

# Primjena stimuliranog mikrovalnog zračenja u znanosti i tehnologiji

---

**Kresić, Sofija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:177397>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-21**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Sofija Kresić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Sofija Kresić

PRIMJENA STIMULIRANOG MIKROVALNOG ZRAČENJA U  
ZNANOSTI I TEHNOLOGIJI

ZAVRŠNI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Članovi ispitnog povjerenstva: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić  
prof. dr. sc. Sanja Martinez  
dr. sc. Andrej Vidak

Zagreb, rujan 2020.

## **Sažetak**

Maser je uređaj koji proizvodi koherentne elektromagnetske (mikro) valove pojačavanjem stimuliranom emisijom. Začeci masera počinje 1950. godina potaknuti razvojem spektroskopije. Mnogima je maser poznat kao preteča lasera. Maseri su našli svoju primjenu kao oscilatori i pojačivači signala. U ovom radu će se raspravljati o povijesti masera, principu rada, o dvije vrste masera, plinovitom i čvrstom maseru, kao i njihovoj primjeni u znanosti i tehnologiji. Također se govori o njihovoj budućnosti.

**Ključne riječi:** mikrovalovi, stimulirano zračenje, maser, pojačalo, oscilator

## **Summary**

### **Application of stimulated microwave radiation in science and technology**

Maser is a device that produces coherent electromagnetic waves through amplification by stimulated emission. The beginnings of the maser began in the 1950s with the development of spectroscopy. The maser is known to many as the forerunner of the laser. Masers have found their application as oscillators and signal amplifiers. This paper will discuss the history of masers, their principle, the two types of maser, gas and solid-state masers, as well as their application in science and technology. It will also discuss the future of masers.

**Keywords:** microwaves, stimulated emission, maser, amplifiers, oscillators

*Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Vladimiru Dananiću na razumijevanju, susretljivosti i stručnom vodstvu pri izradi završnog rada.*

*Također bih se htjela zahvaliti svojoj obitelji, posebno majci, na stalnoj podršci i razumijevanju tijekom mog cjelokupnog školovanja te prijateljima po kojima ću sve godine mog studija imati u lijepom sjećanju.*

## Sadržaj

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OPĆI DIO .....</b>	<b>2</b>
2.1. MIKROVALOVI .....	2
2.2. FOTONI .....	3
2.3. STIMULIRANA EMISIJA .....	3
2.4. POVIJEST MASERA.....	4
2.5. KRONOLOGIJA RAZVOJA MASERA .....	5
<b>3. PREGLEDNI DIO .....</b>	<b>7</b>
3.1. PRINCIP RADA MASERA .....	7
3.1.1. DVORAZINSKI SUSTAV .....	8
3.1.2. TRORAZINSKI SUSTAV .....	9
3.2. VRSTE MASERA.....	10
3.2.1. PLINOVITI MASERI.....	10
3.2.2. ČVRSTI MASERI .....	13
3.3. PRIMJENA MASERA .....	17
3.4. OTKRIĆA U 21. STOLJEĆU. ....	21
<b>4. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>24</b>
<b>5. LITERATURA.....</b>	<b>25</b>

## 1. Uvod

Maser je uređaj za stvaranje i pojačavanje mikrovalova, a u suvremenoj inačici i za stvaranje i pojačavanje radiovalova i infracrvenoga zračenja. Rad masera temelji se na stimuliranoj emisiji zračenja koja nastaje zbog obrata inverzije napućenosti energijskih razina atoma aktivne tvari, kao i kod lasera. Njegov je naziv složenica od početnih slova engleskih riječi koje opisuju kako uređaj radi: Microwave Amplification by Stimulated emission of Radiation, što znači: mikrovalno pojačanje stimuliranom emisijom zračenja.

Maserovi radio valovi mnogo su bliži idealnom izvoru frekvencije od onih uobičajenih radio odašiljača. Kao rezultat, učinak masera može se prenositi na prilično velike udaljenosti s relativno malim gubicima. Princip masera zamišljen je početkom pedesetih godina, na temelju razvoja kvantne teorije, a prvi maser sklopili su 1954. godine C. H. Townes, J. P. Gordon i H. J. Zeiger.

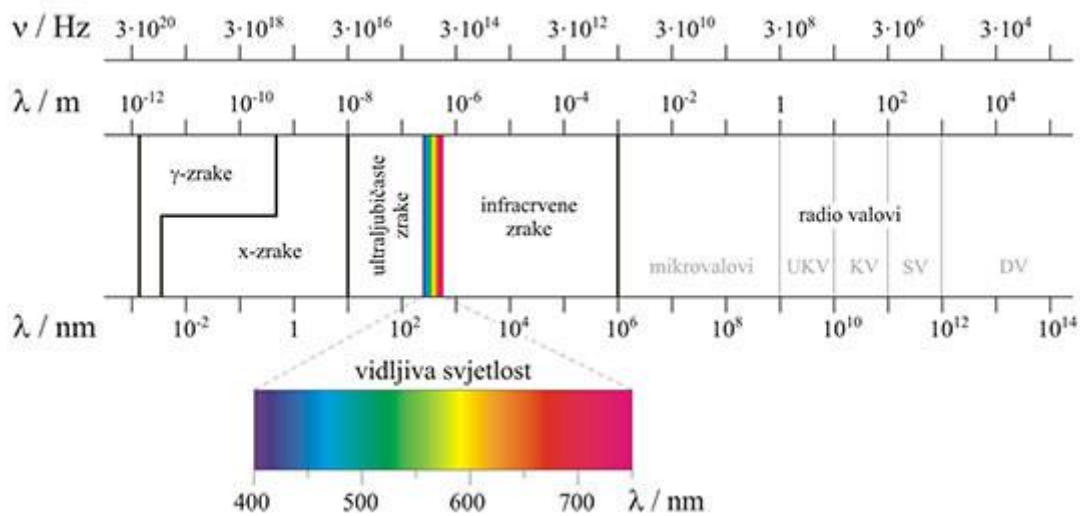
Maser se temelji na principu stimulirane emisije koji je predložio Albert Einstein 1917. Kada su atomi inducirani u pobuđeno energetska stanje, mogu pojačati zračenje na frekvenciji određenoj za element ili molekulu koji se koristi kao aktivni medij.



## 2. Opći dio

### 2.1. Mikrovalovi

Elektromagnetski spektar prikaz je jakosti elektromagnetskoga zračenja kao funkcije njegove frekvencije, odnosno valne duljine. U elektromagnetskom spektru područje mikrovalnog zračenja je valne duljine od 1 mm do 1 m. Mikrovalovi su zajednički naziv za decimetarsko, centimetarsko i milimetarsko područje radio valova. [1]



Slika 1. Elektromagnetski spektar [2]

Brzina svjetlosti, valna duljina i frekvencija elektromagnetskog vala daju izraz:

$$c = \lambda \nu \quad (1)$$

gdje je:

$c$ -brzina svjetlosti ( $299,792,485 \text{ ms}^{-1}$ ),

$\lambda$ -valna duljina elektromagnetskog vala (m),

$\nu$ -frekvencija elektromagnetskog vala ( $\text{Hz}=\text{s}^{-1}$ )

## 2.2. Fotoni

Njemački fizičar Max Planck objasnio je da užareno tijelo ne može apsorbirati ili emitirati energiju zračenja određene valne duljine u bilo kojim malim količinama, nego samo višekratnik od određenog najmanjeg kvanta energije zračenja, koji je za svaki titraj u sekundi različit i njemu proporcionalan. Najmanji kvant energije dat je Planckovom jednadžbom:

$$E = nh\nu \quad (2)$$

gdje je:

$E$  -energija koja se emitira ili apsorbira (Js),

$h$  -Planckova konstanta ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  Js),

$n$ - cijeli broj (broj oscilatora),

$\nu$ -frekvencija elektromagnetkog vala ( $\text{Hz}=\text{s}^{-1}$ ).

Zbog Planckovog zakonamoguće je od sada gledati na zračenje frekvencije kao na skupinu čestica s energijama  $h\nu$ . Američki kemičar G. N. Lewis je te čestice nazvao fotonima. [1]

## 2.3. Stimulirana emisija

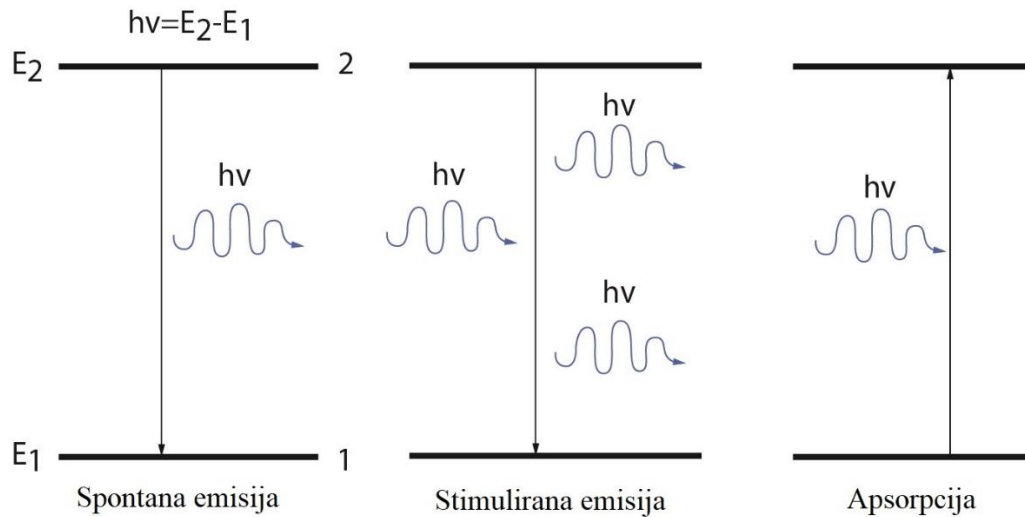
Koncept stimulirane emisije je osnova masera, a prvi ga je uveo Einstein. Prvo treba definirati dva poznatija fenomena, apsorpcija i spontana emisija, koja uključuju međusobno djelovanje materije i zračenja.

Prema kvantnoj mehanici, atom će apsorbirati foton samo ako je valna duljina fotona točno prave veličine. Ako je, atom će apsorbirati energiju fotona te će pobuđen skočiti u više energetske stanje. Ovaj proces se naziva apsorpcija.

Atomi ne vole ostati u višim energetske stanjima (prema zakonima termodinamike), stoga će nakon apsorpcije i prelaska u više energetske stanje prijeći u niže energetske stanje te će emitirati foton. Proces se naziva spontana emisija jer ga ne pokreće nikakav vanjski utjecaj. Obično je prosječni životni vijek spontanih emisija pobuđenih atoma oko  $10^{-8}$  sekundi tj. obično treba  $10^{-8}$  sekundi prije nego što emitira foton. Međutim, ponekad postoje stanja kojima je životni vijek mnogo duži, oko  $10^{-3}$  sekundi. Ta se stanja nazivaju metastabilnim.

Kod stimulirane emisije, foton određene apsorpcijske valne duljine ispaljuje se na atom koji je već u pobuđenom stanju od prethodne apsorpcije. Atom apsorpira taj foton, a zatim emitira dva fotona kako bi se vratio u niže energetska stanje. Oba novonastala fotona imaju istu valnu duljinu.

[3]



Slika 2. Prikaz procesa spontane emisije, stimulirane emisije i apsorpcije [4]

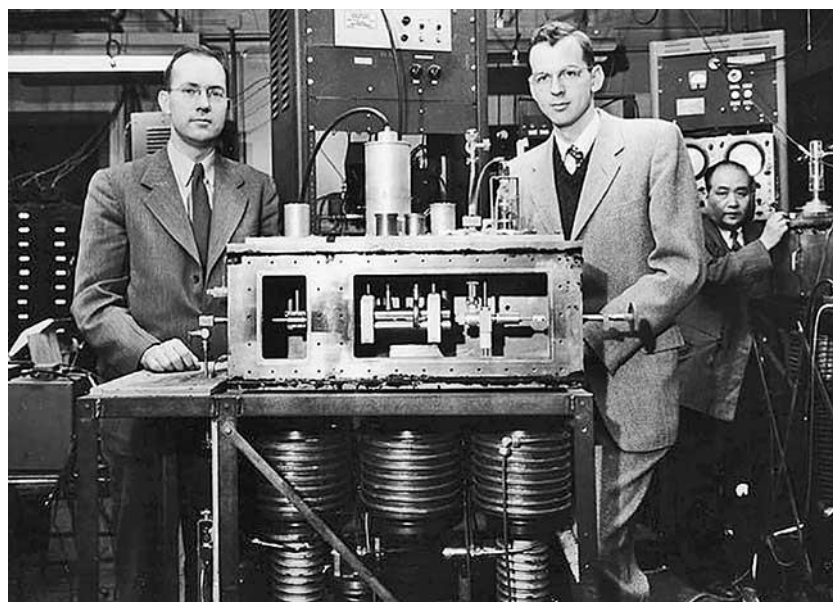
## 2.4. Povijest masera

Einstein je već 1917. godine razmatrao interakcije atoma i fotona te raspravljao o načinu na koje zračenje može uzrokovati prijelaze između energetskih razina atomskih sustava. Posebno se fokusirao na pojmove stimulirane apsorpcije i emisije koje su ustvari osnova masera. No, trebalo je gotovo 10 godina da bi znanstvenici uspjeli dokazati ispravnost Einsteinove teorije. [8]

Prvo istraživanje koje je potvrdilo postojanje stimulirane emisije proveo je A. Landberg u Berlinu između 1926. i 1930. Još 20 godina će proći prije nego se stimulirana emisija upotrijebi u uređaju za pojačavanje zrake elektromagnetskog zračenja. Znanstvenici u SAD-u, Europi i Sovjetskom Savezu nekoliko su godina izbjivali po rubovima interakcija zračenja i materije, a dva svjetska rata uvelike su usporila istraživanja. Godine 1940. mladi fizičar Valentin A. Fabrikant iz Moskovskog instituta za energiju opisao je kako bi inverzija napućenosti - s više molekula uzbuđenih nego ne - nužno dovela do "molekularnog pojačanja", zvanog stimulirana emisija. Podnio je zahtjev za patent (u SSSR-u) za "metodu za pojačavanje elektromagnetskog zračenja", 18. lipnja 1951. Prijava je prvo odbijena, ali je na kraju odobrena 1959., iako prekasno za priznanje zasluženog.

Dok se Fabrikantov patent vrtio kroz sovjetsku birokraciju, Joseph Weber sa Sveučilišta Maryland prvi je put javno opisao koherentno mikrovalno zračenje 1952.

Ideja o maseru razvila se gotovo istodobno u Sjedinjenim Američkim Državama i Sovjetskom Savezu, a prvi operativni maser izgradila je istraživačka skupina sa Sveučilišta Columbia pod vodstvom Charlesa Townesa. Razvoj masera bio je povezan s razvojem mikrovalne tehnologije tijekom Drugog svjetskog rata. Townes je također smislio akronim MASER, eng. *microwave amplification by the stimulated emission of radiation*. U istraživačkoj grupi koju je Townes osnovao za ovaj projekt bili su postdoktorski suradnik Herbert Zeiger i doktorand James Gordon. Zajedno su konstruirali maser na slici 3. [7]



Slika 3. Charlesa Townesa i James Gordon sa prvim maserom [8]

Aleksander Prohorov i Nikolai Basov su pokušavali razviti precizne frekvencijske i vremenske standarde na Institutu za fiziku Lebedev u Moskvi. Oni su predložili trirazinski sustav, iako s njim nije izgrađen uspješan maser. Ubrzo nakon toga, Nicolas Bloembergen je predložio sličnu shemu na tri razine koja je dovela do prilagodljivih masera koji koriste paramagnetne kristale.

## 2.5. Kronologija razvoja masera

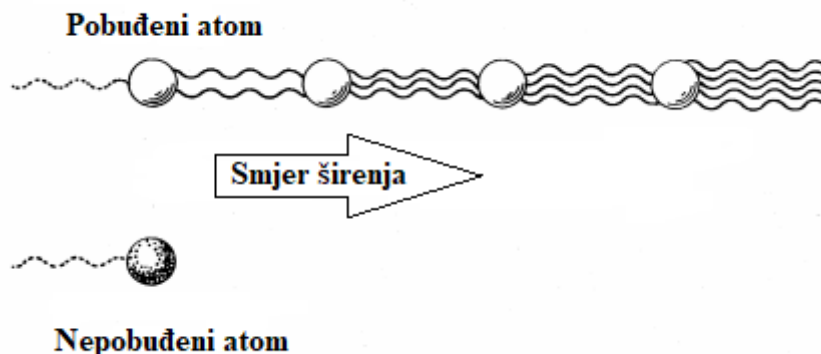
- 1901. Max Planck je odbacio postavku kinetičke teorije topline o kontinuiranoj raspodjeli energije i postavio kvantnu teoriju diskontinuiranosti energije. Matematički je demonstrirao da materija zrači energiju u diskretnim paketima koje je nazvao kvanti.

- 1905. Albert Einstein nadograđuje Plankovu teoriju za objašnjavanje fotoelektričnog efekta, pokazujući da se svjetlost sastoji od kvanta svjetlosti. G. N. Lewis je 1926. godine kvante svjetlosti nazvao fotonima. 1921. Einstein dobiva Nobelovu nagradu za svoje otkriće.
- 1913. Niels Bohr formulira model atoma u kojem elektroni u gibanju oko jezgre okupiraju određene orbite, ili energijska stanja, određene energijom elektrona.
- 1917. Einstein je identificirao pojavu nazvanu stimulirana emisija.
- 1940. Valentin A. Fabrikant opisao je kako bi inverzija napućenosti, s više pobuđenih molekula nego nepobuđenih, nužno dovela do "molekularnog pojačanja", tj. do stimulirane emisije.
- 1950. Alfred Kastler uvodi metodu optičkog pumpanja koja molekule podiže u više energetska stanja, da bi proučavao mikrovalne rezonancije. Ova metoda će postati standardna tehnika u konstrukciji masera i lasera.
- 1951. Charles Hard Townes razmatra stimuliranje molekula da emitiraju zračenje koristeći ulazno zračenje, pojačavajući time početni ulaz. Postavlja Herberta J. Zeigera i Jamesa P. Gordona da rade na ovoj ideji, koristeći zraku plinovitog amonijaka za opskrbu molekulama koje emitiraju.
- 1954. Townes i Gordon dovršavaju oscilirajući maser gdje emitirano zračenje stimulira daljnje zračenje, stvarajući tako kontinuirani učinak pojačanja. Za ovaj svoj rad Townes je 1964. podijelio Nobelovu nagradu s još dva ruska fizičara, Nikolajem Basovim i Alexanderom M. Prokhorovom, koji su nezavisno od njega došli na istu ideju.
- 1955. Rudolf Kompfner zapošljava Gordona za rad na istraživanju masera kao mogućem prijamljaku u satelitskim komunikacijama na čelu s Johnom Pierceom. Townesova grupa konstruirala drugi maser i pokazuje iznimnu čistoću frekvencije.
- 1956. Nicolaas Bloembergen predlaže trofazni maser u kojem koristi čvrstu materiju umjesto plinovitog amonijaka.
- 1957. Derrick Scovil, radeći s Georgeom Feherom i Haroldom Seidelom, prestigao je Bloembergena do prvog funkcionalnog masera na tri razine. Njih trojica konstruirali su uređaj koristeći lantanov etil sulfat dopiran ionima gadolinija.[6,7,9]

### 3. Pregledni dio

#### 3.1. Princip rada masera

Metastabilno stanje emisije omogućuje rad masera. Pod normalnim je uvjetima broj prijelaza od više energetske razine na nižu jednak broju prijelaza u obratnom smjeru. Ako se ta ravnoteža poremeti apsorpcijom vanjskog zračenja, ona će se brzo opet uspostaviti jer je broj prijelaza na svaku razinu proporcionalan broju elektrona na toj razini. Potrebna je velika količina vanjskog zračenja da bi se postiglo znatnije povećanje količine elektrona na višim energetskim nivoima u poređenju s ravnotežnim uvjetima. Međutim, na temperaturama koje su blizu apsolutne nule, vrijeme relaksacije se produžuje i ravnotežna količina elektrona na višim energetskim razinama postaje toliko mala da se elektromagnetskim zračenjem količina elektrona na tim razinama može u znatnijoj mjeri promijeniti. Da bi se dobile odgovarajuće valne duljine za generiranje lančane reakcije, prvo se električna energija ili drugi izvor energije "pumpa" u komoru ispunjenu određenim atomima ili molekulama.



Slika 4. Prikaz stimuliranog zračenja

Takvo zračenje uzrokuje prijelaz atoma iz osnovnog stanja u pobuđeno stanje. Iz ovog kratkotrajnog stanja atomi silaze u metastabilno stanje. Kada dođu u metastabilno stanje, atomi se mogu akumulirati na jednom mjestu i u istom stanju. Stimulirana emisija nastaje kad svi ovi nagomilani atomi istovremeno prelaze u osnovno stanje, oslobađajući svoju energiju te stvarajući snop mikrovalnog zračenja. Novostvoreni snop može biti poslan drugim atomima te ponovo izazvati lančanu reakciju. Budući da su svi rezultirajući fotoni iste valne duljine, zrake su izuzetno fokusirane i koherentne. Zračenje masera je monokromatsko i odgovara razlici energijskih razina.

Mikrovalno stimulirano zračenje može se proizvesti jedino ako stimulirana emisija dominira nad apsorpcijom i spontanom emisijom zračenja. To se postiže inverzijom napučenosti atoma, što znači da broj atoma u pobuđenom stanju ( $N_2$ ) mora biti veći od broja atoma u osnovnom stanju ( $N_1$ ),  $N_2 > N_1$ .

### 3.1.1. Dvorazinski sustav

U dvorazinskom sustavu dolazi do zračenja frekvencije pri prijelazu elektrona iz energijske razine  $E_2$  na energijsku razinu  $E_1$ :

$$\nu_{12} = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (3)$$

gdje je  $h$  Planckova konstanta. Vjerojatnost prijelaza od više na nižu energetske razine proporcionalna je broju elektrona u višoj razini i obratno proporcionalna vremenu relaksacije, tj. vremenu koje je potrebno da energija pobuđenog elektrona padne zbog zračenja na svoje početne vrijednosti. Apsorpcija zračenja ispravne frekvencije uzrokuje prijelaz elektrona s niže na višu energetske razine. U termičkoj ravnoteži broj elektrona u dvije energetske razine dan je Boltzmannovom jednadžbom:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (4)$$

gdje su

$N_2$  i  $N_1$  broj elektrona na višoj, odnosno nižoj energetske razine  $E_2$  odnosno  $E_1$

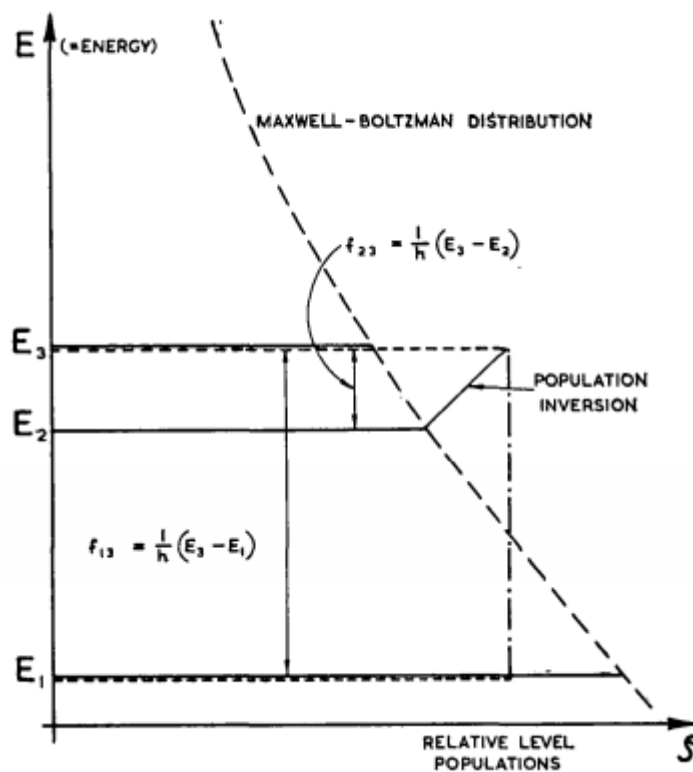
$T$  - temperatura (K)

$k$  – Boltzmannova konstanta ( $k = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ J K}^{-1}$ )

Za sustav sa samo dvije energetske razine moguće je povećati količinu pobuđenih elektrona na višoj energetske razine impulsom mikrovalne energije određene frekvencije, a nakon toga može se odmah zamijetiti mikrovalno zračenje na istoj frekvenciji. Dvorazinski sustav može dati samo malu snagu (reda veličine mikrovata).

### 3.1.2. Trorazinski sustav

Maser s tri razine znači da se za postizanje rada masera koriste samo tri razine energije, iako u materijalu može postojati veći broj. Radi dobivanja veće snage, nastoji se povećati broj pobuđenih čestica na višem energetske nivou. To se može postići različitim metodama, ali se najviše primjenjuje trorazinski sustav prema N. Bloembergen, pošto je najprikladniji. Za uspješan rad uobičajenog trorazinskog masera potrebna je pumpa frekvencije znatno veće od frekvencije signala. Upadno zračenje naziva se pumpna energija. Prema slici 5., ona radi na frekvenciji  $f_{13}$  i ona povećava količinu elektrona na energetskej razini  $E_3$ . Tada nastupa spontani prijelaz od  $E_3$  na  $E_2$ , od  $E_3$  na  $E_1$  i od  $E_2$  na  $E_1$ . Ako se sada privede mali mikrovalni (stimulirajući) signal na frekvenciji  $f_{23}$ , prijelaz od  $E_3$  na  $E_2$  je stimuliran, pa će zračenje na frekvenciji  $f_{23}$  biti jače nego zračenje te frekvencije upotrijebljeno za stimulaciju. Razina stimuliranog zračenja proporcionalna je jakosti stimulirajućeg zračenja te sklop djeluje kao pojačalo. U trorazinskim maserima primjenjuje se aktivni materijal u čvrstom stanju. [11]



Slika 5. Inverzija napučenosti trorazinskog sustava[12]



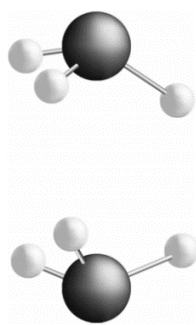
## 3.2. Vrste masera

Maseri se dijele na dvije vrste, ovisno kakav aktivni medij se koristi za kvantno pojačanje te generiranje elektromagnetskih valova: maseri koji koriste molekularne zrake-plinoviti maseri i oni koji koriste paramagnetične kristale-čvrsti maseri.

### 3.2.1. Plinoviti maseri

U ovoj vrsti masera aktivni medij stvara separator koji odvaja molekule u pobuđenom stanju. Sortirana zraka molekula u pobuđenom stanju pada u rezonantnu šupljinu, gdje dolazi do nakupljanja pobuđenih molekula. U rezonatoru pobuđene molekule pri prijelazu u nepobuđeno stanje emitiraju kvant elektromagnetskog zračenja, koje se prenose u polje rezonatora. Rezonator je konfiguriran tako da je rezonantna frekvencija rezonatora jednaka frekvenciji elektromagnetskog zračenja koje emitira pobuđena molekula tijekom prijelaza u osnovno stanje.

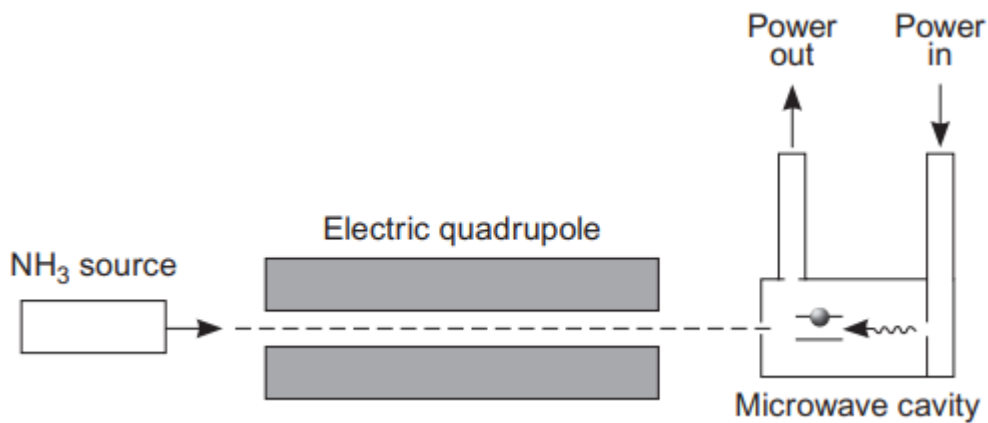
Amonijev maser je bio prvi maser (1954.). Dvije razine energije korištene u amonijevom maseru su vibracijska stanja molekule amonijaka. Može se smatrati da se atomi vodika rotiraju. Atom dušika oscilira između dva položaja, iznad i ispod ravnine vodika atoma. Ova dva položaja ne predstavljaju točno istu energiju. Valne funkcije vodika i dušika nisu simetrične pa molekula postoji u dva energetska stanja. [13]



Slika 6. Molekula amonijaka

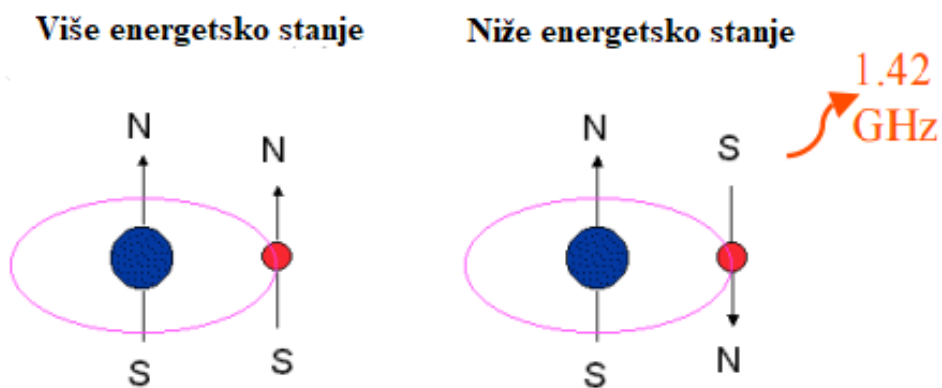
Razlika u energiji između dva stanja odgovara frekvenciji od približno 24 GHz, što je jednako valnoj duljini od 1,25 cm. Grijač daje energiju molekula amonijaka u izvoru. U tom trenutku pola molekula je u pobuđenom stanju dok druga polovica nije. Molekule  $\text{NH}_3$  zrače prema fokuseru (separatoru) koji odvaja molekule u nižem energetske stanju, one koje bi rađe apsorbirale nego emitirale fotone na željenoj frekvenciji, dok pobuđene molekule fokusira kroz malu rupu u

rezonatoru. Separator se sastoji od izmjeničnih šipki koje imaju pozitivan i negativan električni naboj. Inducirani dipolni momenti u molekulama  $\text{NH}_3$  su u interakciji sa električnim poljem. Gotovo sve molekule koje prođu u rezonantnu šupljinu su uzbuđene. One čine inverziju napučenosti molekule. Šupljina ima dovoljno snage da se inicira prijelaz iz pobuđenog stanja u osnovno. Fotoni s ovih prijelaza zatim mogu stimulirati emisiju iz ostalih molekula. Kada se koristi kao pojačalo, signal koji treba biti pojačan se uvodi u šupljinu. Ovo zračenje dovodi do još brže stimulirane emisije uzbuđenim molekulama. Koherentno zračenje na izlazu je pojačana verzija ulaznog signala.



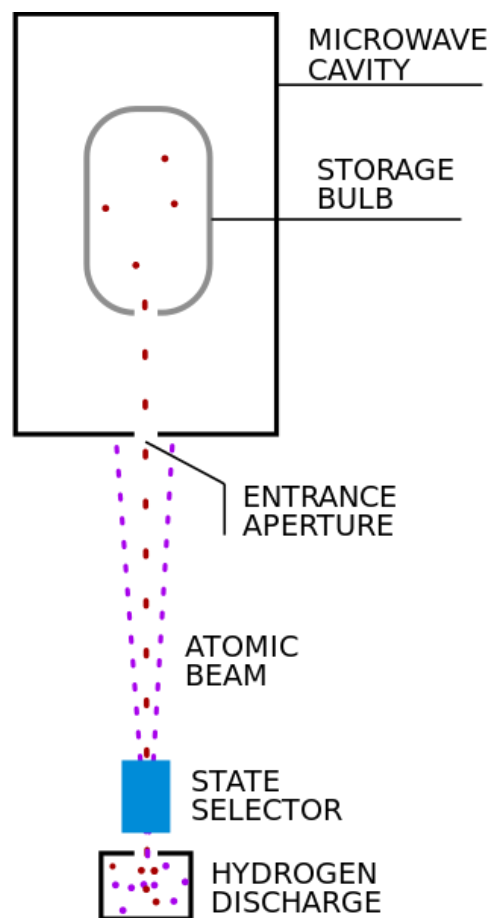
Slika 7. Shema amonijeva masera[10]

Druga vrsta plinskog masera je vodikov maser. Kao i amonijev, vodikov maser koristi dvorazinski sustav. Foton frekvencije 1,42 GHz je emitiran kada dođe do okretanja spina.



Slika 8. Okretanje spina atoma vodika [14]

Atomi vodika stvaraju zraku tako što se plin pri niskom tlaku izloži visokofrekventnom otpuštanju radio valova, poput molekula amonijačnog masera odabiru se one u pobuđenom stanju primaju u rezonator. Da bi se poboljšala točnost, relativno dugo se ispituje rezonancija svakog atoma. To se postiže korištenjem vrlo velikog rezonatora koji sadrži žarulju za pohranu. Zidovi žarulje presvučeni su tako da se atomi mogu neprestano odbijati o zidove uz malo ometanja njihove frekvencije.



Slika 9. Vodikov maser [15]

### 3.2.2. Čvrsti maseri

Molekule plina nisu toliko zbijene kao molekule krutine, dakle izlazna snaga plinskog masera ostaje niska. To je potaklo znanstvenike da razviju čvrsti maser.

Čvrsti maseri su trirazinski sustavi koji obično uključuju elektrone paramagnetskih iona u kristalnom mediju uronjenom u magnetsko polje. Potrebne su najmanje tri razine energije za kontinuirano djelovanje masera. Razine energije određuju se interakcijom elektrona s unutarnjim električnim poljima kristala i interakcijom magnetskih momenata elektrona s magnetskim poljem izvana. Prikladni materijali sadrže ione (atome s električnim nabojem) čija se razina energije može pomicati magnetskim poljem tako da tvar podesi da pojača željenu frekvenciju. Ako ioni imaju tri ili više energetske razine na odgovarajućem razmaku, oni se mogu podići na jednu od viših razina apsorpiranjem radio valova odgovarajuće frekvencije. Rezonantne frekvencije ovih materijala mogu se prilagoditi željenom stanju promjenom jačine primijenjenog magnetskog polja i orijentacije kristala u polju.

Kod odabira materijala za trirazinski čvrsti maser moraju se uzeti u obzir neki čimbenici. Glavni kriteriji za odabir materijala su sljedeći:

- materijal mora sadržavati ion čije se osnovno stanje dijeli djelovanjem unutarnjeg električnog polja kristala i vanjskog magnetskog polja na tri ili više komponenata
- moraju biti dopušteni stimulirani prijelazi između različitih komponenta osnovnog stanja
- ako je moguće, svi paramagnetski ioni u sustavu trebali bi sudjelovati u interakciji s pumpom i signalnim poljima
- da bi se upotrijebili svi aktivni ioni, materijal bi trebao imati nehomogeno proširene linije paramagnetske rezonancije
- bilo bi lakše ukomponirati materijal u mikrovalni sklop ako dielektrična konstanta materijala nije prevelika ili jako ovisi o temperaturi
- mora se lako dobiti u velikim monokristalima visokog stupnja savršenstva.

Ovi zahtjevi ozbiljno ograničavaju broj materijala koji se mogu koristiti u uređajima za maser. Sintetički rubin (aluminijev oksid dopiran kromom) jedan je od materijala koji zadovoljava većinu kriterija i široko se koristi.

Prvo važno svojstvo magnetskog iona je da treba imati osnovno stanje (kada je u kristalu) s tri ili više razina. Drugi je zahtjev da se razine ionske energije ne dijele interakcijom s nuklearnim magnetskim momentom. Pogled na bilo koju tablicu magnetskih svojstava jezgri pokazuje da to znatno smanjuje broj potencijalno korisnih iona. Ova dva zahtjeva sama po sebi smanjuju vjerojatne kandidate za maser ione na vrlo mali broj,  $\text{Cr}^{3+}$  ( $3d^3$ ),  $\text{Fe}^{3+}$  ( $3d^5$ ),  $\text{Ni}^{2+}$  ( $3d^8$ ) i  $\text{Gd}^{3+}$  ( $4f^7$ ).

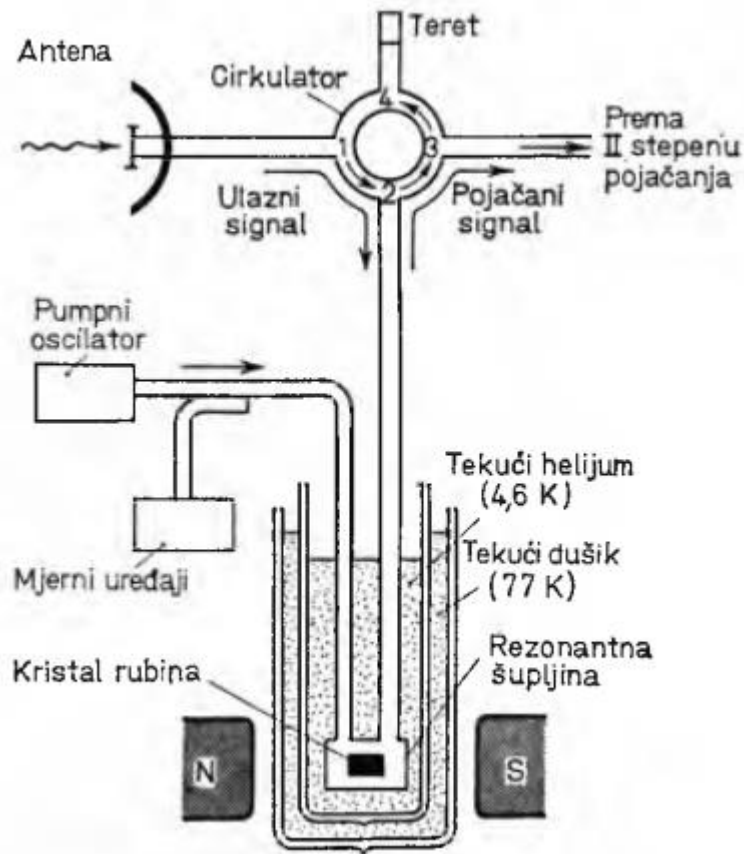
Pojačavajući kristal može raditi u rezonatoru koji, kao u amonijevom maseru, pohranjuje val i tako mu daje više vremena za interakciju s pojačavačkim medijem. Općenito, međutim, maseri sa šupljinom nisu široko upotrebljavani u sustavima, a neki od nedostataka njihove upotrebe u praktičnim sustavima su sljedeći. Prvo, uređaj je u ima tendenciju biti nestabilan pri velikim dobitcima. Drugo, nije moguće osigurati rad preko širokog pojasa. Treće, nužna je uporaba vanjskih neregipročnih elemenata za razdvajanje ulaza i izlaza, oni uvijek imaju konačni gubitak i to neizbježno dovodi do pogoršanja performansi uređaja.

Maser za putujuće valove, TWM (eng. *traveling-wave maser*) nema ovih nedostataka i počeo se razvijati nedugo nakon što je maser sa šupljinom bio korišten u relativno malom broju sustava. Za razliku od šupljine u molekularnom oscilatoru, rezonatorski paramagnetski oscilator ima dvije rezonantne frekvencije: frekvenciju zračenja pumpe i pojačanje frekvencije. Prijelaz molekula kristala u pobuđeno stanje događa se apsorpcijom kristala elektromagnetskog zračenja valne duljine pumpanja manje od valne duljine pojačanja i pojačanja pobuđenog stanja stavljanjem kristala zajedno s rezonatorom u konstantu magnetsko polje, čije podešavanje može promijeniti razinu energije pobuđenih molekula ili atoma. Pri prijelazu pobuđenih molekula tvari u normalno, stabilno, neuzbuđeno stanje emitiraju kvant elektromagnetskog zračenja u rasponu centimetara, što zavarava polje rezonatora.

Kod rubinskog masera, kristali aktivnog materijala smješteni su u mikrovalni rezonator gdje na njih djeluju kontinuirani pumpni signal i stimulirajući signal (npr. iz antene) koji treba pojačati. Pumpni signal proizvođen je posebnim pumpnim oscilatorom koji radi na frekvenciji različitoj od frekvencije stimulirajućeg signala pa zato ovi maseri mogu raditi stalno.

Pumpna energija privodi se aktivnom materijalu odvojeno od stimulirajućeg signala, a rezonator je rezonantan i na signalnoj i na pumpnoj frekvenciji, ali selektivan prema drugim frekvencijama koje mogu nastupiti pri radu masera. Stimulirano zračenje što ga izaziva stimulirajući signal vodi se valovodom u idući stupanj pojačanja koji radi na drugom principu. Za pravilno usmjeravanje stimulirajućeg i stimuliranog signala služi cirkulator. Aktivni se materijal pri radu masera izlaže djelovanju magnetskog istosmjernog polja i hladi se.

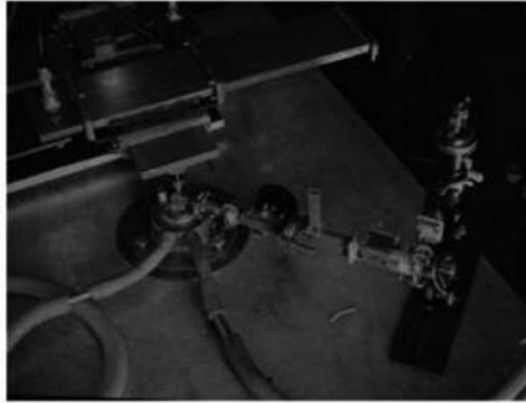
Magnetskim se poljem postiže da čestice materijala mogu zauzeti samo određene energetske razine, a hlađenje smanjuje termalne vibracije, produžuje vrijeme relaksacije i smanjuje šum. Za hlađenje služi tekući helijum (4,6 K) koji je smješten u posudi s tekućim dušikom (77 K). Njima se postiže pojačanje do 30 dB (1000 puta) u pojasu frekvencija širokom više desetaka megaherca.[16]



Slika 10. Shema rubinskog masera[11]



a)



b)



c)

Slika 11. Rubinski maser. [17]

a) općeniti prikaz

b) signalni i pumpni valovodi, izvor pumpe

c) dvofrekventni rezonator

### 3.3. Primjena masera

Amonijev maser je koristan kao frekvencijski ili vremenski standard zbog relativne oštine i nepromjenjivosti rezonantnih frekvencija molekula u plinu. Izlazna energija je bila manja od mikrovata ( $10^{-6}$  W), ali valna duljina, koja je određena molekulama amonijaka, bila je toliko postojana da se mogao koristiti za upravljanje satom koji će dobiti ili izgubiti najviše sekundu u nekoliko stotina godina. Služio je kao prvi standard atomskog sata od strane NIST-a (National Institute of Standards and Technology).

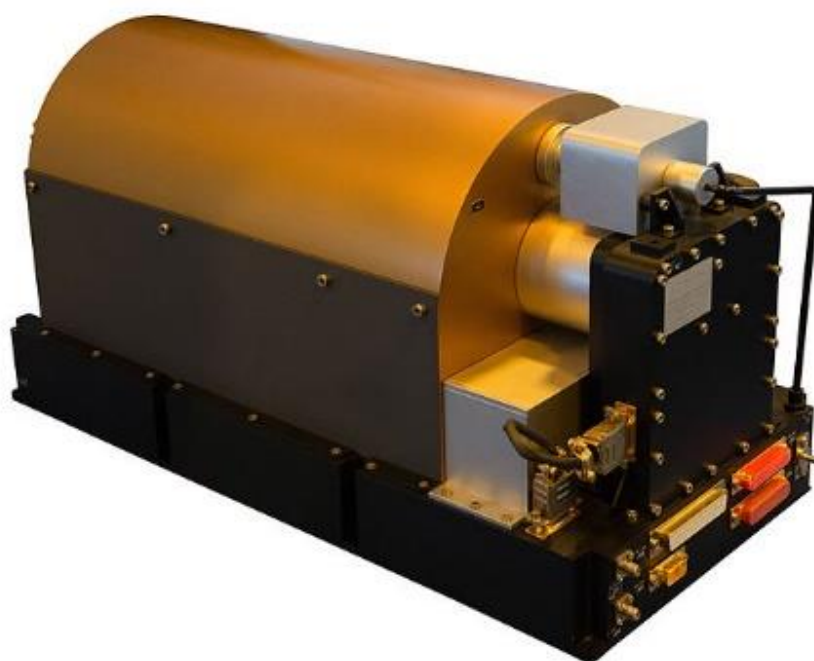


Slika 12. Atomski sat s amonijevim maserom[18]

Ovaj se maser može koristiti i kao mikrovalno pojačalo. Maserova pojačala imaju prednost u tome što su puno tiša od onih koja koriste vakuumske cijevi ili tranzistore; odnosno dodaju vrlo malo šuma signalu koji se pojačava. Tako se mogu koristiti vrlo slabi signali. Amonijev maser može pojačati vrlo uski opseg frekvencija i nije prilagodljiv, tako da je u velikoj mjeri zamijenjen drugim vrstama.



Druga vrsta plinskog mazera, koji koristi vodik, osigurava još precizniji sat. Njihova niska razina buke čini maserove oscilatore koji koriste atomsku ili molekularnu rezonancu izuzetno monokromatskim, pružajući osnovu za frekvencijske standarde. Vodikov maser, koji koristi rezonanciju plina vodikovih atoma kao izvor pojačanja, glavni je primjer ove uporabe. Jedan od najboljih temeljnih standarda frekvencije ili vremena je atomski vodikov maser koji su uveli američki znanstvenici N.F. Ramsey, H.M. Goldenberg i D. Kleppner 1960. godine. Njegov izlaz je radio val frekvencije od 1.420.405.751,786 Hz (ciklusa u sekundi). Sat koji kontrolira takav maser ne bi mogao pogriješiti više od jedne sekunde u 100 000 godina. Zajedno s drugim vrstama atomskih satova, oni pomažu u stvaranju međunarodnog standarda za atomsko vrijeme. To je međunarodna vremenska ljestvica koju koordinira Međunarodni ured za mjerenja i mjere.



Slika 13. Pasivni vodikov maser koji se koristi u Galileo satelitima ESA kao glavni sat za ugrađeni vremenski sustav[21]

Globalnim satelitskim navigacijskim sustavom Galileo upravljaju Europska GNSS agencija i Europska svemirska agencija te su blizu postizanja punog operativnog globalnog pokrivanja. Galileo System Time (GST) kontinuirana je vremenska skala koja se stvara na terenu u Kontrolnom centru Galileo u Fucinu u Italiji od strane Postojenja preciznog mjerenja vremena, na temelju prosjeka različitih atomskih satova. Prema Europskoj agenciji za GNSS, Galileo nudi točnost mjerenja vremena od 30 ns. Svaki satelit Galileo ima dva pasivna vodikova masera i dva

atomska sata s rubidijem za mjerenje vremena. Pasivni vodikov maser glavni je sat na brodu svakog satelita. To je atomski sat koji koristi ultra stabilni prijelaz od 1,4 GHz u atomu vodika za mjerenje vremena unutar 0,45 nanosekundi tijekom 12 sati.[19]

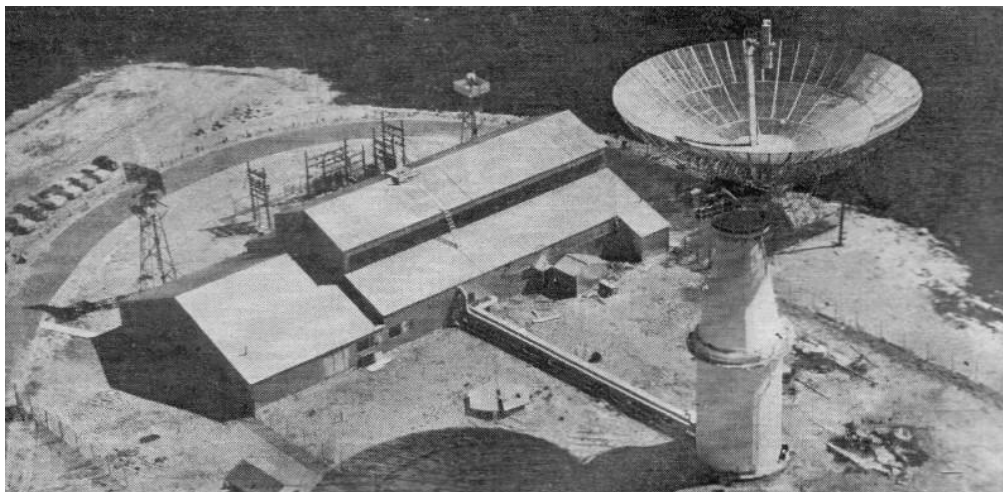
Izvanredna karakteristika čvrstih masera je njegova izuzetno niska ekvivalentna temperatura šuma, što je dovelo do njegove primjene kao pojačala u satelitskim komunikacijskim sustavima. Korišteni su za pojačavanje slabih signala vraćenih s takvih udaljenih ciljeva kao što su sateliti u radaru i komunikacijama. Njihova osjetljivost je posebno važna za takve primjene jer su signali koji dolaze iz svemira obično vrlo slabi. Iako je glavni atribut TWM-a njegova izuzetno niska temperatura šuma, uređaj ima druge karakteristike zbog kojih je izuzetno dobar za komunikacijske svrhe. To su njegova linearnost i intermodulacijske karakteristike. Doista nije pretjerano reći da su rani satelitski komunikacijski sustavi bili uspješni zbog stavljanja masera u prijamnike na Zemlji. U konvencionalnim prijamnicima glavni izvor pozadinske buke je slučajna emisija vrućih katoda, buka pucanja u cijevima i slučajna toplinski šum otpornika. Budući da se kod masera pojačava bez upotrebe vrućih katoda i cijevi, logično je očekivati da buka iz takvih izvora ne postoji. Također, komponente koje bi mogle stvarati buku nalaze se na izuzetno niskoj temperaturi, nekoliko stupnjeva iznad točke na kojoj prestaje sve toplinsko gibanje. Ostala područja primjene masera su u praćenju sonde dubokog svemira i TWM koriste se zajedno s hladnjacima zatvorenog ciklusa u NASA-inom (National Aeronautics and Space Administration) Deep Space Instrumentation Facility. Takav maser s niskim šumom radi u hladnjaku zatvorenog ciklusa za primanje prijenosa slike sa satelita Mariner IV. U ovoj je aplikaciji od primarne važnosti ukupna temperatura šuma, a ne širina pojasa. Korištenje masera koji rade na frekvenciji od 2290 MHz značajno je povećalo mogućnost brzine prijenosa podataka DSIF prijamnika te omogućilo prienos i prijem slika površine Marsa. Maseri, oba tipa, sa šupljinom i TWM, također su pronašli primjenu na polju radioastronomije. Primjena masera krenula je sporo jer mnoge komponente u postojećim sustavima nisu dizajnirane za upotrebu s niskim šumom. Da bi maser bio koristan, doprinos buke ostatka sustava trebao bi biti istog reda kao i maser. Iz tog razloga su Bell Telephone Laboratories morali razviti posebnu antenu s malim šumom za upotrebu s maserom za projekt "Echo". Ovo je prvi sustav projektiran da maksimalno iskoristi karakteristike masera. To je rezultiralo brzom realizacijom sofisticiranih masernih sustava koji su s vidljivim uspjehom korišteni u pionirskim eksperimentima u satelitskim komunikacijama (Project, Echo, Telstar i Relay). Zahvaljujući njihovoj uporabi postignuti su brojni novi važni rezultati u svemirskim istraživanjima. Detaljne studije svemirskog zračenja vodika na valnoj duljini od 21 cm i otkrivanje novih linija zračenja visoko pobuđenih atoma vodika u spektralnom opsegu 8 mm dale su dragocjene podatke o raspodjeli i karakteristikama (temperatura, gustoća, dinamika)

vodika u galaksiji. Studije emisije masera iz svemira na 1,35 cm koje su ranije otkrili Townes i suradnici, iznijele su vrlo zanimljive podatke o sadržaju vode u nekim svemirskim izvorima.

Upotreba pojačala EPR-maser u planetarnim radarskim sustavima omogućila je dobivanje novih podataka o karakteristikama Merkura, Venere, Marsa i Jupitera. U radioastronomiji maseri su omogućili mjerenje slabih radio valova koje emitira planet Venere, dajući prvi pokazatelj njegove temperature.



Slika 14. Dr. R. H. Kingston priprema maser za promatranje Venere u M.I.T. Lincoln laboratoriju u Millstone Hill zvjezdarnici.



Slika 15. Venera je "viđena" s maserom koji se nalazi na mjestu dovoda antene[20]

Unatoč velikoj količini radova koji su izvedeni na materijalima i tehnikama masera, nije bilo naznaka da se maseri prikladni za komunikacijske svrhe mogu ostvariti na temperaturama višim od temperature tekućeg helija (4.2 K). Ova ograničenja masera, zajedno s vrlo brzim razvojem koji su se dogodili na području diodnih parametričkih pojačala, rezultirali su prestankom razvoja na polju masera.

### 3.4. Otkrića u 21. stoljeću

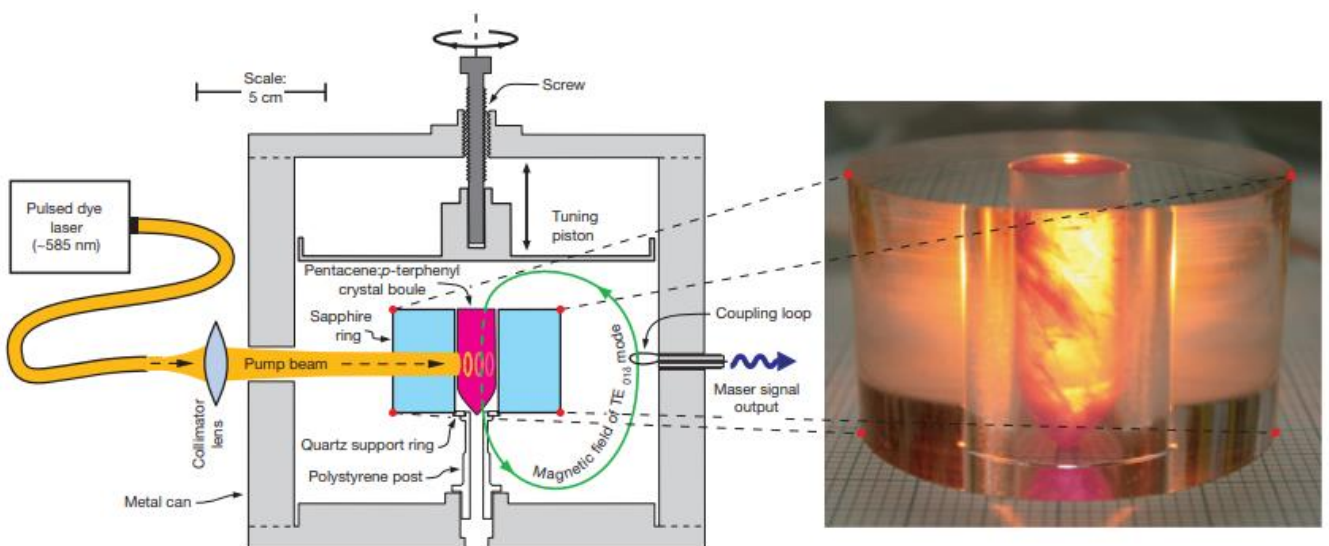
Osnovne komponente masera mogu se navesti na sljedeći način:

- sama struktura masera,
- kupka s tekućim helijem u koju je uronjena konstrukcija,
- magnet, postavlja paramagnetske razine energije,
- izvor pumpe, sa svojim napajanjem. [12]

Maseri su uvijek trpili veliki nedostatak u pogledu primjene: maseri rade samo na temperaturi blizu apsolutne nule ili na vrlo niskim tlakovima. Također, moraju biti u jakom magnetskom polju kako bi generirali svoje koherentne mikrovalne zrake. Uređaj sobne temperature koji radi bez magneta opisao je britanski tim 2012.

Prevladavanje ovih raznih prepreka otvorio bi put poboljšanjima poput osjetljivijih kemijskih ispitivanja, preciznija određivanja biomolekularnih struktura i funkcija. Maser sobne temperature mogao bi se razviti za medicinsko snimanje, daljinske kemijske senzore i možda za osjetljivije radio teleskope.

Britanski tim je demonstrirao čvsti maser koji radi na sobnoj temperaturi u impulsnom načinu rada. Radi u laboratoriju, u zraku, u zemaljskom magnetskom polju i pojačava se na 1,45 GHz. Za razliku od rubinovih masera, u ovom je maseru aktivni medij miješan organski kristal, p-terfenil dopiran pentacenom, uzbuđen žutom svjetlošću. Razine energije molekule pentacena mogu se optički pumpati kako bi se postigla velika inverzija napučenosti čak i na sobnoj temperaturi. Za proces pojačanja potrebna je velika inverzijanapučenosti koja ostavlja malo elektrona na nižoj energetskejoj razini i smanjuje unutarnji šum masera. Maserov mehanizam pumpanja iskorištava spin-selektivni molekularni intersustavni prijelaz u tripletno stanje pentacena. Kada je konfiguriran kao oscilator, izmjerena izlazna snaga polimernog masera je približno 100 milijuna puta veća od atomskog vodikovog masera, koji oscilira na sličnoj frekvenciji (oko 1,42 gigaherca).

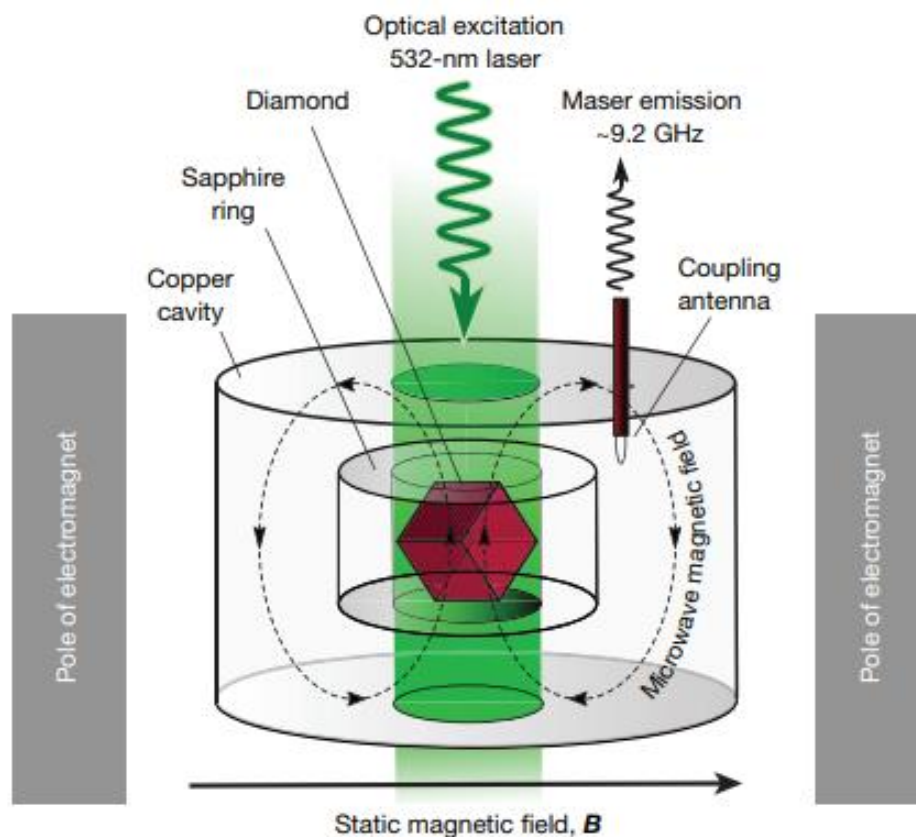


Slika 16. Anatomija masera

Kristal p-terfenila dopiran sa pentacenom nalazi se u magnetskom polju. Fotografija desno prikazuje prsten safirnog rezonatora i pentacena:p-terfenil kristal unutar; žuto osvijetljenje otkriva nedostatke unutar kristala.

Maser djeluje samo u impulsnom načinu rada s rafalnim koherentnim mikrovalnim valovima koji traju djelić sekunde i štoviše dostupni su samo u uskom frekvencijskom području. Tim i dalje istražuje druge materijale kako bi pronašao alternative koje se mogu koristiti u kontinuiranom načinu rada masera i na drugim mikrovalnim frekvencijama. Također je trebalo poboljšati prenosivost ovog masera.

Međutim, p-terfenil ima loša toplinska i mehanička svojstva i stope propadanja tripletnog podnivoa pentacena znače da je moguć samo pulsni maser. Stoga su potrebni alternativni materijali za postizanje kontinuirane emisije: anorganske materijali koji sadrže defekte spina, poput dijamanta i silicijeva karbida, su predloženi. 2018. godine znanstvenici su izvjestili o maseru sobne temperature s kontinuiranim valom. To su postigli pomoću optički pumpanog dijamanta. Ova demonstracija ističe potencijal čvrstih masera sobne temperature za upotrebu u novoj generaciji mikrovalnih uređaja koji bi mogli naći primjenu u medicini, sigurnosti, osjetljivosti i kvantnim tehnologijama.



Slika 17. Konstrukcija dijamantnog masera

Dijamant je stavljen unutar safirnog prstena i orijentiran tako da jedan skup osi poredan paralelno s magnetskim poljem. Safir i dijamant su smješteni unutar cilindrične bakrene šupljine. Dijamant je bio optički pumpan na 532 nm kontinuiranim valom Nd:YAG lasera.

#### **4. Zaključak**

U ovom završnom radu opisan je razvoj masera, kao i njihova primjena. Maser je uređaj koji postavlja niz atoma ili molekula i pobuđuje ih kako bi mogao generirati lančanu reakciju, ili pojačanje, fotona. Od prvog masera 1954. godine, mogao se uvidjeti veliki potencijal primjene mikrovalnog stimuliranog zračenja. Maseri su se postupno razvijali i dokazali da mogu detektirati i pojačati signale bolje od bilo koje druge vrste prijarnika. Zbog svoje niske temperature šuma našli su primjenu u satelitskim komunikacijskim sustavima i radioastronomiji kao precizni satovi, oscilatori te pojačivači signala. Iako su godinama bila zapostavljena istraživanja za poboljšanja masera, pedesetak godina nakon prvog funkcionalnog masera došlo je do novih otkrića koja su ponovno zainteresirale znanstvenike za stimulirano mikrovalno zračenje.

## 5. Literatura

- [1] I. Filipović, S. Lipanović, *Opća i anorganska kemija*, 1. dio *Opća kemija*, Zagreb, 1995., 121-125
- [2] <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=spektar+elektromagnetskog+zra%C4%8Denja> (pristup 10.09.)
- [3] <https://einstein.stanford.edu/content/faqs/maser.html> (pristup 10.09.)
- [4] [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical\\_Chemistry/Supplemental\\_Modules\\_\(Analytical\\_Chemistry\)/Instrumental\\_Analysis/Lasers/Overview\\_of\\_Lasers](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Instrumental_Analysis/Lasers/Overview_of_Lasers) (pristup 10.09.)
- [5] <https://history.aip.org/phn/masers-lasers.html> (pristup 10.09.)
- [6] <https://www.bell-labs.com/about/history-bell-labs/stories-changed-world/inventing-laser/> (pristup 10.09.)
- [7] <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=42279> (pristup 10.09.)
- [8] <https://astromart.com/news/show/charles-townes-inventor-of-the-laser-and-maser-passes-away-at-99> (pristup 10.09.)
- [9] J.W. Orton, D.H. Paxman, J.C. Walling, *The Solid State Maser*, 1970., 3-11
- [10] Morrison, J. C. (2015). *The Emergence of Masers and Lasers*. *Modern Physics*, 117–128.
- [11] [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektronika\\_sklopovi\\_i\\_sastavni\\_dijelovi\\_za\\_mikrovalnu\\_tehniku.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektronika_sklopovi_i_sastavni_dijelovi_za_mikrovalnu_tehniku.pdf) (pristup 15.09.)
- [12] Hlawiczka, P. (1961). The maser and its application to satellite communication systems. *Journal of the British Institution of Radio Engineers*, 22(3), 265–270.
- [13] <https://www.britannica.com/technology/maser> (pristup 15.09.)
- [14] <https://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/21cmlne.html> (pristup 15.09.)
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_maser#/media/File:Hmaser.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_maser#/media/File:Hmaser.svg) (pristup 15.09.)
- [16] J.W. Orton, D.H. Paxman, J.C. Walling, *The Solid State Maser*, 1970., 26-53
- [17] A. A. Manenkov (2011) *J. Phys.: Conf. Ser.* 324
- [18] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ammonia\\_maser\\_atomic\\_clock\\_NIST.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ammonia_maser_atomic_clock_NIST.jpg) (pristup 20.09.)
- [19] [https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo\\_s\\_clocks](https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_s_clocks) (pristup 20.09.)
- [20] <https://www.rfcafe.com/references/electronics-world/maser-november-1960-electronics-world.htm> (pristup 20.09.)
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_clock#History](https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_clock#History) (pristup 20.09.)



- [22] Oxborrow, M., Breeze, J. D., & Alford, N. M. (2012). Room-temperature solid-state maser. *Nature*, 488(7411), 353–356.
- [23] Breeze, J. D., Salvadori, E., Sathian, J., Alford, N. M., & Kay, C. W. M. (2018). Continuous-wave room-temperature diamond maser. *Nature*, 555(7697), 493–496