

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU**

**PRIMENA CO<sub>2</sub> LASERA U ZAŠTITI  
ČOVEKOVE OKOLINE**

**– DIPLOMSKI RAD –**

Mentor:

**Prof. Dr Mira Terzić**

Student:

**Dragana Šarančić**

Novi Sad, avgust 2004.

## PREDGOVOR

Zagađenje životne okoline je veliki problem sa kojim se suočava savremeni svet. Svojom nemarnošću i neznanjem, čovek je doprineo da njegova životna sredina sve više radi protiv njega. Pojačano štetno UV zračenje, globalno zagrevanje i niz drugih primera svakodnevno nas upozoravaju na moguće veće posledice. Zato treba preduzeti sve mere potrebne da se zagađenje svede na minimum.

Cilj ovog rada je da se pokaže uloga lasera, prvenstveno CO<sub>2</sub> lasera, u programima za zaštitu životne sredine. Laseri ne mogu da spreče zagađenje niti da umanjuju koncentracije štetnih materija, već služe da se detektuju polutanti i odredi u kojoj količini su prisutni. Mnogi bi rekli da je to beznačajno, ali svi znamo da “bez dobre dijagnoze nema uspešnog lečenja”.

Zahvaljujem se Prof. Dr Miri Terzić na bezrezervnoj saradnji i pomoći tokom pisanja ovog rada. Takođe se zahvaljujem svojoj porodici za strpljenje i razumevanje.

*Autor*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>3</b>
<b>2. METODE MERENJA POLUTANATA.....</b>	<b>7</b>
2.1. KLASIFIKACIJA METODA MERENJA.....	7
<b>3. OSNOVNI PRINCIP RADA CO<sub>2</sub> LASERA .....</b>	<b>9</b>
3.1. STIMULISANA EMISIJA ZRAČENJA.....	9
3.2. KVANTNI GENERATORI.....	11
3.3. KLASIFIKACIJA LASERA.....	12
3.4. KARAKTERISTIKE CO <sub>2</sub> LASERA .....	13
3.4.1. Izlazni spektar CO <sub>2</sub> lasera.....	16
3.5. TIPOVI CO <sub>2</sub> LASERA.....	17
3.5.1. Protočni gasni laseri.....	17
3.5.2. Laseri sa uzdužnim gasnim kretanjem (Longitudinal -Flow).....	17
3.5.3. Laseri sa poprečnim gasnim kretanjem (Transverse- Flow) .....	18
3.5.4. Zatvoreni gasni CO <sub>2</sub> laseri .....	18
3.5.5. TEA CO <sub>2</sub> laseri.....	18
3.5.6. Gasno-dinamički CO <sub>2</sub> laseri .....	18
3.6. PRIMENA CO <sub>2</sub> LASERA .....	19
<b>4. LIDAR.....</b>	<b>20</b>
4.1. PRINCIP RADA LIDARA.....	21
4.1.1. Laseri u lidarskim sistemima.....	22
4.2. LIDARSKI SISTEMI.....	24
4.2.1. Topografski lidar .....	24
4.2.2. Mie lidar i Rejljev lidar.....	24
4.2.3. Ramanov lidar .....	25
4.2.4. Fluorescentni lidar .....	25
<b>5. DIAL (Differential Absorption Lidar).....</b>	<b>26</b>
5.1. PRINCIP RADA DIAL-A.....	26
5.2. PRIMENA LIDARSKIH SISTEMA.....	28
<b>6. FOTOAKUSTIČKA MERENJA .....</b>	<b>32</b>
6.1. MERENJE POLUTANATA.....	33
<b>7. PREGLED LASERSKIH SPEKTROSKOPSKIH METODA ZA MERENJE POLUTANATA</b>	<b>36</b>
7.1. INFRACRVENA LASERSKA SPEKTROSKOPIJA.....	36
7.1.1. Laserska apsorpciona spektroskopija.....	36
7.1.2. Cavity ring-down spektroskopija .....	37
7.1.3. Optotermalna spektroskopija .....	37

7.2.	MULTIFOTONSKA SPEKTROSKOPIJA .....	38
7.3.	DIFFERENTIAL OPTICAL ABSORPTION SPECTROSKOPY (DOAS) .....	39
7.4.	LASERSKA FLUORESCENTNA SPEKTROSKOPIJA .....	40
7.5.	LASERSKA MASENA SPEKTROSKOPIJA .....	40
<b>8.</b>	<b>SIMULIRANJE PROSTIRANJA LASERSKOG ZRAČENJA KROZ ATMOSFERU .....</b>	<b>42</b>
8.1.	HITRAN BAZA PODATAKA .....	42
8.2.	LBLRTM MODEL .....	44
8.2.1.	Transmisiona funkcija .....	46
8.2.2.	Vodena para .....	47
8.2.3.	Vodena para i ozon .....	49
8.3.	MODELIRANJE IC RADIJATIVNIH FLUKSEVA .....	49
8.4.	SIMULACIJA ATMOSFERSKE TRANSMISIJE KORIŠĆENJEM PROGRAMA PcModWin, PcLnWin I HITRAN-PC .....	52
8.4.1.	PcModWin i PcLnWin programi .....	52
8.4.2.	HITRAN-PC program .....	52
8.5.	PROGRAMI ZA SIMULACIJU RASEJANJA I ATENUACIJE .....	53
8.6.	KOMPJUTERSKA SIMULACIJA LIDARA .....	54
<b>9.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>57</b>

## 1. UVOD

Konstantnim razvojem tehnologije, novim istraživanjima i putem novih saznanja čovek teži da svoj život učini lagodnjim i kvalitetnijim, ali svojim pojedinim aktivnostma, on istovremeno zagađuje svoju životnu sredinu i prirodno stanište svih živih bića. Paljenje fosilnih goriva (uglja i nafte), sagorevanje otpada, proizvodnja papira, korišćenje pena, cigareta, upotreba pesticida samo su neki od mnogobrojnih izvora zagađenja okoline.

Zemlja je okružena vazdušnim omotačem, atmosferom. Atmosfera nas štiti od štetnog kosmičkog zračenja, opasnih sunčevih zraka, reguliše globalnu temperaturu na Zemljinoj površini i obezbeđuje kiseonik za disanje i ugljen-dioksid za fotosintezu biljaka. Zemljinu atmosferu čini smeša različitih gasova. 99% sastava atmosfere čine gasovi N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub>. Drugi gasovi, od kojih su neki prisutni u veoma malim količinama, u tragovima (tabela 1.1), od izuzetne su važnosti za život na Zemlji. Njihove koncentracije su reda ppmV (1ppm=10<sup>-6</sup>), ppbV (1ppb=10<sup>-9</sup>), čak i pptV (1ppm=10<sup>-12</sup>)<sup>1</sup> (Sica, 1999).

Sastav atmosfere se neprekidno menja, što utiče na kvalitet života na Zemlji, a često dovodi i do neželjenih posledica. Jedna od njih je uticaj povećane količine gasova staklene bašte, naročito ugljen-dioksida, na globalno zagrevanje Zemlje. Ono može imati pozitivne efekte (bolji rod useva), ali i dosta negativnih (topljenje polarnog leda i podizanje nivoa mora). Ozon u nižim delovima atmosfere, kao jedan od gasova staklene bašte, u slučaju prisustva u količini većoj od dozvoljene, može biti otrovan za biljke i životinje. Ozon u nižim delovima atmosfere, tj. troposferi, nastaje dejstvom sunčeve svetlosti na azot–oksid, kiseonik i isparljive organske komponente, reakcijama tokom sagorevanja uglja i drugih goriva, a takođe i iz rastvarača, boja, sprejava za kosu. Za razliku od ozona u nižim slojevima, ozon u višim slojevima atmosfere, tačnije stratosferi, je itekako koristan jer živi svet na Zemlji štiti od štetnog UV zračenja (Sica, 1999). Međutim, ozonski omotač je dosta oštećen, naročito iznad Antarktika. Uzrok “nestajanja” ozona je, prvenstveno, posledica povećanja koncentracije hemikalija koje sadrže Cl, kao što su CFCs (hlorofluorokarbonati), ali i komponente koje sadrže Br i azotni oksidi. CFCs potiču iz sistema za hlađenje i pri proizvodnji nekih tipova pakovanja. Ova jedinjenja se penju u više slojeve atmosfere gde ih UV zračenje razbija na komponentne molekule, pa nastali atomi Cl dovode do uništavanja ozona. Proces formiranja smoga je još jedan primer koji demonstrira kako male količine polutanata imaju drastične efekte. Smog se obrazuje od sumpor-dioksida, azot-oksida i isparljivih organskih materija, naročito u industrijskim predelima (Sigrist, 1994).

Polutanti posredno ili neposredno utiču na zdravlje ljudi. Oni koji imaju trenutno dejstvo su primarni polutanti (ugljen monoksid, radioaktivni otpad i visoko toksične komponente kao što su ksilen, atmosferski metali), dok drugi koji su opasni tek kada pređu u druge forme nazivaju se sekundarnim polutantima. Prisustvo ugljen-monoksida, sumpor-dioksida, čestica prašine, čadi nepovoljno utiče na zdravlje ljudi i ostalih živih bića. Sumpor-dioksid, na primer, utiče na ljudski mozak i može izazvati iritacije grla i nosa, ugljen-monoksid redukuje sposobnost krvi da vezuje kiseonik, čestice prašine, čadji i drugi komadići čvrstih materijala izazivaju iritacije nosa, očiju i grla, dok manje čestice (dijametra 2.5 μm i manje) mogu dospeti u pluća i mogu biti vrlo toksične, ozon u nižim slojevima atmosfere irritira oči,

<sup>1</sup> (1ppm ozona znači 1 molekul ozona na svakih 1000000 molekula vazduha)



grlo i pluća, a kod biljaka smanjuje količinu hlorofila. Trovanje olovom (iz velikih peći za spaljivanje otpada) dovodi do oštećenja centralnog nervnog sistema i visokog krvnog pritiska.

Tabela 1.1. Hemijski sastav atmosfere

Konstituent	Hemijska formula	Koncentracija u suvom vazduhu	Glavni izvori i primedbe
Azot	N <sub>2</sub>	78.084%	Biološki
Kiseonik	O <sub>2</sub>	20.948%	Biološki
Argon	Ar	0.934%	Inertan
Ugljen-dioksid	CO <sub>2</sub>	360 ppmV	Sagorevanje, okean, biosfera
Neon	Ne	18.18 ppmV	Inertan
Helijum	He	5.24 ppmV	Inertan
Metan	CH <sub>4</sub>	1.7 ppmV	Biogenični i antropogenični
Vodonik	H <sub>2</sub>	0.55 ppmV	Biogenični, antropogenični, fotohemijski
Ugljen-monoksid	CO	50-200 ppbV	Antropogenični, fotohemijski
Ozon (troposfera)	O <sub>3</sub>	10-500 ppbV	Fotohemijski
Ozon (stratosfera)	O <sub>3</sub>	0.5-10 ppmV	Fotohemijski
Halokarboni	*	3.8 ppbV	85% antropogenični
Azotni oksidi	NO <sub>y</sub>	10 pptV-1 ppmV	Đubriva, antropogenični
Amonijak	NH <sub>3</sub>	10 pptV-1 ppbV	Biogenični
Sumpor-dioksid	SO <sub>2</sub>	10 pptV-1 ppbV	Fotohemijski, vulkanski, antropogenični

Štetne posledice zagađenja na živi i neživi svet možemo ređati u nedogled, zato treba uložiti sve napore da se zagađenje svede na minimum. Veoma je važno znati koji su polutanti i u kojoj količini su prisutni u nekoj oblasti da bi se mogle preduzeti odgovarajuće mere zaštite. Do sada su razvijene različite metode merenja polutanata u čovekovom okruženju. Jednu od značajnih uloga imaju metode u kojima se koriste **laserski izvori zračenja**. Upotreba lasera u istraživanjima atmosfere počinje 1962. Te godine, korišćenjem rubinskog lasera od 0.5 J, dobijeni su signali Rejljevog rasejanja od atmosfere do 50 km visine i takođe, detektovane su naslage prašine u atmosferi. Otkriće različitih laserskih izvora, razvoj detektorske tehnologije i kompjuterske tehnike, sakupljanje i analiza podataka, dovode do razvoja novih metoda merenja polutanata zasnovanih na primeni laserskih izvora.

Metode merenja zasnovane na laserskim sistemima odlikuju se: velikom osetljivošću, selektivnošću, brzinom dobijanja informacija i kompaktnošću. Zahvaljujući ovim osobinama, laserske metode se koriste u različitim poljima kao što su:

- 1) Okolni monitoring ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  i  $\text{CH}_2\text{O}$  su važni gasovi u različitim aspektima studija atmosferske hemije);
- 2) Merenja industrijske emisije (npr. monitoring u petrohemijskoj industriji, mestima sagorevanja, pećima za sagorevanje otpada, gasnim cevima);
- 3) Urbana (npr. automobilski saobraćaj, proizvodnja struje) i ruralna emisija (npr. hortikulturne staklene bašte, skladišta voća);
- 4) Hemijske analize i kontrola za proizvodne procese (npr. u poluprovodnicima, farmaceutskoj, i industriji hrane);
- 5) Detekcija medicinski važnih molekula (npr.  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  i  $\text{CS}_2$ ), otrovnih gasova, droga, i eksploziva i
- 6) Kvalitet vazduha sredine kosmičkog broda i planetarna atmosferska nauka (npr. takvi planetarni gasovi kao  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  i  $\text{C}_2\text{H}_2$ ).

Za istraživanja i detekciju polutanata se koriste različiti tipovi lasera (Nd:YAG,  $\text{CO}_2$  laser, diodni laser, titanium-safir).  $\text{CO}_2$  laser je jedan od lasera koji se veoma često koriste za detekciju polutanata zbog širokog opsega intenziteta izlaznog zračenja, kao i mogućnosti promene talasnih dužina laserskog zračenja (9–10  $\mu\text{m}$ ). Koriste se kako impulsni tako i kontinualni  $\text{CO}_2$  laseri različitih snaga. Spektar talasnih dužina ovog lasera je bitan za spektroskopska merenja jer većina molekula ima karakterističnu apsorpcionu traku upravo na talasnim dužinama  $\text{CO}_2$  lasera. Glavni atmosferski gasovi koji emituju/apsorbuju u IC oblasti su  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFCs. Svaki od ovih gasova ima specifičan apsorpcioni/emisioni spektar. U tabeli 1.2. su prikazani najznačajniji vibracioni i rotacioni prelazi za navedene gasove.

Obzirom da  $\text{CO}_2$  laser zauzima značajno mesto u tehnikama merenja zagađenja čovekove sredine, ovaj rad prvenstveno opisuje sisteme za detekciju polutanata baziranih na zračenju ovog lasera. U prvom delu rada (§ 2) opisani su metodi i principi merenja polutanata u kojima se koristi lasersko zračenje. U sledećem odeljku (§ 3) dat je kratak opis opštih principa generisanja laserskog zračenja, dok je nešto detaljnije prikazan  $\text{CO}_2$  laser.

U sledećem delu (§ 4) opisana je detekcija polutanata upotrebom LIDAR-a (LIght Detection And Ranging). Prikazan je princip rada, primena i razmotrone su tehnike koje se koriste. Posebno je opisan princip rada DIAL-a (DIfferential Absorption Lidar). Primeri detekcije i merenja koncentracije polutanata lidarskim i dialskim sistemima baziranim na  $\text{CO}_2$  laseru takođe su dati ovom delu.

deo o fotoakustičnim merenjima (§ 5) daje objašnjenje fotoakustičnog efekta i fotoakustične spektroskopije, govori o značaju lasera pri ovim merenjima. Dati su primeri detekcije polutanata mobilnim sistemima i sistemima u laboratorijama.

Pregled drugih metoda za merenje polutanata dat je u sledećem delu (§ 6). Opisane su Cavity ringdown spektroskopija, IC apsorpciona spektroskopija, masena spektroskopija, multifotonika spektroskopija i laserom izazvana fluorescencija.

Prikaz programa za simulaciju transmisije ili radijacije atmosfere, kao i jedan program za simulaciju rada lidara (LIDAR-PC) predstavljeni su u delu koji sledi (§ 7). Korišćeni su programi: LBLRTM, PcModWin, PlnWin, HITRAN-PC i BETASPEC.

Tabela 1.2. Značajni vibracioni i rotacioni prelazi za gasove u IC oblasti spektra

GAS	CENTAR		PRELAZ	TRAKA $\left[\text{cm}^{-1}\right]$
	$\nu \left[\text{cm}^{-1}\right]$	$\lambda \left[\mu\text{m}\right]$		
$\text{H}_2\text{O}$	1594.8	6.3	čisto rotacioni	0–1000
			$\nu_2$ , P, R	640–2800
	kontinuum		krila linija	200–1200
$\text{CO}_2$	667	13	$\nu_2$ , P, R, Q	540–800
	2349	4.3	$\nu_3$ , P, R	2100–2400
$\text{O}_3$	1110	9.01	$\nu_1$ , P, R	950–1200
	1043	9.59	$\nu_3$ , P, R	600–800
	705	14.2	$\nu_2$ , P, R	600–800
$\text{CH}_4$	1306.2	7.6	$\nu_4$	950–1650
$\text{N}_2\text{O}$	1285.6	7.9	$\nu_1$	1200–1350
	588.8	17.0	$\nu_2$	520–660
	2223.5	4.5	$\nu_3$	2120–2270
CFCs				700–1300

## 2. METODE MERENJA POLUTANATA

Raznovrsnost polutanata je velika, a njihove koncentracije su, najčešće, jako male (reda ppbV, ppmV) i variraju u različitim oblastima. Izborom odgovarajuće tehnike i eksperimentalne postavke, merenja ovih polutanata mogu biti uspešno sprovedena. Tehnike bi trebalo da zadovoljavaju sledeće uslove:

- a) da poseduju mogućnost detektovanja više komponenti sa jednim istim instrumentom,
- b) da imaju veliku osetljivost, tj. mogućnost detektovanja veoma malih koncentracija,
- c) da se odlikuju velikom selektivnosti, tj. sposobnosti sistema da detektuje male koncentracije odgovarajuće vrste u prisustvu drugih apsorpcionih vrsta, čak iako je njihova koncentracija veća,
- d) da imaju velik dinamički opseg, za detektovanje kako malih tako i velikih koncentracija istim instrumentom,
- e) da imaju dobru vremensku rezoluciju da omogući *on-line* monitoring,
- f) da se instrument može prenositi sa jednog mesta na drugot za *in situ* merenja.

Zavisno od situacije, neki od ovih uslova su manje, a neki više bitni.

### 2.1. KLASIFIKACIJA METODA MERENJA

Metode se mogu klasifikovati na više načina, a jedan od njih je sledeća podela prema načinu merenja (Sigrist, 1994):

1. *Ekstraktivna metoda*. Podaci se sakupljaju neko određeno vreme, a zatim se obrađuju i analiziraju u laboratoriji. Metodu karakterišu velika osetljivost, selektivnost i kontinualno snimanje, a mogući su kontaminacioni problemi.
2. *Tehnika in situ*. Merenja se vrše direktno, na mestu gde se nalazi instrument. Podaci se dobijaju sa ograničenog prostora, sa manjom osetljivošću, ali za kratak vremenski period.
3. *Daljinska merenja*. Dobijaju se podaci o objektima bez fizičkog kontakta sa njima što isključuje bilo kakav uticaj na njih. Merenja su jako osetljiva, efektivna, ali interpretacija rezultata može biti teška.

Daljinska merenja mogu se klasifikovati u zavisnosti od:

- a) *Tipa interakcije elektromagnetskog zračenja i sredine* (emisija, apsorpcija, rasejanje, refleksija,...),
- b) *Spektralne oblasti istraživanja* (ultravioletna, vidljiva, infracrvena, mikrotalasna,...),
- c) *Izvora zračenja* (pasivna i aktivna daljinska merenja, sl. 4.1. i sl. 4.2).

Daljinska merenja počinju intenzivno da se primenjuju skoro odmah nakon pronađaska lasersa (1962.), kao moćnih svetlosnih izvora. Lasersko zračenje je omogućilo merenja velikih površina i zapremina, istraživanja nedostupnih mesta itd.

Izdvojićemo spektroskopske tehnike koje se baziraju na nekoj vrsti interakcionog procesa između zračenja i materije:

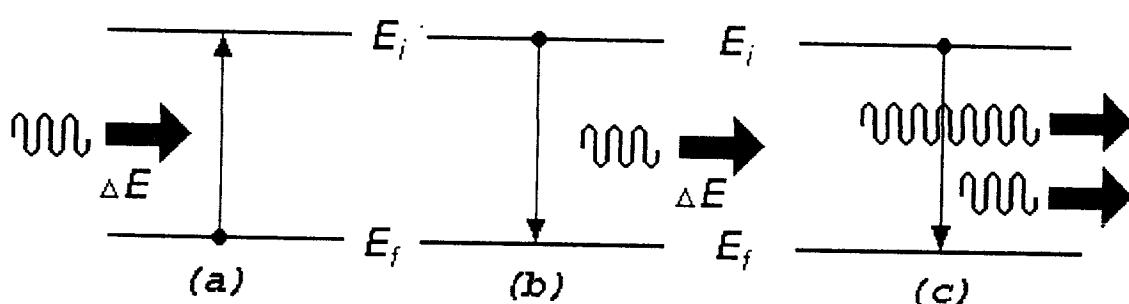
- a) *Laserska fluorescentna spektroskopija*. Ona se uglavnom koristi za detekciju atoma i radikala, ali se odlikuje malom osetljivošću.
- b) *Infracrvena (IC) spektroskopija*, odlikuje se dobrom osetljivošću, i odličnom selektivnošću.
- c) *DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy)*; primenjuje se za ultravioletno zračenje (UV) zračenje, ima veliku osetljivost i dobru selektivnost.
- d) *Apsorpciona spektroskopija dugog puta*. Koristi lasersko zračenje u UV, vidljivoj IC spektralnoj oblasti.
- e) *LIDAR (Light Detection And Ranging)* (§ 4.2) i *DIAL (Differential Absorption Lidar)* (§ 4.3). Lidar i Dial koriste laserko zračenje u UV, vidljivoj IC spektralnoj oblasti.
- f) *Fotoakustična spektroskopija* (FAS) (§ 5). Ova metoda se odlikuje velikom selektivnošću i osetljivošću, a može se koristiti u različitim spektralnim oblastima.
- g) *Multifotonска spektroskopija* (MFS) spada u nelinearne spektroskopske metode (UV, vidljiva, IC spektralna oblast).

### 3. OSNOVNI PRINCIP RADA CO<sub>2</sub> LASERA

Laser je akronim od Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation (pojačanje svetlosti stimulisanom emisijom zračenja). Sam razvoj lasera počinje još 1917. god kada je Albert Einstein sugerisao mogućnost stimulisane emisije. Međutim, realizaciji stimulisane emisije pristupilo se tek posle drudog svetskog rata. Prvi koji je u tome uspeo bio je Charles H. Townes na Columbia University. On je 1954. napravio prvi *maser* (Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation). Prvi *laser* (rubinski) je 1960. konstruisao T. Mainman. Ubrzo je lasersko zračenje realizovano i u drugim sredinama. Npr., prvi CO<sub>2</sub> laser je 1964. godine napravio C. K. N. Patel.

#### 3.1. STIMULISANA EMISIJA ZRAČENJA

Atom u osnovnom stanju kada apsorbuje zračenje (sl. 3.1.a) prelazi u pobuđeno ili eksitovano stanje. Eksitovani atom, teži da se vrati u osnovno stanje. Pri tom on emituje talas odgovarajuće energije, tj. talasne dužine. Sam proces se naziva **spontana emisija** (sl. 3.1.b).



Sl. 3.1. Šematski prikaz apsorpcije (a), spontane (b) i stimulisane emisije (c)

Ako do emisije dolazi pod uticajem spoljašnjeg zračenja, imamo **stimulisani emisiju** (sl. 3.1.c). Upadni i emitovani foton su istog pravca i smera, jednake energije, iste faze i polarizacije, tj. upadno i emitovano zračenje je koherentno.

Problem stimulisane emisije je što ne funkcioniše dobro u "normalnim" uslovima tj. termodinamičkoj ravnoteži. Atomi i molekuli teže najnižem mogućem energetskom stanju (to ne mora biti osnovno stanje), što dovodi do problema populacije-broj atoma ili molekula na istom energetskom nivou. Na termičkoj ravnoteži taj broj opada kako energija raste.

Odnos koncentracija atoma u termodinamičkoj ravnoteži je:

$$\frac{N_i}{N_f} = \frac{g_i}{g_f} e^{-\frac{E_i - E_f}{kT}}$$

i uvek je  $N_i < \frac{g_i}{g_f} N_f$  (index i označava više, a f niže energetsko stanje).

No, da bi došlo do stimulisane emisije potreban je obrnut odnos koncentracija, tj.

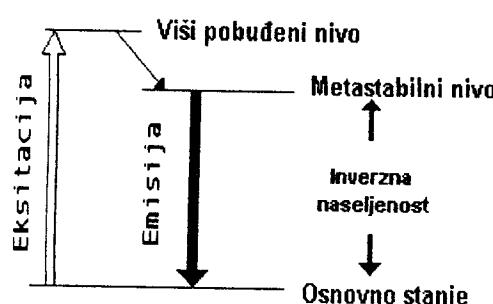
$$N_i > \frac{g_i}{g_f} N_f,$$

odnosno potrebno je narušiti termodinamičku ravnotežu. Nivoi sa ovakvim odnosom populacija čine stanje **inverzne naseljenosti**.

Temperatura sistema je:

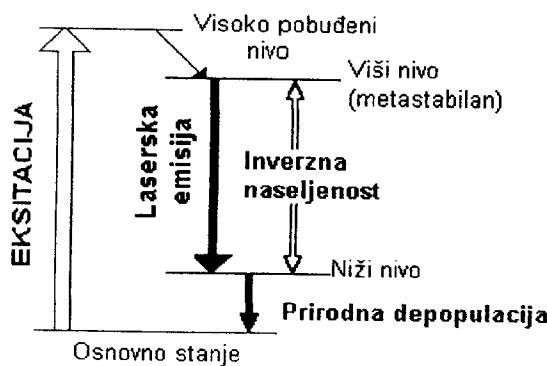
$$T = \frac{E_i - E_f}{k \ln \frac{g_i N_f}{g_f N_i}}, \quad T < 0$$

pa neki fizičari govore o inverznoj naseljenosti kao o negativnoj temperaturi.



Sl. 3.2. Inverzna naseljenost kod sistema sa tri nivoa

Za sistem sa četiri nivoa pobuđivanje se vrši sa osnovnog na više pobuđeno, zatim se brzo prelazi na niže metastabilno stanje, a onda na još niže energetsko stanje koje nije osnovno (sl. 3.3). Najčešće su ova stanja multipliteti.



Sl. 3.3. Inverzna naseljenost kod sistema sa četiri nivoa

Za postizanje inverzne naseljenosti potrebno je najmanje tri nivoa, odnosno postojanje metastabilnih stanja sa dužim vremenom života. Tada je moguće sistem dovesti u stanje u kome inverzna naseljenost postoji za dva određena nivoa. Kod sistema sa tri nivoa, pobuđujemo atome sa osnovnog na kratkoživeće više energetsko stanje, onda ono brzo prelazi na niže metastabilno stanje koje ima duže vreme života. Inverzna naseljenost se uspostavlja između metastabilnog i osnovnog stanja (sl. 3.2).

Supstanca u stanju inverzne naseljenosti naziva se **aktivna supstanca** i postoji više načina kojima se ovo stanje postiže, a to su:

1. Optičkim pobuđivanjem ili **optičkim pumpanjem** (proces apsorpcije svetlosti, pogodan za čvrsta i tečna tела),
2. **Električnim pumpanjem** (sudarima prve vrste u slučaju električnog pražnjenja kroz gasove pri niskim pritiscima),

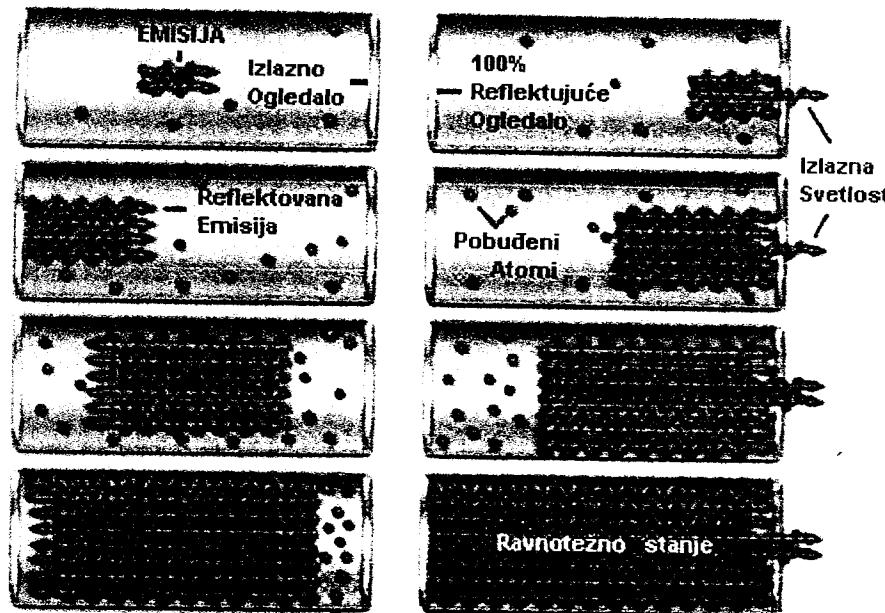
3. **Proticanjem električne struje kroz PN spoj kod poluprovodničkih lasera** (veća koncentracija elektrona u provodnoj nego u valentnoj zoni),
  4. **Hemijskim reakcijama u gasovima**, apsorpcijom energije proizvedene nuklearnim reakcijama, ...

### 3.2. KVANTNI GENERATORI

Već smo naglasili da je za stimulisanu emisiju neophodna aktivna supstanca, tj. supstanca u stanju inverzne naseljenosti i pomenuli smo kako se postiže inverzna naseljenost. Prolaskom kroz aktivnu supstancu spoljašnje zračenje će, usled stimulisane emisije, biti pojačano (kvantno pojačanje). Intenzitet tog zračenja se tada menja prema izrazu:

$$I_v' = I_v e^{(\alpha_v - \beta_v)d}$$

gde je  $\alpha_s > 0$ , koeficijent kvantnog pojačanja,  $\beta_s$  koeficijent smanjenja intenziteta snopa, a  $d$  je predeni put svetlosti.



Slika 3.4. Šematski prikaz načina rada lasera

Za značajno pojačanje potrebno je veliko  $d$ , tj. svetlost treba da pređe duži put kroz radnu supstancu. Zato radnu supstancu stavljamo između dva paralelna ogledala od kojih jedno u potpunosti reflektuje, a drugo delimično propušta zračenje. Ova ogledala čine laserski rezonator u kom svetlost osciluje i pojačava se (sl. 3.4).

Kaskadno umnožavanje zračenja odvija se neko vreme bez stalne pobude pa se ovi sistemi nazivaju **kvantni generatori**. Međutim, zbog spontane deeksitacije i gubitaka, proces se posle određenog vremena gasi.

Prema tome, za rad lasera potrebni su sleći osnovni elementi:

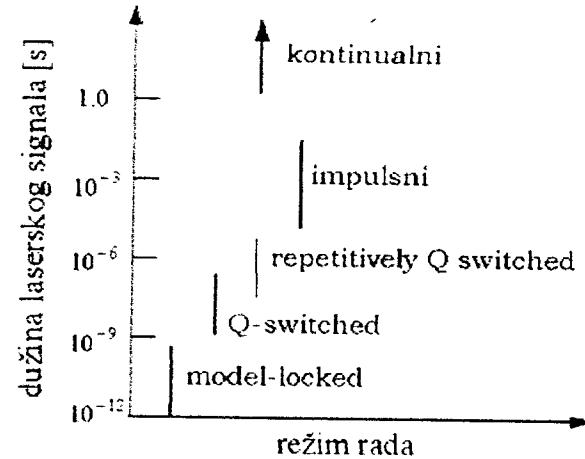
1. *aktivni sredina* (kristal, gas, tečnost, poluprovodnik, čvrsto telo,...)
2. *mehanizam za pobuđivanje* (optički, električni, hemijski,...),
3. *visoko reflektujuća ogledala*,
4. *delimično propusna ogledala*.

Talasi koje emituju laseri su iste faze, talasne dužine, amplitude i pravca. Emitovano zračenje je u vidljivom, infracrvenom ili ultraljubičastom delu spektra.

### 3.3. KLASIFIKACIJA LASERA

Postoji mnogo načina za klasifikaciju lasera. Jedan od načina je podela na lasere koji rade u IC, vidljivoj ili UV oblasti spektra, na lasere velikih i malih snaga, itd. Laseri se mogu podeliti i prema načinu pumpanja aktivne sredine.[Terzić, Kurepa, 1996] Dve najznačajnije podele su prema vrsti aktivne sredine i prema dužini laserskog zračenja. U zavisnosti od vrste aktivne supstance lasere delimo na:

1. **Čvrste lasere**, koji za laserski medium imaju čvrste supstance (npr. rubinski laser, Nd:YAG (neodymium:yttrium aluminium gartet)),
  2. **Gasne lasere**, koji imaju gas kao aktivni medium (npr. HeNe, CO<sub>2</sub> laser, CO laser).
  3. **Excimer lasere** (reč potiče od termina *excited* i *dimers*), koji koriste reaktivne gasove kao što je hlor i fluor pomešane sa inertnim gasovima, argonom, kriptonom ili ksenonom. Električnim pobuđenjem proizvode se pseudomolekuli ili *dimer* i laserskom aktivnošću proizvodi se svetlost u UV delu elektromagnetskog spektra.
  4. **Dye (obojene) lasere**, koji, kao laserski medium, koriste kompleks organskih boja kao što je rodamin 6G u tečnom stanju ili suspenziji. Ovi laseri su podešljivi za širok opseg talasnih dužina.
  5. **Poluprovodničke lasere**, nekad se nazivaju i diodni laseri, nisu laseri čvrstog stanja. Ovi elektronski uređaji su generalno veoma mali i koriste malu snagu. Oni mogu biti ugrađeni u veće redove, npr izvori za pisanje u nekim laserskim štampačima.
- Prema dužini trajanja zračenja, lasere delimo na (sl. 3.5):
- a) **mode-lock** (od nekoliko ps do nekoliko stotina ps),
  - b) **Q-switched** (od nekoliko ns do do 50ns),
  - c) **repetitively Q-switched** (nekoliko μs),
  - d) **impulsne** (od nekoliko stotina μs do 50 ns) i
  - e) **kontinualne** (cw, koji konstantno emituju svetlost).



Sl. 3.5. Podela lasera prema dužini trajanja zračenja

U tabeli 3.1. pokazani su osnovni tipovi lasera i njihove talasne dužine.

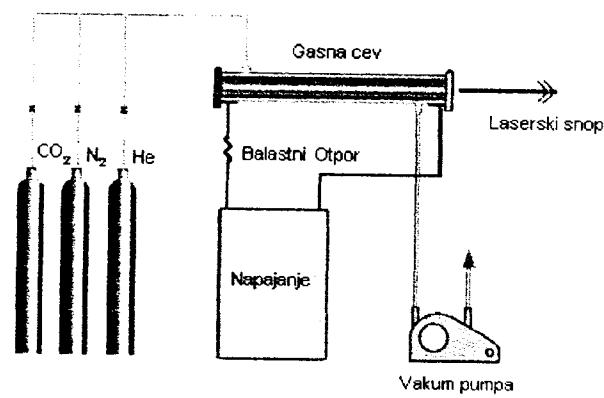
Tabela 3.1. Tipovi lasera

Tipovi lasera	Talasna dužina [nm]
Argon-fluorid	193
Ksenon-hlorid	308, 459
Ksenon-fluorid	353, 459
Helijum-kadmium	325 – 442
Argon	457 – 528 (514.5 i 488 najčešće)
Helijum-neon	543, 594, 612, 632. 8
Kripton	337. 5 – 799. 3 (647.1 – 676.4 najčešće)
Rubin	694.3
Laserska dioda	630 – 950
Aleksandrit	720 – 780
Fluoro-vodonik	2600 – 3000
Ugljen-monoksid	5000 – 6000
Ugljen-dioksid	8700 – 11800 (najčešće 10600)

### 3.4. KARAKTERISTIKE CO<sub>2</sub> LASERA

Laseri ovog tipa, tj. CO<sub>2</sub> laseri spadaju u grupu najpoželjnijih lasera koji su do sada proizvedeni. Karakteristike kojima se oni ističu iznad ostalih lasera jesu: snaga koju mogu da razviju (ovaj laser je najjače izlazne snage), mogu da rade u kontinualnom i/ili impulsnom režimu, visokog su stepena iskorišćenosti u odnosu na druge lasere (do 30%) i veoma jednostavne konstrukcije.

Na slici 3.6. prikazana je principijelna šema CO<sub>2</sub> laserskog sistema sa uzdužnim protokom. Tri gase (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He) se mešaju i vode na jedan kraj cevi pod pritiskom od nekoliko stotina Pa. Da bi se održao konstantan pritisak, gas se odvodi pomoću mehaničke vakuum pumpe. Električno pražnjenje se odvija između metalnih krajeva zakačenih za cev. Balastni otpornik je potreban zbog negativnog dinamičkog otpora pražnjenja.



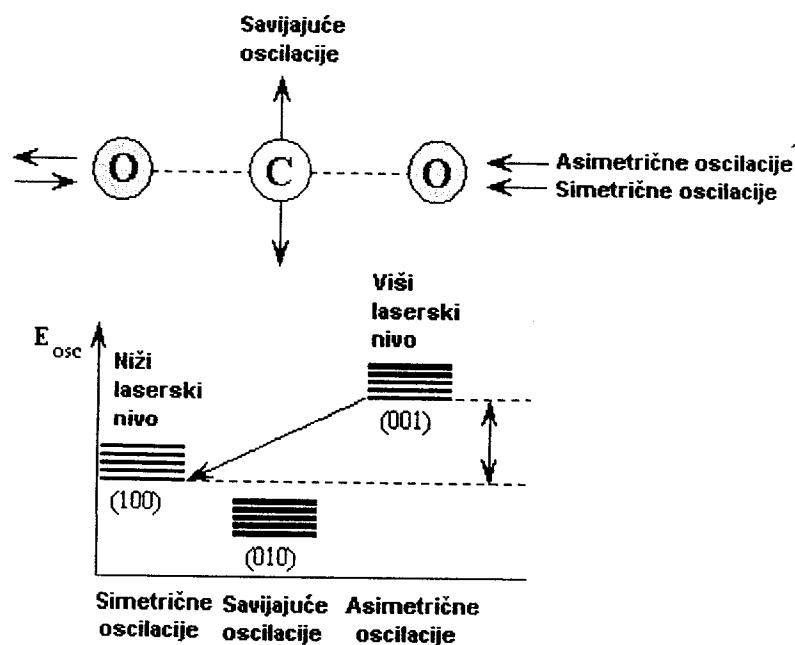
Sl. 3.6. Principijelna šema CO<sub>2</sub> laserskog sistema sa uzdužnim protokom

Na levoj strani je visoko reflektujuće ogledalo, a na desnoj polupropusno. Ogledala su jako bitna jer od njih zavise i izlazne karakteristike zračenja. Ona, u zavisnosti od potrebe, mogu biti fiksirana, obrtna ili rotaciona. Za visoku refleksiju se koriste ogledala prevučena metalom (Au, Mo, Cu), dok za polupropusno ogledalo ne smemo koristiti staklo u osnovi, jer je ono neprozirno za deo spektra izražene svetlosti, koje za CO<sub>2</sub> laser iznose od 9–11 μm (infracrveni deo spektra). Materijali koji se primenjuju u ovom slučaju su: Ge (ali se mora pribegnuti raznim metama hlađenja kod visoko energetskih lasera), NaCl, CaCl, BaF (hidroskopan) i ZnSe (ima male gubitke).

Pražnjenje može biti aktivirano bilo sa DC (jednosmerno), AC (naizmenično), RF (Radio frekventno) ili pulsno. Maksimalna izlazna snaga se postiže sa DC ili sa niskofrekventnim AC napajanjem koje se priključuje direktno na elektrode. Izlazna snaga lasera je manja sa RF napajanjem jer je teško održati veliku dužinu pražnjenja podjednako pobuđenom. Električne karakteristike CO<sub>2</sub> lasera su visoki napon i mala struja sa negativnim dinamičkim otporom. U protočnim gasnim sistemima skoro svaki materijal može biti upotrebljen za izradu elektroda.

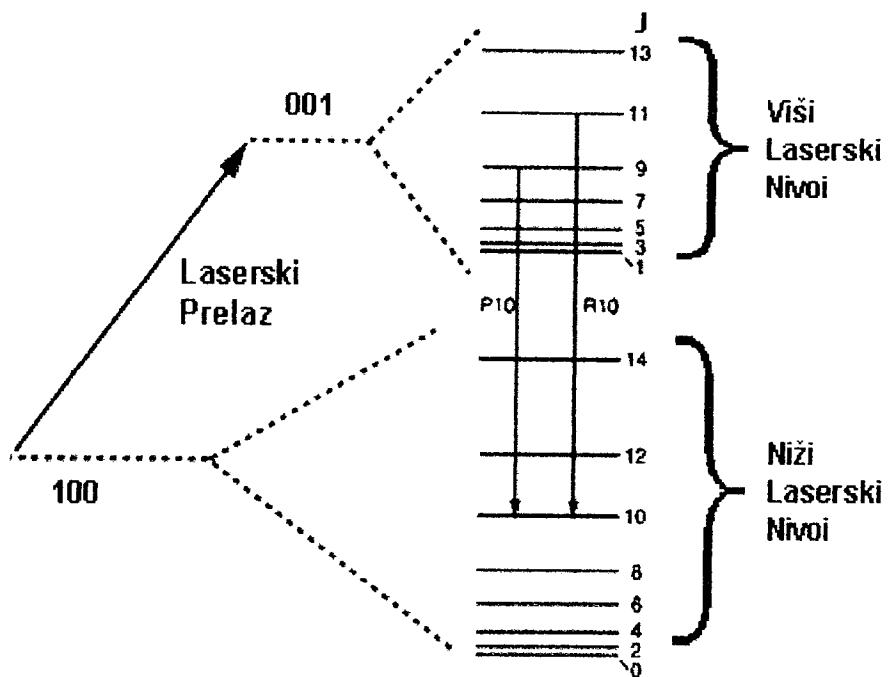
Aktivni medijum ovog lasera, kao što smo već pomenuli, čini jonizovana smeša CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> i He u odnosu: 9, 5% CO<sub>2</sub>, 13, 5% N<sub>2</sub>, 77% He.

CO<sub>2</sub> je linearani, simetrični molekul (O-C-O) i ima tri vibraciona stepena slobode opisana kvantnim brojevima  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$  koji se uglavnom pišu kao  $v_1v_2v_3$ . Ovi kvantni brojevi opisuju broj vibracionih kvanata u **modu simetričnog istezanja**,  $v_1$  (gde dva atoma O vibriraju nasuprot jedan drugom), u **modu savijanja**,  $v_2$  (atom C se pomera van molekularne ose i tako savija molekul) i u **modu asimetričnog istezanja**,  $v_3$  (dva atoma O osciluju nasuprot atomu C) (sl. 3.7).



Sl. 3.7. Vibracioni modovi CO<sub>2</sub> molekula

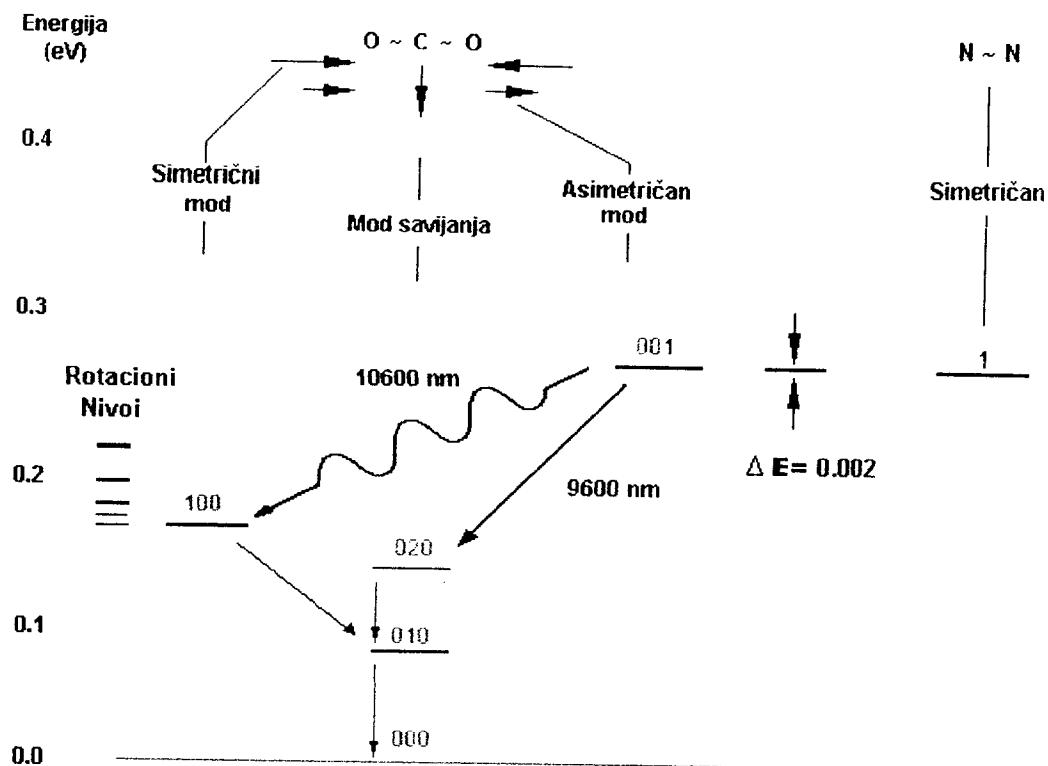
Svaki vibracioni nivo je degenerisan, tj. dalje se deli na cele serije nivoa dobijenih rotacijom vibracionih molekula. I ovi nivoi su, takođe, kvantovani i opisuju se sa rotacionim kvantnim brojem  $J$ . Izborna pravila za vibraciono-rotacione prelaze su  $\Delta J=+1, -1$ . Oni prelazi gde  $J$  raste za 1 zovu se prelazi P-grane, a oni gde  $J$  opada za 1 prelazi R-grane. Ove prelaze karakterišu različite talasne dužine (sl. 3.8).



Sl. 3.8. Vibraciono-rotacioni prelazi

Slobodni elektroni koji se uvek nalaze u ionizovanom gasu, ubrzavaju se u električnom polju i prouzrokuju vibracije molekula  $\text{CO}_2$  i  $\text{N}_2$ . Azot se i dodaje u smešu jer ima veću efikasnost pobuđivanja u sudarima sa elektronima, a uspešno predaje vibracionu energiju molekulima  $\text{CO}_2$ . Najniži vibracioni nivo na koji se molekuli  $\text{N}_2$  pobuđuju je metastabilan i energijski blizak nivou 001 kod  $\text{CO}_2$ , tako da se pri sudaru prenosi energija molekulima  $\text{CO}_2$ , čime se dobija inverzna naseljenost nivoa 001 u odnosu na nivoe 100 i 020. Ova dva nivoa se prazne preko nivoa 010 do osnovnog stanja 000. Kako bi se održala inverzna naseljenost, potrebno je efikasno pražnjenje nivoa 010. Ovo se postiže ubacivanjem vode ili helijuma u smešu gasova, i u sudarima sa njima se smanjuje naseljenost ovog nivoa (sl. 3.9). Voda se relativno lako kondenzuje, pa se više koristi helijum. Osim toga, helijum snižava rotacionu temperaturu i povećava toplotno provođenje do zida, pa, snižavanjem temperature gasa, smanjuje broj sudarnih depopulacija 001 nivoa.

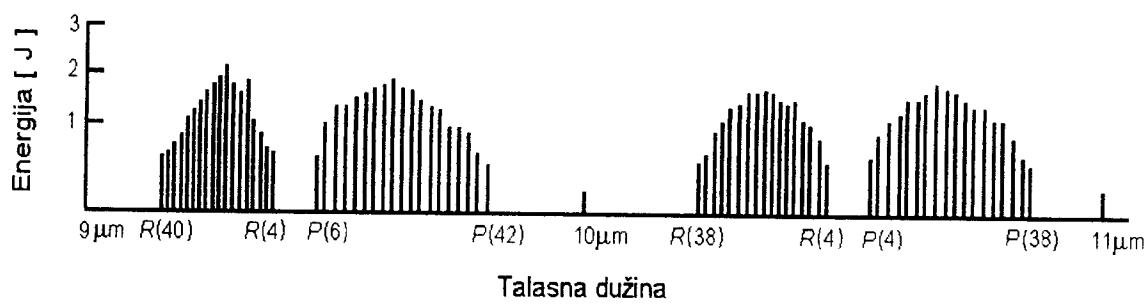




Sl. 3.9. Šematski prikaz dobijanja inverzne naseljenosti nivoa  $\text{CO}_2$

### 3.4.1. Izlazni spektar $\text{CO}_2$ lasera

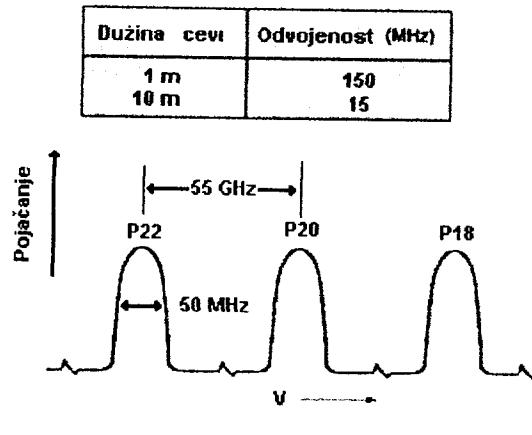
Poznato je da su laseri izvori monohromatskog zračenja, ali to nije u potpunosti korektno. Čak iako postoji samo jedan prelaz, tako dobijena linija ima, iako veoma usku, konačnu raspodelu intenziteta po talasnim dužinama. Talasna dužina  $\text{CO}_2$  lasera najčešće je data kao 10, 10.6 ili  $9.6\mu\text{m}$ . Aktuelni spektar je, međutim, kompleksan skup rotacionih prelaza stavljenih na  $9.6$  i  $10.6\mu\text{m}$  vibracione prelaze. Molekuli mogu gubiti i dobijati energiju, tako da rotacione sublinije mogu imati i nižu i višu energiju od glavnog vibracionog prelaza. Izlazni spektar TEA  $\text{CO}_2$  lasera dat je na sl. 3.10.



Sl. 3.10. Izlazni spektar TEA  $\text{CO}_2$  lasera

Izlazni spektar CO<sub>2</sub> je određen tačnim razdvajanjem ogledala. Kada je pražnjenje u toku medijum odašilje pojačanje dato jednačinom:  $gain = \exp(\alpha L)$ , gde je  $\alpha$  funkcija od frekvencije, dok je  $L$  razdaljina ogledala.

Kriva pojačanja je u serijama pikova 50 MHz širine, gde svaka linija odgovara jednom J rotacionom nivou 001 vibracionog stanja sa većom gustinom od J+1 nivoa na 100 stanju. Talasna dužina ovih linija je određena CO<sub>2</sub> molekulom i razdvajanja su u proseku 55 GHz (sl. 3.11). Širina linija je određena uglavnom termalnim širenjem, a manje čeonim sudarima.



Sl. 3.11. Kriva pojačanja izlaznog signala

Ukupna površina ispod svih P prelaza krivih pojačanja je proporcionalna gustini 001 i 100 vibracionih nivoa. Distribucija između P grana linija je određena efektivnom rotacionom temperaturom molekula. Pošto se lasersko zračenje usled rotacione strukture vibracionih nivoa vrši pri mnogim prelazima, izbor određene talasne dužine omogućava se korišćenjem selektivnog rezonatora. Ukoliko se u njegovoj ulozi koristi optička rešetka, njenim zakretanjem moguće je izbor različitih talasnih dužina, pa imamo lasere sa promenljivom talasnom dužinom izlaznog snopa.

### 3.5. TIPOVI CO<sub>2</sub> LASERA

U ovom odeljku upoznaćemo se sa najosnovnijim tipovima CO<sub>2</sub> lasera, koji se međusobno razlikuju i po konstrukciji i po izlaznoj moći.

#### 3.5.1. Protočni gasni laseri

Ovo je bio jedan od prvih tipova CO<sub>2</sub> lasera. Najjednostavnije su konstrukcije i danas spadaju u najjače lasere.

Cev nije zapečaćena i zahteva aktivni pumpni sistem kao i gasne rezerve za rad. Kontrola izlazne snage kod protočnih lasera je urađena pomoću kontrole napona, pražnjenja i protoka gasa. Ako se povećava napon pražnjenja mora se povećavati i protok gasa i obrnuto. Za kontrolu napona se koriste obični varijaci (mogu biti ručni ili motorni), dok se za kontrolu protoka koriste kontrolni ventili.

#### 3.5.2. Laseri sa uzdužnim gasnim kretanjem (Longitudinal -Flow)

Mešavina gase se upumpava u jedan kraj cevi, a ispumpava u drugom kraju cevi, tako da se gas kroz nju kreće uzdužno. Ovo omogućava da svež gas menja "istrošeni" tj. disosovani gas. Izlazna snaga ovih gasnih lasera je 40-80 W/m gasne cevi. (širina gasne cevi ima

zanemarljive uticaje na izlaznu snagu). Kod ovih lasera se često koriste i savijeni optički sistemi da se redukuje fizička dužina cevi.

### 3.5.3. Laseri sa poprečnim gasnim kretanjem (Transverse- Flow)

Ako se gas kroz gasnu cev kreće normalno u odnosu na lasersku šupljinu, tj. Liniju između ogledala onda se može ostvariti mnogo veća izlazna snaga laserskog snopa (100W/m cevi). Ovakav sistem gasnog kretanja omogućuje brže kretanje gasa, a samim tim i brže "čišćenje" gasa od disosovanih molekula, pa otuda i veća snaga. Važno je napomenuti da se i pražnjenje tj pumpanje gasa može vršiti takodje poprečno, sa nekoliko parova elektroda duž cevi.

### 3.5.4. Zatvoreni gasni CO<sub>2</sub> laseri

Prednost ovih gasnih sistema u odnosu na druge jeste u tome sto se za rad lasera ne moraju imati gasne rezerve. Međutim, jednostavnim zatvaranjem protočnog gasnog sistema i korišćenjem CO<sub>2</sub> gasne smeše ne može se očekivati da takav sistem radi duže od par minuta. Glavni problem je što pražnjenjem kroz gas CO<sub>2</sub> molekul disosuje na CO i O<sub>2</sub> molekul, što u velikoj meri negativno utiče na stimulisanu emisiju. Neka od mnogih praktičnih rešenja sto se ovog problema tiče jesu dodavanja gasova H<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O (u obliku pare), ili korišćenjem katoda sa većom temperaturom od 300 °C koji bi uticali na bržu regeneraciju gasa. Važno je napomenuti da kod ovih sistema postoji tzv. startni napon tj napon koji bi pokrenuo pražnjenje kroz gas i on je 3-5 puta veći od radnog napona. U zavisnosti od snaga koju mogu da proizvedu, variraju i napajanja i struje kroz gasnu cev. Tipične vrednosti su reda veličine kV i mA. Tačne specifikacije se mogu lako dobiti od proizvođača, a i ove gasne cevi lako su dostupne na otvorenom tržištu. Snaga koju mogu oslobođati iznosi do 50W/m cevi, a stepen korisnog dejstva ovog tipa CO<sub>2</sub> lasera iznosi između 5 – 8 %.

### 3.5.5. TEA CO<sub>2</sub> laseri

Naziv potiče od Transferse Excited Atmospheric (TEA) lasers, što znači poprečno pobuđivani atmosferski laseri. Jedan veliki problem kod gasnih lasera sa uzdužnim električnim pražnjenjem je što pritisak gase u cevi mora da bude daleko ispod 133 mbar. Međutim, kod ovih lasera, moguće je postići pražnjenja pri mnogo višim pritiscima (atmosferskim i višim ) primenom poprečnog električnog pražnjenja. Umesto dve elektrode, na početku i kraju cevi, ubaćeno je nekoliko parova elektroda duž cevi. Na ovaj način pražnjenje u gasu ne mora da prelazi dužinu već samo širinu gasne cevi, čime se i omogućava pražnjenje pri tako visokim pritiscima. Sa druge strane ovi laseri ne mogu da rade u kontinualnom režimu, jer su kontinualna pražnjenja nestabilna na pritiscima iznad 1/10 atmosferskog.

### 3.5.6. Gasno-dinamički CO<sub>2</sub> laseri

Ovi laseri koriste princip rada raketnog pogona za eksitaciju. Raketno gorivo (u ovom slučaju azot i CO<sub>2</sub>) se zapale kako bi stvarali voma veliku brzinu, pritisak i visoku temperaturu struje gasova. Kako se izduvni gasovi šire kroz ventil, temperatura gase opada vrlo rapidno. Niži energijski nivoi se brzo i selektivno prazne, potpomognuti hemikalijama u tragovima (one se i dodaju u komoru za sagorevanje isključivo zbog toga), dok viši nivoi, koji su naseljeni

zbog visoke temperature gase u komori ostaju naseljeni. Na ovaj način postižemo inverznu naseljenost i posle vremenskog perioda koji odgovara vremenu relaksacije viših energetskih stanja, počinje stimulisana emisija.

Ovi tipovi lasera su bili prekretnica u visoko-energetskim laserima, njima je prvi put dostignuta snaga snopa preko 100kW. Teško ih je kontrolisati, veoma su složeni, a i skupi.

### 3.6. PRIMENA CO<sub>2</sub> LASERA

U svetu u kom živimo laser je jedna neizbežna stvar. Primene lasera zavise od veličine, snage ili stepena iskorišćenosti. Tamo gde je potrebna velika kolimacija svetlosnog snopa, određene talasne dužine laser neće naći konkurenta. Međutim konkurenca vlada među njima samima, jer ima veoma mnogo tipova i vrsta lasera. Kako se tehnologija razvija neki tipovi lasera bivaju zamenjeni nekim drugim. Gasni laseri polako, ali sigurno bivaju zamenjivani nekim novim vrstama kao što su poluprovodnički laseri koji su kompaktniji, manji i jaftiniji, ali CO<sub>2</sub> laser neće još dugo biti izbačen iz igre. Ono što ga izdvaja jeste snaga koju može da razvije. U odnosu na druge tipove gasnih lasera, kao što je HeNe laser čija se srednja snaga meri u mW, vrednost snaga CO<sub>2</sub> lasera su u W ili kW. Još jedna prednost je stepen iskorišćenosti ili stepen korisnog dejstva koji u proseku iznosi od 5-20 procenata (do 30 % što je i max. ) dok je kod He–Ne 0. 1 %.

CO<sub>2</sub> laser primenu nalazi u medicini, industriji, vojsci, nauci. Primenu CO<sub>2</sub> lasera u medicini omogućuje to što je njegova izračena svetlost (10.6 μm) veoma dobro apsorbovana (oko 95% ) od organskih tkiva. Ovo takođe omogućava da samo gornji tj. epitelni sloj bude uništen (jer je apsorpcija veoma velika ) dok drugi delovi kože budu dobro očuvani, što ovaj laser čini idealnim za razne vrste operacija. Voda takođe dobro apsorbuje energiju ove talasne dužine (inače je za ostale transparentne) pa praktično nema krvarenja kod ovih operacija, tj. krv se brzo koaguliše. Još jedna dobra stvar ovog lasera je da se može visoko fokusirati bez obzira na veličinu i snagu ( laser snage 1 kW se može fokusirati u tačku od samo 100 μm u prečniku ).

Druga primena ovih lasera je u industriji za sečenje raznih vrsta materijala. Iako je vrednost apsorpcije energije mala za ove talasne dužine kod metala, zbog svoje velike snage ovi laseri su nezamenljivi u sečenju, topljenju itd.

Još jedna aplikacija CO<sub>2</sub> lasera, mada ne u tako širokim razmerama, jeste u naučnim istraživanjima nuklearne fuzije. Da bi nuklearna fuzija uopšte bila pokrenuta, potrebne su veoma velike količine energije, gde CO<sub>2</sub> laseri igraju nezamenljivu ulogu. Najjači CO<sub>2</sub> laser koji je do sada proizведен nalazi se na oko 120 km od Moskve u Troisku (Institut za termonuklearna istraživanja ), a njegova snaga iznosi oko 10MW.

Primena CO<sub>2</sub> lasera koju ćemo razmatrati u tekstu koji sledi je u zaštiti životne sredine, tačnije u merenjima zagađenja vazduha, vode i zemljišta.

## 4. LIDAR

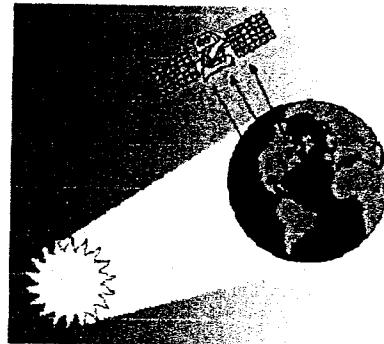
Merenja nivoa zagađenja naše okoline vrše se različitim tehnikama. Rezultati tih merenja ne utiču direktno na poboljšanje uslova sredine, već daju podstrek za razvoj odgovarajućih programa za zaštitu čovekove okoline. Merenja se vrše na lokalnom, regionalnom, a takođe i na globalnom nivou.

Optička spektroskopija bazirana na specifičnim apsorpcionim veličinama različitih gasova pruža osetljiva i selektivna merenja atmosferskih konstituenata. Prilagodljiva je različitim daljinskim merenjima različih zapremina atmosfere. Daljinska spektroskopska merenja mogu biti pasivna (sl. 4.1), kada koriste prirodne izvore zračenja kao što je sunce, ili aktivna (sl. 4.2), kada koriste veštačke izvore zračenja kao što je laser (Svanberg, 1994)

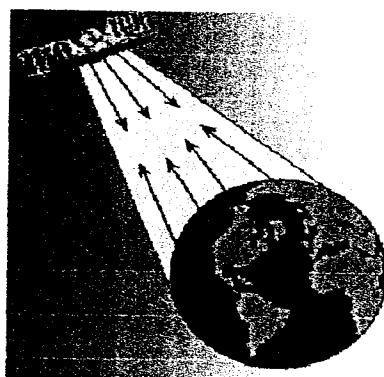
**LIDAR** (Light Detection And Ranging) ili ladar (**LAser Detection And Ranging**) obezbeđuje aktivno optičko daljinsko merenje bazirano na rasejanju. Kao izvor zračenja koristi se laserski transmiter. Prednost laserskog daljinskog merenja je mogućnost istraživanja regiona nedostupnih drugim metodama, brzo snimanje velikih površina ili zapremina, aktivno merenje, velika selektivnost i osetljivost. Lidar služi za detekciju zagađenja vazduha, tla i vode, za merenje temperature i brzine vetra. Ako talasna dužina lasera varira od apsorpcione linije gasnog polutanta do njegove bliske talasne dužine, detektovane promene u intenzitetu rasejane svetlosti mogu se koristiti za procenu koncentracije tog polutanta. Ovo je diferencijalna apsorpciona verzija lidarskog metoda. Diferencijalna apsorpcija koristi se kod **DIAL-a** (**Differential Absorption Lidar**) (Svanberg, 1994).

Zemljina atmosfera bila je prva glavna meta istraživanja laserskog daljinskog merenja. Prvo je korišćen impulsni rubinski laser za merenje raspodele gustine aerosoli u stratosferi (Fiocco et al, 1963). 1966. rubinski lidar je korišćen za merenje profila vodene pare (Schotland). Merenja sa DIALom (**Differential Absorption Lidar**) počinju 1974. kada je određivana koncentracije NO<sub>2</sub> (Rothe et al., 1974), a 1975. merene su koncentracije SO<sub>2</sub> i O<sub>3</sub> (Grant et al, 1975). Ovaj DIAL bio je baziran na dye laseru. Prvi lidar koji koristi zračenje CO<sub>2</sub> lasera upotrebljen je 1976. za merenje vodene pare (Murray et al., 1976).

LIDAR-i već dugi niz godina rade na rešavanju specifičnih i veoma različitih zadataka. Broj primena nije ograničen, i dalje raste zahvaljujući pronalascima novih rešenja i povećanjem tačnosti merenja. Pored praktičnih zadataka postoji i niz problema teorijskog tipa koji se rešavaju metodom lidara. Komplikovanost obrade signala povećava mogućnosti dobijanja podataka o stanju fizičke veličine koja je predstavljena dobijenim signalom. Savremene korelacije i merenja metodama elektronskih razdvajanja pružaju mogućnost za



Sl. 4.1. Pasivno daljinsko merenje

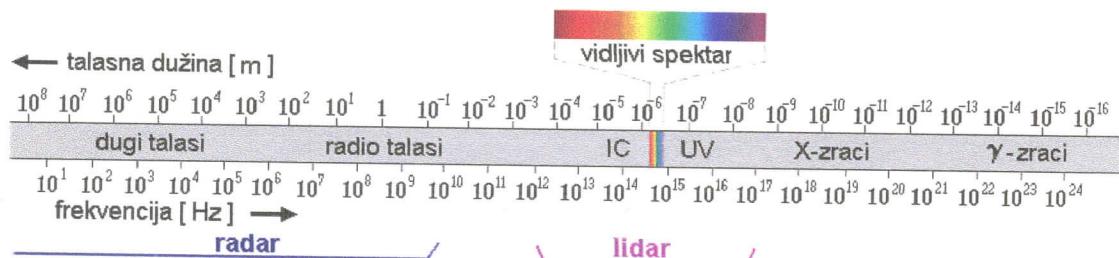


Sl. 4.2. Aktivno daljinsko merenje

mnogo saznanja, ali i zahtevaju strogo savremena tehnička i teoretska rešenja (Srećković et al., 2004).

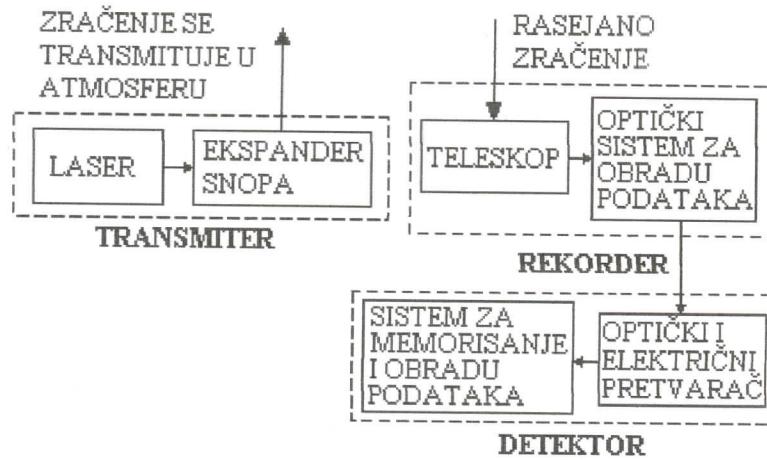
#### 4.1. PRINCIP RADA LIDARA

Lidar je sličan mnogo poznatijem radaru, samo što radi na višim frekvencijama, ultravioletnoj (UV), vidljivoj i infracrvenoj (IC) oblasti elektromagnetskog spektra (sl. 4.3).



Slika 4.3. Oblast primene radara i lidara u elektromagnetskom spektru

Pri prolasku monohromatskog zračenja, koga emituje transmiter, kroz atmosferu, dolazi do njegovog rasejanja na molekulima i česticama koje se nalaze u atmosferi. Rasejano zračenje sakuplja se teleskopom, smeštenim u blizini transmitera, i detektuje se odgovarajućim optoelektronskim detektorom (fotomultiplikator, foto-dioda...). Jednostavan blok dijagram lidara sadrži predajnik, prijemnik i detektorski sistem (Sl. 4.4). Lidarski predajnik je laser, dok je njegov prijemnik optički teleskop.



Sl.4.4. Blok dijagram lidara

Snaga rasejanog zračenja opisuje se lidarskom jednačinom. U najjednostavnijem obliku ona je data sa:

$$P(R) = CR^{-2} \beta(R) \exp\left(-2 \int_0^R a(r) dr\right),$$

gde je  $P(R)$  snaga na rastojanju  $R$ ,  $C$  je konstanta instrumenta,  $\beta(R)$  koeficijent rasejanja na rastojanju  $R$ , a  $a(r)$  je ekcitacioni koeficijent. Kako ovaj niz jednačina (za svako  $R$ ) sadrži dva

seta nepoznatih ( $\beta(R)$  i  $a(r)$ ), a samo jednu merenu veličinu  $P(R)$ , ne postoji jedinstveno rešenje za sve atmosferske parametre. Za rešavanje ovog problema koriste se različite metode. Najčešće se polazi od pretpostavljene relacije između tipa rasejavača aerosola i ekstincije. Ovo se može uraditi samo za one oblasti spektra, gde nema apsorpcije razmatranih gasnih konstituenata.

Za identifikaciju molekula talasna dužina povratne svetlosti je bitna, dok je za njihovu koncentraciju značajan je inenzitet povratnog signala. Kao primer može da posluži sledeća lidarska jednačina za opis intenziteta povratnog signala  $P(\lambda, R)$  elastičnih rasejanja (Sigrist, 1994)

$$P(\lambda, R) = CWn_b(R)\sigma_b \frac{\Delta R}{R} \exp\left(-2 \int_0^R [\sigma(\lambda)N(r) + K_{ext}(r)] dr\right),$$

gde je  $C$  konstanta sistema,  $W$  transmitovana impulsna energija,  $n_b$  brojna gustina objekata čiji je koeficijent rasejanja  $\sigma_b$ . Eksponencijalni faktor opisuje slabljenje laserskog zraka i povratnog zračenja usled prisustva apsorpcionih molekula koncentracije  $N$  i efikasnog preseka apsorpcije  $\sigma(\lambda)$  i usled rasejanja čestica sa ekstinkcijom  $K_{ext}(r)$  zavisnom od talasne dužine. Ni ova jednačina se ne može rešiti bez dodatnih prepostavki ili podataka.

Pri lidarskim osmatranjima postoji niz lažnih signala koji maskiraju merenja i otežavaju egzaktnu interpretaciju. Zato se nalaze nova rešenja za povećanje odnosa signal/šum kako bi se izbegli ovi problemi.

#### 4.1.1. Laseri u lidarskim sistemima

U zavisnosti od snage i talasne dužine koja se traži za atmosferska ispitivanja, koriste se različiti tipovi lasera (tab. 4.1) (Sica, 1999). Tipični parametri CO<sub>2</sub> lasera za lidar sisteme su: spektralna oblast od 9μm do 11μm, energija impulsa od 0.1J do 10J, širina laserskog impulsa od 100ns do 1000ns, površina prijemnika od 0.02m<sup>2</sup> do 0.2m<sup>2</sup>.

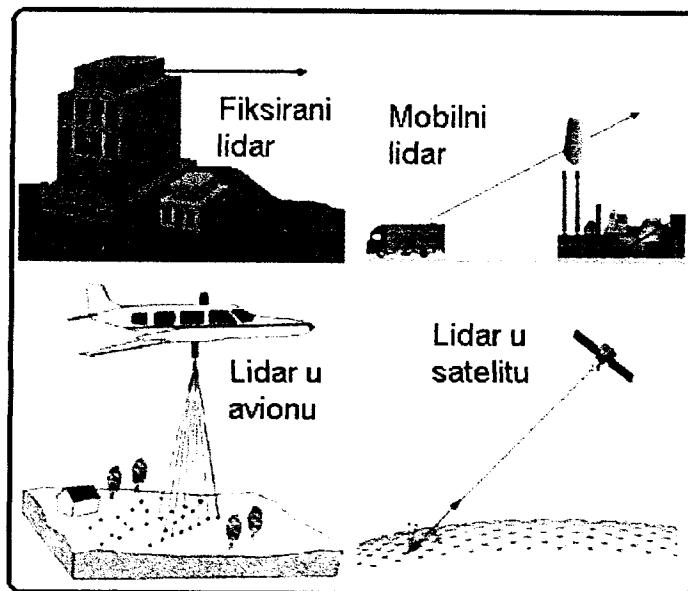
Tabela 4.1. Glavni laserski izvori koji se koriste za atmosferske studije

Tip lasera	Talasna dužina	Energija po impulsu
Rubinski	0.694 μm	2-3 J na 0.5 Hz
Nd:YAG	1.06 μm	1 J na 10 Hz a 0 ns ipmuls
CO <sub>2</sub>	9-11 μm multilinija	1-10 J na 1-50 Hz
CO <sub>2</sub>	podešljiv	0.1 J na 10 Hz
CO	5-6.5 μm	Nije mnogo popularan za impulsne operacije
Dye laseri, pumpani fleš lampom	0.35-6.5 μm	0.1 do 20 J

U interakciji laserskog zračenja sa konstituentima atmosfere dolazi do različitih tipova rasejanja, kao što je Rejlijevo (Rayleigh) rasejanje, Mie rasejanje, Ramanovo rasejanje,... U zavisnosti od tipa rasejanja razvijeni su različiti lidarski sistemi. Oni se koriste u različite svrhe, a neke od primena prikazane su u tabeli 4.2. Svaki od ovih sistema može biti smešten na površini Zemlje (fiksni ili mobilni), mogu se nalaziti i u avionima, kao i u satelitima (sl. 4.6). U tekstu koji sledi dat je kratak pregled nekih od primena lasera

Tabela 4.2. Lidarske tehnike i njihova primena

Tehnike	Efikasni presek [cm <sup>2</sup> ]	Primena
Rejlijevo rasejanje	$10^{-25} - 10^{-24}$	Gustina molekula vazduha, temperatura
Mie rasejanje	$10^{-6} - 10^{-5}$	Oblaci, smog, magla, aerosoli
Rezonantno rasejanje	$10^{-8} - 10^{-6}$	Vrste u tragovima
Fluorescencija	$10^{-14} - 10^{-12}$	Vrste u tragovima (Na, K, Li, OH)
Diferencijalna apsorpcija	$10^{-25} - 10^{-14}$	Vrste u tragovima (O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO...)
Ramanovo rasejanje	$10^{-25} - 10^{-24}$	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>



Sl. 4.6. Različite platforme za lidarske sisteme: fiksirani lidar, mobilni lidar, lidar u avionu, lidar u satelitu

## 4.2. LIDARSKI SISTEMI

### 4.2.1. Topografski lidar

Laserski impuls se transmiteme u atmosferu i povratno rasejano zračenje se detektuje kao funkcija vremena optičkim prijemnikom. Ako se reflektujuće ogledalo ili topografska meta (zid, biljke, planina) nalaze na rastojanju  $R$  od lidarskog sistema, eho signal će stići do prijemnika za vreme  $t = 2R/c$ . Intenzitet eho signala  $P(\lambda)$  zavisi od mnogo faktora kao što su energija impulsnog lasera, rastojanje, površina teleskopa, difuzna reflektansa mete i efikasni presek apsorpcije atmosfere. Ako se samo efikasni presek apsorpcije polutanata,  $\sigma$ , menja sa promenom talasne dužine lasera od  $\lambda_{on}$  (aps. linija) do  $\lambda_{off}$  (nije aps. linija) i interferencije gasova, Beer-Lambert-ov zakon daje:

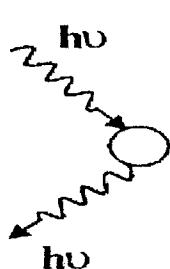
$$\frac{P(\lambda_{on})}{P(\lambda_{off})} = \exp[-2RN(\sigma_{on} - \sigma_{off})],$$

gde je  $[\sigma_{on} - \sigma_{off}]$  diferencijalni efikasni presek apsorpcije,  $N$  koncentracija gasa (Svanberg, 1994).

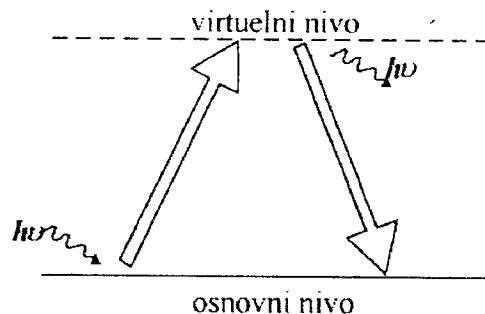
Merenja se mogu vršiti u IC regionu, oko  $10\mu\text{m}$ , gde operiše  $\text{CO}_2$  laser (Shumate et al., 1982; Grant, 1982; Englisch et al., 1983) usled oštine molekularno vibracionog spektra čak i u čvrstim telima ili tečnostima. Ovo se može koristiti za daljinsku karakterizaciju mete.

### 4.2.2. Mie lidar i Rejljev lidar

Mie rasejanje od čestica (sl. 4.7) i Rejljevo rasejanje od molekula (sl. 4.8) obezbeđuju jake signale pri lidarskom sondiranju slobodne atmosfere. Ovi procesi rasejanja su elastični, tj. rasejeni fotonii imaju istu frekvenciju kao inicijalni fotonii.



Sl. 4.7. Mie rasejanje



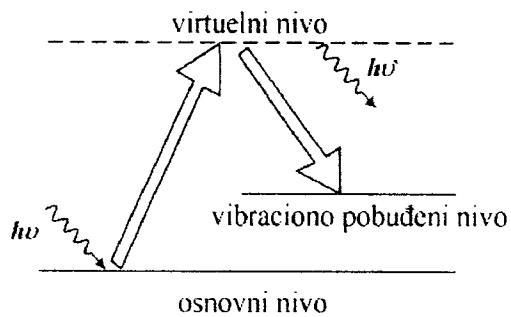
Sl. 4.8. Rejljevo rasejanje

Rejljevo rasejanje ima jaku  $1/\lambda^4$  zavisnost od talasne dužine i može dati dominantan signal na kratkim UV talasnim dužinama. Uglavnom se koristi za stratosferska merenja. Intenzitet Rejljevog rasejanog zračenja proporcionalan je gustini atmosfere, a temperatura je povezana sa gustinom. Tako, merenjima intenziteta profila Rejljevog povratnog rasejanja, možemo odrediti temperaturu. Mie rasejanje ima sporiju zavisnost od talasne dužine ( $\approx 1/\lambda^2$ ) i dominira u ispitivanju vazduha bogatog česticama u vidljivom i bliskom IC delu spektra. Mie

rasejanje se uglavnom koristi za troposferska merenja, ali može se koristi i za studiranje stratosferske prašine iz vulkanskih erupcija (McCormick, 1982; McCormick et al., 1984; Osborn et al., 1992).

#### 4.2.3. Ramanov lidar

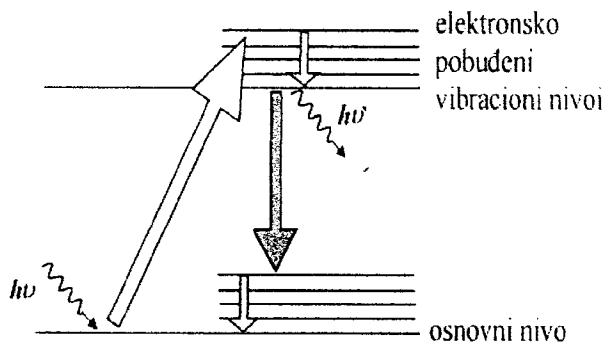
Ramanovo rasejanje (sl. 4.9) je neelastično rasejanje od molekula vazduha. Povratni signal je veće talasne dužine od inicijalnog. Ovaj efekat promene talasne dužine nastaje usled interakcije zračenja sa kvantovanim vibracionim i rotacionim energetskim nivoima molekula. Spektralno pomeranje za vibraciono rotaciono rasejanje je nekoliko stotina do nekoliko hiljada talasnih brojeva. Kada je rasejanje prćeno promenom rotacionih stanja, intenzitet rasejanja je veći, ali spektralno širenje je dosta manje. Ramanovo rasejanje od svakog tipa molekula ima jedinstvenu spektralnu signaturu vezanu za vibracione i rotacione energetske nivoe ovih molekula. (Argall) Ramanovo rasejanje je  $10^3$  puta slabije od Rejljevog rasejanja od istih molekula, pa se koristi za merenja velikih koncentracija atmosferskih konstituenata ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) na rastojanjima manjim od 1km (Svanberg, 1994). Može se koristiti i za merenje temperature.



Sl. 4.9. Ramanovo rasejanje

#### 4.2.4. Fluorescentni lidar

Foton odgovarajuće energije prebacuje elektron u više elektronsko stanje. Unutar pobuđenog elektronskog stanja elektron može zauzeti bilo koje vibraciono stanje. Deo energije se gubi u neradijacionim procesima pri kojim elektron dospeva u najniže pobuđeno vibraciono stanje, a zatim radijacionim procesom elektron prelazi u osnovno stanje (sl. 4.10). Fluorescencija indukovana laserskim zračenjem koristi se za detekciju stresa kod kopnenih i morskih biljaka, ali i za detekciju  $Na$ ,  $K$ ,  $Li$ ,  $OH$  itd. Kod ovih lidara retko se koristi  $CO_2$  laser (Terzić, 2004)



Sl. 4.10. Fluorescencija

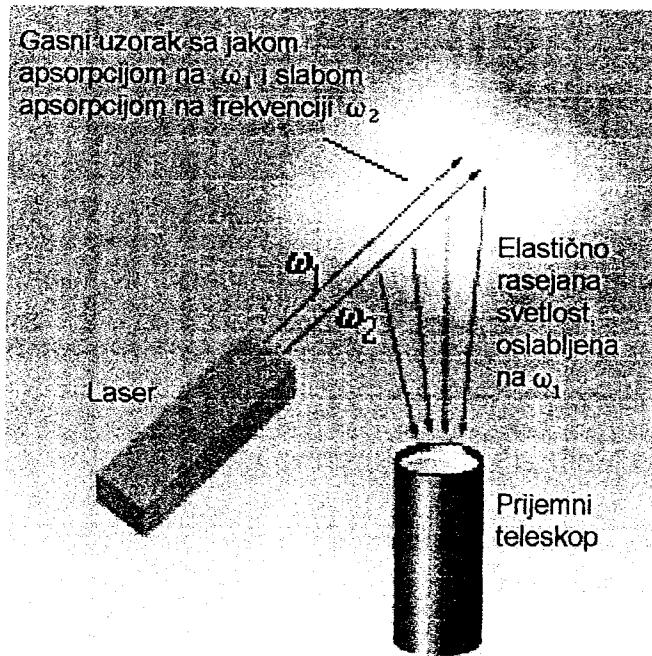
## 5. DIAL (Differential Absorption Lidar).

Diferencijalna atenuacija dva laserska zraka procenjuje se iz različitih povratno rasejanih signala. Frekvencija jednog zraka odgovara datom molekulskom prelazu, a frekvencija drugog zraka je nešto pomerena. Koristi se za merenje O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO. Detaljnije o ovoj tehnici u delu koji sledi (Measures, 1984., 1988)

### 5.1. PRINCIP RADA DIAL-A

**DIAL (Differential Absorption Lidar)** meri koncentraciju gasova u atmosferi. Baziran je na činjenici da je apsorpcija svetlosti u atmosferi različita na različitim talasnim dužinama. Laser naizmenično emituje svetlost one talasne dužine,  $\lambda_1$ , (frekvencije  $\omega_1$ ) koju gas dobro apsorbuje

i one talasne dužine,  $\lambda_2$ , (frekvencije  $\omega_2$ ), koja je bliska prvoj, a koju gas slabo apsorbuje. Svetlost talasne dužine  $\lambda_1$  (rezonantna talasna dužina) biva oslabljena pri prolasku kroz gasni uzorak, a svetlost talasne dužine  $\lambda_2$  (nerezonantna talasna dužina) ne. Šematski prikaz karakterističnog DIAL-a prikazan je na slici 5.1. Ako je koncentracija čestica mala, nerezonantni signal ( $\lambda_2$ ) će pokazati slabu  $1/R^2$  zavisnost. Razlike između dve krive (sl. 4.12) najbolje se predstavljaju ako ih podelimo na iste opseg intervale. Za identične krive, pri maloj razlici talasnih dužina, dobija se ista vrednost odnosa za sve ranges. Rezultujuća kriva se naziva DIAL kriva. Iz DIAL krive jasno je da se gasna koncentracija kao funkcija rastojanja može izračunati upotreboom Beer-Lambertovog zakona i



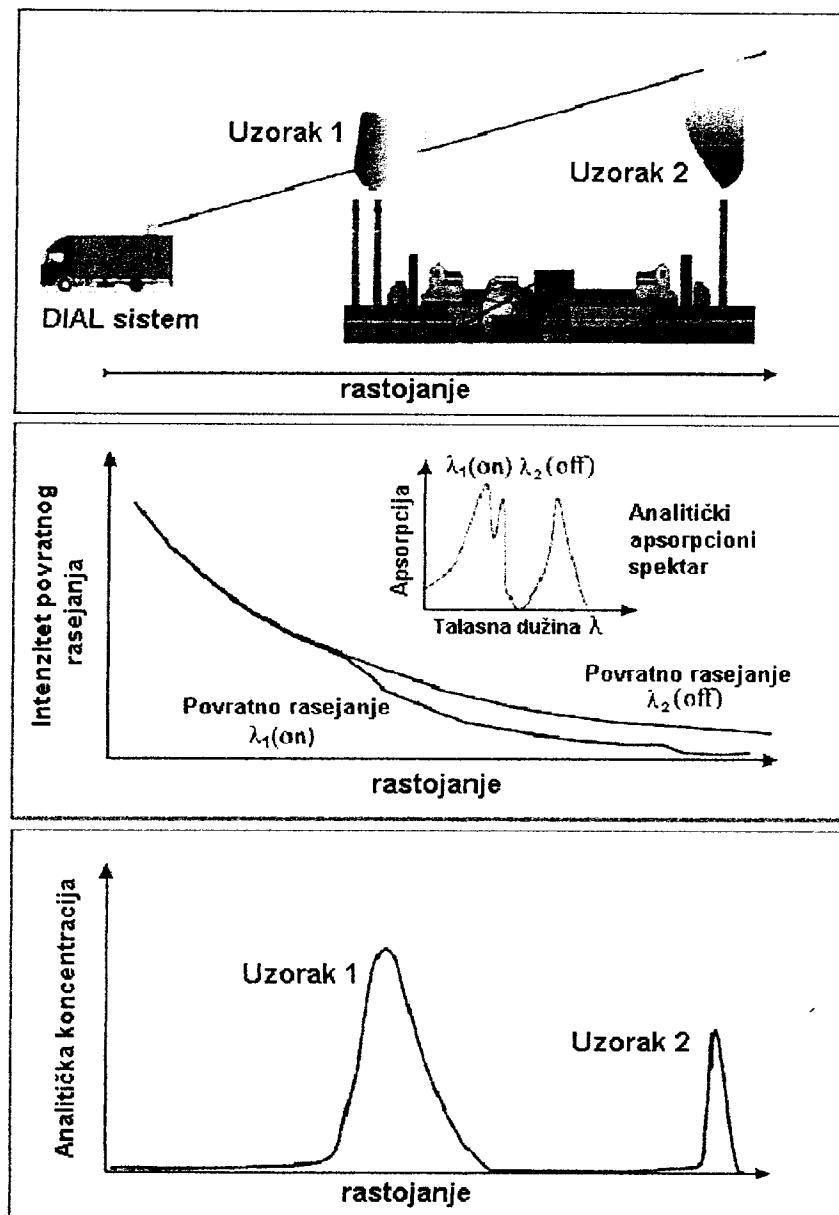
Sl. 5.1. Šema karakterističnog DIAL-a

korišćenjem diferencijalnih efikasnih preseka apsorpcije gasa. Princip rada DIAL-a prikazan je na sl. 5.2. Matematički, DIAL kriva se dobija formiranjem lidarske jednačine za rezonantnu talasnu dužinu, a potom za nerezonantnu talasnu dužinu. Onda se dve jednačine podele jedna drugom i daju:

$$\frac{P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_2, R)} = \exp \left[ -2(\sigma_1 - \sigma_2) \int_0^R N(r) dr \right],$$

gde su  $P(\lambda_1, R)$  i  $P(\lambda_2, R)$  intenziteti povratnih signala pri dobroj i lošoj apsorpciji respektivno,  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  efikasni preseci apsorpcije,  $N(r)$  koncentracija apsorbujуćih molekula. Iz ovog odnosa

mogu se odrediti koncentracije atmosferskih gasova: ozona, metana, ugljen-dioksida, ugljen-monoksida itd., u funkciji rastojanja (Svanberg, 1994)



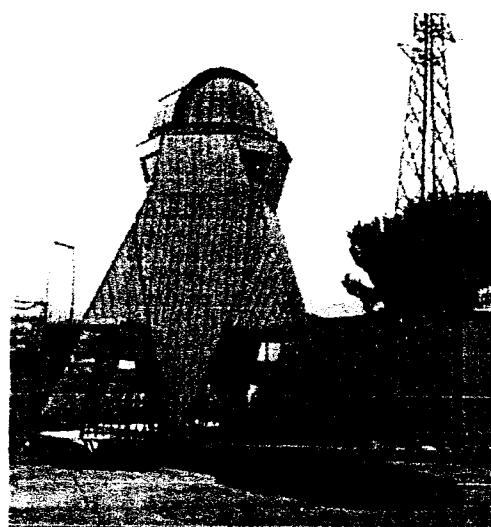
Sl. 5.2. Princip rada DIAL-a

U DIAL sistemima koriste se različiti tipovi lasera, najčešće Nd:YAG laser, excimer laser, dye laser, titanium-safir, CO<sub>2</sub> laser i diodni laser. Pri izboru lasera za DIAL merenja jedne ili više molekulskih vrsta uzimaju se u obzir sledeći faktori: spektralni region gde gas apsorbuje sa dovoljnom snagom da se može meriti na većoj udaljenosti, prostorna rezolucija, transmisione i rasejavajuće veličine atmosfere, tunability, energija i dužina impulsa tog lasera, veličina i cena sistema DIAL merenja u spektralnom regionu 9μm-11μm sprovode se korišćenjem CO<sub>2</sub> lasera, a upotreboom izotopa <sup>12</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub>, <sup>13</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub>, i <sup>14</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub> dobijaju se talasne dužine do 12μm (Solarz, 1987).

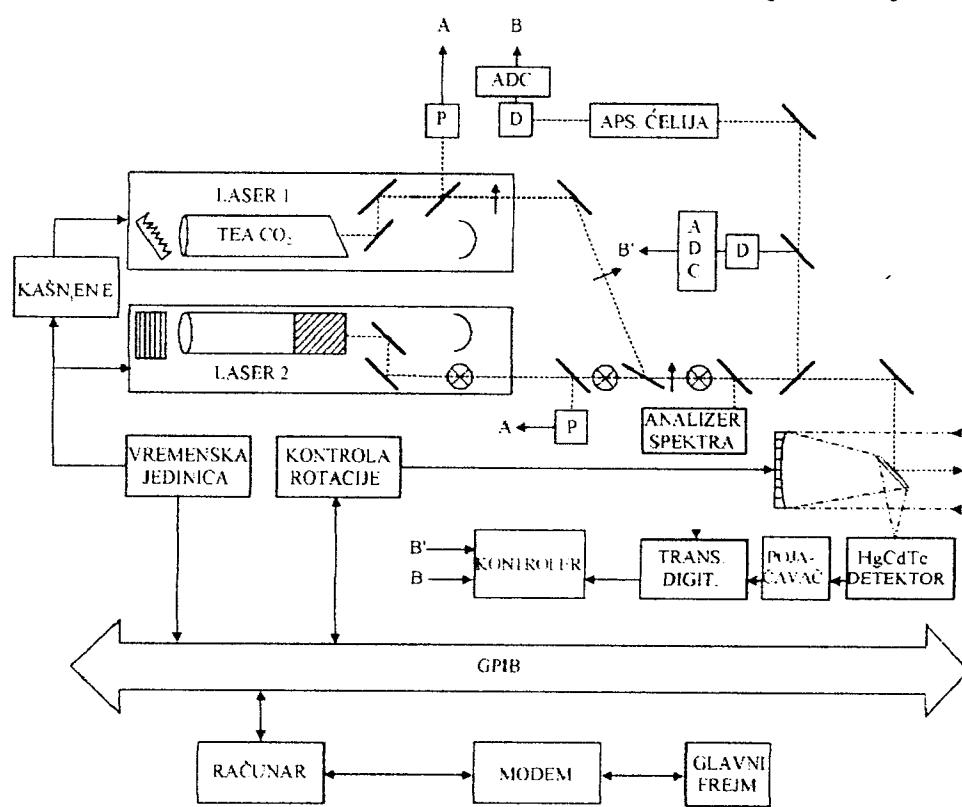
## 5.2. PRIMENA LIDARSKIH SISTEMA

$\text{CO}_2$  lidarski i DIAL-ski sistemi se koriste pri raznim merenjima atmosferskih polutanata. Ovi sistemi mogu biti smešteni na površini zemlje, fiksirani ili mobilni, u avionima i satelitima. Nepokretni sistemi su najjednostavnije konstrukcije. Npr., u laserskoj laboratoriji u IITM, India, vrše se studije na atmosferskim aerosolima i gasovima u trgovima korišćenjem lidara i radiometrijskih tehnika. Jedan od lidara pogodan za atmosferske studije je monostatički impulsni  $\text{CO}_2$  laser koji se koristi pri merenjima vertikalne distribucije koncentracije aerosoli.

U ENEA istraživačkom centru (Italija) nalazi se lidarska stanica koja ima ručno napravljen  $\text{CO}_2$  laser (sl. 5.3). Ovaj sistem je u upotrebi od 1991. godine i služi za nadgledanje atmosferskih zagađivača, distribuciju aerosoli, brzine veta i vazdušne temperature. Stalna poboljšanja povećavaju njegovu iskorišćenost i pouzdanost i obezbeđuju dizajnerske parametre za mobilne verzije (Garifo, 1994) Šematski dijagram ovog sistema prikazan je na slici 5.4.



Sl. 5.3. Lidarska stanica u ENEA istraživačkom centru

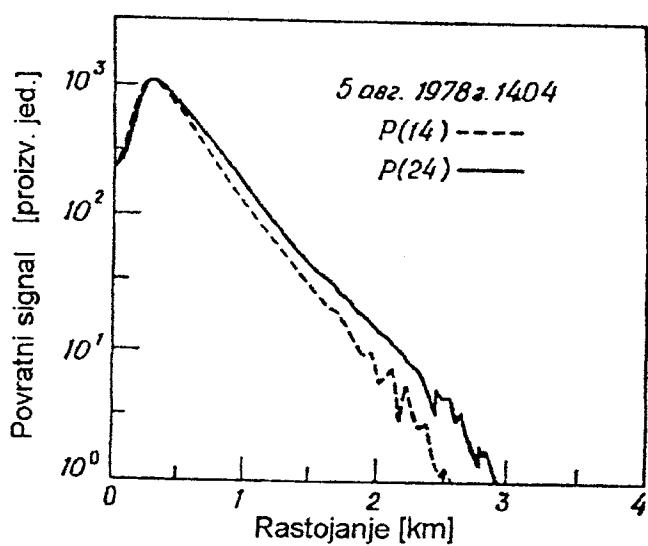


Sl. 5.4. Šematski dijagram nepokretnog lidarskog sistema baziranog na  $\text{CO}_2$  laseru (ENEA, Italija)

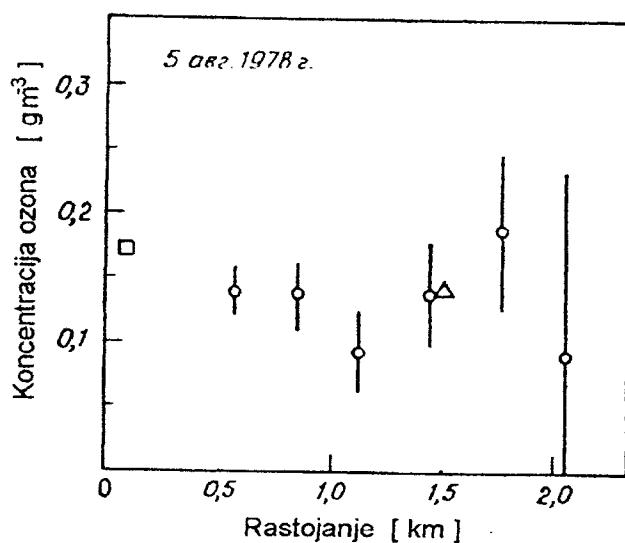
Koriste se dva impulsna CO<sub>2</sub> lasera koji generišu 80ns dug impuls sa energijom 4J i koji su podešeni za rezonantnu i nerezonantnu talasnu dužinu, respektivno. Laserski zraci se šalju duž rotacione ose teleskopa, koji je postavljen na vrhu 5m visokog tornja. Zračenje se detektuje HgCdTe detektorom hlađenim na 77K. Snimanja se vrše u radijusu od 5km (Svanberg, 1994)

Killinger i saradnici (Killinger et al., 1980) su merili koncentraciju atmosferskog CO korišćenjem diferencijalne apsorpcije *line-tunable frequency doubled* CO<sub>2</sub> lasera zračenja blizu 4.6μm. Svetlost je rasejavana od topografskih meta na rastojanju 2.5 km. Korišćenjem nekoliko meta na različitim rastojanjima, ali duž iste linije svetlosti, dobijena je lokalizacija

CO koncentracije iznad saobraćajnog puta. Daljinska merenja atmosferskog NO sprovode se korišćenjem diferencijalnog apsorpcionog impulsnog CO<sub>2</sub> laserskog zračenja rasejanog od topografskih meta. Povratni signal se dobija na rastojanju od 1.4 km i značajne koncentracije NO su dobijene merenjem iznad saobraćajnog puta na rastojanju od 0.5 km (Menyik et al., 1980).



Sl. 5.5. Povratni signali od atmosferskih aerosoli u funkciji od rastojanja



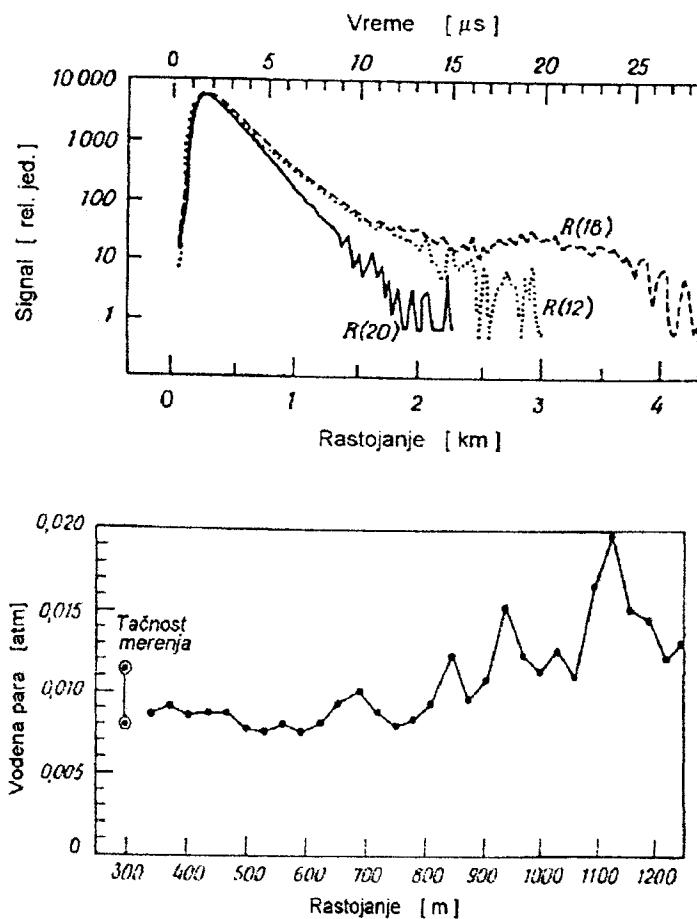
Sl. 5.6. Raspored koncentracije molekula ozona u zavisnosti od rastojanja, dobijen DIAL-om (kružnici), i sa dva in situ merenja, blizu lidara (kvadrat) i na rastojanju 1.5km od lidara (trougaao)

CO<sub>2</sub> DIAL sistem korišćen je za daljinsko merenje amonijaka u atmosferi. Za povratno rasejano zračenje od topografskih meta na rastojanjima do 2.7 km, osetljivost ovog DIAL sistema bila je 5 ppb amonijaka. Koncentracija atmosferskog amonijaka varirala je tokom dana od nedetektovanih nivoa (manje od 5 ppb) do 20 ppb, u tavisnosti od temperature i vlažnosti (Force et al., 1985).

Za detekciju polutanata na većim površinama koriste se DIAL sistemi u avionima. U izdanju Brockman-a i saradnika (Brockman et al., 1980) piše o primeni impulsnog podešljivog CO<sub>2</sub> DIAL sistema pri snimanju vertikalne distribucije ozona, vodene pare i amonijaka. Ovaj sistem zavisi od Mie rasejanja od aerosoli i primenljiv je za merenja u troposferi i nižoj stratosferi. Ima veliku važnost za merenja i sa zemlje i iz aviona (Brockman et al., 1980).

Veoma je bitno meriti regionalnu raspodelu koncentracije ozona za kratko vreme za razumevanje mehanizma kretanja foto-hemijskog smoga. DIAL sistem u avionu sa dva niskomoćna mini-TEA CO<sub>2</sub> lasera razvijen je za merenje trodimenzionalne distribucije ozona u nižoj troposferi. Ovaj CO<sub>2</sub> DIAL, dizajniran za merenje profla ozona između zemlje i aviona, koristi atmosferske aerosoli kao mete. Prvi test sa jednim laserom bio je obavljen u februaru 1985. iznad oblasti Tokija. Sistem je operisao na visini od 1500m. Rezultati prvog testa pokazuju da je visina profila prijemnog signala bila različita pri mernjima iznad zemlje i iznad okeana (Itabe et al., 1986). CO<sub>2</sub> laserski DIAL sistemi obično koriste 9P(14) liniju kao rezonantnu liniju i 9P(22) ili 9P(24) liniju kao nerezonantnu liniju za mernje ozona.

U svom eksperimentu, Asai i saradnici (Measures, 1984) su koristili P(14) i P(24) linije CO<sub>2</sub> lasera i dobili su povratne signale prikazane na slici 5.5. Iz tih signala dobijena je koncentracija ozona u zavisnosti od rastojanja (sl. 5.6.). Na toj slici prikazani su i rezultati još dva *in situ* merenja na rastojanju 1.5 km od lidara.



Sl. 5.7. Merenje vodene pare

saradnici (Measures, 1984) su primenili CO<sub>2</sub> DIAL za merenje sadržaja vodene pare u atmosferi u horizontalnom pravcu na rastojanju ~1km. Na slici 5.7. je prikazana difere-ncijalna apsorpcija na prelazima R(12), R(20) i R(18) CO<sub>2</sub> lasera. Odgovarajući profil koncentracije vodene pare, usrednjen po 100 parnim impulsima na linijama R(18) i R(20) dat je na istoj slici.

Za globalna snimanja koriste se DIAL sistemi u satelitima. Kod ovih sistema retko se koristi CO<sub>2</sub> laser (uglavnom se koristi Nd:YAG laser). U novijim istraživanjima CO<sub>2</sub> laser je većinom zamjenjen drugim tipovima lasera, najčešće Nd:YAG laserom. Izuzetak su merenja

brzine vetra bazirana na Doplerovom efektu. Pri ovim merenjima uglavnom se koristi CO<sub>2</sub> lidar.

DIAL tehnikom mogu se detektovati male koncentracije polutanata, reda ppbV, na velikim rastojanjima, mogu se meriti i meteorološki parametri kao što su temperatura, vlažnost vazduha i brzina vetra. DIAL pruža mogućnost za trodimenzionalnu kartografiju atmosferskih polutanata. DIAL-ska merenja su ograničena ili minimumom detektovane koncentracije ili greškama usled atmosferske turbulencije i samog sistema (ako je nepožljivo dizajniran ili kalibriran). DIAL sistemi operišu na otvorenom i neophodno je da merenja budu sprovedena na takav način da ne dovedu do oštećenja očiju ljudi koji su u okolini. Bezbedno korišćenje lasera regulisano je Američkim standardima, koji su usvojeni i u mnogo drugih zemalja.

## 6. FOTOAKUSTIČKA MERENJA

**Fotoakustična spektroskopija** se bazira na **fotoakustičnom efektu**, tj. pojavi fotoakustičnih talasa u nekoj sredini usled apsorpcije elektromagnetskog zračenja. Za talase generisane laserskim zračenjem koristi se i termin “**optoakustični efekat**”.

Apsorpcijom zračenja pobuđuju se atomi iz osnovnog na više energetske nivoe, a zatim se vraćaju u osnovno stanje putem radijacionih i neradijacionih prelaza. Neradijaciona komponenta generiše toplotu (sudarima se, u IC oblasti, vibaciono-rotaciona energija transformiše u translatororu energiju, tj. toplotu). Modulacijom intenziteta zračenja (uključenjem i isključenjem) kod kontinualnih izvora ili upotreboom impulsnih izvora prouzrokujemo periodičan porast i pad temperature. Te temperaturne varijacije, za gasni uzorak u zatvorenoj zapremini, praćene su varijacijama pritiska, što kreira zvučni talas. Za detekciju ovih talasa koriste se: mikrofoni, piezoelektrični pretvarači, laserske sonde, fiber optički senzori, tanki filmovi i dr. Izbor detektora zavisi od usaglašenosti impedance, osetljivosti, sredine gde se generišu i detektuju fotoakustični talasi, kao i od uslova eksperimenta. Amplituda pritiska, i signal mikrofona koji sledi, je proporcionalna broju apsorbujućih molekula (npr. koncentraciji gasova u tragovima) i apsorpcionoj snazi molekula na specifičnoj frekvenciji zračenja. Signal se može pojačati povećanjem moći lasera, korišćenjem akustičnih pojačala i upotreboom osetljivijih mikrofona.

Fotoakustična spektroskopija (FAS) je metoda dobijanja **fotoakustičnog spektra** promenom talasne dužine upadnog zračenja. Ova metoda je ušla u široku upotrebu primenom lasera u njenoj realizaciji. Koristi se za ispitivanje uzorka tečnog, gasovitog i čvrstog agregatnog stanja. Uloga u ispitivanju polutanata u ovim uzorcima bice razmatrana u daljem tekstu.

Laseri se koriste u fotoakustičnoj spektroskopiji i drugim spektroskopskim metodama zbog svojih specifičnih osobina (Terzić et al, 2000):

- **Širok opseg talasnih dužina laserskog zračenja**, čime je omogućeno ispitivanje skoro svih kvantnih prelaza u atomskim česticama,
- **Monohromatičnost**, moguće je dobiti spektre sa velikim razlaganjem i selektivnu pobudu atoma ili molekula određene vrste u smešama,
- **Prostorna koherentnost zračenja**, mogućnost dobijanja visoko kolimisanih snopova zračenja za sondiranje udaljenih oblasti i fokusiranja na veoma malu površinu,
- **Velik intenzitet laserskog zračenja**, za smanjenje problema sa šumom, a i za dobijanje nelinearnih efekata,
- **Mala spektralna širina linije laserskog zračenja**, omogućava dobijanje spektara sa velikim razlaganjem,
- **Kratko trajanje laserskog impulsa**, može biti kraće od vremena života pobuđenih atomskih i molekulskih stanja što omogućuje višestepeno pobuđivanje.

Linearna laserska spektroskopija se deli na: apsorpciono-transmisionu spektroskopiju, emisionu spektroskopiju i kalorimetrijsku spektroskopiju, gde spada i fotoakustična spektroskopija (slika 6.1), dok se nelinearna laserska spektroskopija deli na: spektroskopiju

zasićenja, spektroskopiju višestepenog pobuđivanja i ionizacije, dvofotonsku spektroskopiju i multifotonsku spektroskopiju.

Fotoakustična spektroskopija se, prema efektima koji se javljaju pri međusobnom dejstvu laserskog zračenja sa supstancom, deli, kao i sve druge metode laserske spektroskopije, na:



Sl. 6.1. Šematski prikaz klasifikacije metoda linearne laserske spektroskopije

eksperimentalna postavka, primena u širokoj dinamičkoj oblasti, merenja na licu mesta, kao i primena u sredinama gde su druge metode koplikovane ili čak neprimenljive (prašasti materijali, živa tkiva...) (Terzić et al, 2000).

## 6.1. MERENJE POLUTANATA

Jedna od najvažnijih primena FAS je analiza mikroprimesa u nekom uzorku i to najčešće u gasu. Ova metoda pruža mogućnost detekcije gotovo svih konstituenata gasa u širokoj spektralnoj oblasti, od ljubičaste do mikrotalasne, i to sa velikom osetljivošću reda veličine ppb. Aparatura za ovaj metod sadrži:

- Optički deo** (laser, sistem za upravljanje parametrima laserskog zračenja, modulator, u slučaju korišćenja kontinualnog lasera),
- Akustički deo** (fotoakustička celija sa uzorkom ili sam uzorak,detektor),
- Električni deo** (sistem za pojačanje, registraciju i obradu signala).

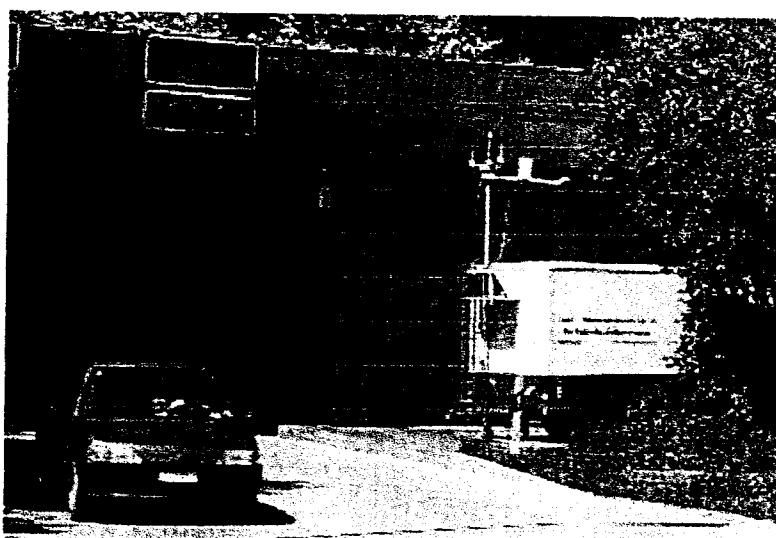
U prošlosti, najčešće je korišćen kontinualni CO<sub>2</sub> laser zbog talasnih dužina svetlosti koju emituje na kojima većina molekula ima karakterističnu apsorpciju. Kontinualni laser zahteva modulator i specijalno izrađene fotoakustične celije tako da je sada, u većini slučajeva, zamjenjen impulsnim laserskim izvorom. Za proučavanje fotoakustičnih talasa u infracrvenoj oblasti koriste se spektrometri bazirani, najčešće, na TEA CO<sub>2</sub> laseru.

Problemi koji se mogu javiti su pozadinski signali koji potiču od neselektivne apsorpcije prozora fotoakustične celije i od spoljašnje akustične buke, kao i pojava efekta

kinetičkog hlađenja. Ovaj efekat nastaje pri upotrebi CO<sub>2</sub> lasera za proučavanje gasnih smeša u kojima je prisutan ugljendioksid, koji ima znatan uticaj na detektovani fotoakustični signal. U zavisnosti od prisustva drugih gasova u smeši i pod određenim uslovima mogući su takvi relaksacioni procesi koji, u početku, prevode translacionu u vibracionu energiju, što dovodi do kinetičkog hlađenja, a zatim do sporog zagrevanja gasa. Pojava kinetičkog hlađenja prouzrokuje smanjenje pritiska i temperature gasa što se detektuje kao invertovan fotoakustični signal. O tim faktorima treba voditi računa pri konstrukciji i upotrebi spektrometara jer tačnost merenja zavisi od tačnosti same aparature. Jedan od problema je i kalibracija fotoakustičnih spektrometara za absolutna merenja.

Većina fotoakustičkih studija se zasniva na analizi prikupljenih uzoraka različitog porekla u laboratorijama. Prva merenja bila su demonstrirana na uzorcima jednokomponentnog gase razredjenog u neapsorbujućem azotu na atmosferskom pritisku i sobnoj temperaturi. Najčešće je korišćen CO<sub>2</sub> laser zbog tražene oblasti talasnih dužina i luke upotrebe. Merene su koncentracije C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, a kasnije počinju merenja gasova u multikomponentnim smešama, npr. C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> u uzorku vazduha uzetom sa glavnog puta. Upotrebo diskretnog CO<sub>2</sub> lasera nađen je minimum detektovane koncentracije C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> od oko 5 ppb u većini slučajeva. Potom su merene koncentracije NH<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> u vazduhu. I sada se veći deo istraživanja vrši na gotovim uzorcima u laboratorijama, međutim, znanje o troposferskoj i stratosferskoj hemiji, kao i kontrola emisionih i industrijskih procesa, zahteva vremenski i prostorno određene informacije na raspodeli brojnih komponenti. *In situ* i daljinska merenja su neophodna u dodatku za detaljnu analizu u laboratoriji. Fotoakustična spektroskopija se, baš, i ne može primeniti za daljinska merenja, ali može za *in situ* merenja, čak i u stratosferi.

Primer za mobilni sistem sa CO<sub>2</sub> laserom prikazan je na slici 6.2. Ovaj mobilni sistem postavljen je na izlazu tunela "Gubrist" blizu Zurich (Švajcarska) i tokom pet nedelja snimao je emisiju NH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> i vodenu paru. Baziran je na dva sealed-off line-tunable CO<sub>2</sub> lasera (jedan sa <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub>, a drugi sa <sup>13</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub> izotopom). 10 R(24) linija <sup>13</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub> lasera je izabrana za



Sl. 6.2. Mobilni sistem sa CO<sub>2</sub> laserom na izlazu tunela "Gubrist"  
(Zurich, Switzerland)

snimanje NH<sub>3</sub> usled male interferencije, sa drugim gasovima na njegovoj talasnoj dužini. Mali apsorpcioni koeficijent okolnog CO<sub>2</sub> na talasnoj dužini ovog lasera je od velikog interesa zbog isčezavanja doprinosa kinetičkog hlađenja amplitudi fotoakustičnog signala. Koncentracija etena je snimljena na 10 P(14) liniji <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub> lasera. Talasna dužina ovog lasera daje najbolji odnos apsorpcionih koeficijenata etena, ugljendioksida i vodene pare na tipičnim koncentracijama ovih gasova u

tunelskom vazduhu. Podaci koji su dobijeni slažu se sa podacima dobijenim nezavisnim merenjima i u relaciji su sa saobraćajnom gustinom. Glavna prednost laserski baziranog instrumenta je njegova multikomponentna sposobnost i dobra vremenska rezolucija.

Korišćenjem ovog sistema mereni su gasovi u industrijskom okruženju (emisija pare metanola i etanola iz farmaceutske kompanije u Basel-u merena je svakih pet minuta) i gasovi u tragovima u urbanom i ruralnom vazduhu (merene su male koncentracije vodene pare, ugljendioksida, ozona, amonijaka, etilena itd.).

## **7. PREGLED LASERSKIH SPEKTROSKOPSKIH METODA ZA MERENJE POLUTANATA**

Sve metode laserske spektroskopije mogu se, prema efektima koji se javljaju pri međusobnom dejstvu laserskog zračenja i materije, podeliti na dve grupe: linearne i nelinearne, o čemu je detaljnije bilo reči u delu o fotoakustičnoj spektroskopiji (§ 5). Obe navedene grupe laserske spektroskopije sastoje se od mnogobrojnih i raznovrsnih metoda, od kojih su neke već razmatrane u prethodnim delovima teksta (LIDAR, § 4, DIAL § 5 i FAS, § 6). Ovde su ukratko opisane druge značajnije metode laserske spektroskopije, sa posebnim naglaskom na IC deo spektra.

### **7.1. INFRACRVENA LASERSKA SPEKTROSKOPIJA**

Infracrvena spektroskopija je metoda merenja apsorpcije zračenja različitih IC frekvencija u uzorku koji je se nalazi na putu zraka. Korišćenjem različitih pribora za uzorkovanje, IC spektrometri mogu primiti i gasove i tečnosti i čvrsta tela. IC spektroskopija je bitna i popularna tehnika za strukturalna objašnjenja i identifikaciju komponenti. Spektroskopske metode se primenjuju za snimanje zagadenja okолног vazduha, merenje industrijske emisije, istraživanje stratosfere, u medicini, u hemiji itd.

IC region spektra ( $0.78\text{--}1000\text{ }\mu\text{m}$ ) je, kao što je već naglašeno, od velikog interesa za istraživanja i merenja u atmosferi jer dosta hemijskih supstanci ima karakterističnu apsorpciju u ovom delu spektra. Određivanje koncentracije poznatog gasa, ili gasova, realizuje se iz merenih apsorpcionih spektara smeše gasova. Procedura zahteva dobro poznavanje karakteristika gasne apsorpcije (Tittel et al, 1996–200).

Snimanje IC spektara može se realizovati ili laserskim metodama ili Fourier transform IC spektroskopijom. Spektroskopija bazirana na podešljivim laserima je osetljiv, selektivan, kompaktan i brz način merenja polutanata.

#### **7.1.1. Laserska apsorpciona spektroskopija**

Laserska apsorpciona spektroskopija je bazirana na merenjima apsorpcije zračenja u sredini koja se ispituje. Kada su u pitanju gasovi u tragovima, apsorpciona spektroskopija uključuje merenje malih apsorpcionih koeficijenata zbog malih koncentracija ovih gasova. Ova merenja često zahtevaju duge efektivne dužine puta laserskog zraka (apsorpciona spektroskopija dugog puta). Tradicionalno, ovaj uslov se zadovoljava korišćenjem optičkih višeprelaznih ćelija gde se laserski zrak reflektuje o ogledala na krajevima te ćelije i više puta prolazi kroz sredinu koja se ispituje. Primena ove metode je moguća zbog male divergencije laserskog snopa. Zrak će napustiti ćeliju posle kontrolisanog broja prelaza, mada mali delovi zraka napuštaju ćeliju sa svakim prelazom jer ogledala nisu idealna. Kvantitativna identifikacija konstituenata vazduha ograničena je spektralnom rezolucijom i minimalnim detektovanim apsorpcionim koeficijentom.

Za merenje uzorka koji poseduju veliki apsorpcioni koeficijent primenjuje se transmisioni metod. Tu se meri zavisnost propuštenog zračenja kroz materiju od talasne dužine laserskog zračenja. Za povećanje osetljivosti razvijen je veoma efektivan metod zasnovan na

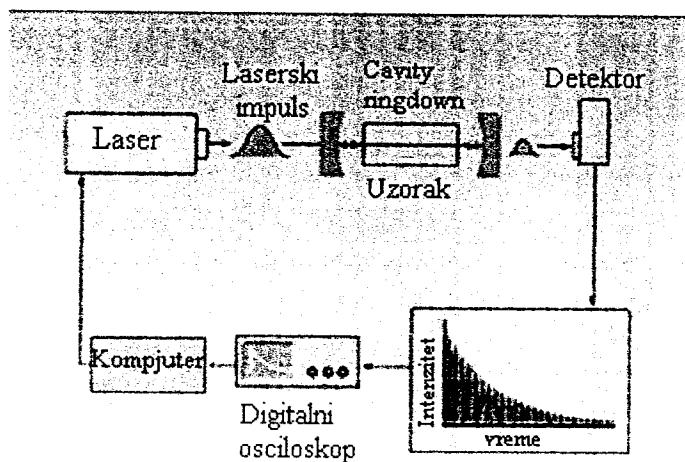
stavljanju ispitivanog utorka u rezonator (intrarezonatorska laserska spektroskopija). Za molekule sa konstantnim magnetnim ili električnim dipolnim momentom koristi se i spektroskopija magnetne rezonance ili Štarkova laserska spektroskopija.

U ovim metodama koriste se različiti laseri (čvrsti laseri, diodni i gasni laseri) ili laserski sistemi u kombinaciji sa nelinarnim optičkim procesima.

### 7.1.2. *Cavity ring-down* spektroskopija

*Cavity ring-down* laserska apsorpciona spektroskopija (CLRAS) je tehnika sposobna za ultrasenzitivna direktna apsorpciona merenja na mikrosekundnoj vremenskoj skali. Koristi i impulsne i kontinualne lasere za merenje elektronskih i vibracionih apsorpcionih spektara gasova u tragovima. Laka je za izvođenje i interpretaciju rezultata (Paul et al, 1997). *Cavity ring-down* spektroskopija je, u spektroskopiji gasova, posebno efektivna za merenje slabih apsorpcija vrsta koje su dosta zastupljene (Curl et al).

CLRAS se bazira na merenju brzine apsorpcije svetlosnog impulsa zarobljenog u optičkoj duplji formiranoj od dva visoko reflektujuća konkavna ogledala. Laserski impuls se ubacuje u optičku duplju u kojoj je rastojanje između ogledala duže od koherentne dužine impulsa. Sa svakom refleksijom impulsa, njegovi mali "delovi" se transmituju kroz ogledala (sl. 7.1). Detektor (fotomultiplikatorska tuba ili fotodioda) koji se nalazi iza duplje snima ove događaje i dobija se zavisnost intenziteta od vremena. Potom se ovi događaji digitalizuju i fituju do prvog eksponencijalnog izraza, koji daje ukupne gubitke duplje, uključujući i apsorpciju unutar duplje (Paul et al, 1997).



Sl. 7.1. Princip Cavity ringdown spektroskopske

Ova metoda se široko koristi u vidljivom, UV i bliskom IC delu spektra. Primarno ograničenje u UV delu spektra je nedostatak visoko reflektujućih ogledala (više od 99%). Velika prednost Cavity ring-down spektroskopije u odnosu na uobičajene spektroskopske metode je da fluktuacije inenziteta lasera ne utiču na izlazni signal. Detektuje se samo vreme prolaska signala, koje ne zavisi od intenziteta laserskog zračenja. Jednostavnost, osetljivost i dobro vreme rezolucije ove metode kreira nove mogućnosti za buduće primene.

### 7.1.3. Optotermalna spektroskopija

Optotermalna spektroskopija je metod za dobijanje visoko rezolucionih *beam* spektara molekula hlađenih do oko 1K supersoničnom ekspanzijom. Na molekularnoj apsorpcionoj liniji, molekul se pobuđuje delovanjem laserskog zraka. Detektuje se porast temperature bolometra i ovaj porast se detektuje.

## 7.2. MULTIFOTONSKA SPEKTROSKOPIJA

Pod pojmom multifotonski procesi (MF) podrazumevaju se prelazi između kvantnih stanja sistema (atoma, molekula i dr.) koji se odvijaju sa apsorpcijom dva ili više fotona intenzivnog elektromagnetskog zračenja koje deluje na sistem. Odgovarajući spektroskopski metod naziva se multifotonika spektroskopija (MFS). Podrazumevamo da se pri MF procesu apsorbuju fotoni istih frekvencija pošto su laseri monohromatski izvori zračenja. Verovatnoća multifotonih prelaza je mala i potrebni su intenzivni svetlosni izvori za njihovo indukovanje, tako da se intrnzivno proučavanje ovih procesa počinje nakon otkrića lasera.

Karakteristike MF procesa zavise od različitih procesa, a najznačajniji su: karakteristike laserskog zračenja kojim se pobuđuju MF procesi, režim pobude i apsorpciona sredina. Najznačajniji eksperimentalni parametri kojima se opisuju MF procesi su: srednji broj apsorbovanih fotona po jednom molekulu, apsorpcioni presek molekula, diferencijalni apsorpcioni presek, povećan apsorpcioni presek smeše, presek za rotaciono relaksacione preseke i presek za vibraciono translacione relaksacione procese.

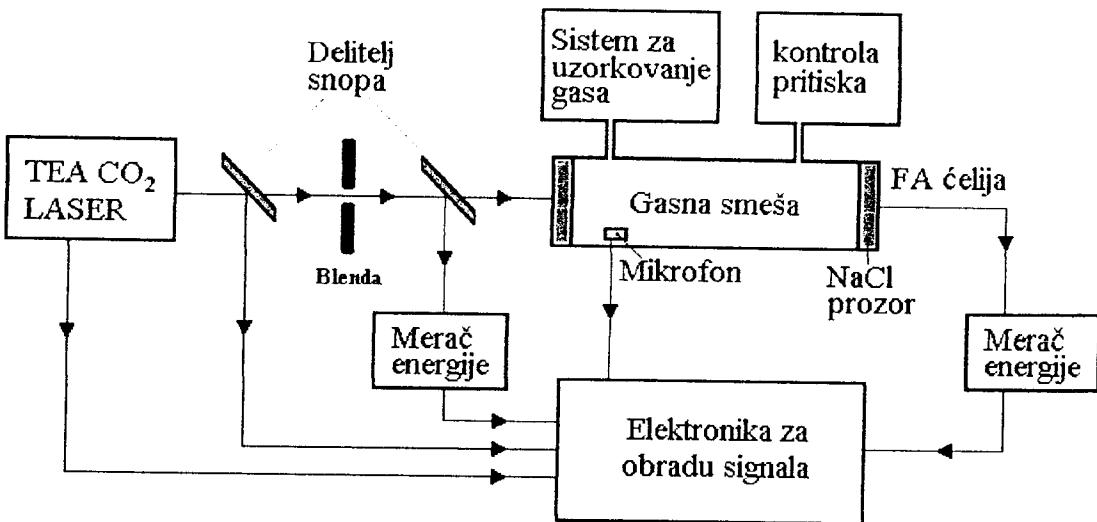
Za ispitivanje MF procesa koriste se rane metode zasnovane na efektima koji se javljaju u toku ili nakon apsorpcije laserskog zračenja u uzorku, a najznačajnije su:

1. Transmisini metod (TR) uključuje merenja transmitovanog intenziteta u funkciji upadnog intenziteta.
2. Fluorescentni metod (FM) koristi se za proučavanje sredina kod kojih je MF apsorpcija praćena fluorescentnom emisijom zračenja pobuđenih stanja.
3. Fotoakustični metod (FM) je zasnovan na merenju akustičnih talasa u nekoj sredini nastalih kao posledica apsorpcije elektromagnetskog zračenja u njoj.
4. Saturacioni metod (SA) se primenjuje kada pri MF procesima dolazi do efekta zasićenja.
5. Ionizacioni metod (MFJ) se zasniva na procesu ionizacije molekula pri MF apsorpciji.

O fotoakustičkom efektu je bilo reči u prethodnom tekstu (§ 6) tako da što ovde nećemo razmatrati detaljnije. MF-FA spektrometar se kao i FA spektrometar sastoji od optičkog dela (laserski izvor i sistem za upravljanje parametrima laserskog zračenja), akustičkog dela (gde dolazi do generisanja i pretvaranja akustičkih oscilacija u električne signale) i električnog dela (sistam za prikupljanje i obradu podataka). Na sl. 7.2. prikazan je MF-FA spektrometar u Institutu za fiziku u Beogradu za ispitivanje MF procesa u gasnim smešama.

Multifotonski procesi se primenjuju u spektroskopiji, nelinearnoj optici, laserskoj tehnologiji, optoelektronici, medicini, zaštiti čovekove okoline,..

Kao što znamo CFC molekuli uništavaju ozon i od velikog je značaja uništiti ove molekule. CFS apsorbuje 30 i više fotona po impulsu pa se može uništiti MF disocijacijom. U tom procesu koristio bi se sistem lasera i ogledala postavljen na planini. Međutim ovo još uvek nije ostvareno u praksi jer je tehnika dosta skupa.



Sl. 7.2. MF-FA spektrometar na Institutu za fiziku u Beogradu

MF procesi se koriste u nelinearnim lidarima za dobijanje podataka o aerosolima. Ovi lidari su bazirani na laserima sa ultrakratkim impulsima. Ovaj lidar je naročito pogodan kod proučavanja mikrokopljica (magla, oblaci) i mikročestica kao što su bioagensi. Za detekciju polutanata u atmosferi konstruisan je i prvi mobilni teravatni LIDAR, "Teramobil", zasnovan na indukciji dvofotonskih fluorescentnih procesa (Terzić et al, 2004). Teramobil emituje femtosekundne impulse na 800nm. Koristi Ti:safir sistem.

### 7.3. DIFFERENTIAL OPTICAL ABSORPTION SPECTROSKOPY (DOAS)

DOAS metodom, atmosferske koncentracije su odredene merenjem apsorpcije vrsta od interesa u UV/vidljivom regionu. Ova metoda je bazirana na merenju razlike između apsorpcije na talasnoj dužini gde vrste imaju jasan pik, i na talasnoj dužini bliskoj ovoj (na nekoj od strana pika). Instrument se sastoji iz spektrometra, CCD detektora, teleskopa, računara,.. Koncentracija se dobija iz dužine puta i apsorpcionog koeficijenta.

DOAS metodom mogu biti mereni samo oni polutanti koji pokazuju značajnu apsorpciju u UV ili vidljivom delu spektra, kao što su O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>... Može se meriti nekoliko vrsta istovremeno (Bruns, 2002).

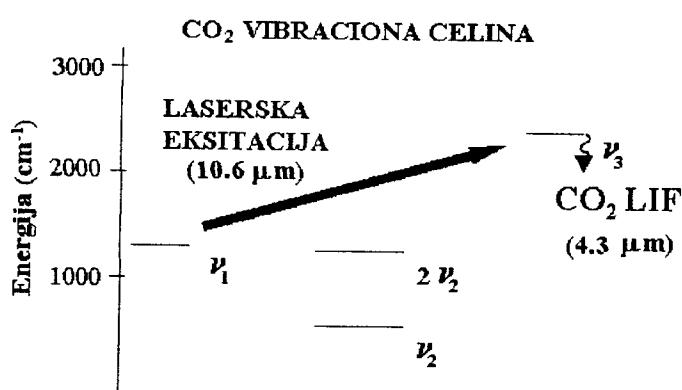
Prednost ove metode je sposobnost da se detektuje ekstremno slaba apsorpcija i nedvosmislena identifikacija gasova u tragovima. DOAS merenja obezbeđuju malo informacija na vertikalnom profilu apsorbera.

**MAX-DOAS (Multi Axis DOAS)** je tehnika koja koristi rasejanu svetlost sunca primljenu od višestrukih pravaca gledanja. Kombinacijom nekoliko pravaca gledanja može biti izvedena prostorna distribucija različitih gasova u tragovima.

Ovde se nećemo puno zadržavati na ovoj metodi jer se ne koristi u IC delu spektra, pa prema tome ni CO<sub>2</sub> laseri nemaju neku ulogu.

## 7.4. LASERSKA FLUORESCENTNA SPEKTROSKOPIJA

Lasersko zračenje pobuđuje molekul na više energetsko stanje. U sudarima sa drugim molekulima, taj molekul može izgubiti deo svoje vibracione energije, ali i dalje ostaje u pobuđenom stanju, samo što prelazi na niže vibraciono stanje. Kada molekul dospe u najniže pobuđeno vibraciono stanje (singletno stanje), tada može preći na niže elektronsko stanje (singletno stanje) emisijom fotona. Energija ovog fotona je manja od energije fotona kojim je sistem pobuđen. Razlika energije je utrošena na zagrevanje uzorka, prelaskom vibracione u kinetičku energiju (neradijativni prelaz), pri spuštanju molekula po vibracionim nivoima. Vreme života molekula u stanju koji se završava fluorescencijom u većini slučajeva je malo ( $\sim 10^{-8}$  s) (Terzić et al, 1996). Fluorescentni prelazi su najčešće u UV i vidljivom delu spektra. Međutim, za ispitivanje molekula  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,.. koji se ne mogu ispitati u ovim delovima spektra, razvijena je i IC laserska fluorescencija.



Sl. 7.3. Fluorescencija molekula  $\text{CO}_2$  izazvana  $\text{CO}_2$  laserskim zračenjem

Kao izvori zračenja u fluorescentnoj spektroskopiji koriste se ksenonske lampe, He-Ne laser i dr. U IC fluorescentnoj spektroskopiji koristi se  $\text{CO}_2$  laser talasne dužine 10.6  $\mu\text{m}$  i energije impulsa 3-5 J. Princip fluorescencije indukovane  $\text{CO}_2$  laserskim zračenjem za molekul  $\text{CO}_2$  prikazan je na sl. 7.3. (Brian et al, 1996-2000). Fluorescentno zračenje emitovano u ovom slučaju je talasne dužine 4.3  $\mu\text{m}$ .

laka na malim skalama. Izuzev u merenju polutanata, laserom izazvana fluorescencija se koristi za ispitivanja razmene toplote, u hemiji, biologiji,...

Fluorescentno zračenje u IC delu spektra snima se IC kamerama, i signal koji se dobija na displeju je proporcionalan koncentraciji datog molekula.

Detekcija laserski izazvanom fluorescencijom, zajedno sa kapilarnom elektroforezom, može biti koristan kvantitativni metod za detekciju fluorescentnih boja koje se široko koriste kao indikatori u studijama toka kopnenih voda. Tu se vrši analiza uticaja curenja iz skladišnih tankova i dr. na kretanje kopnenih voda (Brumley, et al, 1999).

## 7.5. LASERSKA MASENA SPEKTROSKOPIJA

Laserska masena spektroskopija je metod za hemijske analize supstanci u tragovima. Kombinovanjem selektivnosti, osetljivosti i brzine merenja dobijaju se koncentracije reda delova ppb čak i kada se analiziraju dosta komplikovane smeše hemijskih vrsta. Rezonantna laserska masena spektroskopija je kombinacija srednje ili visoko rezolucione UV spektroskopije i *time-of-flight* masene spektroskopiju. Rezonantno povećana multifotonска ionizacija reprezentuje vezujući element i podiže dvodimenzionalnost rezonantne laserske

masene spektroskopije sa parametrima mase i UV talasne dužine. *Time-of-flight* masena spektroskopija je verovatno najlakši način analiziranja mase jona. Dejstvom impulsnih lasera dolazi do stvaranja jona za veoma kratko vreme (tokom laserskog impulsa od tipično  $10^{-8}$  s) i na dobro definisanim tačkama (laserski fokus). Nakon ionizacije svi joni se ubrzavaju u drift regionu bez polja. Potencijalna energija se pretvara u kinetičku, istu za sve jone. Vreme preleta i masa su povezani proporcijom  $t \approx \sqrt{m}$ . Hromatogrami snimaju masenu selektivnost u *time-of-flight* analizeru.

Rezonantna laserska masena spektroskopija je korisna u nekim aktuelnim problemima koji ne mogu biti rešeni uobičajenim tehnikama analize supstanci u tragovima. Tu se uključuju brze promene procesa sagorevanja, brze *in-situ* analize pojedinih hemijskih vrsta (polutanti usled hemijskih nesreća), *on-line* analize komponenata u tragovima koje mogu delovati kao indikatori za visoko otrovne supstance sa dosta manjim koncentracijama,...(Boesl, 2000).

## 8. SIMULIRANJE PROSTIRANJA LASERSKOG ZRAČENJA KROZ ATMOSFERU

Prolazak laserskog zračenja kroz atmosferu, kao i njegova interakcija sa konstituentima atmosfere predstavlja veoma složen proces, koji se sa matematičke tačke gledišta ne može jednostavno predstaviti. Zbog toga su razvijeni mnogi modeli koji se koriste za simuliranje ponašanja laserskog zračenja pri njegovom prolasku kroz atmosferu.

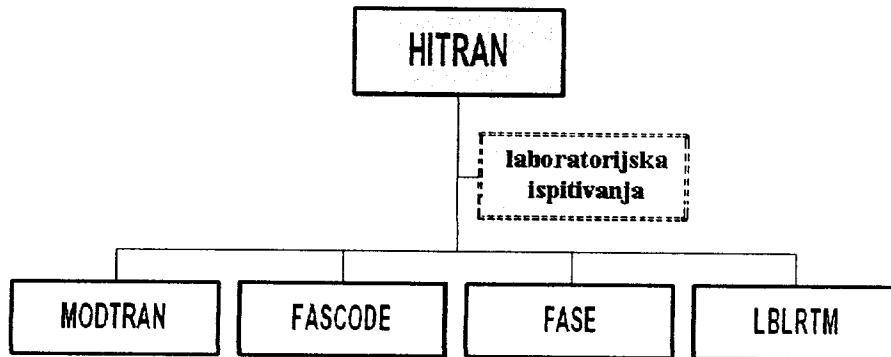
Sa porastom popularnosti, složenosti i efektivnosti lidarskih sistema, uporedo se i razvijaju različiti modeli, kako za obradu podataka dobijenih u merenjima, tako i za simulaciju interakcija gasova atmosfere sa laserskim zračenjem. Neki od programa za simulaciju rada lidarskih sistema i prostiranja svetlosti u atmosferi su: BACKSCAT program, SAGDAM (Sounding of Atmospheric Gases by Differential Absorption Method) program, LIDAR-PC program. Ove kompjuterske simulacije lidarskih sistema moraju se kombinovati sa atmosferskom spektroskopijom, kao i sa parametrima lidara.

Za računanje molekularne atmosferske transmisije, odnosno radijacije obično se koriste programi: FASCODE (Fast Atmospheric Signature Code), LBLRTM (Line-by-line Radiative Transfer Model), HITRAN-PC TRANS, MODTRAN (Moderate resolution atmospheric Transmittance and radiance code), FASE (FASCODE for Environmental) i dr. Ovi programi najčešće koriste HITRAN (High Resolution Transmission) bazu podataka (Wilcox, 1995).

Korišćenje ovih i mnogih drugih programa omogućuje da se odredi koncentracija polutanata u atmosferi.

### 8.1. HITRAN BAZA PODATAKA

Za proučavanje interakcije laserskog zračenja sa molekulima atmosfere potrebni su odgovarajući modeli. Već smo naglasili da ti modeli uglavnom koriste HITRAN (High-resolution TRANsmission) bazu podataka. Šema interakcije labaratorijskih ispitivanja i modela za računanje atmosferske transmisije i radijacije sa HITRAN bazom podataka prikazana je na sl. 8.1.

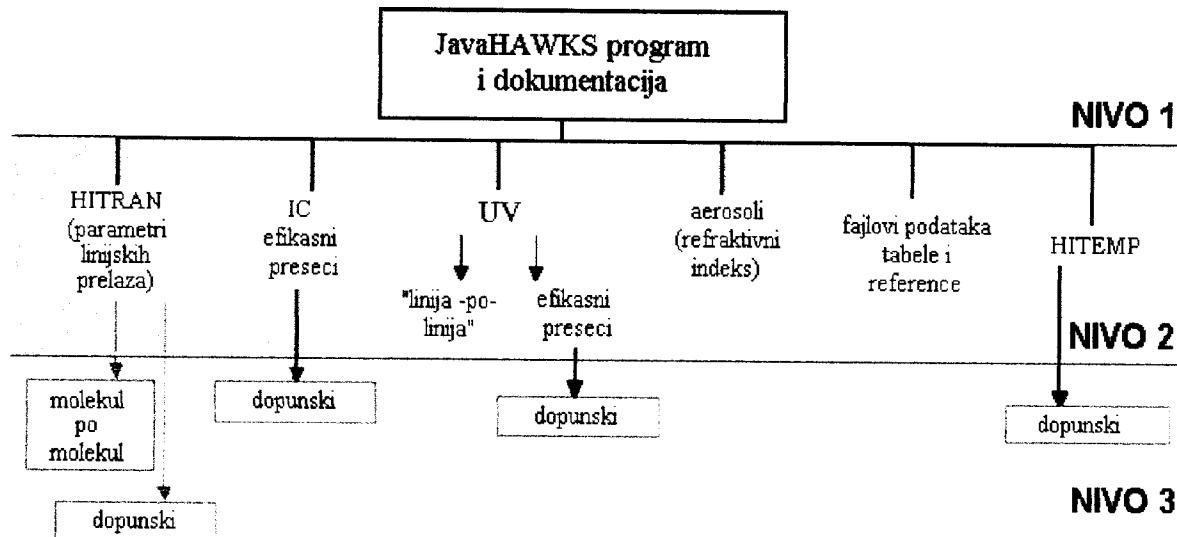


MODTRAN je "traka" model, dok su FASCODE, FASE i LBLRTM "linija-po-linija" modeli. Takođe, postoji i sistem za spajanje ili sistem za povratnu vezu sa laboratorijskim merenjima, što snadbeva bazu sa dovoljno podataka za lociranje nedostataka u modeliranju (Rothman et al.).

Prvo izdanje HITRAN molekularne spektroskopske baze podataka bilo je 1973, a kasnije se periodično pojavljuju nova izdanja sa proširenim bazama podataka. Izdanje iz 1996., pored "linija-po-linija" parametara prelaza, sadrži i podatke o efikasnim preseцима, softver za filtriranje i manipulisanje podacima, i dokumentaciju. "Linija-po-linija" deo kompilacije HITRAN-a (1996) sadrži preko 1000000 spektralnih linija za 37 različitih molekulskih vrsta i parametre tih spektralnih linija (pozicija linije, intenzitet prelaza, poluširina, energija nižeg stanja,...).

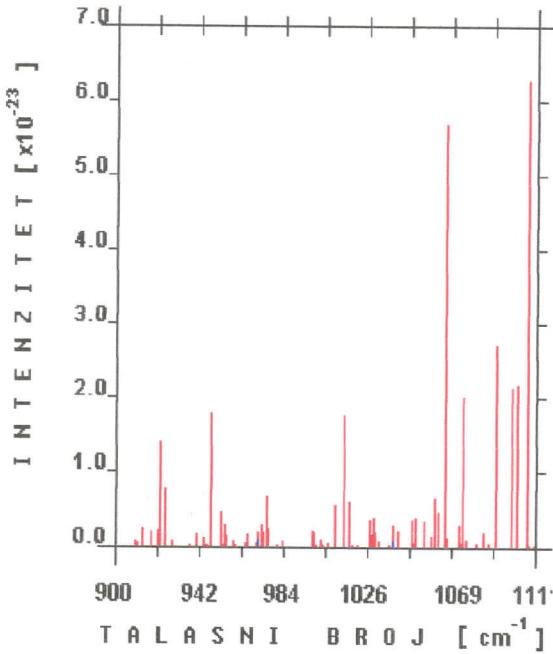
Danas je HITRAN baza podataka poznata kao internacionalni standard za pribavljanje neophodnih osnovnih spektroskopskih parametara za različita atmosferska i laboratorijska transmisiona i radijativna računanja. Dostupna je preko <http://www.HITRAN.com>. "Linija-po-linija" kompilacija spektroskopskih parametara se koristi za zemljano atmosfersko daljinsko merenje, transmisione simulacije, osnovne laboratorijske spektroskopske studije, studije regulisanja zagađenja. HITRAN je sada komponenta velikog seta spektroskopskih podataka i softver se naziva NAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation). Cilj HITRAN i HAWKS programa je da obezbede funkcionalni i fleksibilni set softvera i podataka od mikrotalasa kroz UV spektralnu oblast.

HAWKS softver (editovanje, Grafičko prikazivanje, filtriranje,...) je sada napisan i na Java jeziku, tako da je dostupan i MAC korisnicima. Pre je bio dostupan samo u WINDOWS i UNIX okruženju (Rothman et al.). Struktura kompilacije JavaHAWKS-a prikazana je na sl. 8.2.

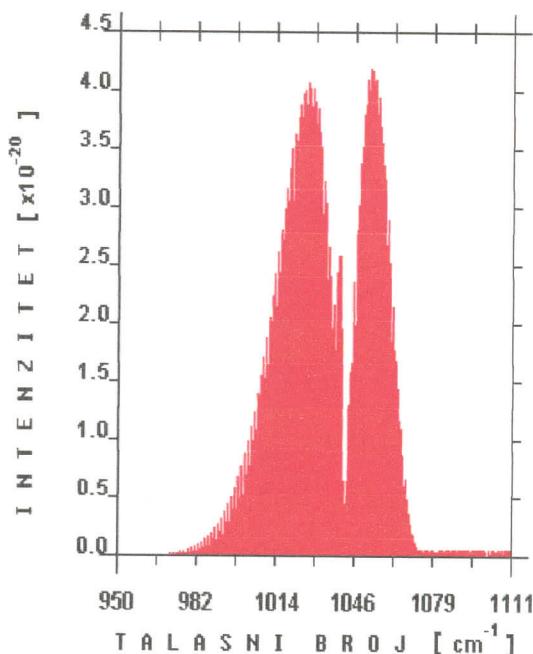


Sl. 8.2. Struktura kompilacije JavaHAWKS programa

Program JavaHAWKS korišćen je za dobijanje različitih podataka o apsorpcionim osobinama spektara. Kao ilustracija, na sl. 8.3. prikazan je spektar ozona, a na sl. 8.4. spektar vodene pare. Oba spektra su data u IC oblasti ( $900\text{--}1110\text{ cm}^{-1}$ ), tj u oblasti  $\text{CO}_2$  laserskog zračenja.



Sl. 8.3. Spektar vodene pare na talasnim dužinama  $\text{CO}_2$  lasera



Sl. 8.4. Spektar ozona na talasnim dužinama  $\text{CO}_2$  lasera

## 8.2. LBLRTM MODEL

LBL (*line-by-line*; "linija-po-linija") modeli uključuju izračunavanje transmisije u nekom spektralnom opsegu za svaki gas u nekoliko atmosferskih slojeva. Za to se koristi adekvatno odabran korak za integraciju (npr. interval  $dv$ , obično je  $dv = 5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ) kako bi se izračunala sprekatalna transmisija u intervalu  $\Delta v$  ( $\Delta v > dv$ ), za  $j$ -ti atmosferski sloj. Za dati talasni broj  $v$  i za  $j$ -ti homogen atmosferski sloj, apsorpcioni koeficijent  $k_{v,j,n}$  je dat sa:

$$k_{v,j,n} = \sum_{l=1}^L k_{v,j,n,l} = \sum_{l=1}^L S_{v,n,l} n_l f_{v,n,l}(T_j, p_j),$$

gde je  $l = 1, \dots, L$  apsorbujucih linija  $n$ -toga gasa na odabranom  $v$ ,  $S_{v,n,l}$  intenzitet linije,  $f_{v,n,l}$  profil  $l$ -te linije,  $T_j$  i  $p_j$  je temperatura i pritisak  $j$ -toga atmosferskog sloja. Optička debljina  $\tau_{v,j,n}$   $n$ -toga gasa i  $j$ -toga sloja je:

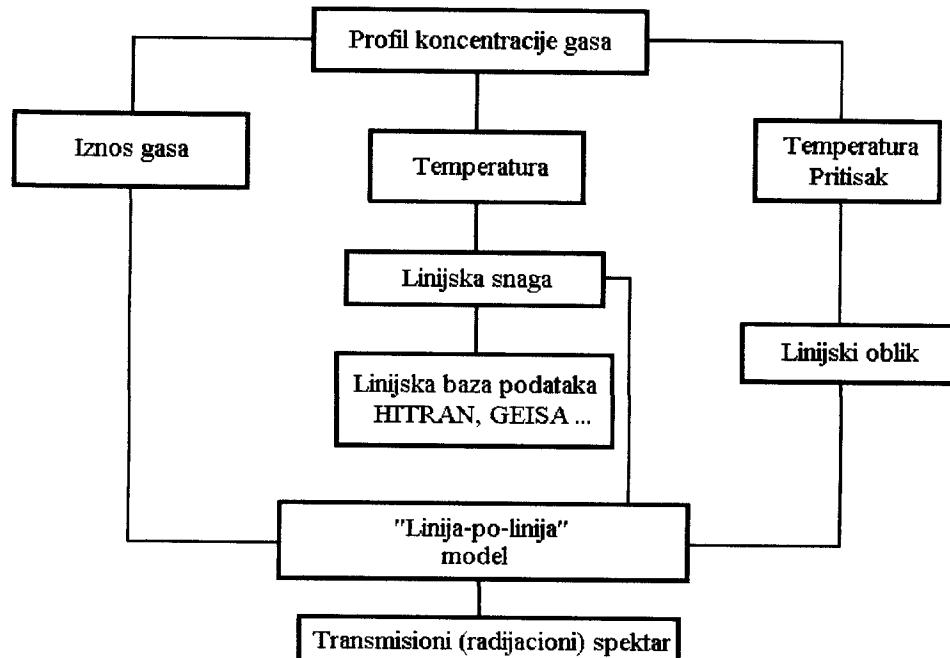
$$\tau_{v,j,n} = k_{v,n,j} u_{n,j},$$

gde je  $u_{n,j}$  količina  $n$ -tog gasa u  $j$ -tom sloju. Ponavljanjem izračunavanja za sve gasove  $n = 1, \dots, N$  dobija se optička debljina za  $j$ -ti sloj:

$$\tau_{v,j,n} = \sum_{n=1}^N \tau_{v,j,n}.$$

Iz ponavljanja gornjih izračunavanja za sve slojeve  $j = 1, \dots, J$ , nalazi se optička debljina svakog sloja. Poznavanjem optičke debljine mogu se odrediti intenziteti spektralnih linija.

Blok dijagram dobijanja transmisionog, odn. radijacionog spektra korišćenjem "linija-po-linija" modela dat je na sl. 8.5.



Sl. 8.5. Blok dijagram dobijanja transmisionog (radijacionog) spektra korišćenjem "linija-po-linija" modela

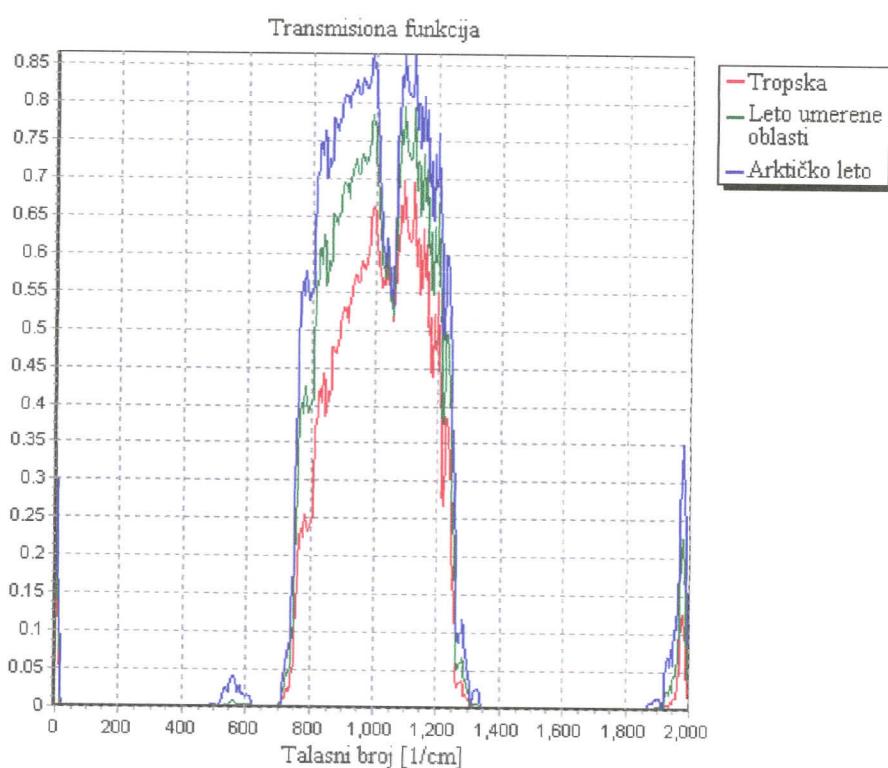
Za računanja transmisije (radijacije) razvijeni su različiti LBL numerički kodovi-modeli. Jedan od njih je LBLRTM model (*Line-by-line Radiative Transfer Model*), korišćen u ovom radu za simulaciju transmisije (radijacije) u IC delu spektra. Ovaj model je razvila korporacija *Atmospheric and environmental research* (<http://www.rtweb.aer.com>), a napravljen je na osnovu istraživanja atmosfere i okoline. LBLRTM model koristi HITRAN bazu podataka (§ 8.1) i uključuje efekte apsorpcije atmosferskog kontinuma. Najznačajnije karakteristike ovog modela su:

- Za sve atmosferske nivoe koristi se Voight linijski oblik. Voight linijski oblik nastaje kombinacijom Lorenz-ovog i Doppler-ovog širenja i adekvatno opisuje većinu prelaza u atmosferi.
- Model je primenljiv u širokoj spektralnoj oblasti od UV do sub milimetarske.
- Koristi sve parametre HITRAN baze podataka, uključujući i temperaturnu zavisnost preseka za apsopciju.
- Tačnost algoritma LBLRTM je oko 0.4 %, a greška povezana sa procedurom izračunavanja je pet puta manja od grešaka linijskih parametara. Otud, limitirajuća greška se pripisuje parametrima i obliku linije.

Korišćenjem LBLRTM modela dobijaju se transmisione (radijacione) spektre u IC oblasti za različite atmosferske modele (Tropska atmosfera, Leto umerenog pojasa, Arktičko leto) kao i za različite gasove.

### 8.2.1. Transmisiona funkcija

Transmisiona funkcija za Tropsku, Arktičko leto i atmosferu Leta umerene oblasti, korišćenjem opcije “različitih molekula”, dobijena pomoću LBLRTM modela data je na sl. 8.6. Transmisija je data u spektralnom intervalu od 0 do 2000 cm<sup>-1</sup>, na visini od 0 do 13 km.



Sl. 8.6. Transmisiona funkcija za tri modela atmosfere u IC delu spektra dobijena korišćenjem opcije “više molekula”

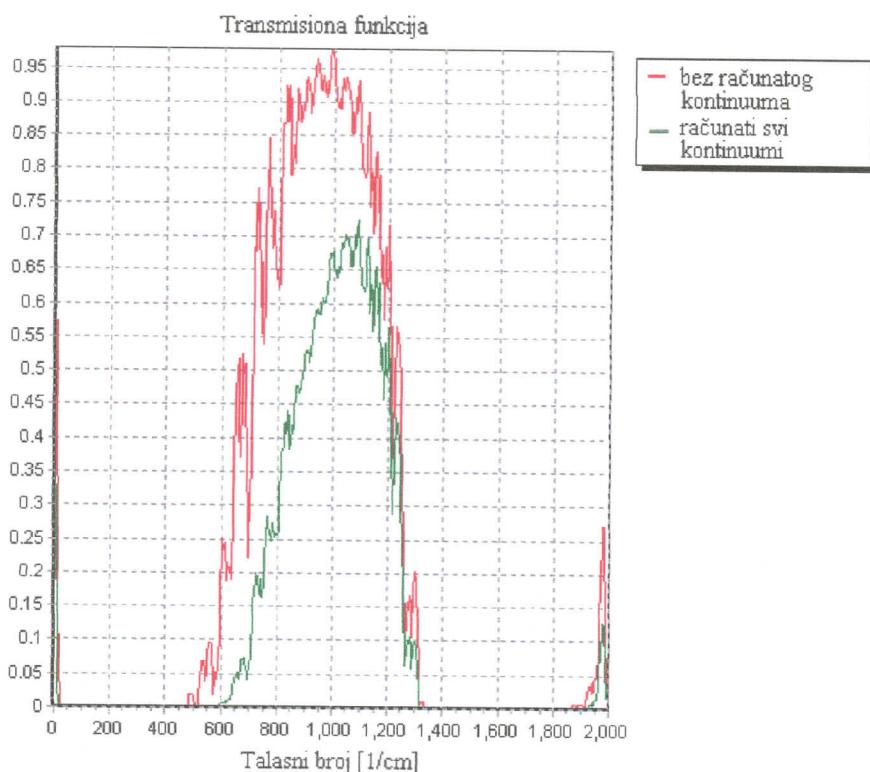
Sa slike vidimo da je transmisiona funkcija najviša za atmosferu Arktičko leto, nešto niža za Atmosferu Leto umerene oblasti, a najniža za Tropsku atmosferu. Razlika je usled

promene iznosa apsorbera u atmosferi sa promenom visine kao i usled efekta širenja linija što zavisi od promene temperature sa visinom. Manja transmisija u tropskoj atmosferi je determinisana većom količinom vodene pare nego u srednjoj atmosferi, dok je arktička atmosfera veoma suva (mali iznos apsorbera). Viša temperatura u tropskoj rezultuje većim apsorpcionim koeficientom nego u arktičkoj. Prema tome, efekti veće koncentracije i većih apsorpcionih koeficijenata rezultuju manjoj transmisiji.

### 8.2.2. Vodena para

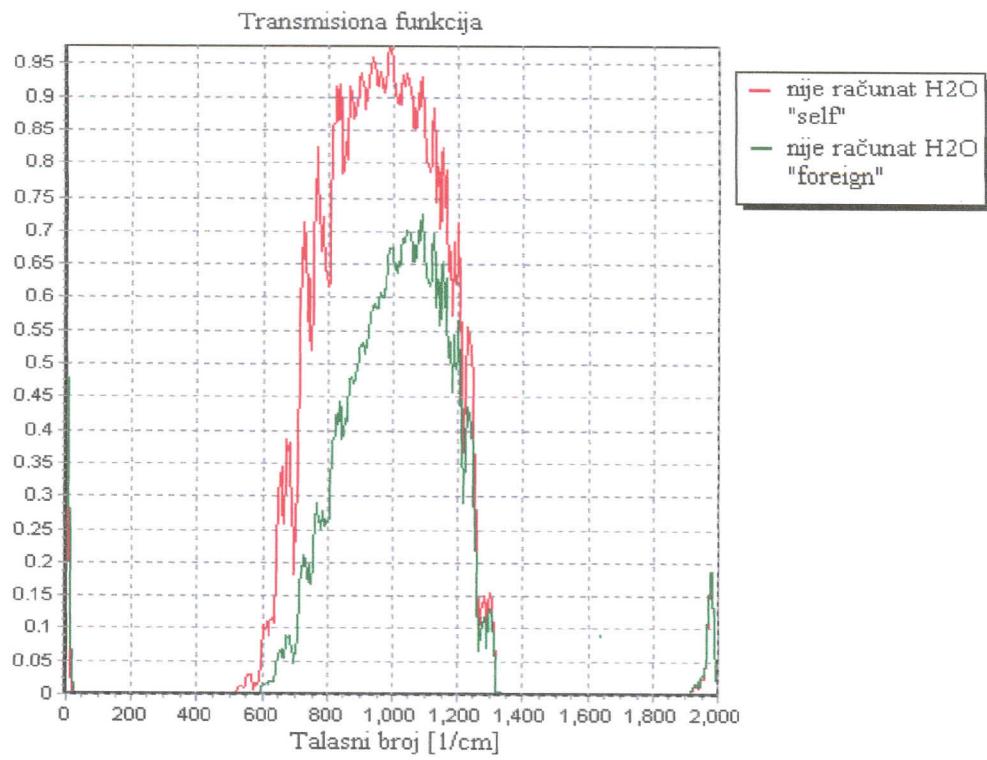
U IC delu spektra, među najznačajnije apsorbere spadaju vodena para ( $H_2O$ ), ozon ( $O_3$ ), ugljen-dioksid ( $CO_2$ ). Vodena para spada u komponente atmosfere čija je količina promenljiva. Iz programa LBLRTM  $H_2O$  dobijamo transmisione i radijacione funkcije sa računatom apsorpcijom kontinuuma ili bez računatog kontinuuma. Inače, kontinuum, kada je dodat "linija-po-linija" apsorpciji, obezbeđuje slaganje sa merenjem.

Sa slike 8.7. vidimo da apsorpcija  $H_2O$  kontinuumom dosta redukuje transmisiju u Tropskoj atmosferi. Transmisija, takođe opada i u prisustvu drugih apsorbera (ozona,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,...).

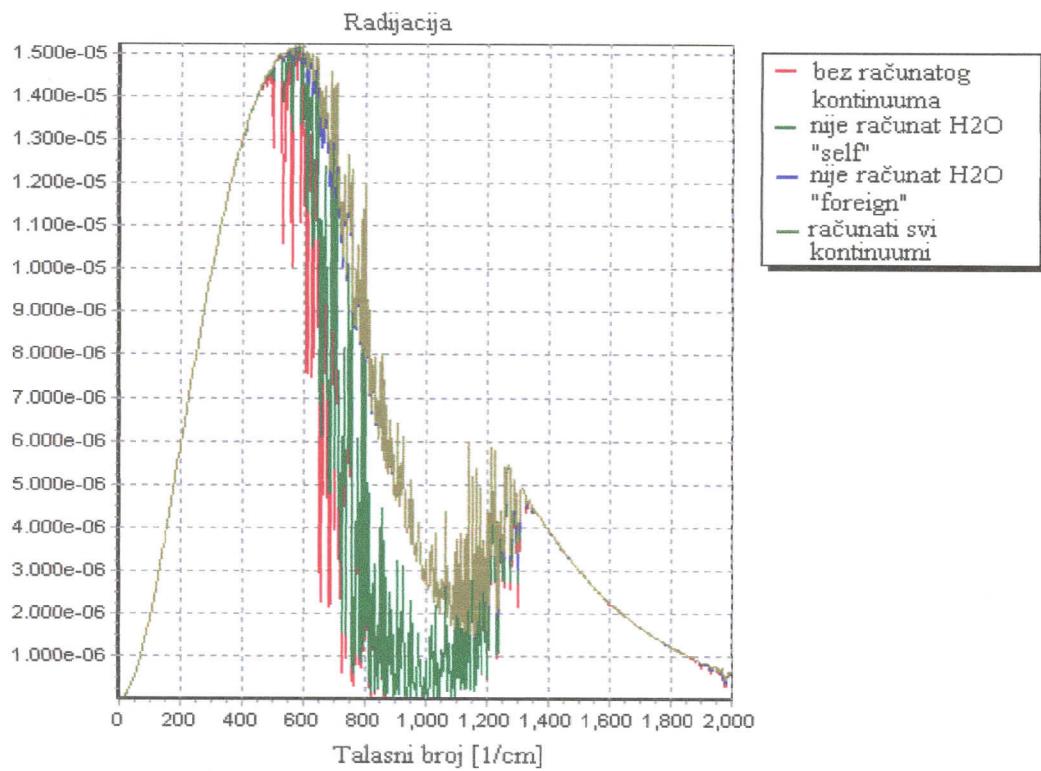


Sl. 8.7. Transmisiona funkcija za model Tropska atmosfera sa i bez računate kontinualne apsorpcije

Kontinualna apsorpcija molekula usled stranog širenja (sudari  $H_2O$  sa drugim molekulama) i samoširenja (isti molekuli) nije ista (sl. 8.8). Samoširenje igra važniju ulogu u troposferi gde ima dosta molekula iste vrste, dok se strano širenje dešava u višim delovima atmosfere. Radijaciona funkcija za date kontinuume data je na sl. 8.9.



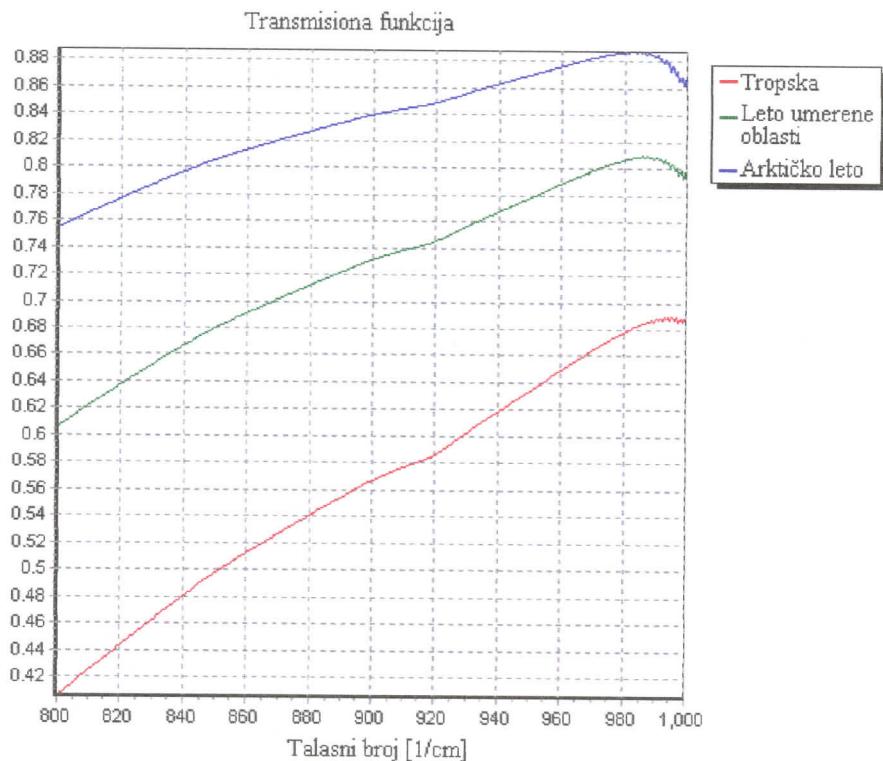
Sl. 8.8. Transmisiona funkcija za Tropsku atmosferu sa računatim  $\text{H}_2\text{O}$  "self" i  $\text{H}_2\text{O}$  "foreign"



Sl. 8.9. Radijaciona funkcija za Tropsku atmosferu dobijena korišćenjem opcije "Samo  $\text{H}_2\text{O}$  i kontinuum vode"

### 8.2.3. Vodena para i ozon

Računanjem i kontinuuma vodene pare i ozona za različite modele atmosfere (Tropsku, Arktičko leto i atmosferu Leto umerenog pojasa) LBLRTM model daje stransmisione funkcije prikazane na sl. 8.10. Ova funkcija predstavljena je u intervalu talasnih brojeva od 800 do  $1000\text{cm}^{-1}$ .



Sl. 8.10. Transmisiona funkcija za tri modela atmosfere u IC delu spektra dobijena korišćenjem opcije “ $\text{H}_2\text{O}$  kontinuum i samo  $\text{O}_3$ ”

## 8.3. MODELIRANJE IC RADIJATIVNIH FLUKSEVA

Jednačina IC radijativnog transfera za monohromatske intenzitete nagore i nadole data je kao:

$$\mu \frac{dI_\nu(\tau, \mu)}{d\tau} = I_\nu(\tau, \mu) - B_\nu(T)$$

gde je  $I_\nu$  intenzitet zračenja, a  $B_\nu(T)$  Plankova funkcija.

Rešenja jednačine ove jednačine u IC delu spektra za plan–paralelnu atmosferu koja je sastavljena od apsorbujućih gasova (nema rasejanja) su:

$$I_\nu^\uparrow(\tau; \mu) = B_\nu(\tau^*) \exp\left(-\frac{\tau^* - \tau}{\mu}\right) + \frac{1}{\mu} \int_{\tau}^{\tau^*} \exp\left(-\frac{\tau' - \tau}{\mu}\right) B_\nu(\tau') d\tau',$$

$$I_v^\downarrow(\tau; -\mu) = \frac{I}{\mu} \int_0^\tau \exp\left(-\frac{\tau - \tau'}{\mu}\right) B_\nu(\tau') d\tau'$$

gde je  $I_v^\uparrow$  intenzitet zračenja nagore,  $I_v^\downarrow$  intenzitet zračenja nadole,  $\tau$  optička širina. Ove jednačine su izvedene za celu atmosferu sa ukupnom optičkom širinom  $\tau_v^*$  sa dva granična uslova:

1) Prepostavlja se da je površina crno telo u IC emisiji sa površinskom temperaturom  $T_s$ :

$$I_v^\uparrow(\tau_v^*, \mu) = B_\nu(T_s) = B_\nu(T_s(\tau_v^*)) = B_\nu(\tau_v^*)$$

2) Za vrh atmosfere nema emisije nadole,  $\tau_v = 0$ :

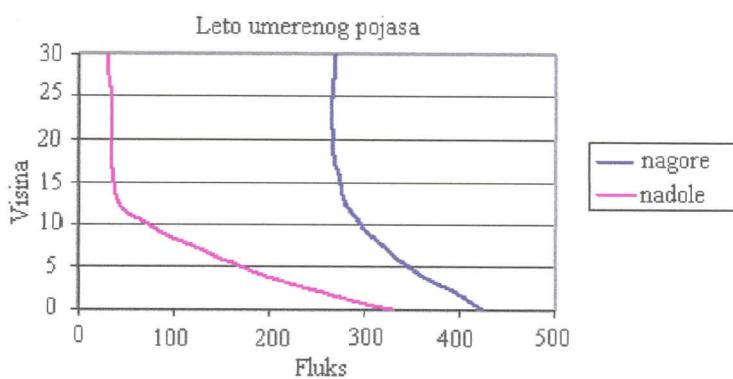
$$I_v^\downarrow(0, -\mu) = 0$$

Fluks nagore i fluks nadole za plan-paralelnu atmosferu su definisani kao:

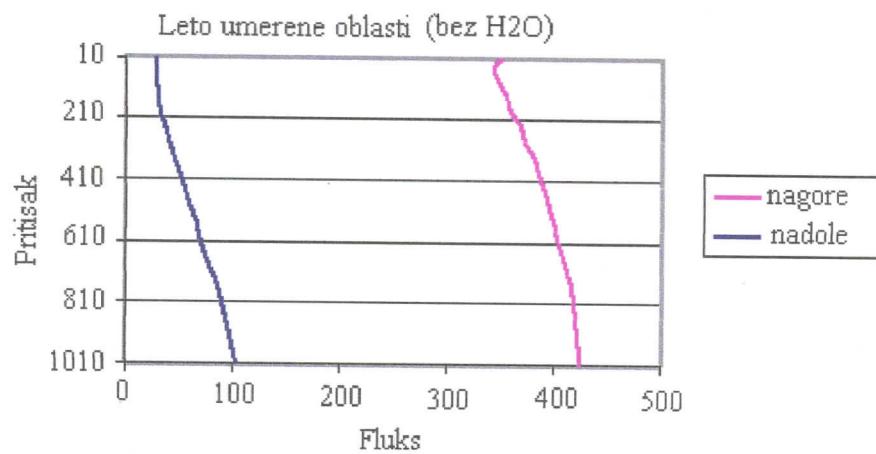
$$F_v^\uparrow = 2\pi \int_0^l I_v^\uparrow(\mu) \mu d\mu,$$

$$F_v^\downarrow = 2\pi \int_0^l I_v^\downarrow(-\mu) \mu d\mu$$

Za modeliranje ovih IC radijativnih flukseva i IC radijativnih brzina zagrevanja, odnosno hlađenja u gasnoj atmosferi korišćen je RUN IR-RAD program. IC fluksevi (nagore i nadole) za atmosferu Leto umerenog pojasa prikazani su u funkciji pritiska (sl. 8.11). Na isti način, dobijeni su i fluksevi za atmosferu bez prisustva vodene pare (sl. 8.12).



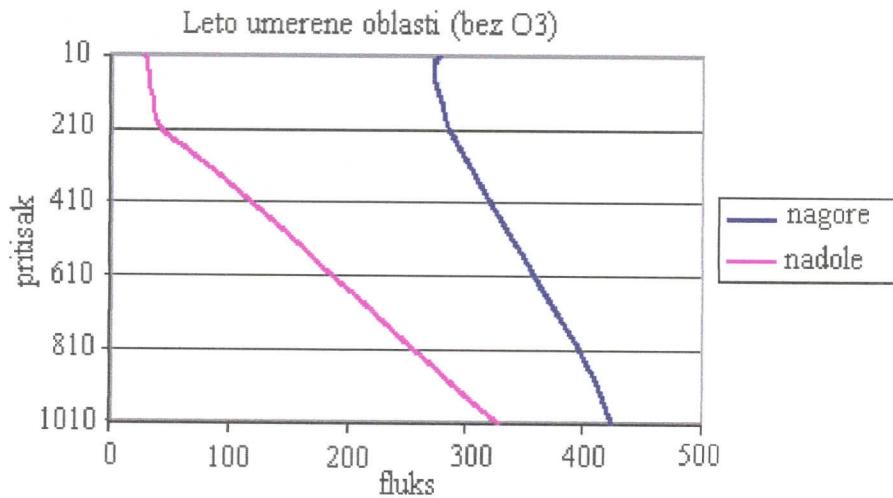
Sl. 8.11. IC fluksevi za atmosferu Leto umerenog pojasa



Sl. 8.12. IC fluksevi za atmosferu Leto umerenog pojasa bez prisustva vodene pare

Kada isključimo vodenu paru jak porast sa pritiskom u fluksu nadole nestaje jer nema izvora emisije vodene pare. Fluks nagore raste usled nedostatka apsorpcije vodenom parom. Atmosfera postaje transparentnija za zračenje emitovano sa zagrejane površine. Nedostatkom vodene pare u troposferi raste troposferska temperatura i raste doprinos fluksu od  $\text{CO}_2$  i emisije ozona.

Kada sprovedemo isti račun, ali bez prisustva ozona (sl. 8.13), vidimo da ovaj gas puno ne doprinosi ukupnom fluksu u troposferi, tako da se gotovo i ne vidi razlika između ovog i slučaja prikazanog na sl. 8.11. Prisutan je samo mali porast fluksa nagore usled odsustva apsorpcije ozona.



Sl. 8.13. IC fluksevi za atmosferu Leto umerenog pojasa bez prisustva ozona

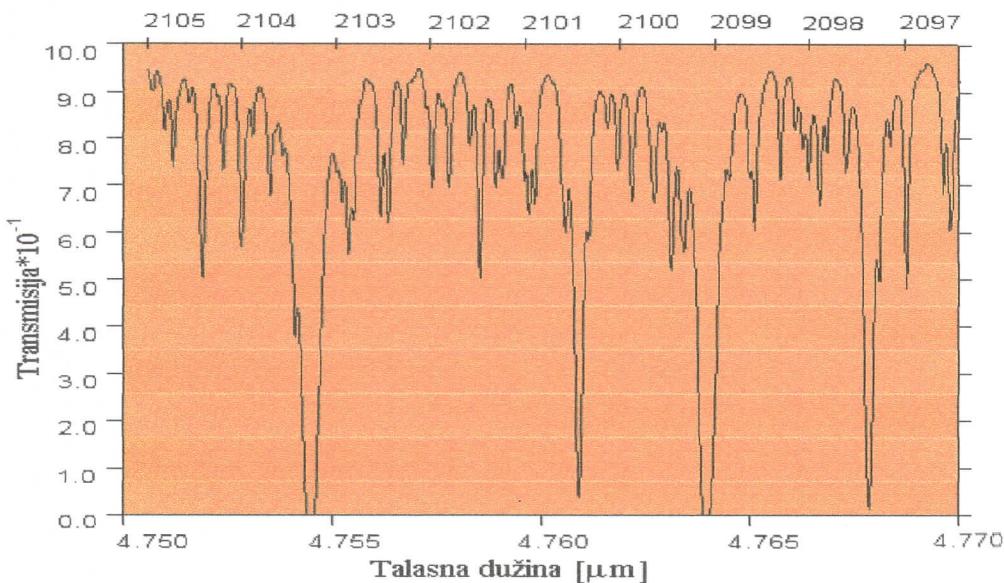
## 8.4. SIMULACIJA ATMOSFERSKE TRANSMISIJE KORIŠĆENJEM PROGRAMA PcModWin, PcLnWin I HITRAN-PC

### 8.4.1. PcModWin i PcLnWin programi

PcModWin (komercijalna verzija MODTRAN modela) i PcLnWin (komercijalna verzija FASCODE3P modela) su takođe programi za računanje atmosferske transmisije i radijacije. Razlika između ova dva programa je u spektralnoj rezoluciji.

PcModWin je standard za kompjutersku atmosfersku transmisiju i radijaciju spektralne rezolucije  $2 \text{ cm}^{-1}$ . MODTRAN pruža precizna i brza računanja u UV, vidljivom, IC i mikrotalasnom delu spektra. PcModWin se koristi za radiometre, spektrometre niže rezolucije...

PcLnWin je "linija-po-linija" model koji koristi HITRAN bazu podataka. Ovaj program služi za računanje atmosferske transmisije i radijacije visoke spektralne rezolucije. PcLnWin se koristi za spektrometre visoke rezolucije, lasere i lidare. Primer spektra dobijenog PcLnWin modelom dat je na slici 8.14.

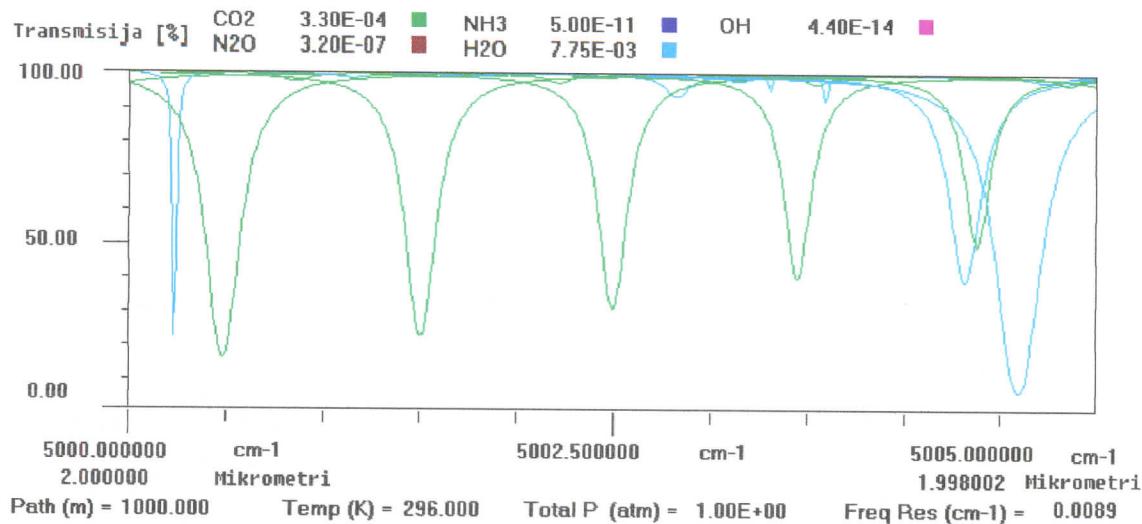


Sl. 8.14. Transmisioni spektar dobijem PcLnWin programom

### 8.4.2. HITRAN-PC program

Hitran-PC je kopjuterski program koji koristi spektroskopske jednačine FASCODE programa i HITRAN bazu podataka za računanje visoko rezolucionog transmisionog spektra atmosfere. Softver i baza podataka operišu na IBM-PC kompjuterskoj platformi. Glavni HITRAN-PC transmisioni program u Windows-u je TRANS program. TRANS program računa molekulsku atenuaciju,  $\alpha$ , kombinovanjem podataka o poziciji spektroskopske linije, snazi, i širini linije iz HITRAN baze podataka sa AFGL modelom atmosfere u "linija-po-linija" računanju. Atenuacione veličine se daju u funkciji talasne dužine i visine i korisne su za lidarska merenja. Korisnik ovog programa može uneti različite koncentracije gasa ili koristiti

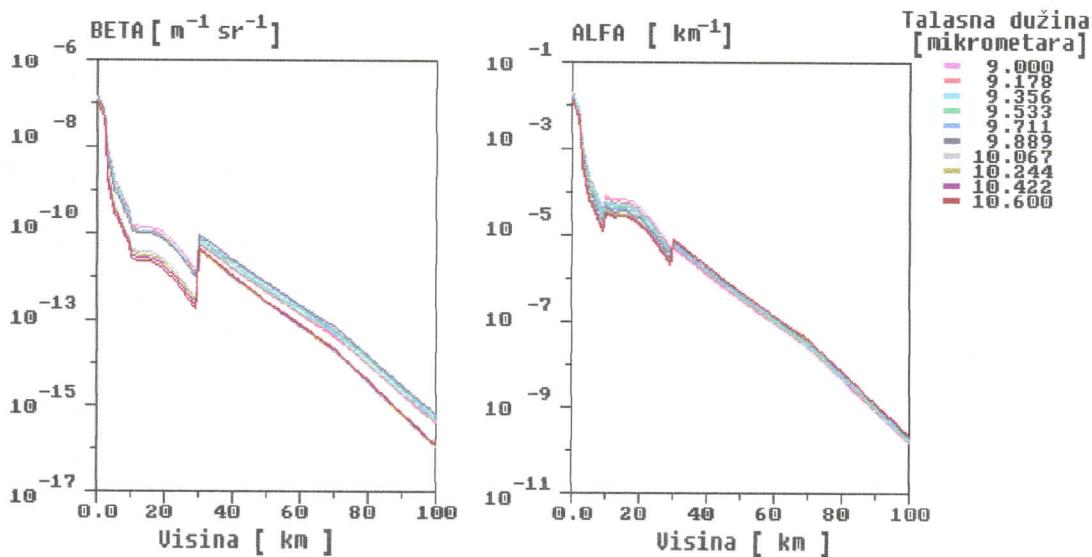
standardne atmosferske modele, menjati oblik linija i dužinu puta zraka. Primer spektra dobijenog HITRAN-PC programom dat je na slici 8.15. Izlazni fajl HITRAN-PC TRANS programa TALPHA.BIN se koristi u LIDAR.PC programu za simulaciju (Wilcox, 1995).



Sl. 8.15. Transmisioni spektar dobijen korišćenjem HITRAN-PC programa

## 8.5. PROGRAMI ZA SIMULACIJU RASEJANJA I ATENUACIJE

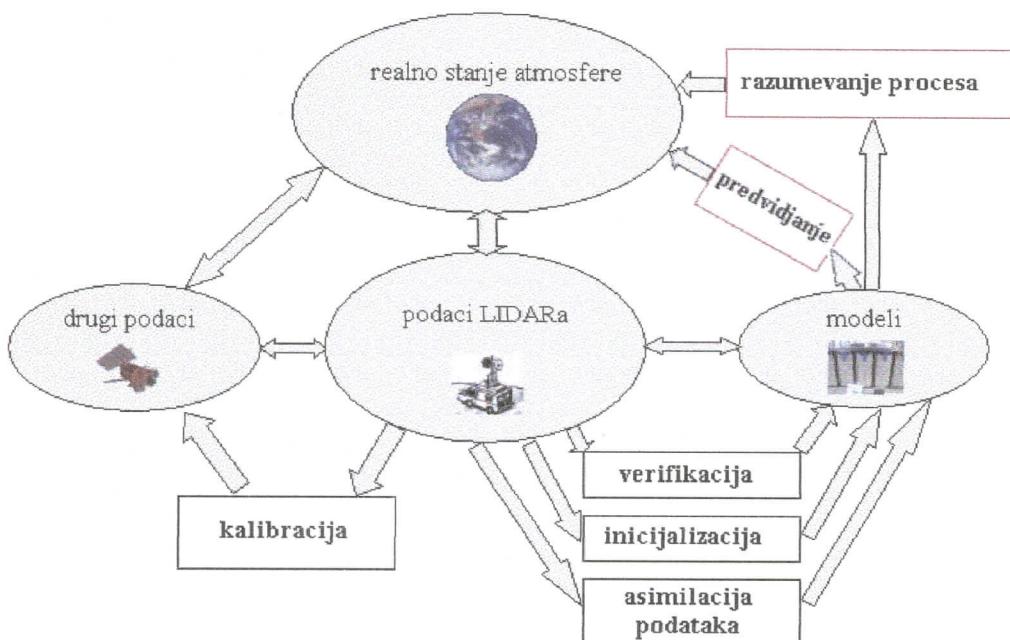
BETASPEC program je verzija BACKSCAT programa, koja koristi LOWTRAN/FASCODE modele aerosoli. Izlaz iz BETASPEC programa je grafički prikaz koeficijenta rasejanja, ( $\beta$ ), i atenuacionog koeficijenta aerosoli, ( $\alpha$ ) u funkciji talasne dužine i visine.  $\alpha$  i  $\beta$  koeficijenti u funkciji rastojanja i talasne dužine (talasne dužine rada CO<sub>2</sub> lasera) za Tropsku atmosferu prikazani su na slici 8.16. Izlazni fajl BACKSCAT.BIN se koristi u LIDAR-PC programu.



Sl. 8.16. Beta i alfa koeficijenti u funkciji visine i talasne dužine za Tropsku atmosferu

## 8.6. KOMPJUTERSKA SIMULACIJA LIDARA

O lidarskim sistemima i njihovoj ulozi u ispitivanju atmosfere bilo je reči u prethodnom tekstu (§ 4). Prikazani su i neki podaci dobijeni lidarskim metodom. Za lakšu analizu ovih podataka i ispitivanje sposobnosti novih lidarskih sistema koji će se primeniti u atmosferskim istraživanjima, razvijeni su različiti modeli za lidarsku kompjutersku simulaciju. Većina ovih modela su kopjuterski kodovi napisani za specijalni dizajn hardvera (kao što je Doplerov lidar u helikopteru za izbegavanje sudara) ili za lidarski sistem sa fiksiranom talasnom dužinom. LIDAR-PC nije tog tipa, on je univerzalniji i šire korišćen program za lidarsku simulaciju. Pored LIDAR-PC programa, koriste se i BACKSCAT program i SAGDAM program. Uloga lidarskih sistema i lidarskih kompjuterskih simulacija u atmosferskim istraživanjima data je na sl. 8.17.

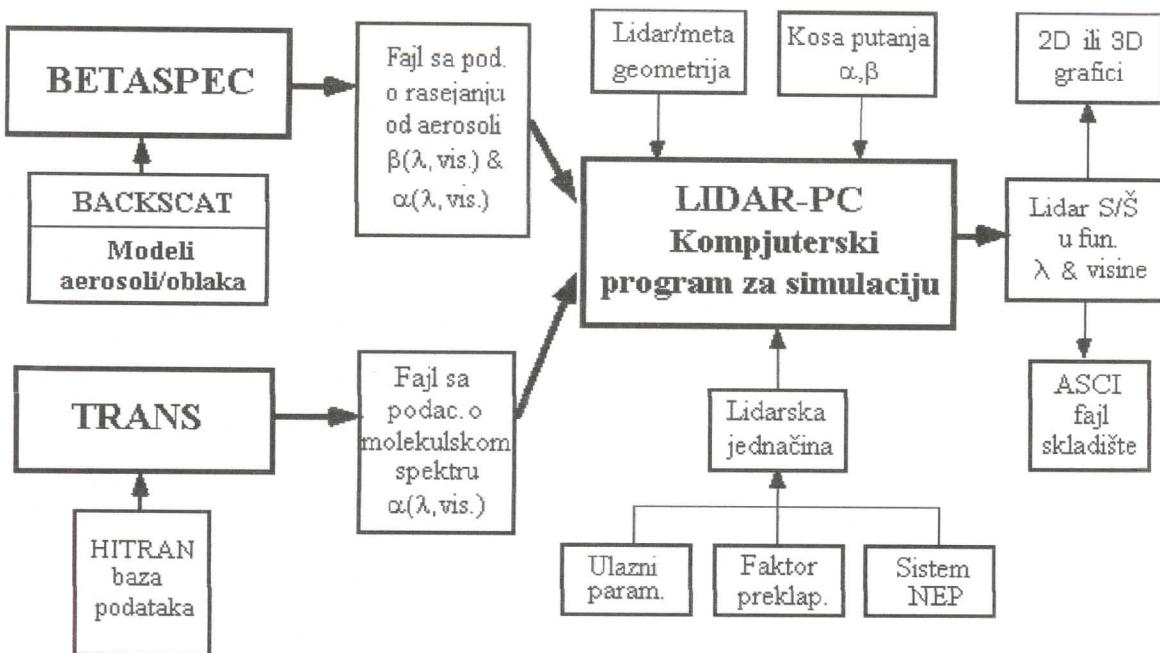


Sl. 8.17. Uloga LIDAR-a i modela u atmosferskim istraživanjima

LIDAR-PC kompjuterski program se koristi da simulira i modelira lidarsku jednačinu za impulsni laserski ili radarski sistem za primene na teške mete i atmosfersko rasejanje od aerosoli. Operacija LIDAR-PC i njegova interakcija sa različitim programima prikazana je na slici 8.18.

Ovaj program dopušta korisniku da odredi ulazne parametre laserskog radarskog ili lidarskog sistema (talasnu dužinu lasera, intenzitet po impulsu, dijametar teleskopa, itd.), što bi u našem slučaju bili parametri CO<sub>2</sub> lidarskog sistema. Korisnik unosi attenuacioni koeficijent i koeficijent rasejanja od aerosoli ili koristi modele iz BACKSCAT programa za unos ovih koeficijenata. Korisnik, takođe, unosi visoko rezoluciona molekularna računanja transmisije atmosfere korišćenjem HITRAN-PC TRANS programa. Lidar-PC dozvoljava korisniku da unese fajlove sa eksperimentalnim lidarskim podacima koji se onda mogu poređiti sa računatim vrednostima. Generalno, simulacije se veoma dobro slažu sa eksperimentalnim

vrednostima. Sve ove podatke koji su potrebni za izračunavanja očekivanih lidarskih povratnih signala u funkciji rastojanja unosimo u LIDAR-PC "radni papir" (sl. 8.19).



Sl. 8.18. Blok dijagram rada LIDAR-PC i njegove interakcije sa drugim programima

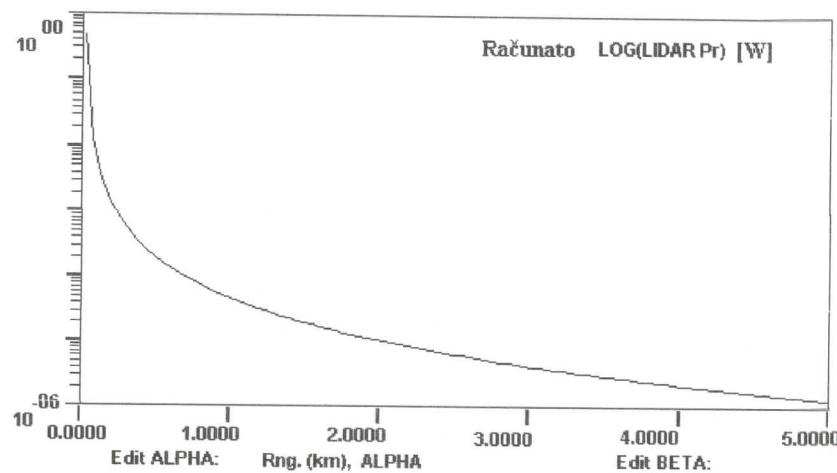
#### Basic LIDAR Equation:

$$P_{ret.}(r) = \frac{P_{trans.} \cdot F(r) \cdot A \cdot K \cdot \rho \cdot e^{-2 \int_0^r \alpha_T(r') dr'}}{\pi \cdot r^2}$$

$E$ = Pulse Energy [Joules] =	<input type="text"/>	$R_{max}$ = Max Range [km] =	<input type="text"/>
$\tau$ = Pulse Duration [ns]	<input type="text"/>	$R_{min}$ = Closest Range [km] =	<input type="text"/>
$P_t$ = Power Transmitted [Watts] =	<input type="text"/>	$Alt$ = Height Of LIDAR Sensor [km]	<input type="text"/>
$\Delta r$ = Range Resolution [m] =	<input type="text"/>	Number Of Data Points For LIDAR Signal Calculation =	<input type="text"/>
$\rho$ = Hard Target Reflectivity =	<input type="text"/>	$\alpha_m$ = HITRAN/TRANS Mol Spectra File: mol	<input type="text"/>
$D$ = Telescope Diam [cm] = Note: $A = \pi \cdot D^2 / 4$	<input type="text"/>	$\beta, \alpha_a$ = BACKSCAT/BETASPEC Aerosol File: aer	<input type="text"/>
$K$ = Optical Efficientcy =	<input type="text"/>	Horizontal Path Values:	
$\lambda$ = Laser Wavelength [ $\mu$ m] =	<input type="text"/>	Total Abs. Coeff., Alpha (km-1) =	<input type="text"/>
NEP = Noise Power [Watts]	<input type="text"/>	Total Backscatter Coeff., Beta (m-1sr-1) =	<input type="text"/>
$F(r)$ = Overlap Factor [0 to 1], ON / OFF: <input type="checkbox"/>			<input type="button" value="Recalc"/> <input type="button" value="Rescale"/>

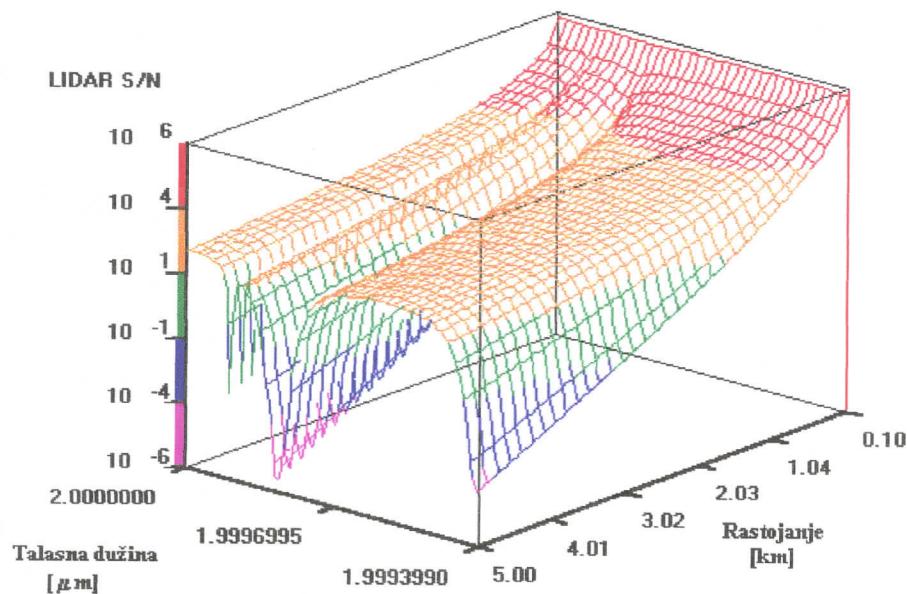
Sl. 8.19. Radni papir LIDAR-PC programa

Primer računanja LIDAR-PC programom dat je na slici 8.20.



Sl. 8.20. Rezultat računanja u LIDAR-PC programu

U ovom programu mogu se vršiti računanja za više talasnih dužina. Tada dobijamo 3-D atmosferske spekture u funkciji talasne dužine i visine (sl. 8.21). Ovaj tip računanja se koristi za modeliranje DIAL sistema.



Sl. 8.21. Višetalasna LIDAR-PC računanja odnosa signal/buka, (S/N), za aerosol lidar

## 9. ZAKLJUČAK

Problemi globalnog zagađenja zaokupljuju pažnju ljudi, prvenstveno zbog "nestajanja" stratosferskog ozona, a i zbog povećane količine gasova staklene bašte. Može doći do katastrofalnih posledica ako se ne spreči povećana emisija ovih gasova i nastanak hlorofluorokarbona koji uništavaju ozon. Ne treba zanemariti ni "značaj" zagađenja na lokalnom nivou jer ono doprinosi zagađenju širih razmara i štetno deluje na ljudsko zdravlje. Zato treba uložiti sve napore da se ovaj problem reši i da se zagađenje svede na minimum. Za zaštitu životne sredine razvijeni su različiti programi, a značajan korak u ovim programima je detekcija i merenje polutanata.

Analiza i detekcija polutanata zasnovana na primeni laserskih sistema omogućuje brza, *in situ*, i u mnogim slučajevima nedestruktivna merenja. Za merenja se primenjuju različite šeme za ozračivanje uzorka direktno, ili uzorka koji su na neki način prethodno pripremljeni. Zahvaljujući jedinstvenim osobinama laserskog zračenja (koherentnost, intenzitet, usmerenost, monohromatičnost), moguća su praćenja zagađenja u nepristupačnim oblastima, u oblastima gde su druge analitičke metode komplikovane za pripremu, kao i u slučajevima kada se ispitivani uzorci nalaze udaljeni nekoliko kilometara od detektorskih sistema.

Primenu u detekciji polutanata našao je veliki broj laserskih sistema zasnovanih na različitim tipovima lasera (Nd:YAG, CO<sub>2</sub>, QC laser,...). U ovom radu razmatrana su istraživanja u IC oblasti spektra (100–3800 cm<sup>-1</sup>) i uloga CO<sub>2</sub> lasera u tim istraživanjima. Talasne dužine ovog lasera (9–11 μm) su pogodne za primenu u merenjima polutanata jer veliki deo hemijskih supstanci ima karakterističnu apsorpciju upravo na tim talasnim dužinama. Uz pomoć nelinearnih kristala (AgGaSe<sub>2</sub>–ZnGeP<sub>2</sub>) dobiju se i manje talasne dužine CO<sub>2</sub> lasera (3.1–3.6 μm), što proširuje korišćenje CO<sub>2</sub> laserskog zračenja.

Pored primena različitih tipova lasera, postoji i velika raznolikost metoda laserske spektroskopije koje se koriste u detekciji i analizi polutanata. Savremene i rutinske metode laserske dijagnostike i analize, kao što su laserska fotoakustička spektroskopija, LIDAR-ska i DIAL-ska merenja, ovde su detaljnije prikazane. Sem toga, ukratko su opisane i osnove drugih laserskih spektroskopskih metoda (cavity ring down spektroskopija, laserom izazvana fluorescencija, multifotonska spektroskopija,...).

Prostiranje IC laserskog zračenja kroz atmosferu razmatrano je korišćenjem različitih programa za simulacije. Poseban značaj dat je transmisiji i radijaciji atmosfere u kojoj se nalazi vodena para i ozon zbog njihove osobine da dobro apsorbuju IC zračenje. Za ove potrebe razmatrani su različiti programi (LBLRTM, PcModWin, PcLnWin, HITRAN-PC). Dat je i prikaz BETASPEC programa, koji služi za simulaciju atenuacije i rasejanja od aerosoli. Ukratko je opisan i program za simulaciju rada lidara (LIDAR-PC). Kompjutersko simuliranje je bitno u atmosferskim istraživanjima jer služi za lakšu interpretaciju eksperimentalnih rezultata i ispitivanje mogućnosti novih laserskih sistema.

## LITERATURA

1. Anderson G.P., Kneizys F.X., Chetwyng J.H., Wang J., HokeL M.L., Rothman S., Kimball L.M., McClatchey R.A., FASCODE/MODTRAN/LOWTRAN: Past/Present/Future, PL/Geophysics Directorate, Hanscom AFB, MA 01731 E.P. Shettle, Naval Research Laboratory, Washington, D.C. 20375S.A. Clough, W.O. Gallery, Atmospheric and Environmental Research, Cambridge, MAL.W. Abreu, ONTAR Corp., North Andover, MA 01845J.E.A. Selby, Northrop-Grumman Aerospace Corp., Bethpage, NY, 1994
2. Boesl U., Laser mass spectrometry for environmental and industrial chemical trace analysis, Journal of mass spectrometry, J. Mass Spectrom. **35**, 289-304, 2000.
3. Brockman National Aeronautics and Space Administration. Langley Research Center, Hampton, VA
4. Brockman, P., Hess, R. V., Slaton, L. D., Bair, C. H., DIAL with heterodyne detection including speckle noise: Aircraft/shuttle measurements of O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, and NH<sub>3</sub> with pulsed tunable CO<sub>2</sub> lasers, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hanpton, VA, 1980.
5. Brumley W.C. and Gerlach L.C., Capillary Electrophoresis/Laser-induced Fluorescence in Groundwater Migration Determination, Am. Lab., **31**, 45-49, 1999.
6. Bruns M., DOAS measurements of stratospheric species, April, 2002.
7. Curl R.F., and Tittel K.F., Tunable laser spectroscopy, Department of Chemistry and Electrical and Computer Engineering, Rice Quantum Institute, Rice University, Houston,Tx 77005, USA.
8. Englisch W., Wieseman W., Boscher J., Rother M., Laser remote sensing measurements of atmospheric species and natural target reflectivities, Springer Ser. Opt. Sci. **39**, 38-43, 1983.
9. Fioccio, G., and Smullin, L. D., (1963), Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60-140km) by optical radars, Nature **199**, 1275-1276.
10. Force, N. P., Killinger, D. K., Defeo, W. E., Menyik, N., Laser remote sensing of atmospheric ammonia using a CO<sub>2</sub> lidar system, Appl. Opt. **24**, 2837-2841, 1985.
11. Garifo L., Lidar measures pollutants over air, land, and sea, Laser Focus World, august 1994.
12. Grant W. B., Laser remote sensing techniques, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1987.
13. Grant, W.B., Effect of differential special reflectance of DIAL measurement using topographic targets, Appl. Opt. **21**, 2390-2394, 1982.
14. Hecht, J., Understanding lasers, 1993.
15. Killinger, D. K., Menyik, N., Defeo, W.E., Remote sensing of CO<sub>2</sub> using frequency-doubled CO<sub>2</sub> laser radiation, Appl. Opt. **36**, 402-405, 1980.
16. Kirby B.J., Infrared PLIF Imaging diagnostic for visualization of CO and CO<sub>2</sub>, Mechanical Engineering Department, Stenford University, 1996-2000.

17. McCormic M. P., Swisser T. J., Fuller W. H., Hunt W. H., Osborn M. T., Airborne and ground-based lidar measurements of the El Chichon stratospheric aerosol from 90°N to 56°S, *Geofis. Int.* 23-2, 187, 1984.
18. McCormick M. P., Lidar measurements of Mt. St. Helens effluents, *Opt. Eng.* **21**, 340-342, 1982.
19. Measures, R. M., (1984), *Laser remote sensing: Fundamentals and application*, Wiley, New York.
20. Measures, R. M., (1988), *Laser remote chemical analysis*, Wiley, New York.
21. Menyik, N., Killinger, D. K., Defeo, W. E., Remote sensing of NO using a differential absorption lidar, *Appl. Opt.* **19**, 3282-3286, 1980.
22. Osborn M. T., Winker D. M., Woods D. C., DeCoursey R. J., Lidar observations of the Pinatubo volcanic cloud over Hampton, Virginia, *Nasa Conf. Publ.* 3158, 1992.
23. Paul J.B., Scherer J.J., O'Keefe A., and Saykally R.J., Cavity ringdown measures trace concentrations, *Laser Focus World*, March, 1997.
24. Robinson J. P., Fluorescence and Fluorescence Probes, Purdue University, Department of Basic Medical Sciences, School of Veterinary Medicine, 2000.
25. Rothe, K. W., Brinkmann, U., Walther, H. (1974), Application of tunable dye lasers to air pollution detection: Measurements of atmospheric NO<sub>2</sub> concentrations by differential absorption, *Appl. Opt.* **3**, 115-119.
26. Shumate M. S., Lundqvist S., Persson U., Eng. S. T., Differential reflectance of natural and man-made materials at CO<sub>2</sub> laser wavelengths, *Appl. Opt.* **21**, 2386-2389, 1982.
27. Sica R., Exploring the atmosphere with lidars, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, 1999.
28. Sigrist, W. M., (1994) Air monitoring by spectroscopic techniques, Infrared Physics Laboratory, Institute of Quantum Electronics, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.
29. Smith, S. D., *Infrared lasers and their application*, Optics and laser technology, 1980.
30. Solarz, W. R., Paisner, A. J., Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, Radziemski, J. L., Department of Physics, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, 1987.
31. Srećković M., Pippi I., Rakočević N., Savremena primena lidara, 1. Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2. Istituto di ricerca del elettromagnetiche onde, Firenza, Italija, 3. Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2004.
32. Svanberg S., Differential absorption lidar (DIAL), Department of Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1994.
33. Terzić M., Jovanović-Kurepa J., Linearna fotoakustična spektroskopija-metodologija i ispitivanje molekula, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, 2000
34. Terzić M., Markushev D. D., Rabasović M., Multifotonska spektroskopija-mogućnosti i primene, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, SCG, Institut za fiziku, Beograd, SCG, 2004,

35. Terzić, M., Kurepa, M. (1996), Uvod u fiziku atoma i molekula, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet.
36. Tittel, K. F., Richter D., and Fried A., Mid-Infrared Laser Applications in Spectroscopy. Rice Quantum Institute, Rice University, Houston, USA, The National Center for Atmospheric Research, USA
37. Urban, W. (1994), Physics and spectroscopic application of carbon monoxide lasers, a review, Institut für Angewandte Physik der Universität Bonn, Wegelerstr, Bonn, Germany.
38. Wilcox, W. E., Jr, (1995, 2000), Development and experimental verification af a high resolution, tunable lidar computer simulation model for atmospheric laser remote sensing, University of South Florida.
39. Rothman, L.S., Snreoder, J., ARM Enhancements to HITRAN, Atomic and molekular division, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, Massachusetts; Ontar corporation, North Andover, Massachusetts.



## BIOGRAFIJA AUTORA



Šarančić Dragana, rođena 25.04.1979. god. u Prijepolju. Osnovnu školu i Gimnaziju "Branko Radičević", prirodno-matematički smer, završila sam u Prijepolju 1998. god. Iste godine upisala sam Prirodno-matematički fakultet, odsek fizika, smer prof. fizike u Novom Sadu. Apsolvirala sam 2002. god. U toku studija radila sam nekoliko poslova koji nemaju veze ni sa nastavom ni sa naukom. Kratak vremenski period bila sam zaposlena u osnovnoj školi u Kaću. Trenutno živim u Kaću.

---

Dragana Šarančić

**UNIVERZITET U NOVOM SADU**  
**PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET**  
**KJUĆNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Diplomski rad

VR

Autor: Šarančić Dragana; br. dosijea 224/98

AU

Mentor: Prof. Dr Mira Terzić

MN

Naslov rada: Primena CO<sub>2</sub> lasera u zaštiti čovekove okoline

NR

Jezik publikacije: Srpski, latinica

JP

Jezik izvoda: sr/en

JI

Zemlja publikovanja: Srbija i Crna Gora

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2004

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: PMF, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada: broj poglavlja-9, broj strana-61, priloga-0, slika-52, tabela-5

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Fizika lasera, optika,

ND

Predmetna određnica/ klučne reči

CO<sub>2</sub> laser, Lidar, Dial, fotoakustička spektroskopija, simulacije,...

PO

UDK

Čuva se: Biblioteka Instituta za fiziku, PMF Novi Sad

ČU

Važna napomena: Nema

VN

Izvod: Cilj rada je da se sažeto prikaže savremena primena lasera u merenju zagadjenja čovekove okoline, sa posebnim osvrtom na primenu CO<sub>2</sub> lasera. Razmotren je Lidar, Dial, fotoakustička spektroskopija. Uradjene su komjuterske simulacije prostiranja laserskog zračenja kroz atmosferu.

IZ

Datum prihvatanja teme od strana NN veća: 28.06.2004.

DP

Datum odbrane: 16.08.2004.

DO

Članovi komisije:

–Predsednik: Prof. dr Svetlana Lukić, redovan profesor PMF-a u Novom Sadu

–član : Prof. dr Mira Terzić, redovan profesor PMF-a u Novom Sadu

–član: Prof. dr Jaroslav Slivka, redovan profesor PMF-a u Novom Sadu

**UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF NATURAL SCIENCE & MATHEMATIC  
KEY WORD DOCUMENTATION**

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monographic document

DT

Type of record

TR

Contens code: Final paper

CC

Author: Šarančić Dragana

AU

Mentor: Prof. dr Mira Terzić

MN

**Title: Application of CO<sub>2</sub> lasers in protection of human environment**

TI

**Language of text: Serbian**

LT

**Language of abstract: Serb/english**

LA

**County of publication: Serbia & Montenegro**

CP

**Locality of publication: Vojvodina**

LP

**Publication year: 2004**

PY

**Publisher: Authors reprint**

PU

**Publ. place: Facultz of Natural Science and Mathematic, Novi Sad**

PP

**Physical description: chapters–9, page–61, tables–5, graphs–52, additional list–0**

PD

**Scientific field: Physics**

SF

**Scientific discipline: Physics of laser, optics**

SD

**Subject / key words: CO<sub>2</sub> laser, Lidar, Dial, photoacoustic spectroscopy, simulation,...**

SKW

**UC:**

**Holding data: -Library of Faculty of Natural Science and Mathematic, Department of physics, Novi Sad**

**HD**

**Note: none**

**N**

**Abstract: ??**

**AB**

**Accepted by the Scientific Board on 28. 06. 2004**

**ASb**

**Defended: 16. 08. 2004.**

**DE**

**Thesis defend board:**

- President: Prof. dr Svetlana Lukić, full professor of Faculty of Science, Novi Sad**
- Member: Prof. dr Mira Terzić, full professor of Faculty of Science, Novi Sad**
- Member: Prof. dr Jaroslav Slivka, full professor of Faculty of Science, Novi Sad**

## **GREŠKE U ŠTAMPI**

<b>Greške</b>	<b>Ispравке</b>	
DIAL	DIAL (§ 5)	(str. 5, § 5, red 3.)
FA (§ 5)	FA (§ 6)	(str. 5, § 6, red 1.)
ostale metode (§ 6)	ostale metode (§ 7)	(str. 5, § 7, red 1.)
simulacije (§ 7)	simulacije (§ 8)	(str. 6, red 1.)
omogući	omoguće	(str. 7, § 2, red 8.)
drugot	drugo	(str. 7, § 2, red 9.)
§ 4.3	§ 5.1	(str. 8, red 9.)
§ 5	§ 6	(str. 8, red 11.)
laserko	lasersko	(str. 8, red 10.)
drudog	drugog	(str. 9, red 4.)
amplitude	amplitude	(str. 12, red 1.)
do do	do	(str. 12, § poslednji, red 5.)
CO <sub>2</sub> lasera	CO <sub>2</sub> lasera	(str. 16, red 3.)
rotacionalnih	rotacionih	(str. 16, red 4.)
Liniju	liniju	(str. 17, § 3.5.3, red 1.)
rstoanju	rastojanju	(str. 21, drugi red od dole)
ekcitacioni	eksitacioni	(str. 21, drugi red od dole)
ekstinciji	ekstinkcije	(str. 22, red 3.)
prisusva	prisustva	(str. 22, § 2, red 7.)
fiksini	fiksni	(str. 23, red 5.)
koristi	koristiti	(str. 25, red 1.)
ranges	područje	(str. 26, § 2, red 20.)
merli	merili	(str. 29, red 5.)
u tavisnosti	u zavisnosti	(str. 29, § 3, red 10.)
mernjima	merenjima	(str. 30, red 7.)
heterodzne	heterodyne	(str. 30, § 2, red 4.)
translatororu	translatornu	(str. 32, red 3.)
jonizazije	jonizacije	(str. 33, red 1.)
§ 5	§ 6	(str. 36, red 3.)
utorka	uzorka	(str. 37, red 1.)
prosesi	procesi	(str. 38, red 1.)
intrnzivno	intenzivno	(str. 38, red 7.)
tako da se	tako da	(str. 38, red 7.)
rane	razne	(str. 38, § 3, red 1.)
transmisini	transmisioni	(str. 38, § 3, red 3.)
spektroskopiju	spektroskopije	(str. 40, § 6, red 5.)
Grafičko	grafičko	(str. 43, § 4, red 1.)
spekra	spektra	(str. 44, red 3.)
transmisione spektre	transmisioni spektri	(str. 46, red 10.)
stransmisioni	transmisioni	(str. 49, red 2.)
jednačine ove jednačine	ove jednačine	(str. 49, § 3, red 1.)
para	pare	(str. 51, slika 8.12)
kopjuterski	kompjuterski	(str. 52, § 4, red 1.)
Topsku	Tropsku	(str. 53, § 2, red 5.)