrokuju toplinsko oštećenje, ali tek nakon duljeg vremena izlaganja. Veća opasnost je što infracrveni laseri valnih duljina oko 1 μm koji se koriste u ovoj tehnologiji spadaju u spektar valnih duljina koje su opasne za ljudsko oko i nalaze se upravo izvan vidljivog spektra. Slika 2.10 prikazuje koliko dugo ljudsko oko smije biti izloženo različitim valnim duljinama elektromagnetskog zračenja pri različitim energetske gustoćama i kao što se vidi, najveću prijetnju predstavlja vidljivi dio spektra od 400 do 700 nm, ali 1000 nm još uvijek predstavlja veliku prijetnju, veću od svih valnih duljina ispod 400 nm i iznad 1000 nm. Zbog toga čak i male količine rasute laserske svjetlosti mogu biti štetne. LaserMotive se trudi poduzeti sve potrebne mjere da se ta opasnost minimizira kao što su detektori pokreta koji automatski isključuju laser kada se netko približi zraku, no taj problem nebi postajao kada bi se mogli koristiti laseri većih valnih duljina. Valne duljine izvan spektra štetnog za ljudsko oko mogu biti prisutne u 100 puta većim koncentracijama prije nego što postanu opasne jer ih oko ne fokusira, ali korisnost tih laserskih dioda mora porasti i cijena pasti da bi bile prihvatljive u primjeni za bežični prijenos energije.



Slika 3.2 Vrijeme koje ljudsko oko smije biti izloženo različitim valnim duljinama elektromagnetskog zračenja (nm) pri različitim energetske gustoćama (J/cm^2) [22]

4. Primjene laserskog prijenosa energije

Prijenos energije laserom je nova tehnologija koja je još u fazi razvoja, ali ima mnogo mogućih primjena. Neke od njih su:

- Bezpilotna podvodna vozila za istraživanje morskog dna koja bi bila jako ograničena bakrenim kablama.
- Male bespilotne letjelice koje bi mogle mnogo dulje raditi s dovodom energije, nego s baterijom.
- Telekomunikacijski tornjevi koji se nalaze daleko od dalekovoda i na mjestima gdje vremenske prilike i teren onemogućavaju napajanje solarniom energijom.
- Ako će ljudi ikada napraviti bazu na Mjesecu, preko noći koja na Mjesecu traje dva tjedna neće moći biti napajana solarnom energijom. NASA je zaključila da je dovođenje energije sa Zemlje pomoću lasera efikasnije od izgradnje nuklearne elektrane na Mjesecu.
- Napajanje bolnica i ostalih važnih struktura na mjestima gdje je prirodna nesreća oštetila infrastrukturu.
- Jeftino lansiranje rakete u svemir, gdje će rakete moći koristiti inertno gorivo koje će biti zagrijavano laserima postavljenima na zemlji.
- Nepaženi senzori koji se sve više koriste.
- Komercijalni avioni bi mogli biti napajani laserima postavljenima na tlu, tako da nemoraju nositi svoje gorivo i pritom ne zagađuju okoliš.
- Elektrane u svemiru bi mogle slati proizvedenu energiju na Zemlju.

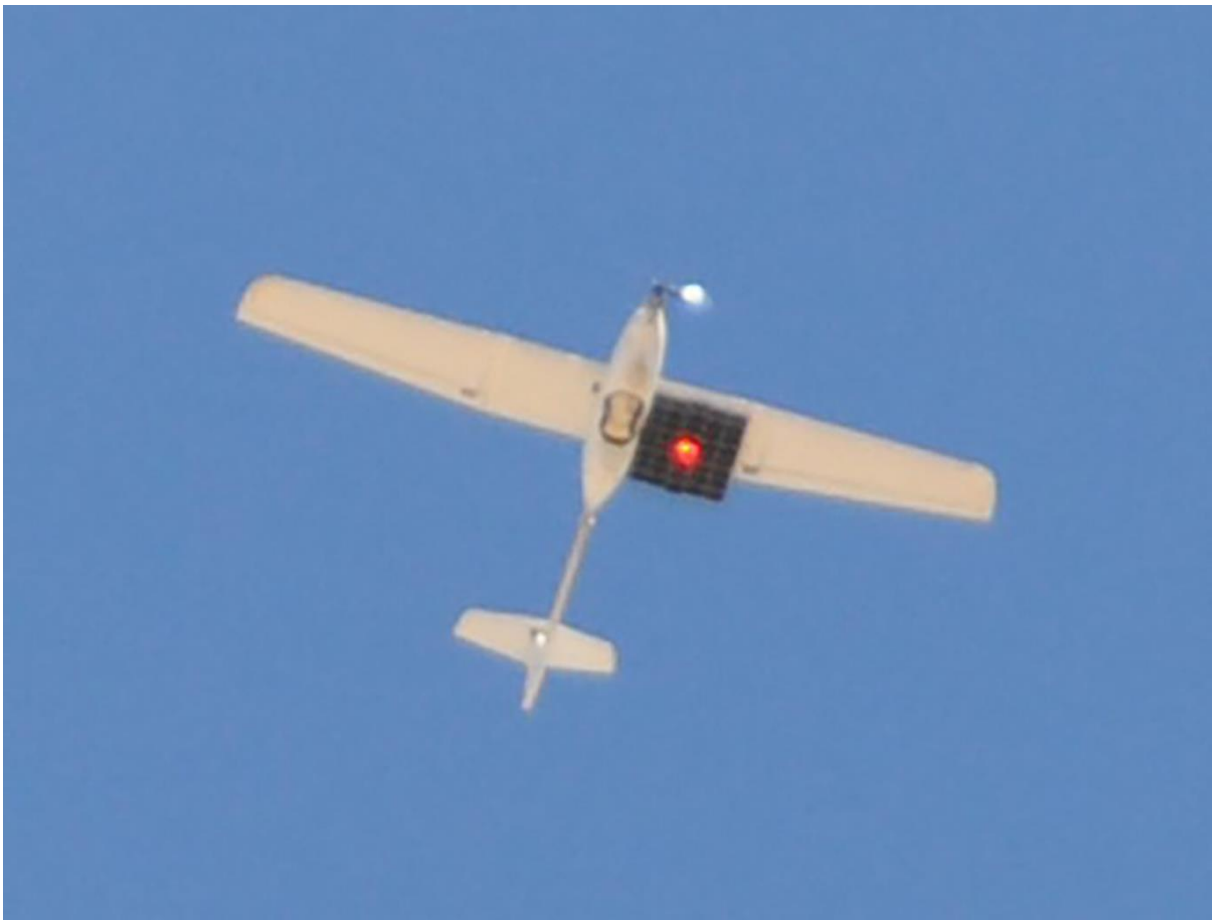
4.1. Postojeće primjene

LaserMotive je inženjerska firma iz SAD-a, koja razvija tehnologije za efikasan prijenos energije laserima. Firmu su osnovali Tom Nugent i Jordin Kare 2006. godine s ciljem da osvoje NASA-inu nagradu za „Centennial Challenges: Beam Power Challenge” gdje je cilj bio napraviti bežično napajanog robota koji će se penjati po vertikalnom kablju. 6.11.2009. LaserMotive je uspješno pomoću lasera podigao teret od 4.8 kg na visinu 900 m prosječnom brzinom 13 km/h. Energija prenesena na prijammnik je iznosila više od 1 kW uz efikasnost veću od 10% i specifičnu snagu u laserskom prijammniku od ~500 W/kg. [23] [24]

28.10.2010. su uspješno laserom napajali dron koji je letio 12.5 sati bez prekida i time su ostvarili record za najdulji let ne pričvršćenog električnog vozila i općenito najdulji let

napajan zrakom energije. Osim toga, taj let je ostvario neka važna postignuća za operacionalne bespilotne letjelice napajane laserom koja su automatsko ciljanje letjelice laserom, punjenje baterije tijekom trajanja leta i automatsko držanje pozicije letjelice u laserskoj zraki.

7.8.2012. su opermili bespilotnu letjelicu Lockheed Martin Stalker s laserskim prijammnikom i uspješno demonstrirali sustav po danu i noći u pustinji. Letjelica je prikazana na slici 2.11. Osim prijenosa energije laserom kroz zrak ili svemir, LaserMotive su podesili tehnologiju da može prenositi preko 10 wata energije kroz optički kabel. [25]



Slika 4.1 LaserMotive laserom napaja letjelicu Lockheed Martin Stalker [26]

Već nekoliko godina, Japanska svemirska agencija JAXA istraživa tehnologiju za svemirske solarne elektrane koje bi pomoću mikrovalova ili lasera slale tu energiju na Zemlju. JAXA planira koristiti direktno solarno pobuđeni laser s Nd:YAG kristalom kao laserskim medijem. Elektrana bi bila sagrađena modularno gdje bi se svaki modul sastojao od zrcala veličine 100 m x 200 m i davao bi snagu 10 MW. Ukupna duljina postrojenja bi bila 10 km. 2004 JAXA i

Institut za lasersku tehnologiju su objavili eksperiment sa direktno solarno pobuđenom laserskom zrakom gdje je korisnost pretvorbe solarne energije u laser bila 37%. [27] [28]

Europska svemirska agencija je 2002 razmotrila korištenje laserskog prijenosa energije u svemirskim aplikacijama od kojih je najviše obećavajuća korištenje lasera za napajanje postrojenja na Mjesecu. Dizajn koristi četiri paralelnih laserskih sustava, spojenih na teleskop promjera 1.5 m i može emitirati snagu od 6 kW. Da bi sustav iz Mjesečeve orbite mogao opskrbljivati energijom mala postrojenja na Mjesecu, trebao je imati preciznost ciljanja od samo 86.2 nrad. Za napajanje bespilotnih vozila na Mjesecu, na satelitu bi se nalazio optički prijamnik, a na vozilu mali laserski svijetionik da ga satelit može naciljati i foto ćelije za pretvaranje lasera u električnu energiju. Promjer laserske zrake kada stigne do vozila bi bio 14.4 m, što je mnogo veće od površine prijavnika na vozilu pa bi se samo mali dio energije iskoristio, ali bi zato bilo lakše ciljati vozilo. Procjena snage koju bi vozilo primilo u tom slučaju je 650 W. Satelit bi se nalazio u Lagrangeovim točkama Mjeseca i Zemlje L1 i L2, na udaljenost 58000 km od Mjeseca i svaki bi mogao fokusirati laser na bilo koju točku na polovici Mjeseca. [29]

Provedeni su eksperimenti s direktno solarno pobuđenim Nd:YAG i Nd:Cr:GSGG laserima na temperaturama 300 K i 77 K i pokazali su da hlađenje laserskih kristala na temperature mnogo manje od 300 K smanjuje termalne problem i povećava korisnost i kvalitetu zrake. Osim toga su utvrdili da se ukupna korisnost može povećati tako da se spektar Sunčevog zračenja podijeli na različite dijelove za pretvorbu u lasersku energiju i pretvorbu u električnu energiju. Procijenjene vrijednosti su 17% za sustav sa laserom i foto ćelijama i 27% za solarni dinamički sustav s laserom. [30]

Proveden je i eksperiment s dvoslojnim solarnim koncentраторom čiji je primar imao promjer 40.6 cm i Nd:YAG i Nd:Cr:GSGG laserima, gdje je 55 W solarne energije koncentrirano u točku promjera 1.27 mm s 55% korisnosti. [31]

5. Budući razvoj tehnologije

Ova tehnologija najviše dolazi do izražaja kada se razmatraju njezine primjene u svemiru. Unutar Zemljine atmosfere korisnost lasera je ograničena atmosferskim uvjetima, a u svemiru laser prolazi kroz vakuum bez gubitaka, tako da je udaljenost preko koje se može slati energija laserom jedino ograničena difrakcijom lasera.

Jedna od najboljih primjena ove tehnologije bi bila za slanje energije iz satelita na Zemlju. Na satelitu koji orbitira oko Zemlje bi se nalazila solarna farma koja bi skupljala solarnu energiju i pomoću laserske zrake slala tu energiju na prijamnik koji se nalazi na površini Zemlje kao što prikazuje slika 2.12.

2007 je Pentagon objavio istraživanje koje predlaže razvoj energetske postrojenja u svemiru, korištenjem lasera za prijenos energije. Istraživanje je pokazalo da ako se energetska postrojenja postave na prava mjesta u svemiru, mogla bi u jednoj godini pružiti toliko energije kao sve otkrivene naftne rezerve na Zemlji. [32]

Osim SAD-a, ostale nacije koje istražuju tu ideju su Rusija, Kina, Europska Unija, Indija i Japan, koji planira demonstrirati sustav na manjoj skali u bliskoj budućnosti.

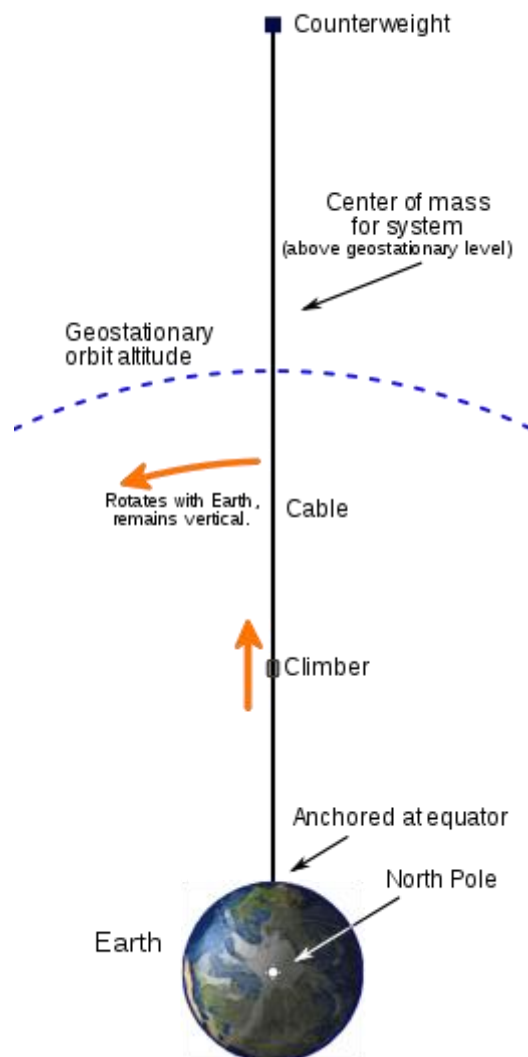
Osim slanja te energije na Zemlju, taj bi satelit mogao opskrbljivati druge satelite energijom tijekom trajanja eklipse da se kompenzira degradacija solarnih ćelija ili u slučaju električnog kvara. Na taj način bi satelit opremljen laserom mogao produljiti korisnost ostalih degradiranih satelita.



Slika 5.1 Koncept satelita koji skuplja solarnu energiju, pretvara ju u laser i šalje lasersku zraku na prijamnik na Zemlji [33]

Jedna druga primjena tehnologije bi bila kod svemirskih liftova. Svemirski lift je teoretska struktura koja bi služila za prenošenje materijala u svemir bez potrebe za raketama, što bi mnogo puta pojeftinilo prenošenje materijala u svemir. Svemirski lift bi se sastojao od kabla napravljenog od nekog superčvrstog materijala kao ugljične nanocijevi, koji je s jedne strane pričvršćen za Zemlju, a s druge na neku svemirsku platformu. Po kablu bi se kretao mehanički penjač, kao što prikazuje slika 2.13, kojeg bi trebalo opskrbljivati energijom da bi se mogao kretati. Laser bi bio idealna tehnologija za opskrbljivanje penjača energijom, jer bi se mogao fokusirati na relativno malu površinu penjača dok je jako visoko iznad zemlje, za razliku od mikrovalova koji bi zbog difrakcije zahtjevali mnogo veću površinu prijarnika.

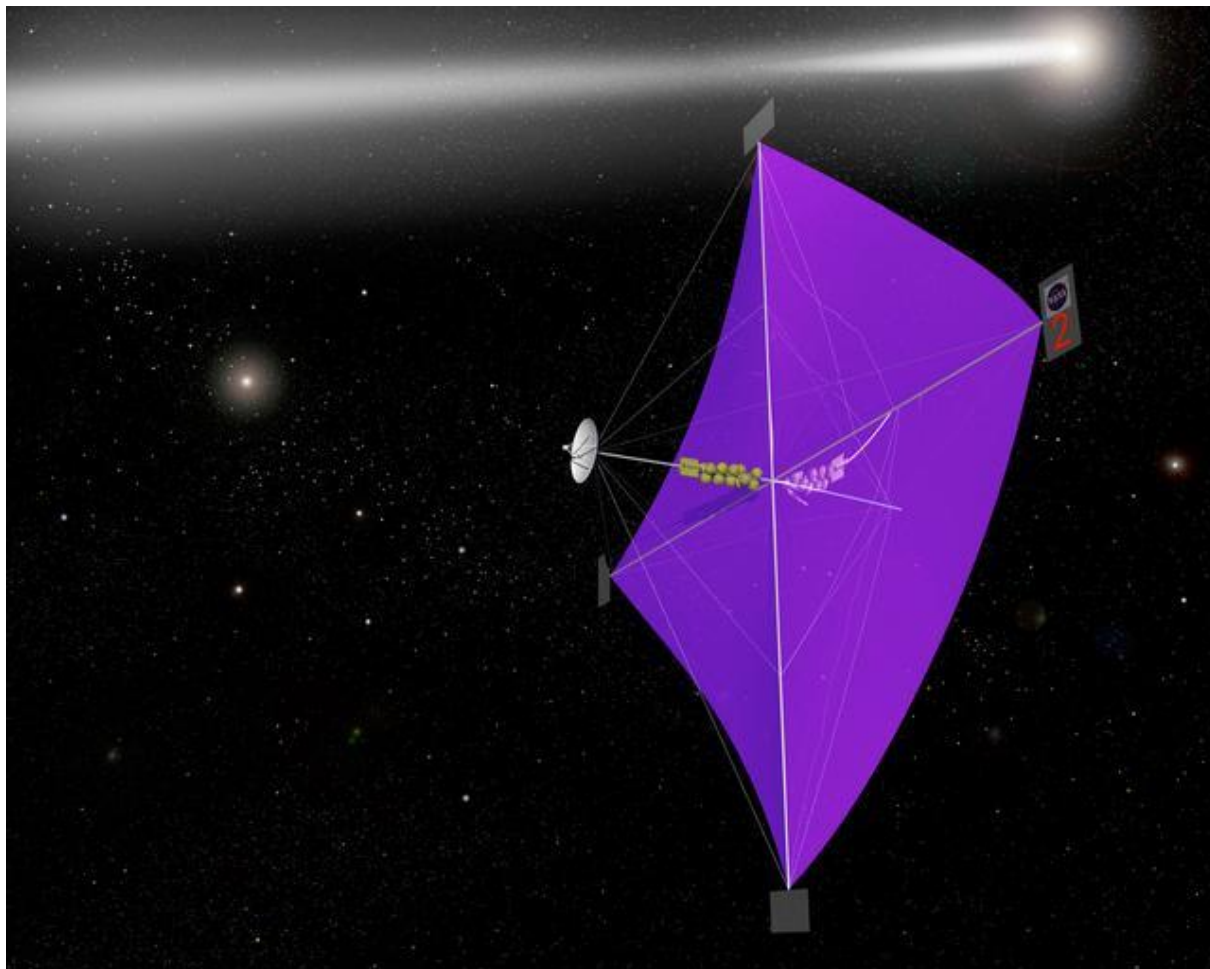
Space Elevator



Slika 5.2 Svemirski lift i penjač koji se kreće po njemu [34]

Još jedna primjena ove tehnologije bi bila za potiskivanje svemirskih letjelica sa solarnim jedrima. Solarna jedra su napravljena od jako tankog i jako reflektivnog materijala, jako velike površine i koriste energiju svjetla za pokretanje letjelice, baš kao što jedra na Zemlji koriste energiju vjetrova. Slika 2.14 prikazuje koncept letjelice sa solarnim jedrima koju NASA planira izgraditi. Kada fotoni udaraju u solarno jedro, oni se reflektiraju i guraju jedro u suprotnom smjeru. Što znači da letjelica ne mora nositi vlastito gorivo, što joj znatno smanjuje masu. NASA planira izgraditi letjelicu s solarnim jedrima promjera 402 metra od materijala načinjenog od ugljičnih vlakna težine manje od 2.8 grama po kvadratnom metru. U svemiru bi se jedra mogla odklopiti i sklopiti kao lepeza i mogla bi koristiti Sunčevu svjetlost za kretanje

ili bi mogli sa Zemlje fokusirati lasersku zraku na jedra da se usmjeri letjelicu u bilo koju
direkciju. Takva letjelica bi se mogla kretati brzinom 93 km/s. [35]



Slika 5.3 Koncept letjelice sa solarnim jedrima [35]

6. Zaključak

Iako tehnologija za prijenos električne energije laserom još nije dovoljno napredovala da bi bila bolji izbor od mikrovalova, solarne ćelije i laserske diode će se nastaviti unaprijeđivati za zasebne svrhe i to će doprinjeti razvoju laserskog prijenosa energije, tako da će se u bliskoj budućnosti dostići korisnosti pretvorbe energije kao i kod mikrovalova. Ova tehnologija ima vrlo mnogo mogućih primjena i pogotovo važna će joj biti primjena u svemiru, zato je važan njezin daljnji napredak.

7. Literatura

- [1] W. Bernard Carlson: "Innovation as a Social Process: Elihu Thomson and the Rise of General Electric", Cambridge University Press - 2003, str. 57-58.
- [2] Brown, W. C.: "Experimental Airborne Microwave Supported Platform," Raytheon Co Burlington, MA Microwave and Power Tube Div, Prosinac 1965.
- [3] Jull, G. W.; Lillemark, A.; Turner, R. M.: "SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) Telecommunications missions and systems," GLOBECOM '85, New Orleans, LA; UNITED STATES; Prosinac 1985. str. 955- 959.
- [4] http://www.ripublication.com/ijepa/ijepav1n3_2.pdf, dostupno 18.09.2018
- [5] Ortabasi, U.; Friedman, H.: "Powersphere: a photovoltaic cavity converter for wireless power transmission using high power lasers," 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2006.
- [6] Blackwell, T.: "Recent demonstrations of laser power beaming at DFRC and MSFC," AIP Conference Proceedings Beamed Energy Propulsion. Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2005. str. 73-85.
- [7] Nepoznat autor, "To infinity ... and beyond! [power beaming for interplanetary vehicles]," Machine Design International br. 79, 2007. str.78, 80, 82, 84, 86, 88.
- [8] <https://images.nasa.gov/details-ED03-0249-18.html>, dostupno 18.09.2018
- [9] <https://images.nasa.gov/details-ED03-0249-20.html>, dostupno 18.09.2018
- [10] Maiman, T. H. (1960). "Stimulated optical radiation in ruby". Nature br. 187 (4736) str. 493–494.
- [11] Hecht, Jeff (2005). "Beam: The Race to Make the Laser." Oxford University Press. str. 25-29.
- [12] (U.S. Patent 3,149,290)
- [13] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Laser.svg>, dostupno 18.09.2018
- [14] https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Trostupanjski_laser.png, dostupno 18.09.2018

- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/File:Diode_laser.jpg, dostupno 18.09.2018
- [16] https://sh.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Fotoelektricna_konverzija_PN_spoju.jpg, dostupno 18.09.2018
- [17] <http://engagedscholarship.csuohio.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1575&context=etdarchive>, dostupno 18.09.2018
- [18] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosfaerisk_spredning.png, dostupno 18.09.2018
- [19] <http://www.esa.int/gsp/ACT/doc/POW/ACT-RPR-NRG-2009-SPS-ICSOS-concepts-for-laser-WPT.pdf>, dostupno 18.09.2018
- [20] http://www.nlight.net/nlight-files/file/technical_papers/SPRCS05_stanford.pdf, dostupno 18.09.2018
- [21] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laser_in_fibre.jpg, dostupno 18.09.2018
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/File:IEC60825_MPE_J_nm.png, dostupno 18.09.2018
- [23] https://www.nasa.gov/offices/oct/stp/centennial_challenges/after_challenge/lasermotive.html, dostupno 18.09.2018
- [24] <https://www.space.com/7501-seattle-team-wins-900-000-space-elevator-contest.html>, dostupno 18.09.2018
- [25] http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2012/august/120807ae_uas-laser-powered.html, dostupno 18.09.2018
- [26] https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/after_challenge/lasermotive.html, dostupno 18.09.2018
- [27] Masahiro Mori, H. Kagawa, Y. Saito. "Current status of a study on hydrogen production with space solar power systems (SSPS)." SPS'04 Conference - Solar Power from Space, Granada, Španjolska, 30. Lipanj – 2. Srpanj 2004.

- [28] Masahiro Mori. “Medium efficiently converts solar rays into laser beams.” *The Japan Times*, 9. Rujan, 2004.
- [29] Claude Cougnet; Emmanuel Sein; Alain Celeste; Leopold Summerer: “Solar power satellites for space exploration.” *Journal of the British Interplanetary Society*, 59(8), 2006. str. 290–296.
- [30] H.G. Brauch, J. Muckenschnabel, H. O’power, and W. Wittwer. “Solar-pumped solid state lasers for space to space power transmission.” *Space Power, Resources, Manufacturing and Development*, 10(3- 4), 1991. str. 285–294.
- [31] P. Gleckman. “Achievement of ultrahigh solar concentration with potential for efficient laser pumping.” *Applied Optics*, Studeni 1988.
- [32] <http://archive.spacefrontier.org/Presentations/SBSPInterimAssesment0.1.pdf>, dostupno 18.09.2018
- [33] <http://www.thespacereview.com/article/3015/1>, dostupno 18.09.2018
- [34] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Space_elevator_structural_diagram--corrected_for_scale%2BCM%2Betc.svg, dostupno 18.09.2018
- [35] <https://images.nasa.gov/details-9906265.html>, dostupno 18.09.2018

SVEUČILIŠTE
SJEVER**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, JURICA HIRŠ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom

PRIENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE KORIŠTENJEM LASERA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Jurica Hirš
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, JURICA HIRŠ (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom PRIENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE KORIŠTENJEM LASERA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Jurica Hirš
(vlastoručni potpis)