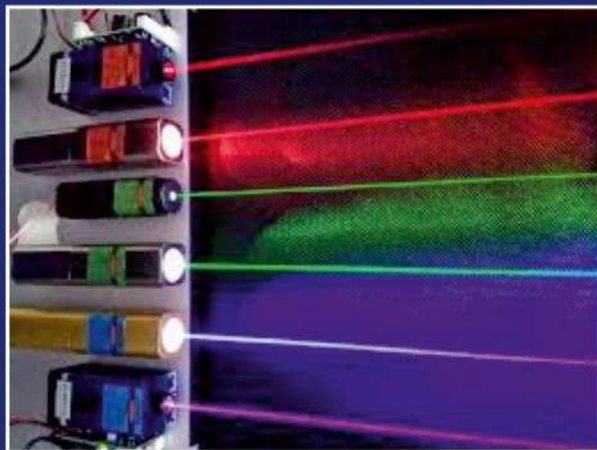


R.C. Qasimova,
G.Ə. Səfərova

QAZ OPTİK KVANT GENERATORLAR



**R.C. Qasımova,
G.Ə. Səfərova**

***QAZ OPTİK
KVANT GENERATORLAR***

Dərslik

Bakı 2019

Elmi redaktor:

Maarif Əli oğlu Cəfərov

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor

Kitaba rəy verənlər:

Zirəddin Yaqub oğlu Sadiqov

fizika üzrə elmlər doktoru, professor

Tərlan Xanbaba oğlu Hüseynov

fizika üzrə elmlər doktoru, dosent

R.C. Qasımova, G.Ə. Səfərova

Qaz optik kvant generatorlar dərslik. Bakı, 2019, -170 səh.

Bu kitab müxtəlif növ qaz lazerlərinə, onlarda həyəcənlaşma mexanizmlərin fizikasına, lazerlərin maraqlı xarakteristikalarına və tətbiqinə həsr olunub. Kitabın birinci hissəsində qaz lazerlərinin işçi maddələrinə qoyulan tələblər, atomların enerji səvəyyələri, qeyri-elastiki qarşılıqlı təsir, doldurma növləri, qazboşalmalarındakı fiziki proseslər araşdırılır. İkinci hissədə mövcud qaz lazerlərində invers məskunlaşmanın yaradılması metodları, FİƏ-nin hesablanması, lazerin quruluşu, alınan koherent şüanın xarakteristikaları və spektrləri nəzərdən keçirilir. Kitabın sonuncu hissəsində əsas diqqət lazerlərin tətbiqi məsələlərinə ayrılıb. Bu dərslikdə tibbdə lazerlərin tətbiqinə xüsusi diqqət ayrılıbmışdır.

Kitab müxtəlif magistr proqramları üzrə təhsil alan magistrantlar üçün nəzərdə tutulmuşdur. Məqsəd - gələcək fiziklərə kvant elektronikasının fiziki əsasları, fəal lazer mühitinin yaradılması metodları, optik rezonatorlar nəzəriyyəsinin əsasları, qaz lazerlərin xüsusiyyətləri, lazerlərin tətbiqi və onların inkişaf tendensiyaları haqda zəruri minimum məlumatların verilməsidir. Bu kursun mənimsənilməsi eksperimentator–fiziklərə mövcud lazerlərin praktik fəaliyyətdə tətbiqinə nəzəriyyəçi–fiziklərə isə lazerlərin işlənməsinin əsas qanunauyğunluqlarını anlamağa imkan verəcəkdir.

DOI: <https://doi.org/10.36719/0844/2025>

R.C. Qasımova, G.Ə. Səfərova, 2019

Ön söz

Lazerlər (kvant gücləndiriciləri və optik diapazon generatorları) kvant elektronikasının ən vacib və geniş tətbiq olunan cihazlarıdır. Lazerlər intensiv optik şüalanmanın birinci və hələ ki, yeganə mənbələridir. Optik şüalanma koherentliyin, monoxromatikliyin və istiqamətlənmənin yüksək dərəcəsinə malikdir. İlk lazer 1960-cı ildə T. Meyman tərəfindən yaqutun əsasında yaradılmışdır. Həmin ilin sonunda helium və neon qazlarının qarışığında ilk qaz lazeri Ə. Cavan tərəfindən 1960-cı ildə yaradılmışdır. 1962-ci ildə qalliumun arsenidində ilk yarımkeçirici lazer və 1966-cı ildə üzvi boyada birinci maye lazer hazırlanmışdır.

Ötən illər ərzində lazerlərin çoxlu yeni növləri yaranmışdır. Onlarda müxtəlif fəal maddələr istifadə edilir və demək olar ki, lazerlərin köməyi ilə bütün optik diapazonda koherent şüalanma təmin olunur.

İstifadə olunan fəal maddənin növündən asılı olaraq müxtəlif növ lazerlər vardır: qaz, bərk cisim (bərk dielektrlərdə), maye və yarımkeçirici lazerlər. Baxmayaraq ki, fəal maddənin aqreqat halına görə yarımkeçirici lazerlər formal olaraq bərk cisim lazerlərinə aid etmək olar, lakin yarımkeçirici lazerlərdə baş verən proseslərin xassələri, həmçinin, onların layihələşməsinin, hazırlanmasının və istifadəsinin xüsusiyyətləri bu cihazları ayrıca qrupa daxil etməyi tələb edir.

Qaz lazerlərinin həyəcənlanması üçün çox saylı üsullar və doldurulmanın mənbələri - qaz boşalmasından, elektron və ion dəstələrindən, qaz dinamik üsuldan, kimyəvi reaksiyalardan və s. istifadə olunur. Bu növ lazerlər geniş spektral diapazonda fəal mühitin şəffaflığı və onun yüksək bircinsliliyi ilə fərqlənilirlər ki, bu da şüalanmanın monoxromatikliyini təmin edir.

Qaz mühitində invers məskunlaşmasının yaradılmasının üstünlüyü qazlardakı relaksasiya proseslərinin yavaş getməsi ilə sıx bağlıdır və bundan başqa, qazlarda qeyri-elastiki toqquşma zamanı həyəcənlanmış molekulardan digərlərinə enerji ötürülməsi mümkündür. Bu, fəal mühitdə həyəcənlaşma enerjisinin toplanma funksiyasını və enerjinin lazım olan tezlikdə sonrakı şüalanma funksiyasını ayırmağa imkan verir.

Bildiyimiz kimi qaz lazerlərinin fəal maddəsi qaz aqrekat halında olur. Bu ola bilər ki, adi qazlar (normal şəraitlərdə qaz halında olan maddələr), müxtəlif maddələrin buxarları (məsələn, metalların) və qarışıqlar olsun. Qaz lazerlərində işçi keçidlər kimi neytral və ya ionlaşmış atomların, molekulaların elektron rəqsi və fırlanma enerji səviyyələri arasındakı tamamilə müxtəlif şəkili keçidlər istifadə oluna bilər. Buna görə də qaz lazerlər 6000-dən çox müxtəlif keçidlərdə, spektrin çox geniş diapazonunda –ultrabənövşəyi oblastdan submillimetr oblasta kimi şüalanmaya malikdir.

Fəal mühiti qaz və ya qaz qarışığı olan lazerlər elm və texnikanın müxtəlif sahələrində daha geniş tətbiq olunurlar. İlk qaz lazerində generasiya üçün yaxın infraqırmızı (İQ) oblastında neon və helium qarışığı istifadə olunmuşdur. Sonradan neon və helium qarışığında spektrin görünən hissəsində generasiya həyata keçirilmişdir: $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ (0.6328 mkm). Hal-hazırda qaz lazerlərinin köməyi ilə

tezliklərin geniş diapazonu əhatə olunur, bu diapazona UB və İQ oblastları daxildir. Çoxlu sayda müxtəlif generatorlar, həm az güclü (çıxış gücü ≤ 1 mVt), həm də böyük çıxış gücünə malik (fasiləsiz rejimdə 104 Vt-a qədər və daha çox), işlənilib hazırlanmışdır.

Lazerin işçi maddələri kimi qazların əsas üstünlüyü onların yüksək optik bircinsliliyidir. Qazın sıxlığı bərk cisimlərin sıxlığından əhəmiyyətli dərəcədə kiçikdir. Buna görə də qazlarda işığın səpilməsi bir neçə tərtib azdır. Eyni zamanda qazlarda hissəciklərin konsentrasiyasının böyük qradiyentləri olmaz, belə ki, onlar sərbəstdirlər və fəzada hərəkət edə bilirlər. Qazların optik bircinsliliyi güzgülər arasında böyük məsafəyə malik olan açıq rezonatorların lazerlərdə istifadə olunmasına şərait yaradır, bu isə şüalanmanın yüksək dərəcədə istiqamətlənməsinə və onun monoxromatikliyinə təsir edir.

Qazların ikinci üstünlüyü, həmçinin hissəciklərin kiçik konsentrasiyası ilə də əlaqəlidir. Belə ki, qazda hissəciklər arasındakı qarşılıqlı təsir azdır, onda qazların enerji səviyyələri atom və molekulaların enerji səviyyələrindən (onların istilik hərəkətini nəzərə almaqla) praktiki olaraq fərqlənmirlər. Bu, qaz lazerlərində mümkün olan enerji səviyyələri arasında keçidlərin olmasını deməyə imkan verir. Yuxarıda deyilən fikirlərlə yanaşı qazda olan hissəciklərin kiçik konsentrasiyası qaz lazerlərinin əsas çatışmayan cəhətdir. Bütün qaz lazerləri kiçik gücləndirmə əmsalına malikdirlər.

Müasir elmdə, texnikada, tibbdə, biologiyada və insan fəaliyyətinin digər sahələrində lazerlər öz geniş tətbiqini tapmışdır. Bununla əlaqədar olaraq sizlərə qaz lazerlərinə və onların iş mexanizmlərinə həsr olunan və özündə müxtəlif qaz lazerləri və ya onların ayrı-ayrı növləri haqqında informasiya daşıyan elmi-tədris vəsaiti təqdim olunur.

GİRİŞ

Qazların xarakterik cəhəti hissəciklər arasındakı enerji mübadiləsi proseslərinin müxtəlifliyi, qaz qarışığının tərkibini, onun sıxlığını və qaz boşalmasının şərtlərini dəyişmək yolu ilə bu proseslərdən bəzilərini idarə etmək imkanının olmasıdır.

Qaz boşalması plazmada enerji mübadiləsinin bütün prosesləri hissəciklərin (elektron, ion, atom və molekulların) öz aralarındakı qarşılıqlı təsiri və ya onların elektromaqnit sahəsi ilə qarşılıqlı təsiri ilə yaranan bilər. Məlum olduğu kimi, enerji mübadiləsi prosesi üç elementar aktla: elektromaqnit sahəsinin kvantının–fotonun spontan buraxılması, məcburi buraxılması və udulması ilə təsvir oluna bilər. Qaz hissəciklərinin öz aralarındakı qarşılıqlı təsiri zamanı yaranan enerji mübadiləsinin elementar aktları iki yerə bölünür: elastiki və qeyri-elastiki.

İki hissəciyin elastiki qarşılıqlı təsiri (elastiki toqquşma) zamanı onların yekun kinetik enerjisi dəyişmir. Proseslər mütləq elastiki cisimlərin qarşılıqlı təsir qanunları üzrə baş verirlər, buradan isə “elastiki toqquşma” termini yaranmışdır. Qeyri-elastiki qarşılıqlı təsir (qeyri-elastiki toqquşma) zamanı bir-biri ilə qarşılıqlı təsirdə olan hissəciklərin yekun kinetik enerjisi hissəciklərdən birinin daxili (potensial) enerjisinin dəyişilməsi hesabına dəyişilir.

Əgər sistemin kinetik enerjisi azalırsa və bunun nəticəsində hissəciklərdən birinin daxili enerjisi artarsa, onda belə proses birinci növ qeyri-elastiki qarşılıqlı təsir adlanır.

Əksinə, əgər atomun, ionun və ya molekulun daxili enerjisinin azalması hesabına kinetik enerji artarsa, onda belə proses ikinci növ qeyri-elastiki qarşılıqlı təsir adlanır. Qarşılıqlı təsir proseslərindən hər biri öz ehtimalı və ya qarşılıqlı təsirin effektiv kəsiyi ilə xarakterizə olunur. Analoji şəkildə digər proseslər üçün də, eyni zamanda qaz boşalmanın plazmasında elastiki və qeyri-elastiki toqquşmalar üçün qarşılıqlı təsirin effektiv kəsikləri daxil edilir.

Bir-birinə nəzərən sürətlə hərəkət edən iki hissəciklərinin qarşılıqlı təsirinin effektiv kəsiyi məlum olarsa, onda bu terminin mənasını onun adından və ölçüsündən asanlıqla başa düşmək olar. Elastiki qarşılıqlı təsir zamanı hissəciklər və onların sürəti əhəmiyyət kəsb edir. Bu nöqteyi-nəzərdən, qaz boşalması plazmasında hissəciklərin iki qrupunu ayırmaq olar: yüngül (elektronlar) və ağır (atomlar, molekulalar, ionlar). Enerji və impuls mübadiləsinin hesabına əmələ gələn elastiki qarşılıqlı təsirlərin nəticəsində stasionar rejimdə eyni hissəciklər arasında onların sürətlərinə (enerjilərinə) görə müəyyən izotrop paylanma yaranır.

Qabın xarakterik ölçüləri, baxılan halda, qaz boşalma borusunun diametri hissəciklərin sərbəst qaçışının uzunluğundan əhəmiyyətli dərəcədə böyük olarsa, onda hissəciklərin sürətə görə paylanmasının yeganə qanunu haqqında danışmaq olar. Belə rejim diffuziya rejimi adlanır. Əgər diffuziya rejimində elastiki qarşılıqlı təsirlər üstünlük təşkil edərsə, onda orada hissəciklərin sürətə (enerjiyə) görə Maksvell paylanması qurulur.

Qaz boşalması olmadıqda bütün hissəciklərin kinetik enerjiləri öz aralarında bərabərdir və yalnız ətraf mühitin temperaturu ilə təyin olunurlar. Qaz boşalmasında yüklü

hissəciklər elektrik sahəsində sürətlənirlər və öz kinetik enerjisini artırır. Elastiki qarşılıqlı təsirlərin hesabına yaranan bu əlavə enerji neytral hissəciklərə ötürülür. Buna görə də qaz boşalmasında hissəciklərin orta kinetik enerjisi artır ki, bu da temperaturun artmasına ekvivalentdir.

Hissəciklərin (elektron, ion, neytral atom və molekulların) hər bir qrupu üçün öz orta kinetik enerjisi və deməli, öz effektiv temperaturu ilə məxsusi kvazitarazlığı qurulur. Kiçik kütləyə və böyük yürüklüyə malik olan elektronlar elektrik sahəsində sürətlənirlər. Atomlarla elastiki toqquşma zamanı onlar kütlələrindəki böyük fərqi nəticəsində öz enerjilərini az dəyişirlər. İonlar isə, əksinə, kiçik yürüklüyə malikdirlər, neytral atom və molekullarla elastiki toqquşmalar zamanı enerjilərini aktiv şəkildə mübadilə edirlər. Buna görə də qaz boşalmasında elektronların effektiv temperaturu ağır hissəciklərin temperaturunu əhəmiyyətli dərəcədə ötüb keçir. Baxmayaraq ki, neytral hissəciklərin temperaturunu artırırıq, ionların temperaturu bu temperatura yaxın olur.

Elektronların orta kinetik enerjisini xarakterizə edən parametr kimi elektron temperatur qaz boşalmasının aşağıdakı parametrlərindən asılıdır:

- qazın təzyiqindən; təzyiq artdıqca sərbəst yükün uzunluğu azalır və həm də
- qazın ionizasiya enerjisindən.

Atomun potensialı nə qədər yüksək olarsa, adətən, bir o qədər də onun həyəcanlanmış vəziyyətləri yuxarıda yerləşir və birinci növ qeyri-elastiki toqquşmalar zamanı elektronlar öz enerjisini bir o qədər də az itirirlər. Elektronun kinetik enerjisi sahənin gərginliyinə və sərbəst qaçışın uzunluğuna mütənasibdir, buna görə də o, potensialın qradienti artdıqca

böyüyür. Bundan başqa, elektron temperatur boşalma borunun diametrindən (d) asılıdır, diametr azaldıqca o, artır. Bu onunla əlaqəlidir ki, d azaldıqca qazın ionizasiya dərəcəsi boşalma borunun divarları ilə ionların intensiv qarşılıqlı təsiri nəticəsində azalır.

Cərəyanın dəyişilməz qiymətində bu proses atomların ionizasiya prosesinin intensivliyinin artması ilə kompensasiya olmalıdır, bu isə böyük elektron temperaturu T_e olduqda mümkündür. Diametri 7 mm olan, 100 Pa təzyiq altında neonla doldurulmuş qaz boşalma borusunda elektron temperaturun tipik qiymətləri 50000 K, lakin həmin təzyiq altında heliumla doldurulmuş həmin boruda isə 70000 K tərtibinə malikdir.

Mövcud qaz lazer növlərindən qısa məlumat. Atom və ion qaz lazerlərinin şüalanması, məsələn He-Ne, Ar^+ və Kr^+ -lazerlər, adətən özlərində müxtəlif rəngli şüaları təşkil edir. Belə lazerlər, keçmişdə əsas lazer mənbəyi olaraq, bir çox sahələrdə kiçik FİƏ görə istifadədən çıxarılıb. Məlumat üçün Kr^+ -lazer şüasının gücü - yüzlərlə millivattın tərtibində; şüanın spektri yaxın UV $\lambda = 350$ nm-dən 676 nm-ə (qırmızı rəng) qədər uzanır. Eyni zamanda bir neçə spektral xətdə işləyərək, o "ağ lazer rəngini" şüalandıra bilər. Eyni növ atomlardan və ya ionlardan ibarət olan müxtəlif qazlar fəal mühit kimi işləyə bilərlər. Bu qazlar yaxın İQ və görünən diapazonda bir çox saysız-hesabsız dalğa uzunluqlarında generasiya edə bilərlər. Buna baxmayaraq, atom və ion lazerləri bu gün ixtisaslaşdırılmış tətbiqlərdə əsasən istifadə olunurlar. Müqayisə üçün lazerdiodlu doldurma ilə bərk cisimli lazerlərdə məhsuldarlıq yuxarı, onlar lazer rezonatorun kökləməsində daha sadə və etibarlıdır.

He-Ne lazerində neonun 3 şüalanan keçidləri mümkündür. Daha effektiv keçid dalğa uzunluğu 3,39 mkm və gücləndiricisi 20 dB/m olan keçiddir, orada generasiya sadə metal güzgüləri tətbiq etməklə əldə olunur. Dalğa uzunluğu 0,63 mkm olan keçid həmin yuxarı səviyyədən baş verir və cəmi 5%/m gücləndiriciyə malikdir. Orada generasiya yalnız xüsusi çoxlaylı interferensiyalı güzgülərin tətbiqi ilə mümkündür, bu güzgülər verilmiş tezlikdə yüksək əksətmə əmsalına malikdirlər. Dalğa uzunluğu 1,15 mkm olan keçidə 20%/m gücləndirici uyğundur, generasiya isə dielektrik güzgülərdə mümkündür.

Neon səviyyələrinin məskunlaşma inversiyası üçün iki şərtin ödənilməsi vacibdir: birincisi, yuxarı enerji halda helium atomlarının nisbi məskunlaşması yüksək olmalıdır; ikincisi, helium atomlarının sayı kifayət qədər böyük olmalıdır. Birinci şərtin ödənilməsinə heliumun yuxarı enerji səviyyələrinin metastabilliyi şərait yaradır. Buna əsaslanaraq, onu əldə etmək olar ki, heliumun həyəcanlanmış atomlarının neonun həyəcanlanmamış atomları ilə toqquşmalarının 1 san. ərzində sayı helium atomlarının əsas hala relaksasiya keçidlərinin eyni bir zaman aralığı ərzində sayından əhəmiyyətli dərəcədə artıq olsun. Bu isə neonun yuxarı səviyyələrinin məskunlaşmasının artımına şərait yaradır. İkinci şərtin yerinə yetirilməsi qaz boşalma boruya çoxlu miqdarda heliumun daxil edilməsilə əldə olunur. Adətən, helium və neonun parsial təzyiqlərinin nisbəti $7:1 \div 15:1$ intervalında dəyişir.

İon qaz lazerlərində yuxarı lazer səviyyəsi elektrik boşalmasında elektronlarla toqquşma zamanı dolur. Məlumdur ki, spektral xəttin eni ion temperaturu ilə təyin edilir. İonun

böyük atom çəkisinə və yüksək ion temperaturuna görə toqquşma genişlənməsi radiasiya genişlənməsindən kiçikdir. Buradan qeyri-bircins genişlənmə müşahidə olunur. Nəticədə, uzun rezonatorlu lazerlərdə $c/2L = 100$ MHS çoxtezlikli generasiya almaq olar.

Generasiyada iştirak edən keçidlərin növündən asılı olaraq **molekulyar lazerləri** üç sinfə bölürlər. Rəqsi-fırlanma keçidlərdəki lazerlər eyni bir (bir qayda olaraq, əsas) elektron vəziyyətin rəqsi səviyyələri arasında yerləşən keçidləri istifadə edirlər. Enerjinin rəqsi səviyyələri arasındakı məsafə elektronvoltun onluq və yüzlik hissəsinin tərtibinə malik olduğundan, bu lazerlər orta İQ-diapazonunda (5...100 mkm) işləyirlər. Elektron-rəqsi keçidlərdəki lazerlər müxtəlif elektron vəziyyətlərin rəqsi səviyyələri arasında yerləşən keçidləri istifadə edirlər, spektrin görünən və yaxın UF-oblastlarında işləyirlər. Molekullardakı daxili hərəkətlərin çoxolduğu relaksasiyanın yeni kanallarını açır, bu kanallar, xüsusi halda, aşağı lazer səviyyənin effektiv boşalması üçün istifadə oluna bilirlər. Yada salaq ki, məhz (He-Ne) lazerində 1S(s) neon səviyyəli relaksasiyanın effektiv proseslərinin olmaması bu cihazın parametrlərini əhəmiyyətli dərəcədə korlayır.

Qazın molekullarında lazerlər (məsələn., $\lambda = 9.6$ -da və $\lambda = 10.6$ mkm dalğa uzunluqlarında, orta İQ-diapazonda şüalanan CO₂-lazerlər) fasiləsiz rejimdə minlərlə vatt gücü şüalandırmağa malikdirlər. Bu halda onların tam FİƏ təqribən 10% təşkil edir. Onlar kəsmə, qaynaq, skaybirovaniya, oyma və nişanlama üçün istifadə olunurlar. Uzaq İQ diapazonda $\lambda = 119$ mkm və $\lambda = 124$ mkm dalğa uzunluqlarında şüalanan metanol əsasında lazer ən çox yayılmışdır. Qeyd edək ki,

molekulyar qaz üçün şüalanmanı bütün İQ diapazonda almaq asandır. Hətta İQ-diapazonda suyun adi molekulu lazer şüasının bir çox spektral xətlərinə malik ola bilər.

CO₂ molekulu xətti simmetrik molekul kimi özünü aparır. Generasiya 00⁰1 və 10⁰0 səviyyələri arasındakı keçidlərdə həyata keçirilir. Keçidlərdən istifadə etməklə generasiyanın alınması mümkündür. CO₂ molekulunun 00⁰1 – yuxarı işçi lazer səviyyəsi, demək olar ki, N₂ molekulunun birinci rəqsi halının enerjisi ilə dəqiq üst-üstə düşür. Bu vəziyyət metastabildir, belə ki, dipol yaxınlaşmasında N₂ molekulu üçün 1-0 keçidinə qadağan qoyulmuşdur. Eyni zamanda N₂ molekulunun əsas haldan birinci rəqsi səviyyəsinə keçidi zamanı həyəcanlanma prosesi çox effektivdir.

Baxmayaraq ki, CO₂-lazerinin və He-Kr ion lazerinin ($\lambda = 647.1$ nm) iş sxemləri oxşardır, lakin birincinin effektivliyi ikinci effektivliyindən üç tərtib yüksəkdir. Bu, əsasən iki səbəbdən müəyyən olunur. Birincisi, CO₂ lazerinin enerji səviyyələrinin sxemi optimaldır və elektronvolt enerjiyə malik olan fotonun generasiyasına cəmi iki dəfə çox enerji sərf etmək lazımdır (müqayisə üçün He-Ne- və Aq lazerlərində isə 20...40 dəfə çox enerji sərf olunur). İkincisi, CO₂ lazerdə lazer səviyyələrinin həm 00⁰1–yuxarı işçi səviyyəsinin məskunlaşması, həm də 10⁰0 –aşağı işçi səviyyəsinin boşalması son dərəcə effektiv baş verir. Közərən boşalma plazmasında elektrik sahəsinin gətirilmiş gərginliyinin tipik qiyməti $E = 4$ V/m Pa təşkil edir.

Molekulyar lazerlərdə yüksək FİƏ malik olan güclü qaz lazerlərinin işçi maddəsinə qoyulan tələbləri reallaşdırmağa nümunə olaraq CO₂ lazerini göstərmək olar. Bu unikal lazerdir, o, yüksək FİƏ-yə və əhəmiyyətli dərəcədə enerji çıxışına

malikdir. Fasiləsiz rejimdə bu lazer yüksək güc təmin edir: onlarla kilovatt, impuls rejimində bir neçə qıqavatt, impulsda enerji kilocoul verir. 30% FİƏ bütün digər lazerləri üstələyir. Şüalanma dalğalarının uzunluqları 9-11 mkm atmosferinin şəffaflıq pəncərəsinə düşürlər. CO₂ lazerini həddindən artıq təmiz materialların texnologiyasında istifadə edirlər, şüalanmanın hamar və diskret yenidənqurulma xassəsinə görə o, elmi məqsədlə cisimlər üzərində rezonans qarşılıqlı təsirin tədqiqatı üçün geniş istifadə oluna bilər.

İmpuls CO₂ lazerlər. CO₂ lazerin enerji parametrlərini artırmaq üçün fəal mühitin təzyiqini atmosfer və daha yüksək təzyiqə qədər artırmaq lazımdır ki, bu da şüalanan hissəciklərin sıxlığının artmasına və müəyyən enerji çıxmasına gətirib çıxaracaq. Ancaq təzyiqin artması ilə lazerin konstruksiyasının və onun həyacanlanma üsulunda dəyişiklik tələb edən boşalmasının yüksək gərginliklərində fəal mühitin bircins həyacanlanması ilə əlaqədar problemləri aradan qaldırmaq lazımdır. Bunun üçün əsasən impuls qaz boşalmasının iki növü istifadə olunur: 1) qazın nisbətən zəif ilkin ionlaşması ilə sərbəst boşalma; 2) xarici mənbədən, misal üçün elektron dəstələr, nüvə reaksiyalarının məhsulları, qazın ilkin ionlaşması ilə qeyri- sərbəst boşalma.

Yüksək təzyiqli sərbəst boşalma ilə lazer texnikasının inkişafı onlarla santimetr boşalma aralıqların ölçülərində və 1mks qədər yanma müddətində yüzlərlə litr təşkil edən həcmlərdə belə boşalmaların yanma problemini həll etməyə imkan verdi. Bu işləmələr əsasında 10% -dən olduqca yüksək FİƏ ilə 10 kC-la qədər şüalanma enerjisi ilə impulsu CO₂ lazerlər yaradılmışdır. Enerji parametrlərinin qiymətləri həmçinin elektron dəstələrilə qaz mühitin ilkin ionlaşması ilə

lazerlərin doldurulması üçün sərbəst boşalmalardan istifadə edilərək alınmışdır.

CO lazerlər. CO molekulları ($\lambda = 5.0 - 6.55$ mkm) rəqsi fırlanma keçidlərdə lazerlər bir çox cəhətdən CO₂ lazerlərinə oxşardır. Onlar həmçinin yüksək enerji parametrlərinə və müxtəlif rejimlərdə işləmək bacarığına malikdirlər.

CO molekullarının rəqsi həyacanlanma mexanizmləri CO₂ molekulunun həyacanlanma mexanizmlərinə oxşardır. Bu bilavasitə elektron zərbə ilə CO molekullarının rəqsi hallarının həyacanlanması və ya N₂-in həyacanlandırılmış molekullarından enerjinin ötürülməsidir. Yuxarı və aşağı rəqsi səviyyələrin arasında məskunlaşmaların inversiyasının olmaması CO lazerlərin xüsusiyyətidir. Bu halda generasiya iki qonşu rəqsi səviyyələrə məxsus olan fırlanma səviyyələri arasında qismən inversiya nəticəsində baş verir.

Hal-hazırda həyacanlanmanın və konstruksiyanın üsulundan asılı olaraq fasiləsiz rejimdə CO lazerlərin şüalanmasının gücü bir neçə vattadan onlarla kilovatta qədər dəyişilir, generasiyanın FİƏ-1 isə CO₂ lazerləri ilə müqayisədə daha yüksəkdir və 50% -ə çatır.

Qaz dinamik lazerlər. Qaz boşalma həyacanlanması halında olduğu kimi qaz dinamik lazerlərdə bu molekulların eyni keçidlərində şüalanmış CO və CO₂ molekulyar qazlara əsaslanan qarışıqlar fəal mühit kimi istifadə olunur. Bu lazerlərdə yüksək temperatura qədər bərabər qızdırılmış molekulyar qazın istilik enerjisi doldurulmanın mənbəyi kimi xidmət edir.

Qaz dinamiki lazerlərin əsas üstünlüyü bir neçə milisaniyədən onlarla saniyəyə qədər iş müddətində onların yüksək gücü ~ 1 MVt alınır.

CO₂ əsasında qaz dinamiki lazerkimyəvi lazerlə yanaşıfasiləsiz lazerlərin arasında ən güclü lazerdir.

Metal buxarı əsasında lazerlərdə fəal mühit rolunu Sn, Pb, Zn, Cd və Semetalların buxarı oynayır. Metal buxarı əsasında lazerlər geniş yayılmışdır. Helium-kadmium lazerinin təsir prinsipi enerjinin heliumun həyəcanlanmış metastabil atomundan həyəcanlaşmamış kadmium atomuna toqquşaraq keçməsinə əsaslanır. Kadmiumun ionlaşması və ionun həyəcanlanması ilə müşayiət olunur. Belə lazer spektral xəttinin Dopler eni cəmi 1 QHs təşkil edir, yalnız bir ¹¹⁴Cd izotop cütlüyünün istifadəsi generasiyanın çox dar spektral xəttini verir. Spektrin göy (441,6 nm) və ultrabənövşəyi (325,0 nm) oblastlarında birmodlu rejim də mümkündür.

Eksimer lazerlər spektrin ultrabənövşəyi hissəsində istifadə olunur. "Eksimer" anlayışı - həyəcanlanmış dimer ("*excited dimer*"dən ixtisar) iki həyəcanlanmış atomları özündə saxlayan-qısa yaşama müddətinə malik molekula başa düşülür. Əgər iki atom müxtəlifdirsə, "eksipleks" termini istifadə olunur. XeCl kimi olan təsirsiz qazlarının halogenitləri eksiplekləri formalaşdırırlar. Belə ki, təsirsiz qazın həyəcanlanmış atomunun kimyəvi halı halogenlə reaksiyaya asan daxil olan qələvinin atomunun davranışı kimidir. Eksipleks öz əsas halına qayıtdığı zaman onun komponentləri dissosasiya edirlər və ayrı-ayrı atomlar itələyici qüvvəyə, malikdirlər, yəni molekul parçalanır. Beləliklə, lazerin aşağı səviyyəsi məskunlaşmamış olur, bu da məskunlaşmanın inversiyasını təmin edir.

Kimyəvi lazerlərdə inversiya kimyəvi reaksiya zamanı yaranır. Kimyəvi lazer kimyəvi enerjini birbaşa koherent şüalanma enerjisinə çevirir. Lazerlərdə əvvəlcə doldurma enerjisini lazerin işçi mühitinə daxil etməli və sonra isə onu işçi mühitdən koherent şüalanma şəklində almaq lazımdır. Enerjinin çox miqdarda daxil edilməsi asan deyildir. Kimyəvi lazerdə bu başqa cürdür: kimyəvi qarışıqda lazımi qədər enerji artığı vardır. Yalnız koherent şüalanma şəklinə çevrilməsi üçün effektiv üsul tapmaq lazımdır. Vahid çəkisinə görə kimyəvi qarışığın enerjisi elektrik və ya maqnit yığıcılarının enerjisindən qat – qat çoxdur. Kimyəvi reaksiyalar prosesində ayrılan enerjinin ən təbii akkumulyatoru molekulların rəqsi sərbəstlik dərəcəsidir. Buna görə də kimyəvi lazerlərin əksərində rəqsi səviyyələr arasındakı keçidlərdən istifadə olunur.

Kimyəvi lazerlərin ən məşhur nümayəndəsi əsasən 2.7-3.1 μm dalğa uzunluğunda işləyən HF lazeridir. H_2 və F_2 qazlarının qarışığında elektrik boşalma yaranır, bunun nəticəsində dərhal rəqsi həyacanlandırılmış vəziyyətdə olan HF molekulu yaranır (HF^* işarə olunur). Bu molekul, əsas vəziyyətə keçərək, İQ fotonu şüalandırır və dağılır. Dağılmanın məhsulları (maddələri) H_2 və F_2 molekulları ilə qarşılıqlı təsir edir, nəticədə bir növ (özünə məxsus) zəncirvari reaksiya yaradan digər həyəcanlı molekullar yaranırlar. Kimyəvi lazer yüksək şüalanma gücünü yarada bilər və əsasən hərbi işlər üçün istifadə olunur.

Hal – hazırda digər vacib lazerlər: boyayıcı maddələr əsasında lazerlər, uzaq UB və rentgen diapazonunda şüalanan lazerlər, sərbəst elektronlarda lazerlər və s.

Ayrılıqda yarımkeçirici işıq mənbələri, həmçinin lazerlər də nəzərdən keçiriləcəkdir.

Bəzi lazerlərin işçi parametrləri. Cədvəldə dalğa uzunluqlarının artma sırası ilə bəzi lazerlərin parametrləri və xarakteristikaları göstərilir. Görünür ki, lazerlər keçidlərin müxtəlif uzunluqları, FİƏ, çıxış gücləri ilə xarakterizə olunur.

Qeyd edək ki, cədvəldə göstərilən lazerlərin spektral xətlərinin eni işçi keçidin spektral xəttinin enindən bir neçətərtib kiçikdir. Bu rezonatorlarda generasiya edən tezliklərin əlavə seçməsi ilə izah olunur. Bəzi lazer sistemlərində stasionar rejimdə məskunlaşma inversiyasını təmin etmək mümkün deyil. Belə lazerlər yalnız impuls rejimdə işləyə bilər.

Cədvəl. Bəzi tanınmış lazerlərin tipik xarakteristikaları və parametrləri (dalğa uzunluğunun artırılma sırası ilə).

Fəal mühit	Keçidin dalğa uzunluğu λ_0	Bir modlu və çox modlu rejim	Fasiləsiz və ya impuls rejimi	Tam FİƏ $\eta_c, \%$	Çıxış gücü və ya enerji
Ag ¹⁹⁺ (p)	13.9 nm	cox modlu	impuls	0.0002	25mkkCoul
C ⁵⁺ (p)	18.2 nm	cox modlu	impuls	0.0005	2 mCoul
ArF eksimer (q)	193 nm	cox modlu	impuls	1	200mCoul
KrF eksimer (q)	248 nm	cox modlu	impuls	1	500 mCoul
He-Cd (q)	442 nm	bir modlu	fasiləsiz	0.1	1-- mVt
Ar ⁺ (q)	515 nm	bir modlu	fasiləsiz	0.5	10Vt
Rodamin -6J (m)	560-640 nm	bir modlu	fasiləsiz	0.005	100 mVt
He-Ne (q)	633 nm	bir modlu	fasiləsiz	0.05	10 mVt
Kr ⁺ (q)	647 nm	bir modlu	fasiləsiz	0.01	1 Vt
Rubin (b)	694 nm	cox modlu	fasiləsiz	0.1	5 Vt
Aleksandrit (b)	700-820 nm	cox modlu	fasiləsiz	0.1	1 Vt
Ti: sapfir (b)	700-1050 nm	bir modlu	fasiləsiz	0.01	5 Vt
Yb ³⁺ :YAG (b)	1030 nm	bir modlu	fasiləsiz	5	100 Vt
Nd ³⁺ : şüşə (b)	1053 nm	cox modlu	impuls	1	50 Coul
Nd ³⁺ :YAG (b)	1064 nm	bir modlu	fasiləsiz	5	50 Vt
Nd ³⁺ :YVO ₄ (b)	1064 nm	bir modlu	fasiləsiz	10	30 Vt

Yb ³⁺ kvars lifi (b)	1075 nm	bir modlu	fasiləsiz	20	1500 Vt
Er ³⁺ : kvars lifi (b)	1550 nm	bir modlu	fasiləsiz	10	100 Vt
Tm ³⁺ :ftor lifi (b)	1.8-2.1 mkm	bir modlu	fasiləsiz	5	150 Vt
He-Ne (q)	3.39 mkm	bir modlu	fasiləsiz	0.05	20 mVt
CO ₂ (q)	10.6 mkm	bir modlu	fasiləsiz	10	500 Vt
H ₂ O (q)	28 mkm	bir modlu	fasiləsiz	0.02	100 mVt
LSE (q)	60mkm-2.5mm	cox modlu	impuls	0.5	5 mCoul
H ₂ O (q)	118.7 mkm	bir modlu	fasiləsiz	0.01	50 MVt
CH ₃ OH (q)	118.9 mkm	bir modlu	fasiləsiz	0.02	100 mVt
HCN (q)	336.8 mkm	bir modlu	fasiləsiz	0.01	20 mVt

*(p) –plazma, (m) –maye, (b) bərk cisim, (q) –qaz

FƏSİL I

QAZ LAZERLƏRİNDƏN ÜMUMİ MƏLUMAT

§ 1.1. Qaz lazerlərinin işçi maddələri

Lazerlərdə istifadə olunan qazların xassələrinə lazerin işçi maddəsinə qoyulan tələblər nöqtəyi-nəzərinə baxmaq məqsəduyğundur.

- İşçi maddə dalğa uzunluğunun bizi maraqlandıran diapazonunda şüalanan keçidə malik olmalıdır.

- İşçi maddə enerjinin doldurulmasının mümkünlüyünə imkan yaratmalıdır.

- Lazer keçidində yuxarı səviyyə böyük yaşama müddətinə malik olmalıdır.

- Aşağı səviyyə kiçik yaşama zamanına malik olmalıdır.

- İşçi maddənin həyəcanlanması zamanı onun tarazlıq vəziyyətinə qayıtması, əsasən, lazer keçidi vasitəsilə baş verməlidir, başqa sözlə, lazer keçidinin tezliyində özbaşına şüalanan kvantların sayı udulan kvantların sayının böyük hissəsini təşkil etməlidir.

Üçüncü və dördüncü şərtlərin ödənilməsi lazerin işçi keçidində yuxarı səviyyənin həddindən çox məskunlaşmanın yaradılmasını təmin edir. Beşinci tələb doldurmanın enerjisindən effektiv istifadənin vacibliyi ilə əlaqəlidir.

Qaz lazerlərində işçi maddənin və enerjinin doldurma sisteminin birgəliyi xüsusi rol oynayır. Bunu enerji səviyyələrin sadələşmiş sxemi üzərində izah etmək olar, belə sxem istənilən qazlar üçün xarakterikdir (şək. 1.1). Ən yuxarı səviyyə W_i atomun ionizasiya enerjisində (atomar qazda) və ya molekulun dissosiasiya enerjisində (molekulyar qazda) uyğundur. Aralığında lazer keçidləri baş verən səviyyələr

A hərfi ilə işarə olunmuşdur. A

səviyyələrindən

yuxarı-da yerləşən

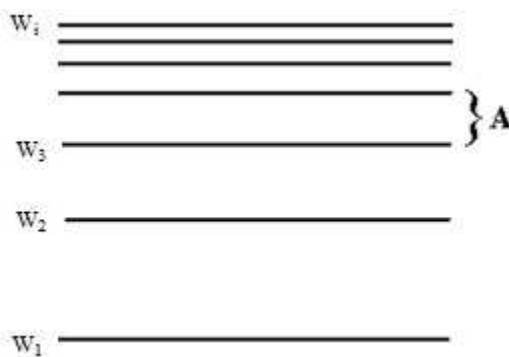
səviyyələr, adətən,

sıx sistem yaradırlar,

bu sistem yuxarı

hissədə, demək olar ki,

kəsilməz spektrə uyğundur.



Şəkil 1.1

Yuxarı səviyyələrin yaşama müddəti azdır. Əgər atom onlara düşərsə, onda o, A yuxarı səviyyələrdən birinə sürətlə keçir.

Qazların əksəriyyətində A aşağı səviyyələri çox qısa yaşama müddətinə malikdirlər. Bu, yuxarı lazer səviyyələrinin həddindən çox məskunlaşmanın yaranmasına səbəb olur.

Neytral atomlar üçün $W_i = 5-15$ eV, lakin $\Delta W \sim 0.1-1.0$ eV (A qrupunun qonşu səviyyələri arasındakı enerjilərin fərqi).

ΔW -nin bu qiymətlərinə 1-25 mkm dalğa uzunluqları uyğundur. Beləliklə, neytral atomlarda lazerlər İQ şüalanmanın mənbələri, lakin onlar görünən diapazonda da generasiya edə bilirlər. İonlar üçün $W_i = 12-25$ eV (iki- və üçqatlı

ionizasiya enerjisi), $\Delta W \sim 2-5$ eV. Bu, görünən və UB diapazonlardakı şüalanmaya uyğundur. Molekullar üçün $W_i = 2-3$ eV (molekulların dissosiasiya enerjisi), lazer keçidləri isə 10-100 mkm dalğa uzunluqlarına uyğundur.

Çoxlu qazların A səviyyələrindən aşağıda olan spektrlərində W_2 metastabil səviyyə yerləşmişdir. Adi şəraitdə onun yerləşməsi böyükdür və deməli, $W_2 \rightarrow W_3$ keçidləri mümkündür, onda W_2 səviyyəsi hesabına W_3 aşağı lazer səviyyəsi öz məskunlaşmasını artırır. Bu, təbiidir ki, lazer keçidlərinin sayının artmasına mane olur. Qaz lazerlərində səviyyənin boşalması üçün müəyyən tədbirlərin görülməsi lazım gəlir.

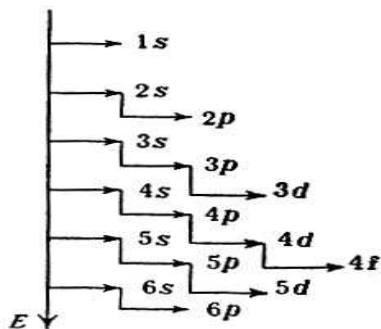
Qazlarda spektral dar xətlərin olması lampanın köməyiylə optik doldurmadan istifadə etməyə imkan vermir, ona görə ki, lampa qeyri-koherent şüalanma mənbəyidir. Belə doldurma son dərəcə qeyri-effektiv ola bilər, çünki lampaların şüalanma spektri çox genişdir, lakin fəal qaz mühitində udulmanın geniş zolaqları yoxdur. Qaz lazerlərində atomların həyəcanlanması, adətən, elektrik boşalmanın köməyiylə baş verir. Eyni zamanda səviyyələrin məskunlaşma inversiyasının yaradılmasını asanlaşdırmaq üçün işçi qaz, bir qayda olaraq, qarışıqda digər qazlarla birlikdə istifadə olunur.

§ 1.2. Atomların enerji səviyyələri

Baxmayaraq ki, atomlar təbəqəli quruluşa malikdir, bütün elementlərin atomlarının analoji daxili səviyyələri eyni çür qurulmuşdur. Lakin Z böyük olduqca atomdakı energetik alt səviyyələrin elektronlarla dolma ardıcılığını təyin edən

qanunauyğunluq daha da mürəkkəb olur. Burada ümumi olan odur ki, elektron energetik mənada daha əlverişli (daha çox aşağı) alt səviyyəni tutmağa meyllidir. Məhz buna görə də kalium atomunun 19-cu elektronu 3d-alt səviyyəsində deyil, 4s-də yerləşir. Həmçinin eyni qayda ilə 5s alt səviyyəsi 4d-yə nisbətən tez, 5p alt səviyyəsi isə 4f alt səviyyəsinə nisbətən tez dolur.

Atomdakı enerji alt səviyyələri onların dolma qiymətinə və ardıcılığına görə şərti olaraq aşağıdakı kimi təsvir etmək olar: atomun quruluşunun sirlərinin açılmasında daha əhəmiyyətli rolu spektral analiz üsulu oynamışdır. Optik və rentgen spektrlərini fərqləndirmək lazımdır.



Şək. 1.2

Optik spektr elektronun həyəcanlanmış vəziyyətdən az həyəcanlanmış və ya əsas vəziyyətinə bütün mümkün olan “qadağan olunmayan” keçidlərinin əksidir. Optik spektrlər çox mürəkkəbdirlər. Onlar onlarla, yüzlərlə və minlərlə spektral xətlərdən təşkil olunmuşlar.

Rentgen spektri daxili elektron səviyyələrin boş qalan yerinə elektronların keçməsi zamanı yaranır. Daxili elektron səviyyələr isə rentgen şüalanması zamanı atom elektronla və ya fotonla toqquşduqda (elektron və ya foton zərbəsi) atomun həyəcanlanması nəticəsində əmələ gəlir. Əgər elektronlar nüvəyə ən yaxın olan daxili təbəqəyə doğru yerlərini dəyişərlərsə, onda rentgen spektrinin *K* seriyası yaranır; digər daxili təbəqələrə keçid zamanı başqa seriyalar əmələ gəlir.

Daha mürəkkəb atomlar üçün rentgen spektrinin yeddi seriyası məlumdur: K , L , M , N , O , P və Q , onlar atomun elektron örtüyündəki yeddi enerji səviyyələrə uyğundurlar.

Rentgen spektrləri optik spektrlərdən xətlərin çox olmayan sayı ilə fərqlənilirlər, məsələn, K seriyasında cəmi beş xətt vardır. Yuxarıda qeyd olundu ki, xarakterik rentgen şüalanma dalğalarının uzunluğuna görə elementlərin vacib kəmiyyət xassəsini – sıra nömrəsini təyin etmək olar.

Atomları mürəkkəb quruluşa malik olan elementlərin optik spektrlərinin müəyyən olunması çətin məsələdir. Burada sadələşdirilmiş formada hidrogensayağı atomların optik spektrlərinin təyin olunmasının bəzi ümumi problemlərinə baxılır. Hidrogensayağı atomlar o atomlara deyilir ki, onlar hidrogen atomunda olduğu kimi nüvədən və bir elektrondan ibarətdir. Belə atomlar $Z \geq 2$ -yə malik olan ionlaşmış atomlardır, onlar isə bütün elektronlarını itirmiş, yalnız birini saxlamışlar. Məsələn, əgər üç elektrona malik olan ($Z = 3$) litium atomundan iki elektronu qopartsaq, onda litiumun hidrogensayağı ionlaşmış atomunu alırıq: Li^{2+} . Kvant səviyyəsində olan mürəkkəb atomun elektronunun enerjisi (eV-lə) bu düsturla təyin olunur: $W = -13,6(Z^*)^2/n^2$. Burada Z^* - nüvənin effektiv enerjisidir və $Z - \sigma$ -ya bərabərdir, burada σ – xarici elektronun digər elektronlarla itələnməsi nəticəsində həmin xarici elektronun nüvəyə cəzb olunma gücünün azalmasını xarakterizə edən ekranlaşma əmsalıdır; hidrogensayağı atomlar üçün $\sigma = 0$.

Spektroskopiyada elektronun enerjisini müəyyən termilə (T) ifadə etmək qəbul olunmuşdur, onu erqlərlə ifadə olunmuş

enerjini (W) işıq sürətinə (c) və Plank sabitinə (h) bölməklə tapırlar, yəni $T = W / c h$.

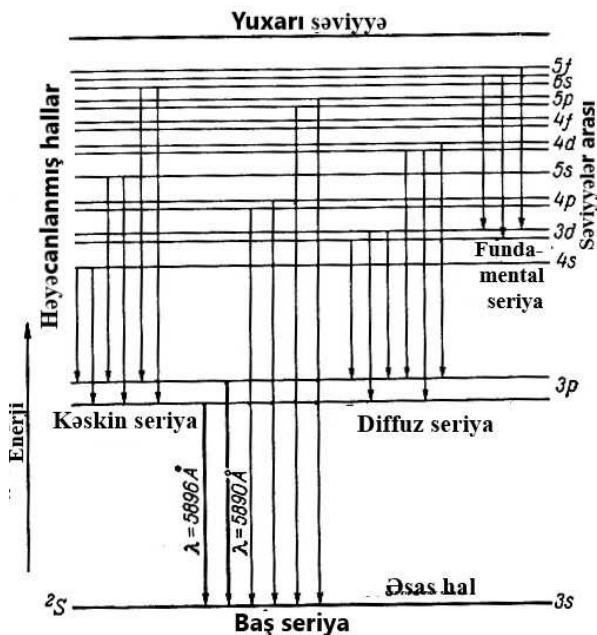
Tək elektrona 1 orbital kvant ədədinin müəyyən qiyməti uyğun gəlir. Əgər atomda bir neçə elektron varsa, onda ayrı-ayrı orbital momentlər L -cəmlənmiş orbital momentinə toplanırlar. L -in hər bir qiymətinə özünün termi uyğun gəlir. L -cəmlənmiş orbital momentlər elektronun orbital momentinin işarə olunduğu hərflərlə işarə olunurlar, lakin balaca hərflərlə (s, p, d, ...) deyil, böyük (S, P, D, ...) hərflərlə işarə olunurlar, eyni hərflərlə uyğun termlər də işarə olunurlar. Beləliklə, cəmlənmiş orbital momentlərin mümkün ədədi qiymətləri, onların qəbul olunmuş işarələmələri və onların termlərinin işarələmələri aşağıdakılardır:

L	0	1	2	3	4	5
İşarələmələr	S	P	D	F	G	H

Elektronların bu keçidlərinə cavab verən termlər müxtəlifdirlər. Ən az enerjiyə uyğun gələn term əsas term adlanır. Məsələn, natriumun optik spektrinin yaranma sxemindən (şək. 1.3) alınır ki, əsas term – 2S -dir, lakin bütün başqa termlər həyəcanlanmış termlərdir. Verilmiş sxemdə yalnız daha çox vacib spektral xətlər göstərilmişdir, həqiqətdə isə onlar əhəmiyyətli dərəcədə çoxdurlar. Deməli, natriumun optik spektrinin əsas seriyasında 57-dən az olmayan spektral xətləri müşahidə etmək olar.

Böyük həlledici gücə malik spektroskopların köməyiylə müəyyən olunmuşdur ki, əksər spektral xətlər iki, üç və ya çoxlu sayda nazik xətlərdən ibarətdir. Məsələn, natriumun optik spektrinin baş seriyasında dalğa uzunluğu 5890 və 5896

Å olan dublet (ikiqat) xətlər müşahidə olunur. Bu effekt onunla bağlıdır ki, S-termlərdən (sxemdə onların hər biri bir üfiqi xətlə işarə olunmuşdur, bu xətlər isə 3s, 4s, 5s və ya 6s vəziyyətlərinə uyğundurlar) başqa, bütün termlər bir sıra yaxın



Şək. 1.3. Natriumun optik spektrinin sxemi

enerji səviyyələrə (sxemdə onlar ikiqat xətlərlə işarə olunmuşlar) ayrılırlar və yaxud necə deyərlər, multipletliyə malikdirlər (M). Multipletlik ikidən az və çox ola bilər, yəni termlər singlet (tək), dublet, triplet, kvartet və daha mürəkkəb ola bilərlər. Termin multipletliyi termi hərflə işarə etdikdə ədədi indekslə işarə olunur. Məsələn, 2S – “S –dublet termi” bildirir. Natriumun əsas vəziyyəti bu termə xarakterizə olunur (bax. sxemə).

Spektrin multipletliyi atomdakı cütliyi olmayan elektronların sayını müəyyən etməyə imkan verir, bu say multipletlikdən 1 vahid azdır. Belə ki, natriumun atomunda 1 ədəd cütliyi olmayan elektron olmalıdır, çünki fərq $M - 1 = 2 - 1 = 1$ olur. Doğrudan da, natrium üçün $Z = 11$ və elektronların paylanması düsturu belə olacaqdır: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$, yəni elektron cütliyi olmayan bir ədəd elektron vardır, o isə $3s$ – alt səviyyədə yerləşmişdir. Oksigen üçün $3R$ termi xarakterikdir, bu isə onu göstərir ki, onun atomunda iki ədəd cütliyi olmayan elektron vardır ($Z = 8$; $1s^2 2s^2 2p^4$; bax. elektronların paylanma sxeminə). 1S termi halında cütliyi olmayan elektronların sayı sıfıra bərabərdir. Təsirsiz qazların, berilliumun, qələvi yer metalların, sinkin, kadmiumun, civənin və palladiumun atomları bu cür termə malikdirlər. 7S termi altı ədəd cütliyi olmayan elektrona malik olan atom üçün xarakterikdir, cütliyi olmayan elektronlardan biri s -, beşi isə d -elektrondur (xrom atomu). Spektroskopik verilənlərə əsasən elementlərin termləri təyin olunur və onların atomlarının elektron örtüklərinin quruluşu aşkar olunur.

Termin multipletliyi (M) –atomun dəqiq fiziki xassəsidir, bu xassə elementlərin əsas kimyəvi xassəsi ilə - valentliklə (V) əlaqəlidir, bu halda valentlik klassik mənada verilir. Lyuis-Londona görə valentlik atomdakı cütliyi olmayan elektronların sayı ilə təyin olunur, yəni valentlik multipletlikdən bir vahid kiçikdir ($V=M-1$). Deməli, optik spektrlər dövrü sistemin quruluşu ilə sıx bağlıdırlar, bu sistemdə qrupların nömrələri elementlərin xarakterik valentliyini göstərir.

Elementlərin xassələrinin dəyişikliyinə dəvrililik nəinki atomların elektron örtüyünün quruluşunun qanunauyğun dəyişikliyi əsasında, hətta termlərin multipletliyinin dövrü dəyişikliyi əsasında izah olunur. Elementlər sistemində dövrə

görə soldan sağa hərəkət etdikdə multipletlik cüt qiymətlər (dublet, kvartet, sekstet, oktet) və tək qiymətlər (sinqlet, triplet, kvintet, septet) növbə ilə dəyişildiyi halda artır. Elektrik qövsünün (qövsi spektrlər) alovunda alınmış emissiya spektrlərində atomları tək sayda elektronlara malik olan elementlər üçün cüt multipletlik müşahidə olunur və əksinə.

2-ci dövrlü elementlərin atomlarının əsas səviyyəsi üçün ekvivalent s- və p-elektronların (n və l kvant ədədlərinin eyni qiymətlərinə malik olan elektronlar ekvivalent elektronlar adlanır) sayından asılı olaraq termlər belə işarə olunur:

Element .	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Xarici səviyəli elektronlar	s^1	s^2	s^2p^1	s^2p^2	s^2p^3	s^2p^4	s^2p^5	s^2p^6
Cütlüyü olmayan elektronların sayı	1	0	1	2	3	2	1	0
Termlərin yazılışı	2S	1S	2P	3P	4S	3P	2P	1S
$(^M T_{L+S})$	$^2S_{1/2}$	2S_0	$^2P_{1/2}$	3P_0	$^4S_{3/2}$	3P_2	$^2P_{3/2}$	1S_0

Aşağı sağ indekslərlə J kvant ədədləri qeyd olunur, onlar atomun tam momentini bütövlüklə təyin edirlər $J=L+S$ (L – ümumi orbital moment, S – ümumi spin momentidir).

Dövri sistemin eyni bir qrupunun s- və p-elementləri eyni əsas termlə xarakterizə olunurlar. Belə ki, bütün qələvi metalların termləri - 2S -dir, buradan isə $V=1$ olur, doğrudanda, bu elementlərin xarakterik valentliyi 1-ə bərabərdir.

d-elementlərin atomlarının əsas termi ekvivalent s- və d-elektronların ümumi sayından ($\sum s + \sum d$) və xarici səviyyədəki (s^n) s-elektronların sayından (n) asılıdır:

Ekvivalent və <i>d</i> -elektron- ların ümumi sayı	s-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Term						⁶ S							
<i>s</i> ⁰ olduqda .		² D	³ F	⁴ F	⁵ D		⁵ D	⁴ F	³ F	² D	¹ S	-	-
<i>s</i> ¹ olduqda		² S	³ D	⁴ F	⁵ F	⁶ D	⁷ S	⁶ D	⁵ F	⁴ F	³ D	² S	-
<i>s</i> ² olduqda		-	¹ S	² D	³ F	⁴ F	⁵ D	⁶ S	⁵ D	⁴ F	³ F	² D	¹ S

Analoji olan d-elementlərin atomlarındakı elektronların müşahidə olunan sayının azalması nəticəsində əsas halın termləri müxtəlif ola bilər. Məsələn, VIB-qrupun –xrom, molibden və volframın element-analoqlarının elektron konfigurasiyaları bir-birlərindən fərqlənilir, əsas vəziyyətdəki termlər isə eyni olmayacaqlar:

Element	Cr	Mo	W
Elektron konfigurasiya	<i>d</i> ⁵ <i>s</i> ¹	<i>d</i> ⁵ <i>s</i> ¹	<i>d</i> ⁴ <i>s</i> ²
Atomların termi	⁷ S	⁷ S	⁵ D

Yuxarıda qeyd olunduğu kimi, berilliumun və qələvitorpaq metalların (Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) əsas vəziyyətinin termi ¹S olmalıdır, deməli, multipletlik $M = 1$ və xarakterik valentlik $V = M - 1 = 0$. Lakin məlum olduğu kimi, birləşmələrdə bu elementlər 2-yə bərabər olan valentlik əmələ gətirir. Bunu necə izah etmək olar? Məsələ ondan ibarətdir ki, əsas səviyyəyə yanaşı, enerjinin xaricdən daşınması hesabına atomlar həyəcanlanmış səviyyəyə gətirilə bilər. Bu o zaman ola bilər ki, atomların əltsəviyyələrində boş yerlər (orbitallar) olsun. Məsələn, kalsium atomunun xarici səviyyəsində ($n = 4$) iki ədəd cüt elektron *s*-əltsəviyyə tutur (atomun konfigurasiyası – 4*s*²). Lakin bu səviyyədə də üç ədəd tutulmamış orbital olan *p*-əltsəviyyəsi vardır, bu orbitallardan birinə 5-əltsəviyyənin elektronlarından biri verilə bilər. Kalsium atomu həyəcanlanmış səviyyədə (konfigurasiya – 4*sp*) iki ədəd cütlüyü olmayan elektrona malikdir, o, $M = 3$ multipletliklə və

$V = M - 1 = 2$ valentliklə xarakterizə olunur. Doğrudan da, kalsiumun və digər qələvitorpaq metallarının spektrində həm singlet ($M = 1$), həm də triplet ($M = 3$) aşkar olunur.

Əgər alt səviyələrin enerjiləri arasındakı fərq böyük deyilsə, onda həyəcanlanmanın mümkünlüyü real olaraq həyata keçirilə bilər, bu isə doğrudur. Cütlüyü olmayan elektronların sayının artması valentliyin artmasına səbəb olur. Məsələn, alüminium 1 və 3, kremniyum 2 və 4, fosfor 3 və 5, kükürd 2, 4 və 6 və s. valentliyi yarada bilər. Atomların həyəcanlanmasına hibridizasiya hadisəsi müşayiət edir, bu haqda aşağıda məlumat veriləcəkdir.

Kimyəvi elementlərin valentliyinin çox olmasının səbəbi eyni bir elementin termlərinin müxtəlif multipletliyi ilə izah olunur. Belə ki, yüksək multipletliyə malik olan termlər (septetlər, oktetlər, nonetlər) nadir hallarda əmələ gəlirlər, onda yüksək valentlik də nisbətən nadir hallarda müşahidə olunur.

Lamb uçuşumu. Məlum olduğu kimi, lazerlərdə gücləndirmə fəal mühitin molekullarıyla işıq şüalarının qarşılıqlı təsiri yolu ilə baş verir. Bu molekullar gücləndirmənin maksimumuna uyğun olan tezlikdəki mərkəzlə məxsusi udma xətti ilə səciyyələnilirlər. Lakin, qaz lazerinin gücləndirilmə xətti Dopler effektinə görə genişlənməyə məruz qalır: belə ki, qazın molekulları daimi hərəkətdədir, fotonlar üçün isə udulma xətti molekulların sürətindən asılı olan kəmiyyət qədər sürüşür.

Bu halda işıq dalğası yalnız onunla rezonansda olan atomlarla qarşılıqlı təsir edir. Lazer rezonatoru daxilində işıq şüalanması hər iki istiqamətdə yayılır. Bu zaman müəyyən bir sürətə malik olan molekul həm rezonans keçidi daha yüksək tezliklər oblastına sürüşmüş qarşılıqlı fotonla, həm də rezonans keçidi daha aşağı tezliklər oblastına sürüşmüş ona çatan fotonla qarşılıqlı təsir edə bilər. Xətti lazerin rezonator daxili sahəsini eyni tezlikli qarşı-qarşıya yayılan iki dalğaların superpozisiyası kimi göstərmək olar. Dalğalardan hər biri atomların sürətlərə görə paylanması konturunda öz "deşiyini" ("Bennetdeşiyini")

yaradır. Deşiklər kontur mərkəzinə nəzərən simmetrik yerləşirlər. Lazer tezliyini Dopler konturunun mərkəzinə köklənərkən “deşiklər” üst-üstə düşür və hər iki dalğa eyni atomlar qrupu ilə qarşılıqlı təsirdə olur. Bu gücləndirmənin Dopler xəttinin mərkəzi yaxınlığında işləyən lazerin gücünün düşməsinə, yəni uçuroma səbəb olur. Qaz lazeri haqqında öz nəzəriyyəsini yaradaraq Lamb bu nəticəyə gəldi və intensivlik konturunda baş verən uçurom onun adını daşıyır. Lamb uçuromu həm tezliyin stabilləşdirilməsi sistemlərində, həm də ifrat yüksək ayırdetmə spektroskopiyasında uğurla istifadə olunur. Uçuromun yaranmasının təbiəti gücləndirmənin qeyribircins genişlənmiş konturunun hər hansı bir bircins genişlənmiş qrupunun dalğa sahəsilə selektiv doyması ilə əlaqələndirilir. Lamb uçuromu eksperimental olaraq 1963-cü ildə U. Lamb, U. Bennet və R. Makfarley tərəfindən müşahidə olunmuşdur.

§ 1.3. Qeyri-elastiki qarşılıqlı təsir

İndi isə qeyri-elastiki qarşılıqlı təsirin əsas proseslərinə baxaq, bu proseslərə görə işçi qazın atomlarının həyəcanlanması baş verir və işçi lazer səviyyələri arasındakı inversiya doldurmaları əldə olunur.

Elektrik sahəsi ilə sürətlənmiş elektron (e simvolu üzərindəki ox) atomla, molekul və ya A ionla qarşılıqlı təsirdə olur, onu həyəcanlanmış vəziyyətə (A simvolunun yanında ulduz işarəsi) gətirir və öz kinetik enerjisini itirir. Bu prosesin nəticəsində qarşılıqlı təsirə qədər artıq həyəcanlanmış vəziyyətdə olan A mərkəzi daha yüksək həyəcanlanmış vəziyyətə keçir. Bu prosesin nəticəsində isə boşalmanın sütununda əlavə yüklənmiş hissəciklər – elektron və ion (A simvolunun yanında işarə) yaranır.

Bu üç prosesin baş verməsi üçün vacibdir ki, elektronun enerjisi hər hansı minimal astana qiyməti ötürüb keçsin. Bu

astana qiymət birinci proses üçün atomun (molekul və ya ionun) halı, ikinci proses üçün həyəcanlanmış enerji səviyyələri arasındakı məsafə və üçüncü proses üçün ionizasiya enerjisi ilə təyin olunur.

Elektron zərbə ilə həyəcanlanma kəsiyi, adətən, eksperimental olaraq müəyyən olunur, çünki çoxelektronlu atomlar üçün onun hesablama üsulları zəif inkişaf etmişdir. Lakin aydındır ki, proses üçün qarşılıqlı təsir kəsiyi böyük olacaqdır, elektronla toqquşma hesabına baş verən həyəcanlanma halı ilə əsas hal arasındakı optik keçid dipol yaxınlaşmasında mümkündür. Bu proseslərin ilk üç prosesə əks olması məlumdur və onların spontan keçidlərlə birlikdə həyəcanlanmış halların dağılmasına səbəb olur.

Qeyd edək ki, rekombinasiya prosesi boşalma həcmində az ehtimallıdır, çünki onun baş verməsi üçün toqquşmanın qısa vaxtı ərzində rekombinasiyasının enerjisinin ayrılması (məsələn, şüalanma yolu ilə) lazımdır. Buna görə də proses əsasən borunun divarlarında baş verir. Aydındır ki, bu proseslər yalnız A atomunun həyəcanlanma enerjisi B atomunun ionizasiya enerjisindən böyük olduqda mümkündür. Artıq qalan enerji elektrona ötürülür. Elektronun emissiyasının baş vermədiyi rezonans proseslərdən fərqli olaraq, Penning ionizasiyası qeyri-rezonans prosesdir.

Həyəcanlanma enerjisinin artığı elektronun kinetik enerjisinə keçir. Əgər A həyəcanlanmış halı böyük yaşama müddətinə malikdirsə, yəni metastabildirsə, onda proses effektiv olacaqdır. Qaz qarışıqlarında enerji mübadiləsinin yuxarıda baxılmış proseslərindən başqa, bəzi kimyəvi reaksiyalar zamanı həyəcanlanmış hallarda olan atom və molekulların alınması mümkündür.

§ 1.4. Lazerlərin fəal mühitinin doldurulma üsulları

Səviyyələrin inversiya məskunlaşmasının yaradılması prosesi fəal və ya lazer mühitinin doldurulması adlanır. Doldurmanın bütün metodları müəyyən həyacanlandırılmış halların effektiv məskunlaşmasına və ya yuxarı lazer səviyyələrinin selektiv məskunlaşmasına yönəldilib. Aşağıdakı üsullar doldurulmanın əsas üsullarıdır:

1. Optik doldurulma, əsasən kondensasiya olunmuş mühitlərdə lazerlərinin həyacanlanması üçün (doldurulmanın üç- və dördsəviyyəli sxemləri) istifadə olunur.

2. Fotodissosiyalı doldurulma (optik doldurulmanın növü) doldurmanın işıq şüasının udulması zamanı dissosiasiya edən molekulyar qaz mühitlər üçün istifadə olunur. Dissosiasiyanın məhsulları arasında ən azı bir atom həyacanlanmış halda ola bilər. Ən məşhur C_3F_7I və ya CF_3I molekulyar birləşmələrini özündə saxlayan fəal mühitli fotodissosiyalı lazerlər, 1,315 mkm dalğa uzunluqlu şüalanma ilə yod atomlarının keçidlərində işləyir.

3. Qaz boşalma – həm aşağı (<50 mm c. s.), həm də yüksək (~1 atm) təzyiqli qaz lazerlərinin doldurulmasının ən geniş yayılmış metodlarından biridir. Qaz boşalmanın tətbiqi 0,1115-337 mkm dalğa uzunluqlu diapazonda təxminən 130 müxtəlif element və molekulyar birləşmələrdən istifadə etməklə atomların, ionların, molekulların 6000-dən çox keçidlərində generasiya almağa imkan verir.

4. Kimyəvi doldurulma kimyəvi lazerlərdə səviyyələrin inversiyalı məskunlaşmanın yaradılması üçün istifadə olunur. İnversiyalı məskunlaşma bilavasitə fəal mühitin komponentlərinin arasında kimyəvi reaksiyalar prosesində yaranır. Kimyəvi

lazerin şüalanması kimyəvi enerjinin lazer şüalanmasına birbaşa çevrilməsinin nəticəsidir. Kimyəvi reaksiyaların başlanması üçün əksər hallarda qaz boşalmanın müxtəlif növlərindən və sürətli elektron dəstələrindən istifadə olunur. HF molekulunun rəqsi-fırlanma keçidlərində(2,6-3,3mkm) kimyəvi lazerləri ən tanınmışdır.

5. 1000-2000 K temperatura qədər qızdırılan qaz qarışığının sürətli soyumasına əsaslanan qaz dinamiki doldurma. Lazer mühitləri kimi CO₂ (10,6 mkm) lazer qarışığı əsasında molekulyar qazlar daha çox istifadə olunur.

6. Lazerin doldurulması yüksək sürətli elektronlar və ionlar, nüvə reaktorları, nüvə partlayıcı qurğuları, radioaktiv izotoplardan istifadə zamanı ionlaşmış şüa ilə baş verir.

Elmi ədəbiyyatda doldurulmanın bu ənənəvi metodlarından başqa lazerlərinin doldurulması üçün güclü, kompakt və enerji tutumu böyük olan nüvə enerjisi mənbələrindən istifadə olunması mümkünlüyü nəzərdən keçirilir. Fəal mühitlərin doldurulması üçün nüvə şüalarının tətbiqi və bunun əsasında nüvə doldurmalı lazerlərin yaradılması, iki istiqamətin-kvant elektronikası və nüvə fizikasının kəsişməsində formalaşması nisbətən yeni elmi-texniki istiqamətdir. Keçən əsrin 60-cı illərindən indiyədək keçən, təxminən 55 ildə bu istiqamətdə aparılan işlər müəyyən ardıcıl mənbələrindən - lazerlərin doldurulması üçün nüvə enerji mənbələrindən istifadə edilməsi təklifindən tutmuş nüvə doldurmalı lazerlərin müxtəlif növlərinin yaradılmasına qədər keçmişdir.

Hal-hazırda nüvə doldurmalı lazerlərin tədqiqi elə bir mərhələyə gəlib çatmışdır ki, artıq konkret təbiiqlərə fasiləsiz və impuls nüvə-lazer qurğularının mühəndis-konstruktor hazırlaması tam reallıqdır. Belə qurğular nüvə fizikasının və

texnikanın, kvant elektronikası, qaz dinamikası, optikanın və s. nailiyyətlərinə əsaslanan kompleks cihazlardır.

Doldurma üsullarına görə qaz lazerlərini **qaz boşalması, qazo dinamikı və kimyəvi** növlərə bölürlər. Prinsipcə, qaz lazerlərində optik doldurma da istifadə oluna bilər, lakin onun realizasiyası üçün dar spektral intervalda şüalanma mənbəyinin olması vacibdir, bu interval aktiv qazın udulma spektri ilə üst-üstə düşməlidir. Buna görə də qaz lazerlərində optik doldurma effektiv deyildir. Qazboşalma lazerlər daha geniş yayılmağa başladı, onları da öz növbəsində üç qrupa bölürlər: **atomar, ion və molekulyar**.

Qaz boşalması bilavasitə aktiv mühitin özündə yaranmış kimi, elə iş sxemləri mümkündür ki, bu zaman boşalma köməkçi qazın köməyi ilə də baş verir, sonra isə köməkçi qazın atomları işçi həcmdə öz enerjilərini işçi qazın atomlarına ötürürlər. Qaz boşalmalarının müxtəlif növləri istifadə olunur: sərbəst və sərbəst olmayan, impulsu və stasionar, közərən, yüksək tezlikli boşalma və sabit cərəyandakı boşalma.

Sərbəst olmayan boşalma zamanı qazın ionlaşması xarici təsirin nəticəsində baş verir, lakin həyəcanlaşma prosesi qaz boşalmadakı elektrik sahəsinin optimal gərginliyi zamanı dəşilmə şəraitindən asılı olmayaraq baş verir. Belə boşalmanı işçi həcmdə qazın böyük təzyiqi zamanı tətbiq etmək lazımdır, bu halda sərbəst qaz boşalmasını yandırmaq çətin olur.

İmpulsu boşalma üçün cərəyan impulslarının cəbhəsinin kəskin dəyişilməsi kimi, onlar arasındakı zaman intervalı da əhəmiyyətlidir. Bu halda inversiya cərəyan impulsununa cəbhəsində, ya da düşməsində yaranır, inversiyanın yaranma proseslərinin özləri isə stasionar olmayan plazmanın xassələri ilə əlaqəlidir. Əks halda, cərəyan impulsunun artması zamanı

hər bir vaxt intervalında plazmada stasionar (dəqiq desək - kvazistasionar) vəziyyət yarana bilər. Belə boşalma kvazistasionar adlanır. Kəsilməz və ya kvazikəsilməz təsirli qaz lazerlərinin həyəcənlanması üçün tətbiq edilən stasionar boşalma qövsi və közərən adlanan iki növə ayrılır.

Qövsi boşalma üçün cərəyanın böyük sıxlığı, qazın yüksək effektiv temperaturu, boşalmanın parlaq ipliyi xarakterikdir. Közərən boşalma üçün, əksinə, cərəyanın çox da böyük olmayan sıxlığı, qazın təxminən ətraf mühitin temperaturuna bərabər olan aşağı temperaturu və ionlaşmanın zəif dərəcəsi xarakterikdir.

§1.5. Qaz boşalmalarda fiziki proseslər

Qazdan elektrik cərəyanı buraxdıqda onda müxtəlif fiziki proseslər inkişaf edirlər, bu proseslər atomların həyəcənlanmasına səbəb olur və onların daha artıq daxili enerjisini təyin edirlər. Sərbəst yüklər (bir qayda olaraq, elektronlar və biryüklü ionlar) elektrik sahəsi vasitəsilə sürətlənilər, bu zaman özlərinin kinetik enerjisini artırır. Adətən, ionların hərəkəti heç bir rol oynamır, belə ki, onların yürüklüyü azdır. Qaz boşalmasında aşağı təzyiq zamanı elektronların orta kinetik enerjisi atom və ionların kinetik enerjisindən bir qədər çoxdur. Çox qısa zaman aralığında elektronlar tarazlıq vəziyyətinə çatırlar, bu vəziyyətdə onların sürətlərinin paylanması Maksvell qanununu ödəyir. Elektronlara hər hansı T_e temperaturunu aid etmək olar ki, bu temperatur ətraf mühitin və atomların temperaturundan fərqlənir.

Əgər qaz bir növ hissəciklərdən ibarətdirsə, onda qaz atomlarının həyəcənlanması (yuxarı enerji halına keçid),

əsasən, atomların elektronlarla toqquşmaları nəticəsində əmələ gəlir. Qaz qarışığında, həmçinin, müxtəlif növlü hissəciklər arasındakı enerjilərin rezonans mübadiləsi də mümkündür. Bu zaman enerji alan hissəcik yuxarı enerji halına keçir, enerjini verən ikinci hissəcik aşağı hala qaydır. Əgər hər iki hissəciyin daxili enerjisinin dəyişilməsi eynidirsə, onda bu prosesin ehtimalı daha böyükdür.

Atomun aşağı enerji səviyyələrə keçidinin yuxarıda təsvir olunan mexanizmindən başqa, digər proseslər də mümkündür, belə ki,

- 1) həyəcanlanmış atomun elektronla toqquşması;
- 2) atomun qaz boşalma borunun divarları ilə toqquşması;
- 3) özbaşına şüalanma

prosesləri zamanı atomun daxili enerjisi azalır.

Şüalanma diffuziyasının effekti vacib effektdir (əks halda, şüalanmanın zəbt olunması və ya öz-özünə udulma), o, özbaşına keçidlərin effektiv sürətini azaldır. Şüalanma diffuziyasının effekti ondan ibarətdir ki, qonşu atomlar tərəfindən əmələ gələn şüalanmanın rezonans udulma imkanı vardır, bu effektin digər, ümumi halda, ixtiyari istiqamətdə sonrakı yenidən şüalanması da olur. Deməli, özbaşına şüalanma əhəmiyyətli dərəcədə olan zaman aralığında qazda ola bilər, oradan diffuziya qanunlarına uyğun olaraq çıxarılabilir.

Beləliklə, qazda çoxlu sayda həyəcanlanma və relaksasiya prosesləri baş verir. Buna görə də ümumi halda inversiya məskunlaşmanın yaranma mexanizmi mürəkkəbdir. Lakin, boşalmanın növünü və qaz qarışığının tərkibini konkretləşdirməyərək, demək olar ki, relaksasiyanın kiçik sürətinə malik olan səviyyələr məskunlaşacaqlar. Yuxarıda deyilən ümumi xarakterli qeydlər qaz lazerlərinin müxtəlif

növlərindəki işçi maddələrin ümumi və spesifik xassələrinin təsvirini asanlaşdırır.

1980-90-cu illərdə qazboşalmada iki cür toqquşmalar nəticəsində həyəcanlaşma prosesləri təhlil olunurdu. O illərin lazer fizikasına aid ədəbiyyatda Ne atomunun 1s səviyyəsinin boşalması üçün borunu elliptik formada hazırlanması təklif olunurdu. Bunun hesabına aşağı işçi səviyyələrin (2p və 3p) effektiv boşalmasını təmin olunurdu. Lakin son 20-30 illər ərzində dünya elmi mərkəzlərində aparılan elmi tədqiqatlarda yeni həyəcanlaşma mexanizmlərin mövcudluğu sübut olunmuşdur. Nəticə olaraq yeni ambipolyar diffuziya anlayışı öyrənilmişdir.

Ambipolar diffuziya zəif ionlaşmış plazmada elektronların və ionların birgə yayılması prosesidir. Bu halda elektronların və ionların axını bərabərdir və ya sabit bir qiymətlə fərqlənir. Xarici maqnit sahəsinin olmaması şəraitində plazma diffuziyası hissəciklərin istilik hərəkət sürəti onların aralarında və neytral atomlarla toqquşmanın tezliyi ilə müəyyən edilir. Elektronların kütləsi ionlardan daha kiçik olduğundan, onların istilik hərəkət sürəti daha yüksəkdir. Nəticədə, elektronlar daha yüksək hərəkətlə və daha sürətli yayılırlar, diffuziya edirlər. Lakin elektronların və ionların ayrılmasından meydana gələn elektrostatik sahə elektronların hərəkətinə maneə törədir və eyni zamanda ionların hərəkətini sürətləndirir. Beləliklə, elektronların və ionların diffuziya dərəcələri müqayisə edilir, plazma üçün qeyri-neytrallıq şəraitlərinin olmasını təmin edir.

Tədqiqatlar göstərmişdir ki, He qazı yox Ne qazı üçün ambipolyar diffuziya daha ehtimallıdır. Elektronların enerjiyə görə paylanma funksiyası ölçülmüş və təcrübə olaraq yeni bir

fiziki hadisə – ambipolyar diffuziya müddətinin tərs qiymətinə bərabər olan tezliklərdə elektrik sahəsinin modullaşması və elektronların enerjiyə görə paylanma funksiyasının formasının dəyişməsi aşkar olunmuşdur. Boşalmada arqon təsirsiz qazının olması elektronların sərbəst qaçış yolunun uzunluğunu kiçildir və təsirsiz qazın $p = 1$. Tor təzyiqində onun uzunluğu r - dən xeyli kiçik olur. Bu halda ionların və elektronların balansı ambipolyar diffuziya ilə təyin olunur və yüklü zərrəciklərin xarakterik yaşama müddətləri təmiz civə buxarı halındakından kifayət qədər böyük olur.

§ 1.6. Qaz boşalma növləri

Közəran boşalmanın iki növündən istifadə edirlər: **sabit cərəyandakı** boşalma və **yüksək tezlikli** boşalma. Adətən, 10-50 MQs tezliklərində baş verən yüksək tezlikli boşalma zamanı elektrodlar boşalma borunun xarici tərəfində metallik kəmərlər şəklində yerləşirlər. Bu, boşalma borunun quruluşunu sadələşdirir və onun hazırlanması, işlənməsi zamanı bir sıra əlverişli şəraitlər yaradır. Lakin yüksək tezlikli boşalma zamanı borunun divarları qızır və işçi həcmə əlavə qaz ayrılması baş verir. Buna görə də yüksək tezlikli boşalmaya malik olan boruların istifadə müddəti sabit cərəyandakı boşalmaya malik olan boruların istifadə müddətindən azdır. Bundan başqa, yüksək tezlikli boşalma qəbuledici və digər elektron cihazlarında maneə yaradır. Bütün bunlar ona gətirib çıxarır ki, son zamanlar sənaye qazboşalma lazerlərdə sabit cərəyandakı közəran boşalma istifadə olunur. Bu halda elektrodlar (katod və anod) borunun daxilində yerləşirlər. Onlara ballast müqavimət vasitəsilə sabit gərginliyi verilir.

§ 1.7. Aşağı təzyiqli qaz lazerləri

Qaz lazerlərində aktiv mühitlər kimi neytral və ya ionlaşdırılmış atom və molekulların enerjisinin elektron, rəqsi, fırlanan səviyyələri arasındakı müxtəlif şəkilli keçidlərdən istifadə oluna bilər. Buna görə də qaz lazerləri 6000-dən çox müxtəlif keçidlərdə spektrin çox geniş diapazonunda –UB oblastdan submillimetr oblata kimi şüalanırlar.

Qaz boşalma lazerlər daha geniş yayılmışlar, onlar, öz növbəsində, üç qrupa bölünürlər: atomar, ion və molekulyar. Qaz boşalma, adətən, bilavasitə fəal mühitin özündə yaranır. Qaz boşalmanın müxtəlif formaları istifadə olunur: sərbəst və qeyri-sərbəst, impulsu və stasionar, qövsi və alovuz, yüksək tezlikli boşalma və sabit cərəyanın boşalma.

Aşağı təzyiqli (≤ 10 mm c.s.) qaz boşalma lazerlərin doldurulması üçün stasionar yüklərin iki növündən istifadə edirlər: közərən (atom keçidlərindəki lazerlər və molekulyar lazerlər) və qövsi (ion lazerləri). Közərən boşalma – ionizasiyanın nisbətən aşağı tərtibinə ($\leq 10^{-4}$) malik olan zəif dəqiqlikli (cərəyanın sıxlığı $\leq 0,1$ A/sm²) aşağı temperaturu boşalma, qövsi boşalma - ionizasiyanın yüksək tərtibinə ($>10^{-2}$) malik olan güclü dəqiqlikli (cərəyanın sıxlığı 1000 A/sm² qədər) yüksək temperaturu boşalma.

Aşağı təzyiqli çox saylı qaz lazerləri içərisində stasionar közərmə boşalma həyəcanlanan He-Ne ($\lambda = 0,63; 1,15$ və $3,39$ mkm) və He-Cd ($\lambda = 325,0$ və $441,6$ mkm) qarışıqlardakı lazerlərin, qövsi boşalma ilə həyəcanlanan lazerlər içərisində isə ion arqon lazerlərin ($455-515$ nm diapazonunda 8 xətt)

xüsusiyyətləri ətraflı araşdırılmışdır. Onlardan daha güclüsü argonlu ion lazeridir, bu lazer üçün şüalanma gücü 0,1 %-ə qədər dəqiqlikli FİƏ olduqda 100 Vt-a çatır.

Qaz boşalma lazerlər içərisində öz-özünə məhdudlaşan keçidlərdəki lazerlər adlanan lazerlər maraq kəsb edirlər, bu keçidlərin yuxarı lazer səviyyəsi birinci rezonans vəziyyəti, aşağı lazer səviyyəsi isə metastabil vəziyyətdir. Rezonans səviyyənin həyəcanlanma effektivliyi çox yüksək ola bilər. Belə ki, civənin buxarlarındakı boşalmada rezonans səviyyənin həyəcanlanmasına boşalmaya daxil edilən, 60 %-ə yaxın enerji sərf olunur. Belə lazerlər yalnız impulsu rejimdə işləyə bilərlər, belə ki, aşağı vəziyyət uzun yaşayandır və məskunlaşmaların inversiyası yalnız qısa zamana qədər, yəni yuxarı və aşağı səviyyələrin məskunlaşmaları bərabər olmayana qədər dözə bilər.

Hal-hazırda spektrin 310-650 nm diapazonunda Pb, MN, Cu, Ba, Sr, Au, Ca, Yb, Bi, Fe, Tl metallarının atom və ionlarının təxminən 40 öz-özünə məhdudlaşan keçidlərində generasiya alınmışdır. Belə lazerlərin fəal mühitləri qismində 10-50 mm c.s. təzyiqlərində bufer qazının (helium, neon və ya argon) qarışıqları və 0,3-3 mm c.s. parsial təzyiqlərinə malik olan metal buxarları istifadə olunur. Metal buxarların lazımlı konsentrasiyasını almaq üçün qaz boşalma boruları borulu sobalarda (rezervuarlarda) qızdırırlar və ya xüsusi öz-özünə qızdırılan yüklü borulardan istifadə edirlər.

Öz-özünə məhdudlaşan keçidlərdə lazer sinifinin ən məşhur nümayəndəsi mis buxarlarındakı ($\lambda = 511$ nm və 578 nm) lazerdir, bu lazer üçün maksimal energetik parametrlər alınmışdır. İmpulsların təkrarlanmasının 235 kQs tezliyinə malik olan impuls-periodik rejimdə işləyərkən lazer

şüalanmasının orta gücü dəqiqliyi 1 %-ə yaxın kifayət qədər yüksək FİƏ zamanı 100 Vt təşkil edir.

Öz-özünə məhdudlaşan keçidlərdə impuls rejimdə generasiya, həmçinin, N_2 ($\lambda = 320 - 8200$ nm), H_2 ($\lambda = 110 - 160; 830 - 1600$ nm), CO ($\lambda = 450 - 660$ nm), NO ($\lambda = 1022$ nm) molekullarının elektron keçidlərində də alınmışdır, eyni zamanda aşağı təzyiqli (10-40 mm c.s.) N_2 - və H_2 -lazerlərinin doldurulması üçün yalnız qazboşalma yox, həm də sürətli elektronların dəstəsi istifadə olunmuşdur.

FƏSİL II

ATOMAR QAZ LAZERLƏR

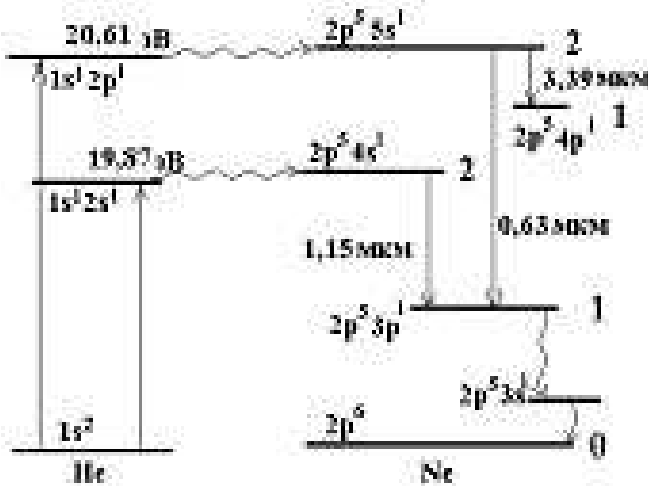
§ 2.1. He-Ne lazerlər

Əksər qaz lazerlərində məskunlaşmaların inversiyası qaz boşalmasında yaranır. He-Ne lazeri üçün işçi mühit adətən elektrik cərəyanının inert He və Ne qaz qarışığından keçməsi və Ne atomunda keçidlərdə şüalanmanı gücləndirməsi nəticəsində yaranan sönən boşalma plazması tipli qaz boşalma plazması olur. Təmiz Ne-da fasiləsiz rejimdə inversiya yaratmaq mümkün olsa da çətinlik, bu haqda sonra danışılacaq. Bu çətinlik bir çox hallar üçün kifayət qədər ümumi xarakter daşımaqla bərabər, boşalmaya həyəcənlanma enerjisinin donoru kimi əvvə helium qazı yeridilməsi ilə kifayətlənir.

Aşağı lazer səviyyəsi 1 əsas (həyəcanlanmamış) səviyyədə olduqda, ikisəviyyəli sxemdə dayanıqlı inversiyanı yaratmaq praktiki olaraq mümkün deyil, belə ki, əsas vəziyyətin məskunlaşması böyükdür. Aşağı lazer səviyyəsinin 1 həyəcanlanmış vəziyyətlərdən biri olması və şüalanmayan (relaksasiya) keçidlərin hesabına sürətlə boşalması vacibdir. Bu sxem üzrə işləyən birinci qaz lazeri helium-neon qazyüklü lazer olmuşdur. Burada həyəcanlanmanın mənbəyi heliumdur, qaz qarışığında onun iştirakı neona nisbətən 5...10 dəfə çoxdur. Heliumun həyəcanlanmış vəziyyətləri metastabilirlər, belə ki, onlardan əsas vəziyyətə optik keçidə seçim qaydalarına əsasən

qadağa qoyulmuşdur. Buna görə də həyəcanlanmış vəziyyətlərin kifayət qədər böyük yaşama vaxtı (təxminən 1 ms) vardır və onlar yükləki elektron zərbələrdən daxil olan enerjini effektiv olaraq toplayırlar.

Neon atomunun iki həyəcanlanmış vəziyyəti 2 helium atomunun həyəcanlanmış vəziyyətlərinə yaxındır (şək. 2.1). Səviyyələrdəki fərq 30 meV-i aşmır. Heliumun nisbətən yüksək konsentrasiyasına görə neonun yuxarı səviyyələrinin yerləşməsi müqayisə olunacaq dərəcədə sürətlə baş verir. Aşağı səviyyə 1 şüalanmayan keçidlərin hesabına sürətlə boşalır. Bu, üçsəviyyəli sxemdir.

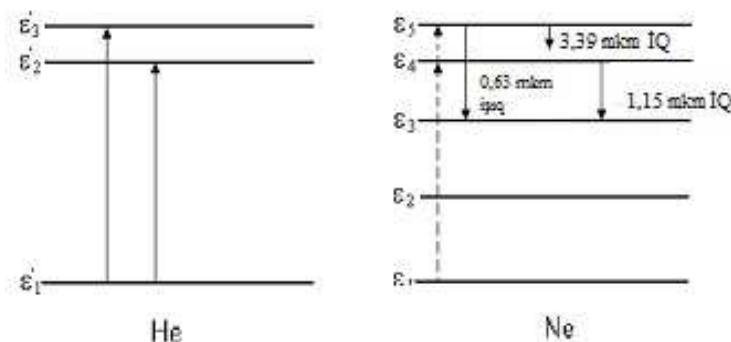


Şəkil 2.1. Helium –neon lazerin enerji səviyyələri.

İkinci qazı tətbiq etmədən neonda inversiyanı bilavasitə yaratmaq olmaz. Buna mane olur, birincisi, həyəcanlanmış səviyyələrdən optik keçidlərin olması, bu isə onların

məskunlaşmasını məhdudlaşdırır. İkincisi, neon atomunda aralıq metastabil səviyyə mövcuddur, bu səviyyə aşağı lazer səviyyəsinin sürətli boşalmasına mane olur, özü isə boşalma prosesində yaxşı məskunlaşır. Buna görə də aralıq səviyyənin olması lazer mühitində qaz boşalma cərəyanına nəzərən optimuma səbəb olur

Helium və neon qazlarının qarışığının enerji halları şərti olaraq səviyyələr şəklində təsvir oluna bilər (şək. 2.2). İşçi maddə neon atomlarıdır.



Şək. 2.2. He və Ne qazlarının şərti enerji səviyyələri.

4 və 5 səviyyələrinin yaşama müddəti 3 səviyyəsinin yaşama müddətindən 10 dəfə böyükdür. Bu, 4 və 5 səviyyələrində həddindən artıq məskunlaşmanın yaranmasını asanlaşdırır. 4 və 5 səviyyələri bir neçə altsəviyyələrdən ibarətdir, bu altsəviyyələrdən 3 səviyyəsinə şüalanma keçidlər mümkündür. Buna görə də bir neçə tezliklərdə şüalanma mümkündür. $4 \rightarrow 3$ tipli keçidlər IQ diapazonunda şüalanma verirlər. Onlardan ən güclüsü dalğa uzunluğu 1,15 mkm olan şüalanmaya malikdir. $5 \rightarrow 3$ keçidlərinə görünən diapazonda

şüalanma uyğundur. Ən güclü keçid $\lambda = 0.6328$ mkm-ə malikdir. Bundan başqa, $\lambda = 3.39$ mkm şüalanması asanlıqla reallaşır, bu şüalanma 5 səviyyəsindən əlavə səviyyəyə keçidlərə uyğundur və şəkildə işarə olunmamışdır. Bu və ya digər xəttin həyəcanlanması lazerin – açıq rezonatorun rəqsi sisteminin rezonans xassələri ilə təyin olunur, xüsusi halda, belə xassə lazerin – açıq rezonatorun güzgülərinin əks olunma əmsalının tezlikdən asılılığıdır.

Ne atomlarında keçid xəttinin enini aşağıdakı effektlər təyin edir:

- toqquşmalar;
- özbaşına şüalanma;
- Dopler effekti.

He-Ne lazerində $p = 0.5$ mm c.s. – tipik təzyiqdə xəttin eni atomların toqquşmaları arasındakı sonlu zamanla təyin olunur, o, kiçikdir və 0,64 MHs təşkil edir. Xəttin özbaşına şüalanma ilə əlaqəli eni şüalanmanın A_{nm} ehtimalı ilə və ya səviyyənin τ_n yaşama müddəti ilə təyin olunur. Lazer keçidlərində neonun yuxarı səviyyələri üçün $\tau \sim 10^{-8}$ s. Buna görə də $\Delta\nu_{sp} = \frac{A_{nm}}{2\pi} \sim 20$ MHs.

Xəttin dopler enlənməsi daha çox əhəmiyyətlidir. Xəttin dopler eninin hesablanması neon atomu üçün $T = 300^0$ K temperaturunda və şüalanmanın $\Delta\nu = 1700$ MHs $\lambda = 0.6328$ mkm dalğa uzunluğunda verir. Beləliklə, Dopler effekti əsas mexanizmdir, o, şüalanma xəttinin enlənməsinə gətirib çıxarır. Xəttin eninin eksperimental olaraq alınmış qiyməti hesablanmış qiymətlə yaxşı uyğunlaşır. Bu onu göstərir ki,

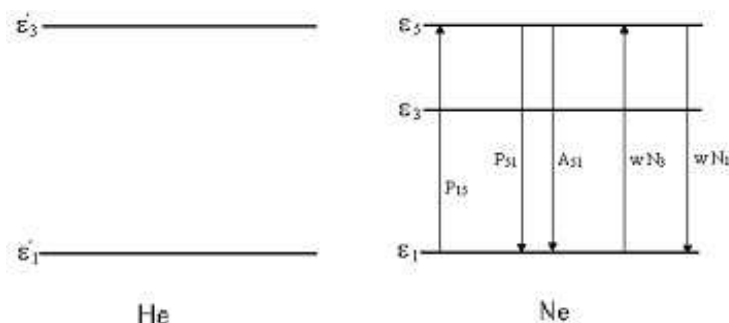
neon atomlarının effektiv temperaturu ətraf mühitin temperaturu ilə təyin olunur.

Helium qazı neon atomlarında inversiya məskunlaşmasının yaradılmasını asanlaşdırmaq üçün daxil edilir. Helium atomları $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2, \varepsilon'_3$ enerji səviyyələrinə malikdir (bax. şəkl. 2.2), enerjilər arasındakı $\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1, \varepsilon'_3 - \varepsilon'_1$ fərq neon atomundakı $\varepsilon_4 - \varepsilon_1, \varepsilon_5 - \varepsilon_1$ enerji fərqi ilə istilik hərəkətinin kT enerjisinə qədər dəqiqliklə üst-üstə düşür. Helium atomları elektronlarla toqquşduqda həyəcanlanırlar. Heliumun həyəcanlanmış atomu neonun həyəcanlanmamış atomu ilə toqquşduqda həyəcanlanmanın rezonans ötürülməsi baş verir. Nəticədə neon atomları həyəcanlanmış hala, helium atomları isə əsas hala keçirlər. Əks proses də mümkündür, bu halda həyəcanlanmış halda olan neon atomlarından əsasən həyəcanlanmamış halda olan helium atomlarına enerji ötürülməsi baş verir. Lakin elə şərtlər yarana bilər ki, neonun yuxarı səviyyələrini boşaldan bu proseslər əhəmiyyətsiz olar.

Həyəcanlanmanın rezonans ötürülməsinə daha ətraflı baxaq, bunun üçün neon və helium atomlarının yuxarı səviyyələrindən birini ayıraq (məsələn, neonda 5 səviyyəsini və heliumda 3 səviyyəsini, şəkl. 2.3).

Əgər hesab etsək ki, neon atomlarının həyəcanlanması zamanı 3 səviyyəsinin məskunlaşması dəyişilmir, onda 5 səviyyəsinin məskunlaşmasına aşağıdakı proseslər təsir edirlər: a) özbaşına (spontan) keçidlər, onların ehtimalı A_{51} -dir; b) relaksasiyalar (qaz boşalma borunun divarları ilə, qalıq qazın molekulları ilə və s. toqquşmalar); c) helium atomları ilə toqquşmalar. Hesab edəcəyik ki, heliumun həyəcanlanmış atomunun neonun həyəcanlanmamış atomu ilə toqquşması

zamanı enerjinin rezonans ötürülməsinin ehtimalı neonun həyəcanlanmış atomunun heliumun həyəcanlanmamış atomu ilə toqquşması zamanı yaranan analogi prosesin ehtimalına bərabərdir.



Şək. 2.3. He və Ne atomlarının yuxarı səviyyələri.

He-Ne lazerində baş verən hadisələri anlamaq üçün atomların enerji səviyyələri barədə məlumatı bilmək lazımdır. Bu səbəbdən yuxarıda deyilənlərə nəzərən bu mövzuya daha ətraflı baxaq.

Şəkil 2.4-də He və Ne atomlarının enerji səviyyələrinin, ancaq ən aşağı və eyni zamanda daha mühüm səviyyələrini nəzərə almaqla, birgə sxemi göstərilmişdir.

He atomu Mendeleyevin kimyəvi elementlərin periodik sistemində II yerdə durur. Bu cədvəldə I yerdə duran və müsbət yüklü nüvədən başqa ancaq 1 elektrona malik olan ən sadə hidrogen atomu ilə müqayisədə, helium atomu iki dəfə böyük müsbət yüklü nüvəyə və elektrik cəhətdən neytral hissəcik kimi iki mənfi yüklü elektrona malikdir (atomun elektrik yükü atomun Mendeleyev cədvəlindəki sıra nömrəsini elementar vurmaqla həyacanlanır). Bir elektronu qopmuş bir yüklü

helium ionu hidrogenə oxşar iondur. He^+ ionundakı vahid elektronun halı hidrogen atomunda olduğu kimi 4 kvant ədədi vasitəsilə: baş kvant ədədi n ($n = 1, 2, 3, \dots$), orbital kvant ədədi l ($l = 0, 1, 2, \dots, n-1$), orbital maqnit kvant ədədi m_l ($m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$) və ancaq iki qiymət ala bilən spin maqnit kvant ədədi $m_s = \frac{1}{2}$ və ya $m_s = -\frac{1}{2}$ təsvir oluna bilər.

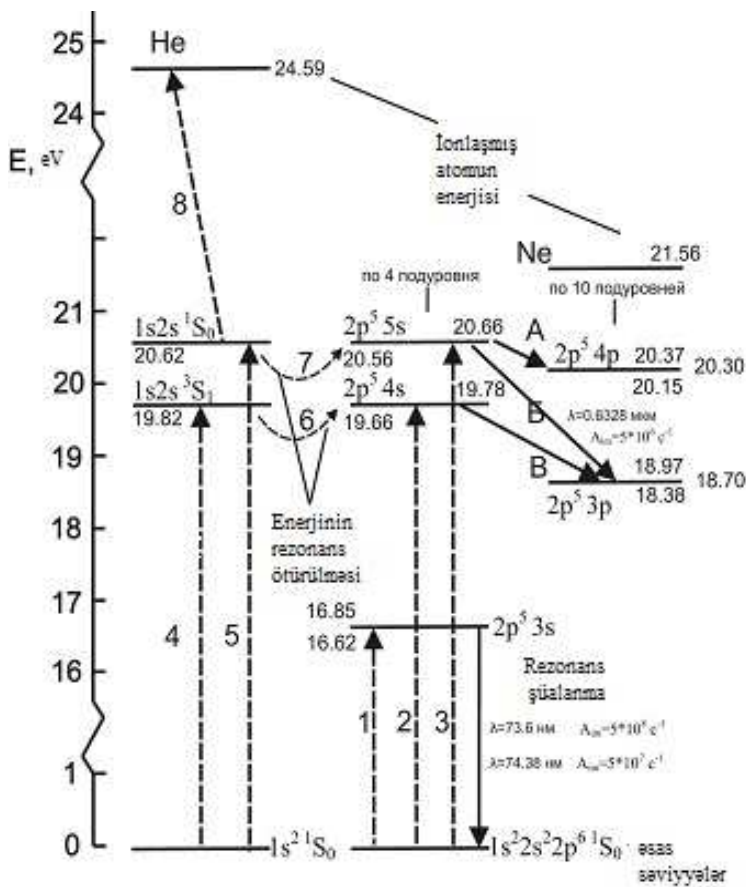
Səviyyələrin yanındakı rəqəmlər atomun əsas enerji səviyyəsindən hesablanmış enerjinin eV-la ifadəsidir. Ne atomu üçün həyacanlanmış səviyyələrin sxemi göstərilmişdir. Təsvir olunan hər bir səviyyə bir-birinə sıx yerləşmiş 4 və ya 10 real səviyyədən (alt səviyyədən) ibarət sistemdir. Hər bir şərti səviyyənin yanında Ne atomunun elektron konfigurasiyasının dəyişən hissəsi göstərilmişdir, həm də alt səviyyələr sistemində səviyyələrin enerjilərinin ən böyük (səviyyənin üstündə) və ən kiçik (səviyyənin altında) qiymətləri qeyd olunmuşdur. Səviyyələrdən sağda A, B və V şüalanma lazer keçidlərinə uyğun alt səviyyələrin enerjilərinin qiymətləri göstərilmişdir. $2p^5 4s$ və $2p^5 5s$ konfigurasiyaları üçün enerjinin bu qiymətləri alt səviyyələr sistemi üçün maksimaldır. Qırıq oxlar atomların enerjilərinin dəyişməsi ilə baş verən toqquşma proseslərini əks etdirir. Bütöv oxlar Ne atomunda şüalanma keçidlərini göstərir.

He^+ ionunun əsas halı hidrogen atomunun əsas halı kimi $n = 1$, $l = 0$, $m_l = 0$, $m_s = \pm \frac{1}{2}$ kvant ədədləri ilə xarakterizə olunur. II elektronun əlavə olunması He^+ ionunu neytral He atomuna çevirir, bu da Mendeleyev cədvəlində birinci çoxelektronlu atomdur. Nəzərə almaq lazımdır ki, çoxelektronlu atomların elektron örtüyünün quruluşuna

keyfiyyət cəhətdən baxdıqda elektronların öz aralarındakı qarşılıqlı təsirlər nəzərə alınmır. Bu imkan verir ki, hər elektrona göstərilən kvant ədədlərinin individual təqribi yığını aid edilsin.

Qeyd edək ki, ixtiyari elektron kollektivinə və uyğun olaraq çoxelektronlu atomlarındakı elektronlar üçün Pauli prinsipi doğrudur: eyni bir kvant halında iki elektron ola bilməz, yəni atomda bütün kvant ədədləri bərabər olan iki elektron ola bilməz. Pauli prinsipini nəzərə alsaq, He atomundakı II elektron həm də $n = 1$, $l = 0$, $m_e = 0$ qiymətləri ala bilər, ancaq bu halda mütləq m_s -in $(+\frac{1}{2}$ və ya $-\frac{1}{2})$ digər qiymətini almalıdır ki, bu da mümkündür. m_s -in fərqli qiymətlərində ayrı-ayrı elektronların spin mexaniki momentləri əks istiqamətlərə yönəlmiş olur, bunun nəticəsində cəm spin mexaniki momenti sıfıra bərabər olur. Eyni n və l kvant ədədlərinə malik elektronlar –ekvivalent adlanır - $l = 0$ olduqda onları kiçik s hərfi ilə işarə edirlər ($l = 1$ olduqda kiçik p , $l = 2$ -kiçik d və s. işarə edirlər).

Nəticədə He atomu əsas (həyacanlanmamış) halda $2s$ elektrondan ibarət elektron örtüyünə malik olur. Onu $n = 1$ -də $1s^2$ (ümumi halda ns^2 kimi) işarə edirlər, sağdakı 2 rəqəmi ekvivalent elektronların sayını bildirir. Bu cür elektron örtüyü qapalı (bağlı) olur, çünki o yeni elektronların əlavə olmasına imkan vermir. Bu örtüyün cəm mexaniki (eləcə də maqnit) orbital, spin və ümumi momentləri sıfır olur, bu kvant ədədləri uyğun olaraq L , S , J (böyük hərflər istifadə olunur) göstərilir, $1s^2$ örtüyü üçün $L=0$, $S=0$, $J=0$. $1s^2$ örtüyünün qapalı olması He atomunun kimyəvi inert olması şərtləndirir.



Şəkil 2.4. He və Ne atomlarının enerji səviyyələrinin sxemi.

Şəkil 2.4-də He atomunun əsas halına uyğun energetik səviyyə $1s^2S_0$ kimi işarələnib. Belə işarələmə zamanı əvvəlcə atomun elektron konfigurasiyası, ona daxil olan müxtəlif elektronları və ya elektronların ən mühüm xarici hissəsini qeyd etməklə göstərilir, sonra isə səviyyənin LS -əlaqəsi (Russel-Saunders əlaqəsi) 1S_0 şəklində göstərilir. 1S_0 işarələməsində solda yuxarıda S spin kvant ədədi vasitəsilə verilən və $S=0$ -da 1-ə bərabər olan səviyyənin $2S+1$ multipletliyi göstərilir. Sağda aşağıda J-nin qiyməti göstərilir (verilən halda $J=0$). Mərkəzi hərf L-in qiymətini bildirir: $L=0$ -da böyük S hərfi yazılır (bunu spin kvant ədədi S-lə (səviyyənin multipletliyini göstərir) qarışdırmaq olmaz) $L=1$ -də böyük P hərfi; $L=2$ -də böyük D hərfi və s. yazılır.

Yada salmaq ki, LS -əlaqə yaxınlaşmasında əvvəlcə ayrı-ayrılıqda vektor kəmiyyətlər kimi bütün elektronların ümumi orbital $\vec{L}$ və spin $\vec{S}$ mexaniki momentləri (hərəkət miqdarı momentləri) nəzərdən keçirilir. Orbital mexaniki momentin xarakteristikası L kvant ədədi, spin mexaniki momentin xarakteristikası S kvant ədədidir. Sonra tam mexaniki moment $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ nəzərdən keçirilir, bunun xarakteristikası J kvant ədədidir.

Şəkil 2.4-də həm də He atomunun ilk iki həyacanlaşmış səviyyəsi göstərilmişdir. Onlar işarələri $1s2s^1S_0$ (enerjisi 20.62eV) və $1s2s^3S_1$ (enerjisi 19.82eV) LS -əlaqə yaxınlaşmasında verilib, bu şüalanma və udma spektrlərinin eksperimental tədqiqinin göstərdiyi kimi, He atomu üçün yaxşıdır. Enerji səviyyələrinin bütün göstərilən qiymətləri atomun əsas səviyyəsinin enerjisindən hesablanır, onun enerjisi sıfıra bərabər götürülür. Bu səviyyələrə $1s2s$ elektron

konfigurasiyası uyğun gəlir, b u odeməkdir ki, heyacanlaşmış He atomunda s –elektronlardan birinə $n = 2$ uyğundur. Hər iki elektron eyni $l = 0$ və $m_l = 0$ -a malikdir, deməli $L = 0$, lakin fərqli n -rə malikdirlər. İndi m_s -in iki fərqli kombinasiyası mümkündür. $1s2s \ ^1S_0$ iki elektron üçün fərqli işarələrə malikdir - əsas səviyyədə olduğu kimi. Belə səviyyələr üçün spin kvant ədədi $S = 0$ və multipletlik $2S + 1 = 1$ -bunlar singlet hallardır. $1s2s \ ^3S_1$ səviyyəsi elə hala uyğundur ki, hər iki elektron üçün m_s -in qiyməti eynidir, yəni elektronların spin mexaniki momentləri bir (eyni) istiqamətdə yönəlir. Onlar üçün $S = 1$ və multipletlik $2S + 1 = 3$ -bunlar triplet hallar adlanır. Triplet hal üçün $1s2s \ ^3S_1$, $L = 0$ olduqda kvant ədədi $J = S = 1$.

Ne atomunun Mendeleyev cədvəlində sıra nömrəsi ondur. Ne atomunun nüvəsinin müsbət yükü hidrogen atomunun nüvəsinin yükündən 10 dəfə böyükdür və uyğun olaraq elektrik cəhətdən neytral olduğu üçün on (10) mənfi yüklü elektrona malikdir. Pauli prinsipinə görə Ne atomunun əsas (heyacanlaşmamış) halına $1s^2 2s^2 2p^6$ elektron konfigurasiyası uyğundur. Konfigurasiyanın ilk iki elektronu üçün $n = 1$ və onlar heyacanlaşmamış He atomunda olduğu kimi s -ekvivalent elektrondan $1s^2$ qapalı elektron örtüyünü əmələ gətirir. Sonrakı elektronlar üçün artıq $n = 2$, $l = 0$ və ya $l = 1$ olacaq və onlar $2s^2 2p^6$ elektron konfigurasiyaya malik olacaqlar, burada $l = 0$ olan iki s -elektron yeni qapalı $2s^2$ örtüyünü əmələ gətirir. $n = 2$ olduqda sonrakı əlavə olunan

elektronlarda $l = 1$, $m_l = -1, 0, +1$ və $m_s = \pm 1/2$ olmalıdır. Eyni bir n və $l = 1$ halında m_l və m_s -in müxtəlif cütlərinə malik elektronların sayı ancaq 6 ola bilər – onlar yenə də $2p^6$ qapalı örtüyünü əmələ gətirirlər – bu dəfə altı p -ekvivalent elektrondan $1s^2 2s^2 2p^6$ elektron konfigurasiyası, $n = 1$ və $n = 2$ olan yeni elektronların əlavə olunmasını mümkünsüz edir, bu da Ne atomunun kimyəvi neytrallığını şərtləndirir.

Şəkil 2.4 -də Ne atomunun əsas halına uyğun olan enerji səviyyəsi $1s^2 2s^2 2p^6 \ ^1S_0$ kimi işarə olunub və bu zaman nəzərə alınıb ki, $1s^2 2s^2 2p^6$ elektron konfigurasiyası He atomu üçün olduğu kimi $L = 0$, $S = 0$, $J = 0$ kvant ədədləri ilə xarakterizə olunur. Ne atomunun həyacanlaşmış halları p -ekvivalent elektronlardan birinin həyacanlaşması zamanı baş verir. $n \geq 3$ olan bu elektronun Ne atomunun digər hissəsi ilə qarşılıqlı təsir zamanı, onun elektron konfigurasiyası bir p -elektronsuz $1s^2 2s^2 2p^5$ olacaq və onun orbital, spin və tam momentləri sıfırdan fərqli olacaq və $L = 1$, $S = 1/2$, $J = 1/2$ və ya $3/2$ olacaq. Bu zaman enerji səviyyələrinin mürəkkəb sxemi yaranır, bunlar bir-birinə sıx yerləşmiş və aralarında çox sayda spektral keçidlər mümkün olan enerji səviyyələri qrupundan ibarətdir.

Spektrlərin eksperimental tədqiqi göstərdi ki, Ne atomu üçün LS -əlaqə gücü kənaraçıxma var, ona görə digər yaxınlaşmalar, məsələn LS -əlaqəyə əks olan $j -j$ əlaqə nəzərdən kiçirilir. Bu yaxınlaşmada əvvəlcə açıq elektron örtüyündə ayrılıqda götürülmüş hər bir elektron üçün elektronun orbital və spin momentlərinin cəmi kimi tam

mexaniki moment tapılır, onun xarakteristikası j kvant ədədidir. Sonra bütün elektronun tam momentləri toplanır və bütün elektron konfigurasiyasının tam mexaniki momenti $\vec{J}$ tapılır, onun xarakteristikası J kvant ədədidir.

Şəkil 2.4 -də Ne atomu üçün həm də mühüm aşağı enerji səviyyələri göstərilmişdir, bunlar bu atomun mürəkkəb energetik mənzərəsini ancaq sxematik əks etdirir. Ne atomunun həyacanlaşmış enerji səviyyələri müxtəlif dəyişən $2p^53s$, $2p^54s$, $2p^55s$ (bir p -ekvivalent elektron $n = 3, 4, 5$ malik s -elektron olur) və $2p^53p$ və $2p^54p$ (bir p -ekvivalent elektron $n = 3, 4$ malik p -elektron olur) elektron konfigurasiyalarına uyğundur, burada elektron konfigurasiyasının bütün səviyyələr üçün ümumi olan $1s^22s^2$ hissəsi göstərilməmişdir. Atomun hər bir $2p^5ns$ ($n \geq 3$) konfigurasiyasına enerji qiymətləri müxtəlif olan yaxın yerləşmiş dörd enerji səviyyəsi uyğundur. $2p^53s$ konfigurasiyası üçün müxtəlif səviyyələrin enerjiləri 16.62 eV - 16.85 eV, $2p^54s$ üçün 19.66 eV - 19.78 eV, $2p^55s$ üçün 20.56 eV - 20.66 eV aralığında olur.

Hər bir $2p^5np$ ($n \geq 3$) konfigurasiyasına enerjiləri fərqli olan on bir –birinə yaxın yerləşmiş enerji səviyyəsi uyğun gəlir. $2p^53p$ konfigurasiyası üçün müxtəlif səviyyələrin enerjisi 18.38 eV - 19.87 eV, $2p^54p$ - 20.15 eV - 20.37 eV aralığında qiymətlər alır. Bu sərhəd qiymətləri şəkil 2.4 -də Ne atomunun həyacanlaşmış səviyyələrinin yaxınlığında sxematik göstərilmişdir.

He və Ne atomlarının enerji mübadiləsini daha tam başa düşmək üçün şəkil 2.4 -də hər bir atom üçün atomun bir dəfəlik ionlaşması baş verən enerji səviyyəsi göstərilmişdir. Bu zaman atomun bir xarici elektronu ondan qopur (He atomda əsas konfigurasıyanın s -elektronu, Ne-da isə əsas konfigurasıyanın p -elektronu). Atomun bu cür uyğun enerji səviyyəsinə qədər həyacanlaşması zamanı atomdakı həyacanlaşmış elektron atomun nüvəsindən o qədər uzaqlaşa bilir ki, o faktiki olaraq atomdan qopmuş olur. Bu zaman neytral atom müsbət yüklənmiş iona çevrilir: He atomda He^+ , Ne atomda Ne^+ .

Atomları həyacanlaşdırmaq üçün lazım olan limit enerjilər və eləcə də onları ionlaşdırmaq üçün lazım olan minimal enerji uyğun olaraq atomun **ionlaşma enerjisi** adlanır. He atomunun ionlaşma enerjisi bir elektronun qopması zamanı 24.59 eV, Ne üçün isə 21.56 eV-dur.

Qeyd edək ki, He və Ne atomlarında bir sıra həyacanlaşmış səviyyələr **metastabildir** – onlardan fotonların yaranması ilə baş verən, əsas səviyyəyə də daxil olmaqla bütün aşağı enerji səviyyələrinə birbaşa şüalanma spektral keçidləri mümkün deyil, əgər mümkün olsaydı keçidlər zamanı seçmə qaydası pozulmuş olardı.

Metastabil səviyyəyə düşən atom çox uzun müddət həyacanlaşmış halda qala bilər. He atomda belə metastabil səviyyələr yuxarıda nəzərdən keçirilən həyacanlaşmış $1s2s\ ^3S_1$ və $1s2s\ ^1S_0$ səviyyələridir. $1s2s\ ^3S_1$ səviyyəsindən $1s^2\ ^1S_0$ əsas səviyyəyə şüalanma keçidi L ($\Delta L = \pm 1$ tələb olunur) və S ($\Delta S = 0$ tələb olunur) kvant ədədlərinə görə seçmə qaydası pozulduğu üçün mümkün deyil. $1s2s\ ^1S_0$ səviyyəsindən

$1s^2 \ ^1S_0 \rightarrow 1s^2 \ ^1S_0$ əsas səviyyəsinə şüalanma keçidi L ($\Delta L = \pm 1$ tələb olunur) və J ($J = 0$ səviyyəsi $J = 0$ səviyyəsi ilə kombinasiya olunmur) kvant ədədlərinə görə seçmə qaydası pozulması səbəbindən mümkün deyil. $1s2s \ ^1S_0$ səviyyəsindən $1s2s \ ^3S_1$ səviyyəsinə keçid L ($\Delta L = \pm 1$ tələb olunur) və S ($\Delta S = 0$ tələb olunur) kvant ədədləri üçün seçmə qaydası pozulduğu üçün mümkün deyil.

Ne atomda $1s^2 2s^2 2p^6 \ ^1S_0$ əsas səviyyəsinə nəzərən metastabil xassələrə malik olan $2p^5 3s$ konfigurasiyalı mühüm energetik səviyyələrdir. Konfigurasiyanın dörd səviyyəsindən J -yə görə qadağalar üzündən metastabil olan ancaq iki səviyyə var. Digər iki səviyyədən əsas səviyyəyə 73.6 nm və 74.38 nm dalğa uzunluğunda şüalanma keçidləri baş verir. Atomların əsas hala keçməsi ilə yaranan şüalanma neon atomları üçün rezonans şüalanma adlanır. Bu şüalanma ona görə rezonans adlanır ki, neon atomları təbii, yəni həyacanlaşmamış halda onu güclü udur. Buna görə də He-Ne lazerində neon atomlarından ibarət mühit əsas halda yerləşən atomlardan ibarət olmaqla, bu şüalanma üçün çox böyük udulma əmsalına malik olur. Əmələ gələn fotonlar əsas halda neon atomları tərəfindən udularaq onları yenidən $2p^5 3s$ konfigurasiyalı həyacanlaşmış hala gətirirlər. Nəticədə sanki neon atomları kollektivinə “bağlanmış” olur. Bu halda şüalanmanın “əsir”liyindən danışılır.

Rezonans şüalanmanın əsirliyi şüalanma keçidləri hesabına $2p^5 3s$ konfigurasiyalı həyacanlaşmış neon atomlarının sayının azalmasının qarşısını alır.

§ 2.2. He-Ne lazerinin fəal mühitində qarşılıqlı təsir prosesləri

İndi daha mühüm prosesləri – He-Ne lazerinin fəal mühitində müxtəlif hissəciklərin elementar qarşılıqlı təsiri (toqquşma) prosesləri və atomlarda şüalanma keçidləri proseslərini nəzərdən keçirək. Ne atomlarında xeyli mühüm şüalanma prosesləri (bunların birində adətən lazer şüalanması baş verir) şəkil 2.4 -də A ($\lambda = 3.394$ mkm; yuxarı səviyyənin enerjisi $W_Y = 20.66$ eV, aşağı səviyyənin enerjisi $W_A = 20.30$ eV), B ($\lambda = 0.6328$ mkm; $W_Y = 20.66$ eV, $W_A = 18.70$ eV) və V ($\lambda = 1.152$ mkm; $W_Y = 19.78$ eV, $W_A = 18.70$ eV) ilə işarə edilmişdir. Bu dalğa uzunluqlarında lazer şüalanmasının yaranması üçün Ne atomunun $2p^55s$ və $2p^54s$, eləcə də $2p^54p$ və $2p^53p$ konfigurasiyalı səviyyələri arasında məskunlaşma inversiyası yaratmaq zəruridir. Bunun üçün yüksək enerjili 20 eV tərtibində neon atomlarında səviyyələrin effektiv həyacanlaşması üçün və müxtəlif mühüm proseslərin, ilk növbədə helium atomlarının həyacanlaşması və ionlaşmasının baş verməsi üçün (bu zaman helium atomlarına da 20 eV - 25 eV tərtibində yüksək enerji vermək lazımdır) şərait yaratmaq lazımdır. Belə şərait közərən boşalmanın plazmasında reallaşır.

Qeyd edək ki, közərən boşalma kiçik cərəyanda alçaq təzyiqə malik qazda baş verən soyuq katodlu müstəqil elektrik qaz boşalmasıdır. He-Ne lazeri halında közərmə boşalması qaz –boşalması borusunda baş verir. Bu borunun daxili diametri

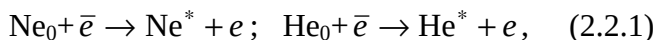
$d \sim (0.5-1)$ sm, qazın ümumi təzyiqi $p \sim 1$ mm c.süt., cərəyan $i_p \sim 25$ mA – 50 mA, helium və neonun parsial təzyiqinin nisbəti 5-10 ($n_{He}/n_{Ne} = 5-10$, burada n_{He} , n_{Ne} – uyğun olaraq He və Ne atomlarının konsentrasiyasıdır). Lazerin fəal mühiti, neytral He və Ne atomlarından və yüklü hissəciklərdən –boşalma oxunda $n_e \sim 10^{11}$ sm⁻³ konsentrasiyalı mənfi elektronlardan və müsbət yüklü He⁺, Ne⁺ ionlarından ibarət qarışıqdan ibarət plazmadır. Elektronlar və ionlar boşalmanın elektrik sahəsi ilə sürətləndirilir (elektronlar – anoda, ionlar –katoda doğru) və kinetik enerji əldə edirlər. Qazın aşağı təzyiqində $p \sim 1$ mm c. süt. yüklü hissəciklərin sərbəst qaçışının orta uzunluğu o qədər böyük olur ki, elektrik sahəsinin təsiri altında individual sərbəst qaçışda onlar bir neçə 10 eV-da kinetik enerji əldə edə bilirlər.

Qeyd edək ki, atomlarla və ionlarla elastiki toqquşmalarda elektronlar atom və ionların kütlələrinə nisbətən kiçik m_e kütləsinə malik olmaları səbəbindən kinetik enerjinin çox kiçik hissəsini itirirlər. Elektronların öz aralarında elastiki toqquşmaları zamanı elektronların kütlələri eyni olduğu üçün effektiv enerji mübadiləsi baş verir, nəticədə elektronların xeyli böyük orta kinetik enerjiyə ($\overline{W}_{kin}$) görə paylanması qərarlaşır. (elektronların atomlarla elastiki və qeyri-elastiki toqquşmalar haqqında Frank və Herts təcrübələrində mövzuna bax).

Nəticədə He-Ne lazerinin plazmasına, adətən tarazlıq hallarında istifadə olunan $\overline{W}_{kin} = (3/2)kT_e$ düsturuna əsasən çox böyük elektron temperaturu $T_e = 50000$ K aid edilə bilər. Eyni zamanda ionlar və atomlar arasında kinetik enerji

mübadiləsi onların kütlələri yaxın olduğu üçün intensiv baş verir, buna görə ionların orta kinetik enerjisi elektronların orta kinetik enerjisindən fərqli olaraq atomların orta kinetik enerjisinə bərabərdir, bu enerjiyə görə ion və atomlara elektronlarda olduğu kimi T_a temperaturu aid edilə bilər. Bu zaman yüngül elektronlarla böyük kütləli atom və ionlar arasında enerji mübadiləsi effektiv olmadığı üçün $T_a \ll T_e$. He-Ne lazeri plazması halında $T_a = 300 \text{ K} - 400 \text{ K}$ T_e və T_a temperaturlarının böyük fərqi səbəbindən He-Ne lazerinin plazması qeyri-izotermikdir, bu da qeyri-taraz plazmanın göstəricisidir.

Aşağı təzyiqli plazmada asanlıqla meydana çıxan bu cür yüksək T_e temperaturunda əsas haldakı atomları birbaşa həyacanlaşdırıla bilən, enerjisi 16 eV - 25 eV diapazonunda yerləşən kifayət qədər çox aktiv elektron var. Bu şərtlərdə atomların əsas həyacanlaşma prosesləri aşağıdakı toqquşma prosesləridir (bunlara çox vaxt birinci növ toqquşmalar deyilir və I növ toqquşmalar kimi işarə edirlər, belə proseslərdə fəal hissəcik verilmiş halda elektron öz kinetik enerjisini atomun həyacanlaşmasına sərf edir):



burada Ne_0 əsas $1s^2 2s^2 2p^6 {}^1S_0$ halındakı Ne atomu, He_0 əsas $1s^2 {}^1S_0$ halındakı He atomu, $\bar{e}$ -atomları həyacanlaşdıracaq qədər böyük enerjiyə malik sürətli elektron, e -yavaş elektron, Ne^* və He^* -müxtəlif həyacanlaşmış səviyyələri məskunlaşdırən (o cümlədən, şəkl. 2.4-də göstərilən) neon və helium atomlarının konkretləşmiş hallarıdır.

(2.2.1)-ə əsasən I növ toqquşmalarda elektronların iştirakı ilə neon və helium atomlarında daha mühüm keçidlər şəkil 2.4-də qırıq-qırıq yuxarı yönəlmiş 1-5 oxları ilə göstərilib. I növ toqquşmaların nəticəsində plazmada müxtəlif səviyyələrdə həyacanlaşmış neon atomları əmələ gəlir. Seyrəlmiş plazma halında həyacanlaşmış neon atomlarının azalması, əsasən spontan şüalanma hesabına baş verir.

Müxtəlif enerji səviyyələri arasında şüalanma keçidlərinin xarakteristikaları ilk növbədə spontan şüalanma üçün A_{im} integral Eynşteyn əmsallarıdır, i -yuxarı səviyyənin, m -aşağı səviyyənin indeksidir. Belə keçidlərə misal şəkil 2.4-də A ($A_{im} = 3 \cdot 10^6 \text{ san}^{-1}$), B ($A_{im} = 5 \cdot 10^6 \text{ san}^{-1}$) və C ($A_{im} = 7 \cdot 10^6 \text{ san}^{-1}$) göstərmək olar. A_{im} əmsallarının qiymətləri həyacanlaşmış halda atomların orta yaşama müddətini τ təyin edir. i və m indeksli səviyyələr arasında ancaq spontan keçidlərlə şərtlənən atomların yaşama müddəti $\tau_{im} = 1/A_{im}$ indeksi ilə təyin olunur.

Ne atomlarının $2p^5 5s$ və $2p^5 4s$ konfigurasiyalı halları üçün $\tau = \tau_s \sim 10^{-7} \text{ san}$ olur, $2p^5 4p$ və $2p^5 3p$ elektron konfigurasiyalı hallarında isə $\tau = \tau_s \sim 10^{-8} \text{ san}$. τ zamanının bir tərtib fərqlənməsi müxtəlif hallarda həyacanlaşmış atomların konsentrasiyalarında özünü göstərir və ona gətirib çıxarırkı, $\tau_p \ll \tau_s$ olduqda $2p^5 ns$ ($n = 4$ və 5) konfigurasiyalı halların enerji səviyyələri və $2p^5 np$ ($n = 3$ və 4) konfigurasiyalı halların aşağıda yerləşən səviyyələri arasında böyük də olmasa, təbii yolla məskunlaşmaların inversiyası baş verir və nəticədə A , B və C keçidlərində hətta təmiz neonda bir

neçə metr L_{mp} uzunluğu olan qaz boşalması borusunda az intensivliyə malik lazer şüalanması mümkün olur (borunun uzun olması fəal mühitdə α_ω güclənmə əmsalının kiçik olması səbəbindən vacibdir).

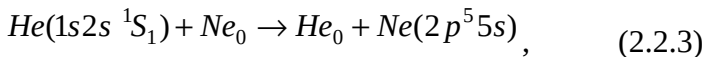
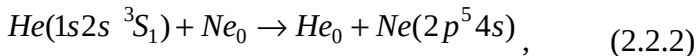
Fəal mühitdə çox sayda mövcud olan və plazmanın əsas komponenti olan helium atomları ($p=1$ mm c.süt-da $n_{He} \sim 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ və $T_a = 300 \text{ K}$ $n_{He} + n_{Ne} = p/(kT_a) = 3.22 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$) neon atomunda lazer keçidləri üçün məskunlaşmaların inversiyasını xeyli gücləndirir. He atomunun təsiri onlarda neon atomu səviyyələrinin enerjisinə yaxın enerjili metastabil enerji səviyyələrinin olması ilə şərtlənir ki, bu səviyyələrdən lazer keçidləri baş verir.

He atomunun $1s2s \ ^3S_1$ və $1s2s \ ^1S_0$ metastabil səviyyələri elektronların iştirakı ilə (2.2.1)-ə əsasən bilavasitə I növ toqquşmalar nəticəsində məskunlaşırlar. Onlar əlavə olaraq həmçinin He atomunun yüksək səviyyələrinin I növ toqquşmalarla həyacanlaşması və sonradan He atomlarının spontan şüalanaraq metastabil səviyyələrə keçməsi ilə məskunlaşır.

Metastabil səviyyələrdə He atomunun konsentrasiyası çox böyük ədədə 10^{12} sm^{-3} çata bilər. Şəkil 2.4-dən göründüyü kimi, helium atomunun metastabil səviyyələrinin enerjisi $2p^5 4s$ və $2p^5 5s$ elektron konfigurasiyalara malik hallarında olan neon atomunun enerjilərinə yaxındır. $1s2s \ ^3S_1$ və ya $1s2s \ ^1S_0$ metastabil səviyyələrdə olan helium atomunun əsas halda olan neon atomları ilə toqquşması zamanı həyəcənlanma enerjisinin helium atomundan neon atomuna ötürülməsi

mümkündür. Bu halda neon atomu $2p^5 4s$ və ya $2p^5 5s$ konfigurasiyalarına aid olan səviyyələrdən birinə keçir, helium atomu isə əsas hala qaydır.

Atomlar arasındakı həyəcanlanma enerjisinin mübadilə olunma ehtimalı daha çoxdur, nəinki onların səviyyələrinin bir-birinə yaxın yerləşməsi, yəni səviyyələrin enerjiləri arasındakı ΔW fərqi daha azdır. Onda deyirlər ki, ehtimalın ΔE kəmiyyətindən güclü asılılığı ilə atomlar arasındakı belə enerji mübadiləsi **rezonans** xarakter daşıyır. Enerjinin rezonans ötürülmə prosesi ΔW enerjisi atomların istilik hərəkətinin enerjisini aşmadıqda xüsusilə effektivdir, yəni $\Delta W \leq kT_a$ olduqda. Bu halda ayrılan ΔE enerjisi atomların istilik hərəkətinin enerjisinə və əksinə asanlıqla çevrilir. Konkret olaraq enerjinin heliumun həyəcanlaşmış atomundan neonun həyəcanlaşmamış atomuna rezonans ötürülməsinin baxılan proseslərini bu şəkildə təsvir etmək olar:



burada (2.2.1) proseslərinin yazılışındakı işarələmələrdən istifadə olunmuşdur. Atomların işarələnməsindəki mötərizələrdə atomların həyəcanlanmış halları göstərilmişdir.

Şəkil 2.4 -də (2.2.2) və (2.2.3) prosesləri 6 və 7 qırıq-qırıq əyri oxlar şəklində əks olunmuşdur. Bu proseslərdə metastabil hallarda He atomları yox olduqda, bu proseslər metastabil hallarda He atomlarının τ yaşama müddətini məhdudlaşdırır. τ zamanına həmçinin metastabil halaldır olan He atomlarının qaz boşalması boruların divarlarına diffuziya

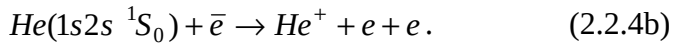
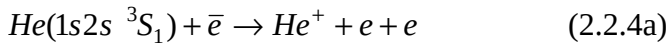
etməsi prosesi və orada divara dəyən zaman yaranan həyəcanlanma enerjisinin itməsi təsir edir. Bu proseslər isə aşağı təzyiqli qaz mühitində kifayət qədər effektiv baş verir. Nəticədə metastabil səviyyələrdə olan He atomları üçün $\tau \sim (10^{-5} - 10^{-4})$ s. Alınmış bu τ - yaşama müddəti atomlar dünyasının ölçülərinə nəzərən daha böyükdür, çünki o, neonun həyəcanlanmış atomlarının τ_s və τ_p yaşama müddətlərindən bir neçə tərtib artıqdır.

Qeyd etmək lazımdır ki, metastabil səviyyələrdə olan He atomlarının rolu təkcə onların (2.2.2) və (2.2.3) rezonans proseslərdə iştirakı ilə məhdudlaşmır. Alovşuz boşalma plazmanın və eyni zamanda lazer şüalanmasının gücünün müəyyən səviyyədə saxlanması üçün atomların kəsilməz ionizasiyası, eyni zamanda, müsbət yüklənmiş ion və elektronların öz itkilərini kompensasiya etməsi üçün kəsilməz əmələ gəlməsi vacibdir. Bu itkilər ion və elektronların öz aralarındakı elektriki, qaz boşalması borunun divarlarına birgə diffuziya prosesi (ion və elektronların belə birgə diffuziyasına ambipolyar diffuziya deyirlər) və orada onların elektriki neytral atomların yaranması ilə nəticələnən rekombinasiyası (birləşməsi) hesabına baş verir.

He-Ne-lazerdə ion və elektronların əsas təchizediciləri helium atomlarıdır, çünki onlar üstünlük təşkil edirlər. He atomlarının əsas kütləsi əsas səviyyədədir. He atomlarının əsas səviyyədən ionizasiyası, buna düz ionizasiya deyirlər, I növ zərbələrə (2.2.1) analogidir və $He_0 + \bar{e} \rightarrow He^+ + e + e$ sxemi üzrə baş verir, bu o şərt daxilində baş verir ki, elektronun $\bar{e}$ kinetik enerjisi He atomunun ionizasiya enerjisindən 24.59 eV çoxdur. Belə elektronlar plazmada müqayisə olunacaq

dərəcədə azdır, düz ionizasiya prosesinin özü isə kiçik kəsiyə malikdir və eyni zamanda, baş verməsinin ehtimalı azdır. Buna görə də He atomlarının (2.2.1) prosesinə əsasən qabaqcadan həyəcanlanmış metastabil səviyyələr vasitəsilə pilləli ionizasiyasının baş verməsi daha çox ehtimala malikdir və effektivdir.

Böyük enerjili $\bar{e}$ elektronu tələb etməyən və misal olaraq qırıq-qırıq ox 8 şəklində (şək. 2.4) göstərilmiş belə ionizasiya prosesi aşağıdakı sxemlər üzrə baş verir:



Neon atomlarında $2p^55s$ və $2p^54s$ elektron konfigurasiyalı səviyyələrin enerji səviyyələri ilə $2p^54p$ və $2p^53p$ elektron konfigurasiyalı aşağıda yerləşmiş səviyyələr arasında müxtəlif dalğa uzunluqlarına malik olan çoxlu müxtəlif spontan şüalanma keçidlər baş verə bilər. Buna görə də səviyyələr arasında məskunlaşmanın inversiyası olduqda neon atomlarının şüalanma spektrinin çoxlu dalğa uzunluqlarında lazer şüalanmasının məlum olduğu kimi, kiçik intensiv generasiyası mümkündür.

Praktikada daha çox istifadə olunan, daha intensiv olan keçidlər yuxarıda verilmiş və şəkil 2.4-də göstərilmiş A, B və C keçidləridir. Birinci He-Ne-lazerində lazer şüalanmasının generasiyası $\lambda = 1.152$ mkm dalğa uzunluqlu C keçidində baş vermişdir, bu dalğa uzunluğu insan gözü ilə görünməyən İQ-spektr oblastına yaxındır. Praktikada tez-tez $\lambda = 0.6328$ mkm dalğa uzunluqlu B keçidində He-Ne-lazer istifadə olunur, bu

dalğa uzunluğu insan gözü ilə görünən spektr oblastının qırmızı sahəsinə uyğundur.

Daha güclü He-Ne-lazer $\lambda = 3.394$ mkm dalğa uzunluqlu A keçidindəki lazerdir, bu dalğa uzunluğu isə İQ-spektr oblastına uyğundur. Şüalanmanın belə böyük dalğa uzunluğuna və uyğun olaraq fotonların kiçik enerjisinə malik olan lazerlər, adətən, o hallarda istifadə olunur ki, şüalanmanın böyük gücü tələb olunsun. Müəyyən dalğa uzunluğunda generasiya verilmiş dalğa uzunluğundakı şüalanmanın daha az itkilərinə malik olan rezonator güzgülərinin seçilməsilə və yaxud da digər dalğa uzunluğundakı lazer şüalanmasının söndürülməsi üçün lazım olan dispersiyaedici və ya selektiv olaraq udulmuş elementin rezonatora daxil edilməsilə həyata keçirilir.

Aydındır ki, məskunlaşmış inversiyalar və deməli, lazer şüalanmasının generasiyaları $2p^5 4p$ və $2p^5 3p$ elektron konfigurasiyalı səviyyələrdə Ne atomlarının az konsentrasiyasına şərait yaradır. Bu konsentrasiyalar aşağıdakı proseslərin tarazlığı vasitəsilə təyin olunurlar. $2p^5 4p$ və $2p^5 3p$ konfigurasiyalı səviyyələrdən $2p^5 3s$ konfigurasiyalı səviyyəyə şüalanma ilə spontan keçidlər:

$$Ne(2p^5 4p) \rightarrow Ne(2p^5 3s) + \hbar\omega_{im}, \quad (2.2.5)$$

$$Ne(2p^5 3p) \rightarrow Ne(2p^5 3s) + \hbar\omega_{im},$$

burada $\hbar\omega_{im}$ ilə ω_{im} tezlikli və $\hbar\omega_{im}$ enerjili foton işarə olunmuşdur. $2p^5 3s$ konfigurasiyalı hallarda olan Ne atomları vasitəsilə (2.2.5) proseslərinə əsasən spontan şüalanma keçidləri zamanı buraxılan şüalanmanın udulması:

$$Ne(2p^5 3s) + \hbar\omega_{im} \rightarrow Ne(2p^5 3p), \quad (2.2.6)$$

$$Ne(2p^5 3s) + \hbar\omega_{im} \rightarrow Ne(2p^5 4p).$$

Yuxarıda deyildiyi kimi, $2p^5 3s$ konfigurasiyalı Ne atomunun halları, həqiqətən, metastabil vəziyyətlərdir, ona görə də bu hallarda Ne atomunun ümumi konsentrasiyası n_{Ne}^{*met} qazboşalma plazmada böyükdür. Deməli, (2.2.6) proseslərinin effektivliyi də böyükdür.

Ne atomları n_{Ne}^{*met} böyük konsentrasiyaya malik olduqlarına görə $2p^5 3s$ konfigurasiyalı hallarda əsas rolu neon atomlarının həyəcanlaşma prosesləri oynayır, həyəcanlanma prosesləri isə neon atomlarının sürətli elektronlarla toqquşması zamanı bu hallardan $2p^5 3p$ və $2p^5 4p$ konfigurasiyalı halları səviyyəsinə qədər olur:

$$Ne(2p^5 3s) + \bar{e} \rightarrow Ne(2p^5 3p) + e, \quad (2.2.7)$$

$$Ne(2p^5 3s) + \bar{e} \rightarrow Ne(2p^5 4p) + e.$$

(2.2.7) toqquşma prosesləri I növ zərbələrə aid nümunələrdən biridir. Nəticədə (2.2.6) və (2.2.7) proseslərinin intensivliyi və onların rolu Ne atomlarının n_{Ne}^{*met} konsentrasiyasının qiymətindən əhəmiyyətli dərəcədə asılıdırlar.

Metastabil He atomlarında olduğu kimi, n_{Ne}^{*met} konsentrasiyasının qiyməti də bir çox hallarda Ne atomlarının qazboşalma borunun divarlarına diffuziyası ilə təyin olunur.

Borunun divarı ilə toqquşma zamanı neonun həyəcanlanmış atomları öz enerjisini boruya ötürürlər və borunu qızdırırlar, özləri isə əsas hala keçirlər.

§ 2.3. Lazer şüalanmasının generasiyası üçün optimal şərtlər

Yuxarıda deyilənlərdən görünür ki, lazer keçidlərində məskunlaşmaların inversiyasının artması və verilmiş dalğa uzunluğunda lazer şüalanmasının maksimal böyük P gücünün alınması üçün, yəni lazer şüalanmasının generasiyası üçün optimal şərtlərin yaranmasından ötrü (2.2.6) və (2.2.7) proseslərinin rolunu minimallaşdırmaq lazımdır. Borunun verilmiş L_{mp} ($W \sim 1/L_{mp}$) uzunluğunda qazboşalma borunun d diametrinin, qazın p təzyiqinin və n_{He}/n_{Ne} konsentrasiyalar nisbətinin, həmçinin, i_p yükünün cərəyan gücünün müəyyən qiymətlərini seçmək yolu ilə praktikada (13) və (14) proseslərinin rolunun minimallaşdırılması və P gücünün böyük qiymətlərinin alınması əldə olunur.

d -nin kiçik qiymətlərində həyəcanlaşmış Ne atomlarının borunun divarlarına diffuziyası effektiv olaraq baş verir və eyni zamanda Ne atomlarının n_{Ne}^{*met} konsentrasiyasının qiyməti azalır. Məhz bununla d -nin kiçik qiymətlərində He-Ne-lazerin fəal mühitinin α_ω güclənmə əmsalının d -dən eksperimental qəbul edilmiş asılılığı izah olunur: $\alpha_\omega \sim 1/d$. Lakin bu zaman qazboşalma borunun eninə ölçüsü kiçik olduğundan P gücünün qiymətləri kiçik alınır. d artdıqca P artır, lakin bu halda neon atomunun borunun divarlarına diffuziya şərtləri

pisləşir və Ne atomlarının n_{Ne}^{*met} konsentrasiyası hər hansı doyma səviyyəsinə qədər artmağa başlayır. Bu zaman (2.2.6) və (2.2.7) proseslərinin rolu artır, məskunlaşmanın inversiyası azalır və nəticədə W azalmağa başlayır.

Maksimal P -a d -nin hər hansı optimal qiyməti uyğundur. n_{He} / n_{Ne} sabit qaldıqda p -nin artması ilə P gücü, əvvəlcə, şüalanma generasiyasında iştirak edən Ne atomlarının ümumi sayı artdığına görə artır. p -nin böyük qiymətlərində elektronların sərbəst hərəkətinin orta uzunluğu azalır, bu isə elektronların T_e temperaturunun azalmasına, eyni zamanda, $\bar{e}$ sürətli elektronların sayının və elektronların iştirakı ilə toqquşma proseslərinin effektivliyinin azalmasına səbəb olur. Nəticədə lazer keçidləri üçün məskunlaşma inversiyası və P gücü azalır. Maksimal P -a yenidən p -nin hər hansı optimal qiyməti uyğun gəlir.

Eksperimentlər və nəzəri analizlər göstərdi ki, optimal şəraitlərdə pd hasili dəyişilməz qalır. $\lambda = 0.6328$ mkm dalğa uzunluğunda generasiya olunmuş He-Ne-lazeri halında optimal şərtlər (W maksimaldır) $pd \approx (3.5 \div 4.0)$ mm c. s. və $n_{He} / n_{Ne} = 5$ olduqda alınır.

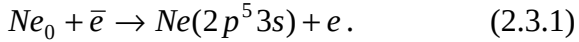
Təcrübi tədqiqatlar göstərir ki, i_p cərəyanı artdıqca n_e elektron konsentrasiyası yük oxu üzərində xətti olaraq artır, W şüalanma gücü isə hər hansı maksimal qiymətinə çatır və sonra azalmağa başlayır. W -nin i_p -dən belə asılılığı He-Ne-lazeri üçün spesifikdir və digər qaz lazerləri üçün müşahidə olunmur. Bu eksperimental nəticələri sonrakı mülahizələr əsasında izah etmək olar.

Közərmə boşalma şəraitlərində i_p cərəyanı müqayisə olunacaq qədər kiçikdir, ona görə də boşalma plazmasında coul istilik şəklində enerji az ayrılır və uyğun olaraq plazma qazının komponentlərinin güclü qızması baş vermir, yəni i_p artdıqda T_e və T_a temperaturlarının və plazmanın bütöv (tam) quruluşunun nəzərə çarpacaq dəyişilməsi baş vermir. Bu şərtlər daxilində i_p və n_e ($i_p \sim n_e$) arasındakı xətti asılılıq təbiidir. n_e -nin və uyğun olaraq i_p -nin artması boşalmanın katodundan gələn elektronların sayının artması hesabına baş verir. i_p -nin artması ilə müşayiət olunan n_e artdıqda elektronların iştirakı ilə toqquşma prosesləri daha intensiv olurlar.

Toqquşma proseslərinin intensivliyi kəmiyyətə toqquşmaların nəticə verən aktlarının sayı ilə xarakterizə olunur, belə toqquşmalar vahid zaman ərzində plazmanın vahid həcmində baş verirlər. Bu kəmiyyət prosesinin G **sürəti** adlandırılır. İki müxtəlif hissəciyin toqquşduğu prosesin sürəti bu hissəciklərin konsentrasiyalarının hasilinə mütənasibdir. Şək. 2.4-də 2-5 toqquşma proseslərinin sürətləri hesabına lazer keçidlərinin yuxarı səviyyələrinin neon atomunda məskunlaşması baş verir, (2.2.1) proseslərinin yazılışına görə, əsas səviyyədə olan helium və neon atomlarının konsentrasiyalarına, n_e elektronlarının konsentrasiyasına mütənasibdirlər, yəni bu proseslər üçün $G \sim n_e$.

Beləliklə, n_e artdıqca 2-5 prosesləri üçün G sürətlərinin qiymətləri artır. i_p cərəyanının və n_e -nin böyük qiymətlərində şək. 3-də göstərilmiş 1 toqquşma prosesi əsas rol oynamağa

başlayır, (8) və (14) düsturlarını nəzərə almaqla, harada ki, 1 toqquşma prosesini sxematik olaraq belə yazmaq olar:



(2.3.1) prosesi (I növ toqquşma) Ne atomlarının n_{Ne}^{*met} konsentrasiyasına əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir - n_e artdıqca n_{Ne}^{*met} konsentrasiyası artır. Sonra isə Ne atomlarının n_{Ne}^{*met} konsentrasiyası (2.2.7) toqquşma proseslərində özünü göstərir. (2.2.7) toqquşma proseslərinin təsiri nəticəsində lazer keçidlərinin aşağı səviyyələrində həyəcanlanmış Ne atomları əmələ gəlirlər. (2.3.1) və (2.2.7) prosesləri birlikdə neon atomlarının əsas səviyyədən lazer keçidlərinin aşağı səviyyələrinə həyəcanlaşmasının **ikipilləli** prosesi kimi özlərini aparırlar, bu aşağı səviyyələr $2p^5 3p$ və $2p^5 4p$ elektron konfigurasiyalarına uyğundurlar. Həyəcanlanmanın hər bir mərhələsində $G \sim n_e$ doğrudur.

Nəticədə, Ne atomlarının ikipilləli həyəcanlanma prosesinin intensivliyi n_e elektron konsentrasiyasının kvadratına tamamilə mütənəsib olur. İntensivlik n_e -dən kvadratik asılı olduğuna görə, göstərilən ikipilləli proses n_e -nin hər hansı qiymətindən başlayaraq, lazer keçidlərinin aşağı səviyyələrinin həyəcanlaşmasında əsas proses olur. n_e -nin böyük qiymətlərində, yəni i_p cərəyanının böyük qiymətlərində bu, həmin səviyyələrdə neon atomlarının konsentrasiyasının güclü artmasına ($\sim n_e^2$) səbəb olur, bu isə öz növbəsində lazer

keçidləri üçün məskunlaşma inversiyasının və W gücünün azalmasına səbəb olur.

Məskunlaşma inversiyasının azalmasına belə bir şərait də kömək edir ki, i_p və uyğun olaraq n_e artdıqca lazer keçidlərinin yuxarı səviyyələrində neon atomlarının konsentrasiyalarının doyması baş verir. i_p və n_e artdıqca $1s2s\ ^3S_1$ və $1s2s\ ^1S_0$ metastabil hallarda olan helium atomlarının konsentrasiyalarının doyması həyəcanlanmış neon atomlarının konsentrasiyalarının bu cür doymasına səbəb olur. Ona görə ki, n_e elektron konsentrasiyasının böyük qiymətlərində (2.2.4) sxemlərinə əsasən metastabil hallardan helium atomlarının ionlaşması prosesləri intensiv olaraq getməyə başlayır.

Həmçinin, həyəcanlanmış helium atomlarının iştirakı ilə (2.2.1) prosesinə (I növ toqquşma) nisbətdə tərs olan toqquşma prosesləri də baş verir: $He^* + e \rightarrow He_0 + \bar{e}$. Bu toqquşma prosesində helium atomu öz həyəcanlaşma enerjisini elektrona ötürür və onun kinetik enerjisini artırır (belə toqquşmaları tez-tez ikinci növ toqquşma adlandırırlar və II növ toqquşma kimi işarə edirlər). Metastabil səviyyələrdə olan helium atomlarının doyması avtomatikdir, (2.2.2) və (2.2.3) proseslərinə əsasən, $2p^54s$ və $2p^55s$ həyəcanlanmış səviyyələrdə olan neon atomlarının konsentrasiyalarının doymasına gətirir.

Beləliklə, i_p cərəyanı artdıqca P gücü maksimumdan keçir. Bu maksimal P -ya hər hansı optimal i_p cərəyanı uyğundur. Sənayedə işlədilən He-Ne-lazərləri, adətən, i_p

optimal cərəyana və maksimal P şüalanma gücünə hesablanmışdır.

Optimal şəraitlərdə metastabil səviyyələrdə olan neon atomlarının n_{Ne}^{*met} konsentrasiyası böyük qiymətlərə çata bilər və $1s2s\ ^3S_1$ və ya $1s2s\ ^1S_0$ metastabil səviyyələrdə olan helium atomlarının konsentrasiyasına yaxın ola bilər. Helium atomları üçün yuxarıda baxılan halda olduğu kimi, bu səviyyələrdə olan neon atomları (2.2.4a, b) sxeminə analoji $Ne(2p^53s) + \bar{e} \rightarrow Ne^+ + e + e$ sxeminə əsasən elektronlarla toqquşmalar zamanı asanlıqla ionlaşırlar. Neon atomlarının belə ionlaşması, həmçinin, böyük enerjili $\bar{e}$ elektronunu tələb etmir və He-Ne-lazerin plazmasındakı atomların ümumi ionlaşmasına nəzərə cəpacaq dərəcədə kömək edir.

Beləliklə, helium –neon lazerlər fasiləsiz rejimdə işləyir və çıxışında şüalanma gücü 0.1vatta çatır. Lazerdə Ne -nün 3 şüalanan keçidləri mümkündür. Dalğasının uzunluğu 3,39 mkm və gücü 20 dB/m olan keçid daha effektivdir, sadə metal güzgüləri tətbiq etməklə onda generasiya əldə olunur. Dalğasının uzunluğu 0,63 mkm olan keçid həmin yuxarı səviyyədən baş verir və 5%/m gücə malikdir. Bu generasiya yalnız xüsusi çoxlaylı interferensiyon güzgüləri tətbiq etməklə mümkündür, belə güzgülər verilmiş tezlikdə əks etmənin yüksək əmsalına malikdirlər. Dalğasının uzunluğu 1,15 mkm olan keçidə 20%/m gücə uyğundur, generasiya isə dielektrik güzgülərdə mümkündür. Generasiya ilk dəfə dalğa uzunluğu $\lambda = 1,15$ mkm olan keçiddə alınmışdır. Digər üç keçid 0.63 mkm; 1.52 mkm və 3.39 mkm dalğa uzunluqlarında baş verir.

§ 2.4. He-Ne lazerində həyəcanlanma mexanizmlərin FİΘ-nın hesablanması

He–Ne lazerində əsasən dörd proses baş verir:

1. Elektrik boşalmasının köməyi ilə helium atomlarının bir hissəsi əsas 1S_0 səviyyəsindən həyəcanlanmış 2^1S_0 , yaxud 2^3S_1 səviyyəsinə keçirlər. Bu proses birinci növlü qarşılıqlı təsirdir və elektronun helium atomu ilə qarşılıqlı təsiri zamanı baş verir. İndi də həmin prosesi düstur şəklində yazmaq və faydalı iş əmsalını hesablayaq:

$$He + e^- = e + He^* . \quad \text{FİΘ} \quad \eta_1 = e^{-\frac{E_{He^*} - E_{He}}{kT_e}} = 0,05$$

Deməli, bu proses nəticəsində heliumun 2^1S_0 , 2^3S_1 metastabil səviyyələri həyəcanlaşırlar. Sxemdə bu ox işarəsi ilə göstərilir.

2. İkinci proses neon atomlarının yuxarı $3S$, $2S$ işçi səviyyələrinin həyəcanlaşmasından ibarətdir. Yuxarıda dediyimiz kimi bu proses helium atomları ilə toqquşma zamanı rezonans xarakter daşıyır:

$$He^* + Ne = Ne^{**}, \quad \text{FİΘ} \quad \eta_2 \approx 1$$

Odur ki, xarici təsirdən həyəcanlanmış He atomları həyəcanlanmış Ne atomlarına toqquşan kimi həyəcanlaşma enerjisini Ne atomlarına ötürürlər, nəticədə Ne atomları həyəcanlaşaraq yuxarı enerji səviyyəyə qalxırlar. Bu proses ikinci növlü qeyri –elastiki qarşılıqlı təsir xarakteri daşıyır və dalğalı ox kimi göstərilir. Qeyd edək ki, ikinci növ toqquşma zamanı enerjinin effektiv ötürülməsinin əsas şərti

$$\Delta W = W_{Ne^*} - W_{He^*} \leq kT, \quad kT = 280 \text{ sm}^{-1},$$

$$W_{2^3S} - W_{2S_2} = 313 \text{ sm}^{-1}, \quad W_{3S_2} - W_{2^1S_0} = 381 \text{ sm}^{-1}$$

ödənilir. Buna görə də $\eta_2 \approx 1$.

3. Üçüncü proses generasiya prosesidir. Beləliklə, birinci və ikinci proseslər nəticəsində $3S$, $2S$ səviyyələrində yerləşən neon atomlarının sayı kəskin böyüyür və işçi səviyyələr arasında inversiya yaranır. Əgər neon atomu aşağı $2p$ səviyyələrin birinə düşərsə, onda generasiya yaranır.

$$Ne^{**} + h\nu_{gen} = 2h\nu_{gen} + Ne^*$$

$$\eta_3 = (W_{Ne^{**}} - W_{Ne^*}) / W_{Ne^*} = \frac{1,23}{20\lambda}$$

$$\eta_{3,\lambda=0,63\text{mkm}} = 0,1; \quad \eta_{3,\lambda=1,15\text{mkm}} = 0,06; \quad \eta_{3,\lambda=3,39\text{mkm}} = 0,02.$$

4. Aşağı ($3P_4$ ya da $2P_4$) işçi səviyyənin aktivləşməsi $1S$ səviyyəyə keçidi və ondan sonra borunun divarları ilə toqquşma zamanı baş verir (əsas səviyyəyə spontan keçidlər və pilləli elektron həyəcənlanması çox az effekt verir).

Təhlildən alınır ki, $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,5\%$ olur. Təcrübədə isə tipik lazer üçün $\eta_{tec} = \text{çıxış gücü}/\text{boşalmanın gücü} = 0,5\%$, yəni təxminən eyni qiymət alınır.

§ 2.5. He-Nelazerinin quruluşu

Qaz optik kvant generatorunda (OKG) fəal mühit boşalma borusunda yerləşir. Yüklü boru, adətən, şüşədən

hazırlanır və optimal təzyiq zamanı He-Ne qazlarının qarışığı ilə doldurulur. Boruya elektrodlar qaynaq edilmişdir.

Rezonatorun güzgüləri və qaz boşalma boruları xüsusi armaturda fiksə olunmuşlar, xətti genişlənmənin kiçik temperatur əmsalına malik invar çubuqlar armaturun əsasını təşkil edir. Qurğu rezonatorun güzgülərindən birini kökləməyə və borunu yerdəyişməsinə imkan verir. Uzunluğu sm -dən metrə qədər, diametri isə mm -dən sm -ə qədər olan bu boru şüşə və ya kvars materialından hazırlanır. Elektrik boşalmasını yaratmaq üçün borunun uclarında bir tərəfdən katod, digər tərəfdən anod yerləşdirilir. Elektronların emissiyasını asanlaşdırmaq üçün qızdırıcı katod istifadə oluna bilər. Boşalma boru bir –birinə paralel qoyulmuş iki güzgü arasında yerləşdirilir. Həmin iki güzgü optik rezonatoru təşkil edir. Güzgülərin paralelliyinin dəqiqliyi əks olunan səthlərin ayrılıyından, borunun uzunluğundan, daxili diametrindən və fəal mühitin gücləndirilməsindən asılıdır.



Şəkil 2.5. He-Ne lazerinin quruluşu

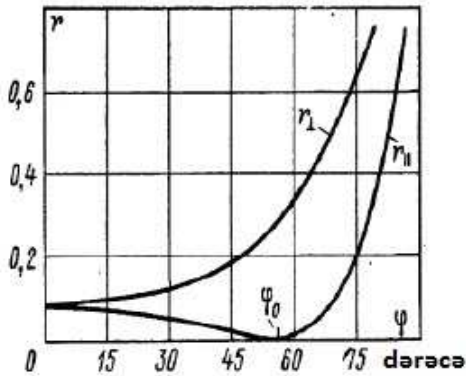
Qaz borusuna nisbətən güzgüləri xaricdə və ya daxildə yerləşdirmək mümkündür. Güzgülər daxildə yerləşdiriləndə onlar qaz borusu üçün həm də pəncərə rolunu oynayrlar. Güzgülər xaricdə yerləşdiriləndə isə optik rezonatora daha iki optik element –pəncərələr əlavə olunur, bu da əlavə enerji

itkilərinə gətirib çıxarır. Pəncərələr və ümumiyyətlə optik rezonatorlarda yerləşən bütün optik elementlər üçün əsas tələb ondan ibarətdir ki, onların səthlərinin hamısı yüksək keyfiyyətə malik olsun və keçən şüa üçün minimal enerji itkiləri yaratsın.

Rezonatorlarda əsas itkilər pəncərələrin iki səthindən Frenel əks olunma qabiliyyəti ilə bağlıdır. İki müxtəlif sındırma əmsalına malik olan mühitlər sərhədinə düşən işığın əks olunma əmsalı düşmə bucağından və polyarlaşma növündən asılıdır. Müstəvi paralel lövhəciyinin üstünə perpendikulyar düşən işıq üçün itki β yalnız lövhəciyin sındırma əmsalından asılıdır və bu düsturla tapılır:

$$\beta = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \cdot 200$$

Şüşə lövhəciyi üçün $\alpha = 8\%$ olur. Bu itkilər lazer keçidlərinin çoxunda rezonatorun keyfiyyətliliyini azaldır, generasiyanın alınmasını çətinləşdirir. Onların ləğv edilməsi üçün iki üsul mövcuddur: lövhəciklərin şəffaflaşması və onların Bryuster bucağı altında yerləşdirilməsi.



Şəkil 2.6. Əks olunma əmsalının
Bryuster bucağından asılılığı

Birinci üsul çətin texnoloji prosesdir. Çox zaman OKG şüalanması müstəvi polyarizasiyalı olur və bəzən **polyarlaşma** rezonatorlarda daxili **itkilərin** azaldılması ilə bağlıdır. Əksolmanın azaldılması üçün

fəal mühitin sərhəd səthləri rezonatorun oxuna perpendikulyar deyil, maili yerləşdirilir. Şəkil 2.6-da düşən **şüanın polyarlaşma səthinin müxtəlif oriyentasiyası** üçün müstəviparalel şüşə lövhənin **əksolunma əmsalının şüanın düşmə bucağından asılılığı** göstərilmişdir. Bu asılılıqdan aydın olur ki, **düşmə səthində polyarlaşdırılmış şüalanma** üçün φ_0 bucağında (**Bryuster bucağında**) əksolma r_{II} sıfıra bərabərdir.

İkinci üsulda bucaq altında düşən işığın lövhəcikdən əks olunması işığın polyarlaşma müstəvisindən asılıdır. Polyarlaşma müstəvisi düşmə müstəvisinə perpendikulyar olanda müstəvi –polyarlaşmış şüanın əksolunma əmsalı $r_{\perp}$ maksimuma bərabər olur:

$$r_{\perp} = [\sin(\varphi - \varphi') / \sin(\varphi + \varphi')]^2$$

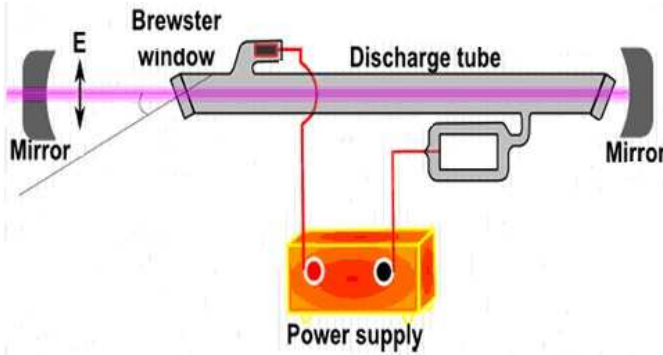
burada φ –düşmə bucağıdır. Düşən şüanın polyarlaşma müstəvisi düşmə müstəvisi ilə üst-üstə düşəndə əksolunma əmsalı r_{II} minimuma bərabər olur:

$$r_{II} = [tg(\varphi - \varphi') / tg(\varphi + \varphi')]^2$$

Düşmə bucağı müəyyən qiymətə $\varphi = \varphi_0$ olanda $r_{II} = 0$ (şək. bax) düşmə müstəvisində polyarlaşmış olan şüa lövhəciyi itkisiz keçir. Bu bucağa (φ_0) –Bryuster bucağı deyilir.

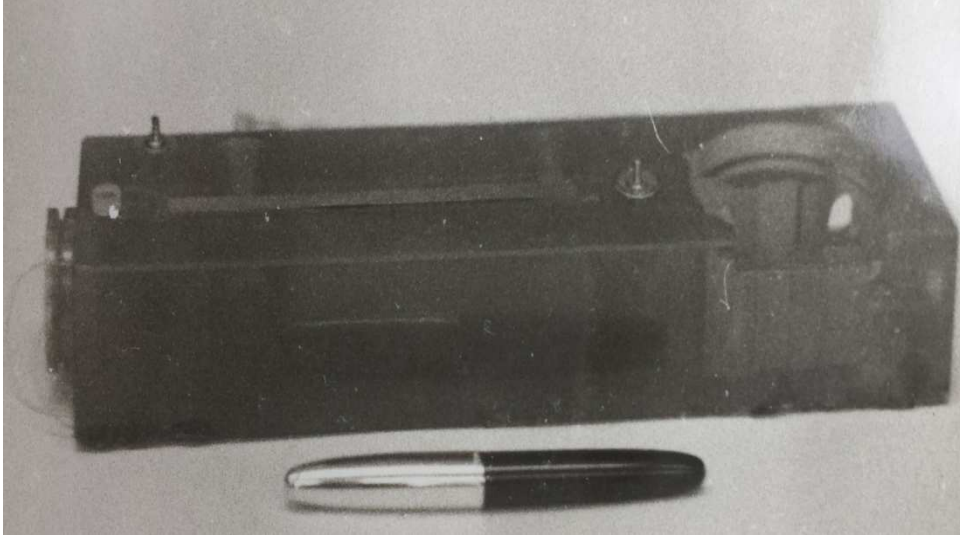
Buna görə də borunun pəncərələri perpendikulyar yox, Bryuter bucağı altında yerləşdirilir. Bunu şəkil 2.7-də görmək olur. Məlumdur ki, spontan şüalanma polyarlaşmamış olur. Lakin pəncərələrin yerləşdirilməsindən asılı olaraq müəyyən polyarlaşma üçün itki az olur. Odur ki, güzgülərə perpendikulyar istiqamətdə spontan keçid zamanı yaranan müəyyən polyarlaşmaya malik işıq şüası yayıldıqda dəfələrlə fəal mühit daxilindən keçəcək və hər dəfə məcburi keçidlər hesabına yeni fotonlar seli yaradacaq.

Bildiyimiz kimi məcburi şüalanma isə məcbur edən şüanın polyarlaşmasını təkrar edir. Buna görə də rezonatorda Bryuster bucağına münasib olan müstəvi-polyarlaşmış işıq yaranır.



Şəkil 2.7. Lazer qurğusunda borunun pencərələri Bryuster bucağı altında yerləşdirilib

Müasir yüksək stabil helium-neon lazerləri monoblok quruluşda istehsal edilirlər. Bunun üçün şüşəyə bənzər maddə - genişlənmənin praktik olaraq sıfır temperatur əmsalına malik olan sitall. istifadə olunur. Düzbucaqlı paralelepiped formasında sitallın parçasında kanal deyil, kanalın yan oturacaqlarına optik kontakt üsulu ilə lazer güzgüləri yapışdırılır. Kanal heliumun və neonun qarışığı ilə doldurulur. Katod və anod əlavə yan kanallar vasitəsilə daxil edilir. Belə monoblok quruluş yüksək mexaniki və istilik sabitliyi təmin edir. Aktiv maddə kimi bütün inert qazlardan istifadə edilə bilər. Təmiz neon, kripton, ksenon, arqon, helium-ksenon qarışığı, arqon-oksigen qarışığından və s. şüalanma alınıb. Belə yolla sezium, su və cıvə buxarılarından karbon qazından şüalanma alınmışdır.



Şek. 2.7. Qaz lazerinin monoblok quruluşu

FƏSİL III

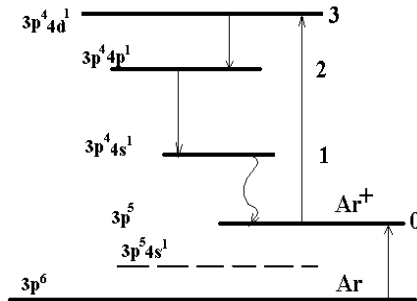
İON LAZERLƏR

İon lazerləri iki qrupa bölmək olar: təsirsiz və başqa qaz lazerləri və metalbuxarı əsasında lazerlər. Təsirsiz qazlarda spektrin qırmızı sahəsində 647,1 nm dalğının uzunluğunda şüalanan ion lazerlərindən biri **Kr-lazeri** istifadə olunur. Yüksək ion konsentrasiyasını təmin etmək (saxlanması) üçün ion lazerlərindəki cərəyanın sıxlığı atomlazerindən daha çox olmalıdır. Bir qayda olaraq, doldurulma qövs boşalmasında həyata keçirilir.

İonların enerji səviyyələrinin şkalası neytral atomlardan daha genişdir. Bu onunla bağlıdır ki, ionlaşmış atomdakı elektronlardan hər biri neytral atomda effektiv yük tərəfindən hərəkətə keçməsi ilə bağlıdır. Enerji şkalasının belə genişlənməsi ion lazerlərinin görülən spektrin qısa dalğalı sahəsində və ultrabənövşəyi diapazonda effektiv işlənməsinə gətirib çıxarır. İonların enerji səviyyələri arasında optik keçidlərin ehtimalları neytral atomlara nisbətən daha yüksəkdir. Görünən işıqda atom lazeriylə müqayisədə dörd səviyyəli arqon ion lazeri fasiləsiz şüalanmanın (yüzlərlə vatt) böyük gücünü təmin edir.

§ 3.1. Ar lazerin işçi səviyyələri

Arqon ion səviyyələrin elektron konfigurasiyası şəkildə göstərilmişdir. Arqon ionun əsas səviyyəsi $3p^5$ -in elektron konfigurasiyasına uyğundur. Arqon lazeri elektrik boşalmasındada elektronlarla iki ardıcıl toqquşma nəticəsində yuxarı lazer səviyyəsinin yerləşdiyi ion qaz lazerlərinə aiddir.

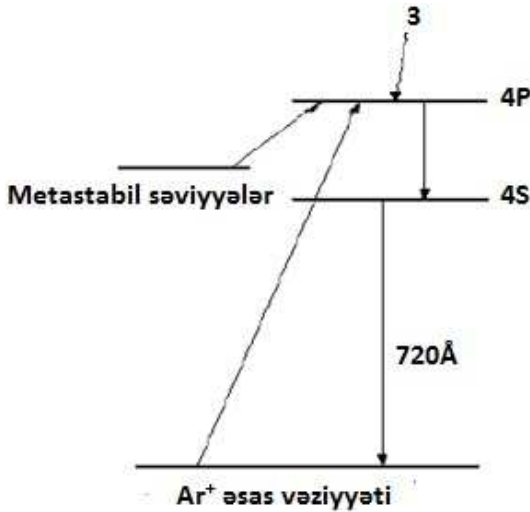


Şəkil 3.1. Arqon lazerinin enerji səviyyələri

İlk toqquşmada neytral atomlardan ionlar yaranırlar, ikinci toqquşmada isə ionların həyacanlanması baş verir. Hər pillədə belə prosesin ehtimalı elektronların miqdarına mütənəsibdir, yəni boşalmanın cərəyanına. Bir halda ki, inversiyanın yaradılması ikipilləli proses olduğundan, həyacanlanmanın effektivliyi cərəyan sıxlığının kvadratı ilə mütənəsibdir. Buna görə ki, belə bir prosesin effektiv olması üçün, böyük cərəyan sıxlıqları tələb olunur. Bilavasitə $3p^6$ -ın əsas səviyyəsindən $3p^4 4s^1$ -in və $3p^4 4p^1$ -in aralıq səviyyələrinin həyacanlanması yüksək enerji tələb edir və buna görə də mümkün deyildir.

Arqon lazerində aşağı lazer səviyyəsi 1 çox kiçik yaşama müddətiylə (10^{-9}) 72 nm (720 Å) dalğa uzunluqlu UB şüalanma hesabına boşaldılır. İnversiyanı təmin edənyuxarı lazer səviyyəsinin 2 yaşama müddəti daha yüksəkdir. Arqon lazerində ən intensiv yaşıl ($514,5 \text{ nm}$) və göy ($488,0 \text{ nm}$) şüaları üçün generasiyanın FİƏ 5 % ötmür.

Arqon ionunun əsas enerjisəviyyələrinin sxemi şəkil 3.2-də göstərilir. Beləliklə, şəkilə əsasən $4p - 4s$ keçid lazerdir. Lazer keçidinin ($4p$) yuxarı səviyyəsi aşağıdakı proseslər nəticəsində yerləşə bilər: 1) əsas səviyyədə olan arqon ionalarla elektron toqquşmalar; 2) metastabil səviyyədə olan ionalarla elektron toqquşmalar; 3) yüksək səviyyəli şüalanma keçidlər.



Şəkil 3.2. Arqon lazerinin işçi səviyyələrinin sxemi

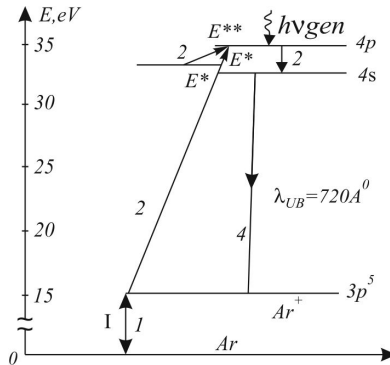
Qeyd etdiyimiz kimi, yuxarı lazer səviyyəsinin yaşama müddəti 10^{-8} s, və aşağı lazer səviyyəsinin 10^{-9} s daha qısa yaşama müddətə malikdir. $4p-4s$ keçid xəttinin eni 3500 MHS

təşkil edir, bu da $T \approx 3000^\circ\text{K}$ temperaturda xəttin Dopler eninə uyğundur. Bu qövs boşalmasında ionların temperaturunun artmasıyla izah olunur. Qaz boşalması burada böyük cərəyanın sıxlığına görə arqon ionları katod istiqamətində ötürülmə baş verir, bu səbəbdən lazerin konstruksiyasında (şək. 3/2) qazın əks dövriyyəsinə təmin edən əlavə boru nəzərdə tutulmuşdur. Arqon lazeri bir çox dalğauzunluğunda generasiya edə bilər. Generasiyanın ən böyük intensivliyi $\lambda = 0.488 \text{ mkm}$ və $\lambda = 0,5145 \text{ mkm}$ (yaşıl xətt) xətlərə uyğundur.

§ 3.2. Həyəcanlanma mexanizmlərin FİƏ-nin hesablanması

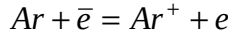
Həyəcanlaşma proseslərinin təhlili üçün arqonun enerji səviyyələrini nəzərdən keçirək. Bu lazerlərdə fəal mühit arqon ionlarıdır. Arqon ionunun

$3p^5$; $4s$ və $4p$ səviyyələrinə baxaq. $3p^5$ səviyyəsi arqon ionunun əsas səviyyəsidir və bu halda ion $\sim 16\text{eV}$ enerjiyə malikdir. $4p - 4s$ lazer keçididir, bu keçid nəticəsində məcburi koherent şüalanma – generasiya yaranır.



İon lazerləri sabit cərəyanlı Şəkil 3.3. Arqonun enerji səviyyələri. qazboşalma lazer növünə aiddir. Arqon lazerində dörd cür proses baş verir (Şək. 3.3):

1. Başlanğıc hal –elektron zərbələri nəticəsində neytral arqon atomlarının ionlaşmasıdır. Bu proses zərbə ilə ionlaşma adını daşıyır. İndi də dediyimizi düstur şəklində yazaq:



Arqonun ionlaşma potensialı böyük olduğundan ($I \sim 15\text{eV}$) prosesin FİƏ kiçikdir. Bunun üçün electron temperaturunun T_e artması məqsəduyğun olardı. Bu yüksək boşalma cərəyanının sıxlığı ($\sim 10 \text{ A/mm}^2$) hesabına əldə olunur. Nəticədə $T_e = 10^3 \text{ K}$ və $n_e \sim 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ alınır. Onda

$$\eta_1 = \exp(-I / kT_e) = 13\%$$

olur.

2. Yuxarı işçi lazer səviyyəsi $4p$ əsas halında yerləşən ionları ilə elektron toqquşmaları hesabına dolur.

$$Ar^+ + \bar{e} = (Ar^+)^{**} + e, \quad \eta_2 = \exp[(W^{**} - I)/kT_e] = 8\%.$$

Bu proses rezonans xarakterli deyil. Nəticədə belə enerjiyə ($W^* \sim 317\text{eV}$) malik olan aşağı səviyyələr, hətta daha çox FİƏ ilə həyəcanlaşırlar. Buna baxmayaraq yuxarı və aşağı işçi səviyyələrin parçalanma sürəti müxtəlif olduğu üçün inversiya təmin olunur. Radiasiya parçalanmasının ehtimalı $4p$ səviyyəsi üçün bərabərdir:

$$A_{4p} = 1,3 \cdot 10^8 \text{ san}^{-1}, \quad A_{4s} = 26 \cdot 10^8 \text{ san}^{-1}.$$

Buradan $\tau_{4p} = 10^{-8} \text{ san}$, $\tau_{4s} = 10^{-9} \text{ san}$.

3. Generasiya fotonun güclü həyəcanlaşmış ionlarla qarşılıqlı təsiri zamanı $\lambda = 0,5mkm$ -də baş verir.

$$h\nu_{gen.} + (Ar^+)^{**} = (Ar^+)^* + 2h\nu_{gen.},$$

$$\eta_3 = -\frac{W^* - W^{**}}{W_{hey.}} = 7\%.$$

FİƏ kiçikdir, çünki güclü həyəcanlaşmış hallardan istifadə olunur ($W_{hey.} = I + W^{**}$).

4. Spontan ultrabənövşəyi şüalanma hesabına aşağı işçi səviyyə effektiv boşalır. Bu proses zamanı həyəcanlaşmış hissəcik arqon ionunun əsas halına (Ar) keçir:

$$(Ar^+)^{**} \rightarrow Ar^+ + h\nu_{ub}.$$

Əgər Ar ionu əsas halda divarlarla toqquşma zamanı neytrallaşırsa, onda yekun FİƏ $\eta_\Sigma = \eta_1\eta_2\eta_3 = 0,07\%$ olur. Əslində arqon ionların bir hissəsi sürətli elektronlarla yenidən həyəcanlaşa bilər. Onda nəzəri $\eta_{\Sigma fakt.}$ faktiki η_Σ -dan kiçik ola bilər:

$$\eta_{\Sigma fakt.} = \eta_2(E^{**} - E^*)/(E - I) = 1\%.$$

$\eta_{tecr.} = 0,1\%$ olması neytral atomlarının iştirakı olmadan həyəcanlaşma prosesinin mümkünlüyünü təsdiq edir.

§ 3.3. Ar lazerinin quruluşu

Arqon lazerində həyəcanlanma güclü cərəyanlı qövs boşalmada əldə edilir. Boşalmanın cərəyan sıxlığı $10^3 A/sm^2$

təşkil edir, müqayisə üçün helium-neon lazerdə boşalma cərəyanı 50 mA/sm^2 -dir. İon lazerlərinin astana cərəyanı bir neçə amper təşkil edir, nominal rejimdə işçi cərəyan bir neçə on amperə çatır. Cərəyanın sıxlığı 1000 A/sm^2 və daha çox. Boşalmanın elektrik sahəsində sürətlənmiş ionlar çox “isti” olurlar. Boşalma borusu HeO əsasında olan berilliydən hazırlanır. Kapilyar soyudulur, elektronların konsentrasiyasını artırmaq üçün uzununa maqnit sahəsini yaradırlar. Belə sahə kapilyarda boşalmasını sıxır və ona divarlara toxunmasına imkan vermir (aşağıya bax).

Arqon lazerində qövs boşalma uzun işçi (diametrlə ≈ 5 millimetr) kapilyarda yaradılır. Kapilyarın boşalma borusu berilliumdan (HeO əsasında) keramikanın və ya qrafitayonun yerinə yetiririk. Qeyd edək ki, berilliumun oksidi qrafitdəntəxminən 100 dəfə ən yaxşı istilikkeçirmə xassəsinə malikdir və buna görə onun tətbiqi daha üstündü. Birinci konstruksiyalarda boru kvarsdan hazırlanırdı, ona görə belə cihazların xidmət müddəti bir neçə on saatla məhdudlaşdırılmışdı.

Konstruksiyaların əksəriyyətində boru, anod və katod su soyumasını tələb edir. Qaz boşalma boruda yüksək cərəyan sıxlığına görə Ar ionlarının katod (kataforez) istiqamətinə doğru intensiv ötürülmə baş verir. Xatırladaq ki, elektrik sahəsinin təsiri altında sabit cərəyanın qaz boşalmasında ionların istiqamətlənmiş hərəkəti **kataforez** adlanır. Böyük diametrli borularda bu effektkonsentrasiyanın böyük qradientlərinin yaranmasına mane olan əks diffuziayla kompensasiya olunur.

İon lazerləri üçün tipik kiçik diametrli borularda qövs boşalmasında kataforez diffuziya üzərində üstünlük təşkil edir,

borunun oxu boyunca konsentrasiyanın böyük qradiyentlərinin yaranmasına gətirib çıxarır.

Lazerin konstruksiyasında kataforezin yaratdığı təzyiq düşməsinə kompensasiya etmək üçün iş həcmnin anod və katod hissələrini birləşdirən xüsusi dolama boru nəzərdə tutulmuşdur.

Aq lazerinin qazboşalma borusunu - öz oxları boyunca istiqamətlənmiş sabit maqnit sahəsində yerləşdirilir. Solenoidlə yaradılan 1000 E gərginlikli olan bu sahə boşalmanı sıxır və işçi borunun divarlarına elektronların və ionların hərəkətinə mane olur, onu ion şüalarıyla dağıtmasını qoruyur. Buna görə Aq lazerində təxminən 1 santimetr boşalma borusunun diametri və uzunluğu 2 metr olan fasiləsiz rejimdə bir neçə yüz vatt qədər yüksək çıxış gücünü almaq olar.

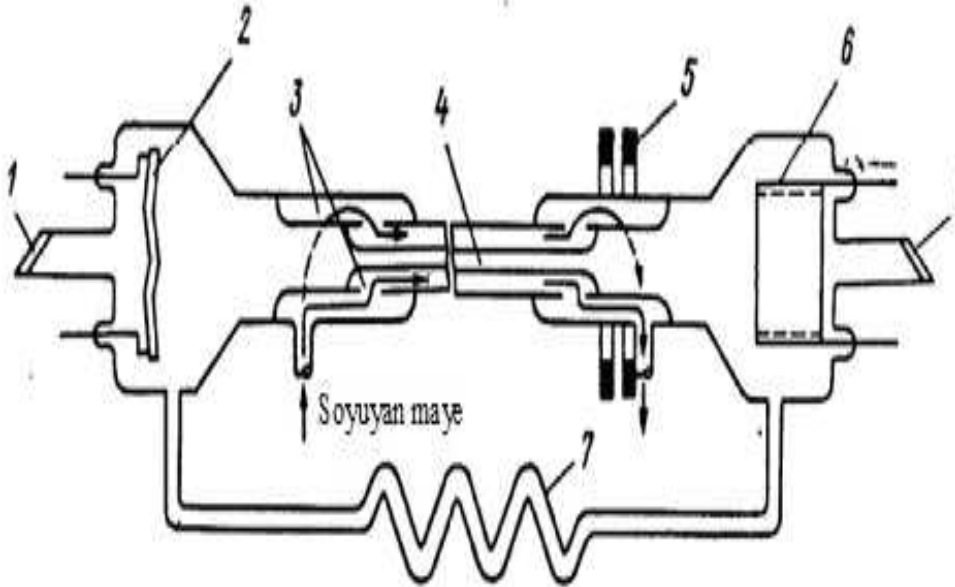
§ 3.4. Həyəcanlaşmanın optimal şərtləri

Həyəcanlaşmanın optimal şərtləri mövcuddur: p təzyiqinin artması ilə həyəcanlaşma üçün əhəmiyyətli olan zərrəciklərin sayı da artır. Bu da cərəyan sıxlığının artırılmasına gətirib çıxarır. Cərəyan sıxlığı ilə temperatur da artır. Lakin temperaturun artması divarlarla toqquşma zamanı yaranan ionların parçalanmasına səbəb olur. Boşalma borusunun divarlarını uzaqlaşdırdıqda (borunun diametrini böyütməklə) həyəcanlaşmış halların parçalanması yavaşır. Təcrübədə $p_{opt} \cdot d = 3Pa \cdot sm = const$ alınır. Boşalma cərəyanının sıxlığının optimal qiyməti mövcuddur. Elektronların sıxlığı neytral atomların sıxlığına bərabər olandan sonra $n_e = n_{at}$, cərəyan sıxlığını artırmaq mənasızdır. Bu şərtədən boşalma cərəyanı sıx-

lığının optimal qiyməti i_{opt} alınır. Vahid uzunluqdan alınan güc d -dən asılı deyil və $P_{xüs}i = i_{opt} = 1Vt/m$ -dir. Axıncı şərt diametri kiçik d kapilyarlarda texniki çətinlik törədir. Bu şərt materialların termodayanıqlılığı ilə əlaqədardır və yalnız impuls rejimində və böyük diametrlər üçün ödənilir. Lakin bu kiloamper cərəyanının alınması ilə mürəkkəbləşir. Buna görə də aksial maqnit sahəsinin köməyi ilə kapilyarın divarından boşalmanın “sıxma” üsulunu tətbiq edirlər.

Nəticədə divarlarla toqquşma hesabına həyəcanlaşmış ion hallarının parçalanma sürəti azaldılır və çıxış gücü bir neçə dəfə artır. Lakin bu zaman lazerin cəkisi artır. p_{opt} və i_{opt} olanda arqon lazerin güclənməsi $6,6 \cdot 10^{-3} / d$ kimi təyin olunur ki, bu da $\lambda = 488$ nm -də lazer rezonatorunun itkisindən çox-çox böyükdür. $\lambda = 514,5$ nm -də isə güclənmə bir neçə dəfə azdır.

Ar lazerinin xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, boşalma cərəyanının artması ilə çıxış gücü sürətlə artır. *He-Ne* lazerindən fərqli olaraq arqon lazerində çıxış gücü həyəcanlaşma gücünün artması ilə böyüyür. Bu onunla əlaqədardır ki, inversiyanın doyma prosesi yalnız $i_{opt} \gg i_{tecr}$ olduqda olacaq. Buna görə də *Ar* lazerində çox yüksək çıxış gücü almaq olur. Fasiləsiz rejimdə borunun diametri 1sm olanda çıxış güc 100 Vt-a çatır.



Şəkil 3.4. Arqon lazerin qazboşalma borunun qurğusu:

1-lazerin çıxış pəncərəsi; 2-katod; 3-su soyuması kanalı; 4-qövsü boşalma kanalı (kapilyar); 5-mağnit; 6-anod; 7- dolama qaz borusu.

§ 3.5. Ar lazerinin spektri

Bir qayda olaraq, Aq lazerlər spektrin göy-yaşıl sahəsində bir neçədalğa uzunluğunda generasiya olunur. Lazerin rezonatorunda vahid dalğanın uzunluğunun seleksiyasının (seçilməsinin) həyata keçirilməsi üçün rezonator daxilinə dispersiya edici prizma yerləşdirilir.

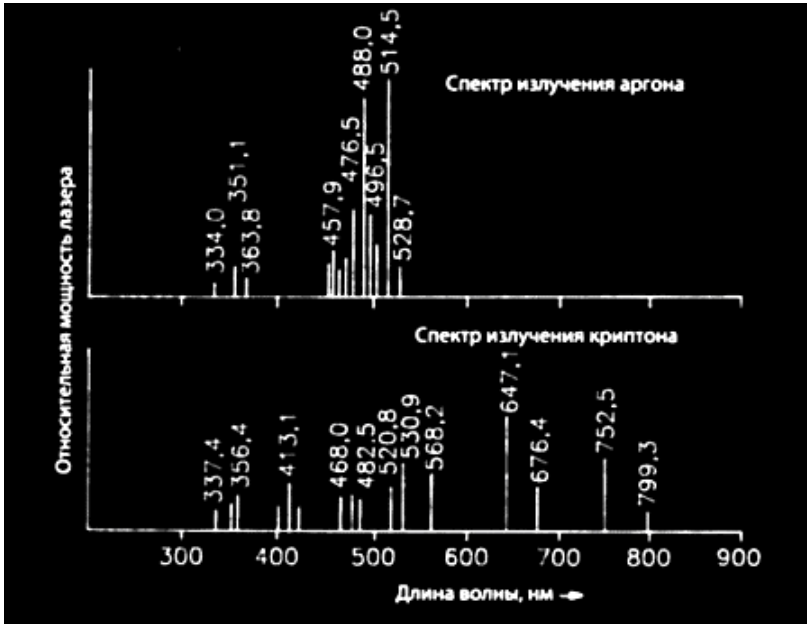
Ar lazerinin qaz boşalma quruluşu ilə tanış olaq. Cərəyanın sıxlığı çox olduğundan arqon ionları katod istiqamətində yığışırlar. Bunu ödəmək üçün borunun quruluşunda qazın tərsinə dövr etməsini təmin edən dolama boru nəzərə alınmışdır. Kanalda boşalmanın qarşısını almaq üçün onun uzunluğunu kapilyarınkindan böyük edirlər. Kapilyarın parçalanmasına görə onu kvarsdan yox, *Be* -dən düzəldirlər. Bundan başqa borunu aksial maqnit sahəsində yerləşdirirlər. Bu zaman borunun oxu *H* -in istiqamətinə paralel olur.

Plazmada yaranan Lorens qüvvəsi elektronların divarlara diffuziya sürətini azaldır. Nəticədə borunun mərkəzində sərbəst elektronların sayının artması həyəcanlaşmanın sürətlənməsinə səbəb olur. Bu da öz növbəsində çıxış gücünü böyüdür.

Maqnit sahəsi borunun mərkəzində elektrik yükünü saxlayaraq divarların dağılmasını azaldır. TEM00 generasiyanı almaq və tam cərəyanı azaltmaq üçün borunun diametri kiçik götürülür (təqribən bir neçə mm). Lakin divarların dağılmasının qarşısını almaq və çıxış gücünü artırmaq üçün diametri böyük olan borulardan istifadə etmək lazımdır.

Ar lazeri eyni zamanda spektrin göy –yaşıl oblastında bir neçə dalğa uzunluğunda generasiya edir. Bu lazerin ən böyük şüalandırıcı gücü $\lambda = 488 \text{ nm}$ (mavi) və $\lambda = 514,5 \text{ nm}$ (yaşıl)

dalğalardadır. Fasiləsiz şüalanma rejimində $p \sim 10$ Vt-a bərabərdir, bu güc müxtəlif metallarda dəşik açmaq üçün kifayət edir (şək. 3.5-də göstərilib).

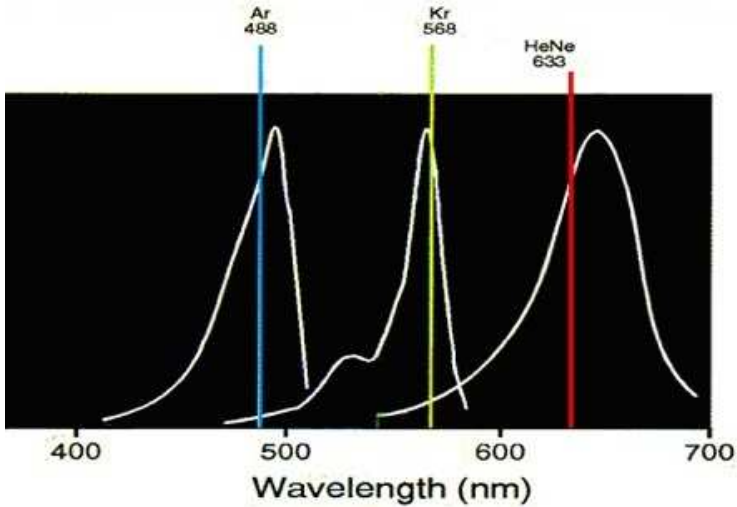


Şəkil 3.5. İnert qazda fasiləsiz rejimdə işləyən lazerlərin intensiv spektral xətləri

Şüalanma xəttinin eni ion temperaturu ilə ($T \sim 3,3 \cdot 10^3 K$) təyin olunur və təqribən 10 QHs -dir. Radiasiya genişlənməsi 100 MHS-ə mütənəssibdir, bu da tamamilə τ_{4s} -ə uyğundur. Ar-nun atom çəkisi böyük və ion temperaturu yüksək olduğundan zərbə genişlənməsi radiasiya genişlənməsinə nisbətən kiçikdir. Deməli, qeyri-bircinsli genişlənmə mövcuddur: $\Delta\nu_D = 10$ QNs; $\Delta\nu_D \gg \Delta\nu_{birc.} = 100$

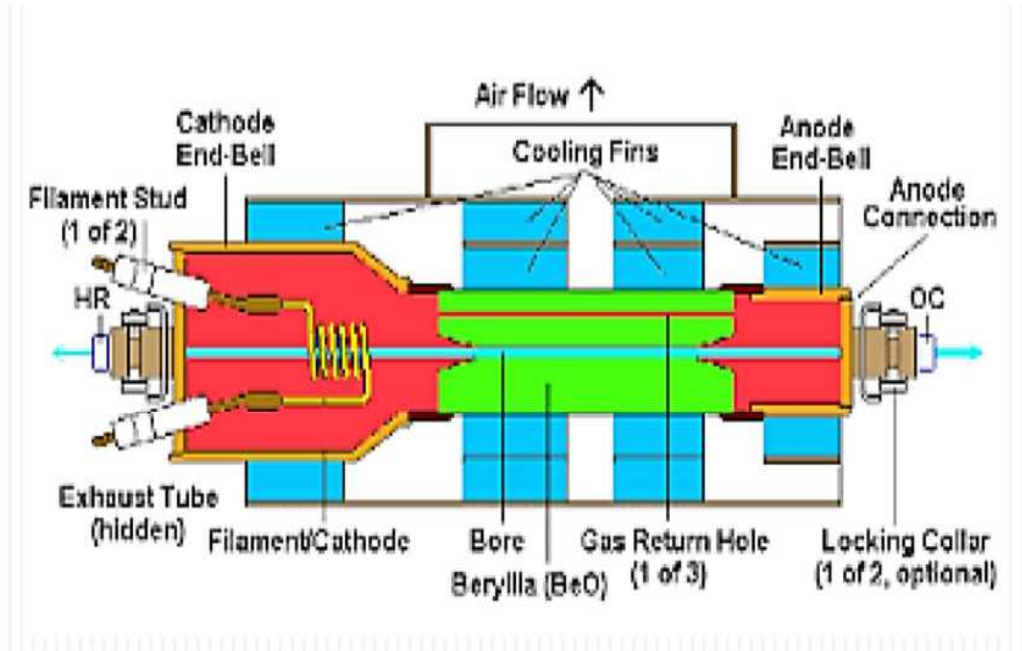
MNs. Nəticədə, uzun (bir metrə yaxın) lazerlərdə uzununa modalar arasındakı məsafə təqribən yüzlərcə MHs tərtibdə olur və çox tezlikli generasiya mövcuddur.

Arqon lazerlərinin tipik xüsusiyyətləri: yüzlərlə saat xidmət davamiyyətində 488 və 514,5 nm dalğa uzunluğunda fasiləsiz rejimində şüalanmanın gücü $1 \div 10$ vatt təşkil edir. İmpuls şüalanma rejimində cərəyan sıxlığı çox böyükdür, bu da güclü ionlaşma prosesinə və inversiyanın artmasına gətirib çıxarır. Nəticədə yüksək çıxış gücü təqribən 100 kVt-a qədər alınır.



Şəkil 3.6. Üç lazerin spektri.

İon qaz lazerlərinin və He-Ne-lazerin əhəmiyyətli çatışmazlığı 0,1-0,01% təşkil edən çox aşağı FİƏ –dır.



Şekil 3.7. Ar lazerinin müasir modifikasiyası

FƏSİL IV

MOLEKULYAR LAZERLƏR

§4.1. Molekulların spektrləri

Molekulların enerji spektri atom və ionlara nisbətən daha çox zəngindir, o, üç hissə ilə təsvir oluna bilər: elektron, rəqsi və fırlanan. Enerji spektrin mürəkkəbliyi molekulyar sistemlərin zəngin spektral imkanlarına səbəb olur və enerjinin əlverişli səviyyələrinin seçimini asanlaşdırır. Molekulyar qaz lazerləri bütün digər lazer növləri içərisindən daha geniş diapazonu örtür.

Molekulyar lazerlər qaz lazerləri arasında ən əsas yeri tuturlar, belə ki, çoxlu elementlər, hətta ağır və ya yüksək temperaturda əriyən elementlər dayanıqlı uçuşu birləşmələr əmələ gətirirlər. Molekulyar spektrlər tamamilə mürəkkəbdirlər, bu isə molekularda baş verən proseslər və qarşılıqlı təsirlərlə bağlıdır.

Molekulyar spektrlər atom spektrlərinə nəzərən əhəmiyyətli dərəcədə mürəkkəbdir, çünki molekularda elektronla yanaşı, sərbəstliyin rəqsi və fırlanma dərəcələri də vardır. Buna görə də molekulun tam enerjisini elektron, rəqsi və fırlanan enerjilərin kvant qiymətlərinin cəmi şəklində təsvir etmək olar: $W = W_{el} + W_r + W_f$ həmçinin $W_{el} : W_r : W_{fir} = 1 : \sqrt{m/M} : m/M$, burada m -elektronun kütləsi, M isə molekulun

kütləsidir. Adətən m/M nisbəti 10^{-5} tərtibinə malikdir, W_{el} elektron enerjisinin tərtibi isə 1eV-dir. Buna görə də $W_r = 10^{-1} \dots 10^{-2}$ eV, bu da infraqırmızı diapazona uyğundur, $W_f = 10^{-3} \dots 10^{-4}$ eV, bu isə mikrodalğalı diapazona və ya rəqsi spektrlərin xətlərinin parçalanmasına uyğundur. N -atomlu xətti molekul üçün sərbəstliyin rəqsi dərəcələrinin sayı $3N-5$ -ə, qeyri-xətti üçün isə $3N-6$ -ya bərabərdir.

İkiatomlu molekullar, məsələn azot N_2 , sərbəstliyin bir rəqsi dərəcəsinə malikdir, o, az amplitudalar zamanı özünü enerjinin kvant qiymətlərinə malik harmonik ossillyator kimi aparır:

$$W_r = \hbar \omega_0 (v + 1/2).$$

Həmçinin dipol keçidlər üçün $\Delta v = \pm 1$ seçmə qaydası yerinə yetirilir, ω_0 tezliyinin qiyməti isə ossillyatorun məxsusi rəqslərinin tezliyi ilə üst-üstə düşür. Rəqslərin böyük amplitudaları zamanı anqarmonizm (qeyri -izoxronluq) yaranır, bu zaman, birincisi, rəqslərin tezliyi v kvant ədədindən asılıdır, yəni səviyyələr qeyri -ekvidistantdır, ikincisi, seçim qaydası götürülür və $\Delta v = \pm 2$ -ə malik keçidlər əmələ gəlir, baxmayaraq ki, az ehtimallıdır.

Molekulun fırlanan enerjisi də kvantlaşır. İkiatomlu molekul üçün

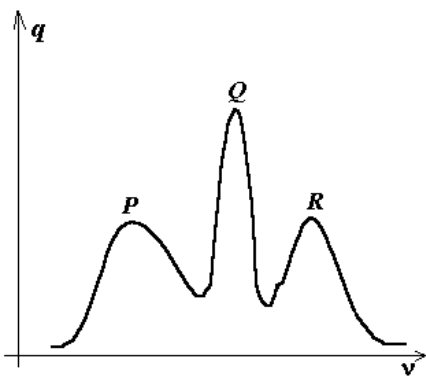
$$W_f = BJ(J + 1).$$

Burada $J=0, 1, \dots$ - fırlanan kvant ədədi, B - fırlanma sabitidir. Dipol keçidləri zamanı $\Delta J=0, \pm 1$ seçim qaydaları yerinə yetirilir. $\Delta J=-1$ -ə malik keçid P -budaqlı adlanır, $\Delta J=0$ -a Q -budaq, lakin $\Delta J=1$ -ə isə R -budaq uyğundur. $W_f < W_r$ olduğun-

dan, adətən bu budaqlar rəqsi vəziyyətlər arasında keçidin parçalanmasını əmələ gətirirlər (şək. 4.1).

Molekulların mütərəqqi hərəkəti ilə yanaşı, elektronların daha asta hərəkət edən nüvələrə nəzərən hərəkəti, nüvələrin tarazlıq vəziyyəti ətrafında rəqsi hərəkəti və molekulun tam halda fırlanan hərəkəti baş verir. Stabil radikallar halında olan molekulların **və** ya sıfırdan fərqli cəm parçalanması. P, Q və R budaqları elektron spinə malik olan molekulların spektri daha da mürəkkəbdir. Bu molekullarda spin-fırlanan qarşılıqlı təsirlərin olması spektrlərdə əlavə parçalanma yaradır və hər bir fırlanan xətt dublet kimi özünü göstərir. Bundan başqa, molekuldakı atomların mümkün nüvə spinləri nəticədə spektrin çox nazik quruluşunu da verə bilər.

Hərəkətin bütün formaları ilə enerjinin müəyyən səviyyələri əlaqəlidir. Yuxarıda qeyd etdiyimiz kimi fırlanma səviyyələri arasındakı keçidlər spektrin mikrodalğalı sahəsinə, rəqsi səviyyələr arasındakı keçidlər $-İQ$ sahəsinə, elektron səviyyələri arasındakı keçidlər isə - görünən və UB sahəyə düşürlər.



Şək. 4.1. Rəqsi xəttin fırlanan parçalanması.

Molekulların daxili hərəkətlərinin çox formalılığı və bu hadisələrin fiziki anlayışı kifayət qədər yüksək FİƏ malik olan güclü qaz lazerlərinin işçi maddəsinə qoyulan ümumi tələbləri formalaşdırmağa imkan verir.

Molekulyar lazerlərin iki tipik nümayəndəsi mövcuddur:

rəqsi-fırlanan keçidlərdə işləyən karbon qazdakı lazerlər (CO_2) və elektron-rəqsi keçidlərdə işləyən impuls azot lazeri (N_2 , 337 nm), həmçinin CO- və H_2 -lazerləri.

§ 4.2. CO_2 lazer

İlk molekulyar lazer 1965 -ci ildə Patel (ABŞ) tərəfindən yaradılmışdır. Bu lazer CO_2 molekullarının rəqs səviyyələri arasındakı məcburi keçidlər hesabına işləyirdi. CO_2 qazına N_2 və He-un qarışığı əlavə etdikdə CO_2 molekullarının iki rəqsi səviyyələrinin keçidlərindən alınan lazerin FİƏ artır. CO_2 lazeri molekulyar lazerlərin içərisində xüsusilə maraqlı, ən güclü (fasiləsiz rejimdə $p \sim 1\text{MVt-dır}$) və effektiv lazerdir (FİƏ $\eta = 15\text{-}20\%$). Gəlin CO_2 və N_2 -nin əsas hallarına uyğun olan vəziyyəti araşdıraq. N_2 –ikiatomlu molekuludur. Burada onun iki ən aşağı səviyyəsi verilmişdir. CO_2 molekulu isə üçatomludur. Ona üç rəqsi moda, başqa sözlə desək rəqsin üç növü uyğun gəlir.

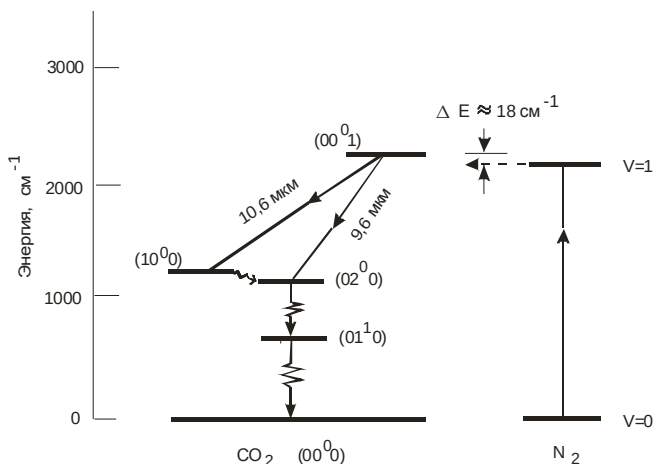
Verilmiş halda şüalanma zamanı atomun bir optik elektronu yox, bütövlükdə molekulun enerjisi dəyişir. Generasiya iki qrup səviyyə arasında baş verir: $00^01\text{-}10^00$ $\lambda = 10.6\text{ mkm}$ və $00^01\text{-}02^00$ $\lambda = 9,6\text{ mkm}$. Əslində isə əgər fırlanma səviyyələrini nəzərə alsaq generasiya $\lambda = 10,6\text{ mkm}$ və $9,6\text{ mkm}$ -da mərkəzi olan iki xətlər qrupundan ibarət olar. Bu iki keçiddə yuxarı işçi səviyyə ümumidir. 00^01 səviyyəsinin doldurulması effektiv həyata keçirilir.

CO_2 , N_2 və He qazlarının molekulyar qarışığı CO_2 lazerin fəal mühitidir. Molekulyar qaz lazerlərində elektron, rəqsi və ya fırlanma enerji səviyyələri arasındakı keçidlərdən və ya

onların birləşməsindən istifadə olunur. Buna görə də molekulyar lazerləri üç sinifə bölmək olar: 1) dalğa uzunluğu (2-300 mkm) orta və uzaq İQ - diapazonda generasiya olunan eyni elektron səviyyənin rəqsi-fırlanma keçidlərində lazerlər; 2) müxtəlif elektron-rəqsi səviyyələrin rəqsi səviyyələri arasında keçidlərdə və dalğa (100-400 nm) uzunluqlarının UB-sahəsində yaranan lazerlər; 3) dalğaların (25 mkm -1 mm) uzunluqlarının uzaq İQ - diapazonunda yaranan eyni bir rəqsi səviyyənin təmiz fırlana səviyyələri arasında keçidlərdən istifadə edən lazerlər.

§ 4.3. CO₂ lazerin enerji səviyyələri

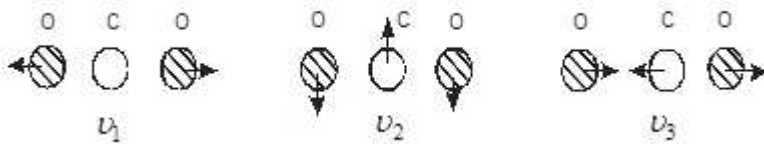
CO₂ lazerində generasiyanı CO₂ molekulun iki rəqsi səviyyələri arasındakı keçiddə almaq olar, N və He isə lazerin



Şəkil 4.2. N₂ və CO₂ molekullarının əsas elektron vəziyyətinin aşağı rəqsi səviyyələri (sadəlik üçün burada fırlanan səviyyələr göstərilməmişdir).

FİƏ artırmaq üçün istifadə edirlər. CO₂ və azot molekullarının əsas elektron hallarının sadələşdirilmiş enerji sxemi şəkil 4.2-də göstərilib.

CO₂ molekulu üç cırlaşmamış rəqsi tezliyə malikdir, yəni: 1) simmetrik rəqs (moda); 2) deformasiyalı rəqs (moda); 3) asimmetrik rəqs (moda). Buna görə hər rəqsi modda kvantların sayını təyin edən molekulun rəqsi üç n_1, n_2, n_3 kvant ədədi ilə təsvir edilir. Məsələn, 01¹0 səviyyəsi deformasiyalı modun rəqsinə uyğundur. Şəkil 4.3-də CO₂ molekulunun rəqslərinin fundamental modlarının diaqramı göstərilib.



Şəkil 4.3. CO₂ rəqsinin 3 fundamental modları: v_1 – simmetrik moda; v_2 – deformasiyalı moda; v_3 – asimmetrik moda

v_1 və v_2 rəqslərinin tezliklərinin təsadüfi üst-üstə düşməsi bu səviyyələri birləşdirir, bu effekti Fermi rezonansı adlandırırlar və kinetik proseslərdə onlara tez-tez bir vəziyyət kimi baxırlar (şək. 4.3).

Generasiya keçidinin 10⁰0 aşağı lazer səviyyəsi çox aşağı relaksasiya zamanına malikdir, bu o səbəbdən olur ki, aşağı lazer səviyyəsi V_2 deformasiya rəqsi və eyni zamanda 01¹0 ilə güclü əlaqəlidir.

Bir rəqsi modanın daxilində toqquşma mübadiləsi çox sürətlə baş verir. 01¹0 rəqsi toqquşma dezaktivasiyasının böyük kəsiyinə malikdir və bunun izahı sadə həndəsi mülahizələrə

əsasən aydındır. Aydındır ki, molekulun oxuna bucaq altında uçan istənilən hissəcik tərəfindən həyəcanlana bilən toqquşma kəsiyinə nisbətən ox boyunca lokallaşmış rəqs üçün toqquşma kəsiyi kiçikdir.

Həyəcanlanmış N_2 molekulunun birinci rəqsinin enerjisi CO_2 molekulunun 00^01 səviyyəsi ilə təsadüfi üst-üstə düşməsini (fərq $\Delta W \sim 18 \text{ sm}^{-1}$ təşkil edir) nəzərə alsaq, görərik ki, molekul ideal qaz boşalma lazerə qoyulan tələblərə yaxşı cavab verir. Azotun simmetrik homonüvəli molekulaları rəqsi həyəcanlanmış halda böyük məxsusi yaşama zamanına malikdirlər, onlar asanlıqla elektron zərbəsi ilə həyəcanlanırlar və yüngüllüklə CO_2 -yə həyəcanlanma enerjisini verirlər. Beləliklə, CO_2 -nin lazer doldurmasının dövrü stasionar şəraitlərdə aşağıdakı kimi olur.

Rəqslərin üç növündən 2 moduna ən kiçik elastiklik sabiti uyğundur, belə ki, rəqslər eninədir və bu səviyyə ən kiçik enerjiyə malikdir. Generasiya $00^01 \rightarrow 10^00$ ($\lambda = 10,6 \text{ mkm}$) və $00^01 \rightarrow 02^00$ ($\lambda = 9,6 \text{ mkm}$) səviyyələri arasında baş verir. 00^01 səviyyəsinin məskunlaşması aşağıdakı iki prosesin nəticəsi olaraq baş verir:

1) $e + CO_2(00^0) \rightarrow e + CO_2(00^01)$ elektronlarla toqquşma, belə ki, keçid optikimümkündür, onun toqquşmalarının kəsiyi böyükdür;

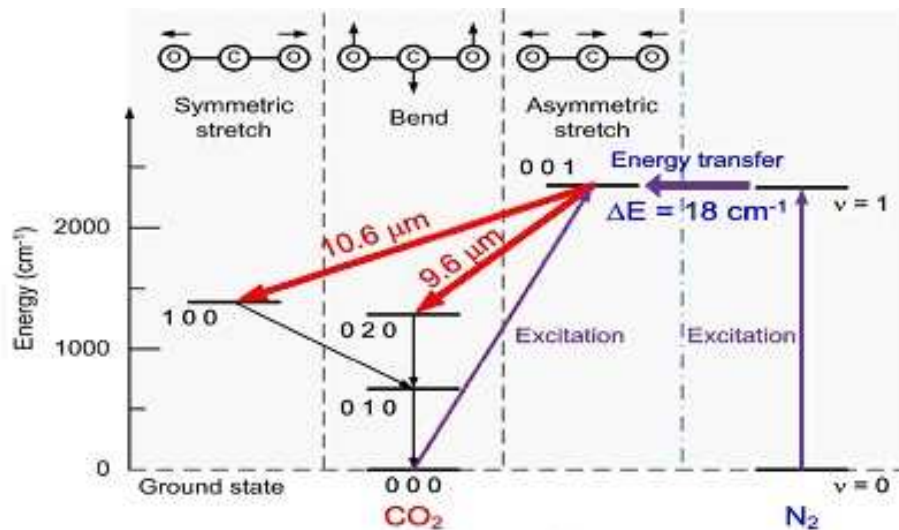
2) N_2 molekulundan enerjinin rezonans ötürülməsi. Azot molekulunun birinci rəqs səviyyəsinin enerjisi CO_2 molekulunun ($\Delta W = 18 \text{ sm}^{-1} \ll KT$) 00^01 rəqs səviyyəsinə uyğun gəldiyi üçün bu proses çox effektiv baş verir.

Azotun daha yüksək rəqs səviyyələri CO₂ molekulunun uyğun rəqs səviyyələri ilə (səviyyə 00⁰4-ə qədər) demək olar ki, rezonans ($\Delta W < kT$) təşkil edir, və 00⁰n həyacanlanmış səviyyələrinin 00⁰1-ə keçid sürəti çox böyükdür.

Azotun həyacanlanma kəsiyi $\sigma = 3 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2$ təşkil edir. N₂-dən CO₂-ə həyacanlanma enerjisinin toqquşma ötürülməsi sürəti $2 \cdot 10^4 \text{ sm}^{-1} \text{ torr}^{-1}$ təşkil edir.

Azot enerjisinin CO₂ yuxarı enerji halına effektiv ötürülməsi ilə yanaşı, eləcədə 00⁰1 → 10⁰0, 00⁰1 → 02⁰0, 10⁰0 → 01⁰0 və 02⁰0 → 01⁰0 keçidlərinin optik mümkün olduğu nəzərə alınarsa, spontan şüalanmanın ($\tau_{sp} \sim 1/\nu^3$) böyük relaksasiya zamanı ilə bağlı olan problem mövcuddur. Müxtəlif göstərilən səviyyələrin relaksasiyası əsasən toqquşmalarla təyin edilir. Buna görə də, bu problemi həll etmək üçün heliumun təsirsiz (inert) qazının qaz qarışığına daxil olunur, hansının ki, atomları ilə toqquşma effektiv CO₂ molekulunun 00⁰1 səviyyəsini $4 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \text{ torr}^{-1}$ sürətilə boşaldır. Məsələn, əgər qarışığın tam təzyiqi 15 mm c.s. bərabərdirsə (parsial təzyiqlərdə CO₂:N₂:He=1:1:8), yuxarı lazer səviyyəsinin yaşama müddəti $\tau_s = 0,4 \text{ ms}$ təşkil edir.

00⁰1 → 10⁰0 generasiya keçidinin 10⁰0 aşağı lazer səviyyəsi 02⁰0 deformasiya rəqsiylə və eyni zamanda 01⁰0 rəqsiylə güclü əlaqəyə görə kiçik relaksasiya müddətinə malikdir. Bir rəqs modası daxilində enerji defisitinin az olması səbəbindən enerjilərin toqquşma mübadiləsi çox tez, praktik olaraq bir qazo-kinetik toqquşma müddətində baş verir. Həmçinin heliumun istiliyin qaz boşalması borunun divarlarına keçməsi hesabına CO₂-in aşağı temperaturunun saxlanılmasına imkan verən yüksək istilikkeçiriciliyimühüm əhəmiyyətə malikdir.



Şəkil 4.4. CO₂ molekulunda mövcud modlarının və rəqsi səviyyələrin müqayisəsi

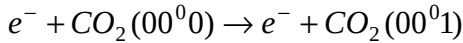
Aşağı temperatur istilik həyəcanlanması hesabına aşağı lazer səviyyəsinin məskunlaşmasının qaçmaq üçün zəruridir.

Beləliklə, azot CO_2 - lazerin yuxarı enerji səviyyəsinin məskunlaşmasına, helium isə aşağı səviyyənin tükənməsinə səbəb olur.

Beləliklə, stasionar şərtlərdə CO_2 lazer doldurmasının sikli aşağıdakı şəkildə görünür.

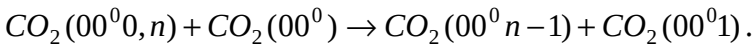
Yuxarı lazer səviyyəsində doldurma aşağıdakı proseslərə əsasən baş verir:

1 Elektronlarla bilavasitə toqquşmalar. Toqquşmanın baxılması lazım olan əsas tipi:



Toqquşma kəsiyi çox böyükdür və 10^00 , 02^00 səviyyələrinin həyəcanlanmasının uyğun kəsiyini ötüb keçir.

2 Bundan başqa, birbaşa elektron zərbəsi CO_2 -nin yuxarı (00^0n) rəqsisəviyyələrinin həyəcanlanmasına səbəb ola bilər. Lakin rezonansa yaxın toqquşmaların nəticəsində 00^01 səviyyəsinə yuxarı rəqsi səviyyələrdən bu tipli sürətli relaksasiya baş verir:



Həyəcanlanmış və həyəcanlanmamış molekulun toqquşmasının ehtimalı daha çoxdur, belə ki, CO_2 -nin molekullarının əksəriyyəti əsas vəziyyətdə yerləşirlər.

3. N_2 molekulundan enerjinin rezonans ötürülməsi

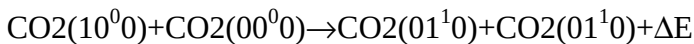
Bu proses həmçinin böyük effektivliyə malikdir, belə ki, CO_2 və N_2 həyəcanlanmış molekullarının enerjiləri arasında enerjilər fərqi kiçikdir ($\sim 18 \text{ sm}^{-1}$). Bundan başqa N_2 səviyyəsi $v = 1$ -də metastabildir. Bu onunla bağlıdır ki, N_2 molekulu öz

dipol momentinə malik deyil və elektrodipol şüalanması üçün $v = 1$ keçid qadağandır. N_2 –nin daha yüksək səviyyələri demək olar ki CO_2 –ni digər səviyyələri ilə rezonans halında olur, onlara enerji ötürür, daha sonra isə bu enerji 00^01 səviyyəsində yığılır.

İndi isə CO_2 səviyyələrin relaksasiyalarının tez baş verməsini, yəni həmin səviyyələrin boşalmasının sürətini qiymətləndirək. Relaksasiyanın uyğun zamanları $\tau_{spontan} \sim 1/\nu^3$ çox böyükdür və toqquşmalar relaksasiyanın əsas alətidir. Ona görə də yxarı lazer səviyyəsinin relaksasiya müddəti aşağıdakı düsturla təyin etmək olar:

$$1/\tau_s = \sum a_i p_i \quad (4.3.1)$$

p_i – parsial təzyiq, a_i – boşalmada qarışıqın hər bir komponentini xarakterizə edən sabitlərdir. Məsələn, $CO_2:N_2:He=1:1:8$ konsentrasiya münasibətində $p_{umumi} = 15$ mm c. s., onda $\tau_s = 0.4$ mksan. $10^00 \rightarrow 02^00$ relaksasiyasının sürətinə gəlicə isə, o böyükdür və keçid hətta izolə olunmuş molekulda baş verir. Əsas vəziyyətdə olan 10^00 , 0200 səviyyələrinin CO_2 molekulları ilə rezonansı proseslərin hesabına toqquşmaları 01^10 səviyyəsi ilə effektiv olaraq qarşılıqlı təsirdə olur:



Bu proseslərin ehtimalı böyükdür və bu üç səviyyənin yerləşmələri çox qısa vaxt ərzində istilik tarazlığına çatırlar. $01^10 \rightarrow 00^00$ keçidi yükə iştirak edən bütün molekullar

arasında ən az enerjiyə malik olduğundan, onda $01^10 \rightarrow 00^00$ səviyyəsindən relaksasiya yalnız enerjinin daxil olan hərəkətin enerjisinə ötürülməsi yolu ilə baş verir.

Toqquşmalar nəzəriyyəsindən məlumdur ki, enerji böyük ehtimalla daha yüngül molekullar kimi helium atomlarına ötürülür. Yaşama müddəti (1) ifadəsi ilə təyin olunur, belə ki, parsial təzyiq p_i digər qazlara nisbətən He üçün çox böyükdür. Heliumun varlığı digər vacib fakta da gətirib çıxarır: öz istilik keçiriciliyinə görə helium qaz boşalma borunun divarlarına istiliyin yaxşı ötürücüsüdür. Qarışığın aşağı temperaturu ona görə vacibdir ki, istilik həyəcanlanmasının hesabına aşağı lazer səviyyəsinin yerləşməsi baş tutmasın, çünki səviyyələr arasındakı fərq $\sim kT$ -dir.

Beləliklə, CO_2 lazerində N_2 yuxarı lazer səviyyəsini məskunlaşmasına, He isə aşağı lazer səviyyəsinin tükənməsinə kömək edir.

§ 4.4. CO_2 lazerinin FİƏ-ı

Doldurma proseslərinə və onların FİƏ-na baxaq:

1. $\nu = 1$ və $W^* = 2400 \text{ sm}^{-1}$ olan metastabil N_2 -nin həyəcanlaşması iki yolla həyata keçir:

a) elektron boşalmalarının iştirakı ilə aşağıdakı kimi:
 $e^- + \text{N}_2 = \text{N}_2^* + e^-$, bundan başqa

b) yüksək səviyyələrdən kaskad keçidlərinin “soyudulması” ilə.

Dipol yaxınlaşmasında $\nu = 1$ -dən əsas hala $\nu = 0$ keçid qadağan olunmuşdur, nəticədə çoxlu metastabil N_2 molekulları

yığılır. Molekulyar sistemin həyəcanlaşma prosesinin FİƏ tapsaq alırıq:

$$\eta_1 = \exp(-W^* / kT) \approx 1.$$

Bu həyəcanlaşmış səviyyələrin enerjisinin (W^*) kiçik mütləq qiymətləri hesabınadır. Molekulların daha aşağı 10^00 və 02^00 səviyyələrinə yox, 00^01 səviyyəsinə yığılması onunla izah olunur ki, 00^01-00^00 keçidi optik mümkündür, 00^00-10^00 keçidi isə qadağan olunmuşdur.

2. Karbon qazı molekulların yuxarı işçi səviyyəsinin həyəcanlaşması da iki yolla həyata keçir: a) elektron boşalmalarının iştirakı ilə: $\bar{e} + CO_2 = CO_2^{**} + e$ və b) azot molekulları ilə rezonans xarakter daşıyan toqquşma zamanı: $N_2^* + CO_2 = N_2 + CO_2^{**}$. Buradan görünür ki, karbon və azot qazlarının birgə istifadəsi təsadüf deyil. Azot molekullarının $v=1$, həyəcanlaşmış metastabil səviyyəsi demək olar ki, karbon molekullarının yuxarı işçi səviyyəsi ilə üst-üstə gəlir. Buna görə də azot və karbon qazı molekulları arasında həyəcanlaşma enerjisinin rezonans ötürmə şərti yaxşı ödənilir. Başqa sözlə desək N_2 -enerji mənbəyi (donor) rolunu oynayır. Biz bu cür oxşar hala $He-Ne$ lazerində rast gəlirik. $\eta_2 \approx 1$ (belə ki, $\Delta W = W_{CO_2^{**}} - W_{N_2^*} = 18 \text{ sm}^{-1}$, $T = 400\text{K}$, $kT = 280 \text{ sm}^{-1}$). Qeyd edək ki, N_2 -nin daha yüksək rəqsi səviyyələri CO_2 -nin münasib səviyyələri ilə rezonansdadırlar ($\Delta W < kT$). Həyəcanlaşmış $00^04, \dots\dots\dots, 00^02$ səviyyələrindən 00^01 səviyyəsinə keçidlər böyük sürətlə xarakterizə olunur. Bu

proseslər nəticəsində yuxarı lazer səviyyəsinin dolmasının effektiv və yüksək FİƏ –lı ilə olduğu aydın olur.

3. Üçüncü proses generasiya prosesidir. Həyəcanlaşmış

CO_2 molekulu aşağı 10^0 və ya 02^0 səviyyəyə düşürsə, onda uyğun olaraq 10,6 və ya 9,6 mkm -da generasiya yaranır. Bu halda FİƏ üçün alırıq:

$$\eta_3 = (W^{**} - W^*) / W^* = 0,4.$$

4. Aşağı lazer səviyyələrinin boşalması ağır hissəciklərlə toqquşma zamanı baş verir. Ağır CO_2 molekulu yuxarı işçi səviyyəni dağıtdığı halda, yüngül helium atomları aşağı işçi səviyyəni daha effektiv dağıdır. Əsas hala qayıdan CO_2 molekullarının köməyi ilə həyəcanlaşıb və yuxarı işçi səviyyəyə qalxıb yenidən gücləndirmə prosesində iştirak edirlər. Bundan başqa heliumun qaz qarışığına əlavə edilməsi qazın temperaturunu azaldır, buna görə də yuxarı işçi səviyyəsinin relaksasiya sürətinin aşağı salır. Cəmi $\eta_\Sigma = \eta_1 \eta_2 \eta_3 = 0,36$. Təcrübədə xüsusi güc optimal olmadıqda $\eta_{ec} \approx 0,3$ olur. Xüsusi güc üçün optimal şərt ödəniləndə isə $\eta = 0,1 \div 0,15$, bu da $p-n$ keçiddə yarımkəçirici OKG -in FİƏ tərtibindədir.

Deməli, qaz qarışığına azotun əlavə olunması yuxarı lazer səviyyəsinin daha çox dolmasını, heliumun əlavə olunması isə aşağı səviyyənin boşalmasını təmin edir. Bundan başqa qeyd edək ki, haqqında danışdığımız tərkibində azot və helium qazları olan CO_2 lazeri fasiləsiz rejimdə də işləyə bilər.

§ 4.5. CO₂ lazerinin spektri

CO₂ lazerinin şüalanma generasiyası iki rəqsi-fırlanma zolaqlarında istifadə olunur:

$$00^01 \rightarrow 10^00 \ (\lambda = 10.6 \text{ mkm})$$

$$\text{və } 00^01 \rightarrow 02^00 \ (\lambda = 9.6 \text{ mkm}).$$

9,6 mkm zolağı üçün rezonatora tezlik-selektiv qurğu yerləşdirmək lazım gəlir. Generasiya bu iki rəqsi zolağın rəqsi-fırlanan (RF) keçidlərində baş verir, eyni zamanda daha çox P-18, P-20 və P-22 keçidlərə aiddir.

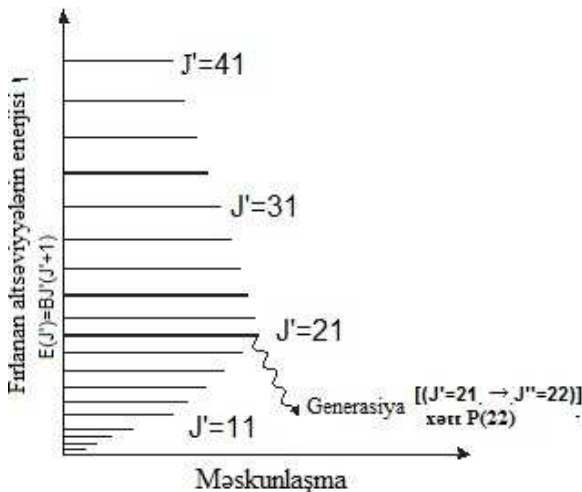
CO₂ lazerinin xətlərinin eni Dopler effektinə görə müəyyən olunur, lakin o, İQ diapazonu üçün tamamilə kiçik olduğundan, onda xəttin enlənməsində toqquşma da rol oynayır.

İşçi maddəsi $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ olan yuxarıda nəzərdən keçirdiyimiz lazerlərin iş prinsipi qaz boşalmasına əsaslanmışdır.

Təcrübədə göstərilmişdir ki, karbon qazına $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}=1:3:15$ faiz nisbətində azot və helium əlavə edəndə və qaz təzyiqi p_{CO_2} və borunun radiusu R_0 arasında belə şərt $p_{\text{CO}_2} = 3sm \cdot qPa / R_0$ olduqda lazerdə çıxış gücü optimaldır.

Bu zaman lazerdə işçi qaz qarışığının tərkibi 1 m/san sürətlə fasiləsiz dəyişilməlidir. Qaz tərkibi dəyişilməyə CO₂qazında kimyəvi parçalanma gedir: $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}$ (oksigen və dəm qazına parçalanma). Oksigen qazı elektrodları və borunun divarlarını oksidləşdirərək borunun iş müddətini

azaldır. Kimyəvi parçalanma $p_{xus.}$ -nin azalmasına gətirir. p_{CO_2} təzyiqin artması FİΘ -nı azaldır. Belə ki, CO_2 -nın çox hissəsi borunun divarlarına sərf olunacaq, onda temperaturun azalması baş verəcək və yuxarı işçi səviyyədə hissəciklərin yığılması pozulacaq. Bu da FİΘ -nın azalmasına gətirəcək. $i_{bos.}$ -optimal cərəyan sıxlığı $10 mA/sm^2$ bərabərdir.



Şəkil 4.5. Fırlanma enerji səviyyələri

İşçi səviyyələrin aşağıda yerləşməsi Bolsman paylanmasına gətirir. Temperaturun artması ilə yuxarı işçi səviyyənin parçalanmasının sürətlənməsi və aşağı səviyyənin əlavə doldurulması səbəblərindən inversiya azalır, sıfıra çatır. Bu çətinlikdən çıxmaq üçün həm təcrübədə, həm də nəzəriyyədə borunun üfürülməsinin əhəmiyyəti göstərilmişdir.

CO_2 lazerində xəttin eni dopler genişlənməsi ilə təyin olunur və $\sim 50 Mnc$ təşkil edir. Bu CO_2 molekulun ağırlığı ilə

əlaqədardır. Lakin yüngül heliumun əlavə olunması toqquşma nəticəsində bircinsli genişlənməyə gətirib çıxarır:

$$\Delta\nu = 120 M\text{Nc} + 36n_{\text{He}} \cdot 10^9 \text{ sm}^3 \cdot \text{hers}.$$

Genişlənmənin demək olar ki, bircinsli xarakterinə görə generasiya bir neçə dəfə P -budaq xətti üçün (~ 4) yalnız bir uzununa modada baş verir. Adətən daha güclü generasiya $P(20)$, $P(22)$, $P(24)$ fırlanma xətlərdə, $\lambda = 10,59; 10,61$ və $10,63$ mkm-lərdə əldə edilir.

CO_2 lazerlərində eyni zamanda generasiya həm $10,6$ mkm-də, həm də $9,6$ mkm -də baş verir. İkinci keçid adətən zəif güclənməyə görə rəqabət nəticəsində yatırılır. Bu keçidin zəif güclənməsi 02^00 aşağı işçi səviyyənin 10^00 səviyyəsi ilə müqayisədə daha çox yüklənməsi ilə əlaqədardır.

§ 4.6. CO_2 lazerinin quruluşu.

Müasir güclü qaz lazerlər

Quruluş nöqteyi-nəzərincə CO_2 lazerlər yeddi növə bölünürlər:

- 1) asta uzununa ötürmə tipli lazerlər;
- 2) sürətli uzununa ötürmə tipli lazerlər;
- 3) qaynaq olunmuş (lehimi açılmış) lazerlər;
- 4) dalğaötürücü lazerlər;
- 5) eninə ötürmə tipli lazerlər;
- 6) atmosfer təzyiqi zamanı eninə həyəcanlaşmaya malik lazerlər (TEA-lazerlər);
- 7) qazodinamik lazerlər.

Birinci tip lazerlərin sxemi –lazer borusu boyunca qarışıq astaca yellənir ki, bu da dissosiasiya proseslərini yox etmək

üçündür. Bu lazerin əsas məhdudiyyəti – boşluğun uzunluq vahidindən çıxış gücünün hədd qiymətidir, çünki güc ipd^2L hasilinə mütənasibdir, burada i , p , d , L – cərəyan, təzyiq, borunun diametri və uzunluğudur.

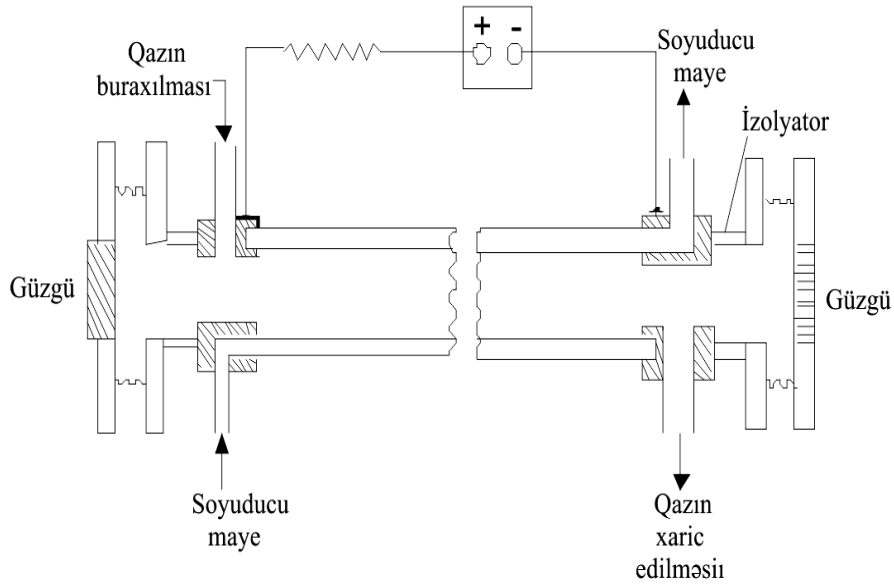
Optimal elektron temperaturu saxlamaq üçün pd hasili sabitdir, lakin istiliyin ayrılmasına məhdudiyyətlər qoyulduğundan cərəyan sıxlığının optimal qiyməti vardır, bu qiymət borunun diametrinə tərs mütənasibdir.

Lazerin ikinci tipi bu çatışmamazlıq yoxdur, belə ki, qazın yüksək sürətli (50 m/s) ötürməsi istiliyi aparır və qarışığın istilik mübadiləsində sonrakı soyuması çox yüksək güclərə çatmağa imkan verir.

Müasir qaz lazerləri – qaz dinamiki, elektrodinamiki və elektroionizasiyalı bərkcisimli lazerlərdən (2000 C-la qədər) daha güclü şüalanma generasiya edirlər. Onlar yüksək (50% qədər) FİΘ-na malikdirlər. Azot və karbon qazı qarışığında işləyən qaz lazeri daha çox inkişaf etmişdir. Onun şüalanması 10,6 mkm dalğasında baş verir, və o fasiləsiz rejimdə işləyir, 75%-ə qədər yüksək FİΘ-a malikdir. Belə ki, belə lazerin şüalanması atmosferin (havanın) "şəffaflıq pəncərəsi" üzərinə düşür, onda o rabitə, məğlubiyyət sistemlərinin modelləşdirilməsi üçün geniş istifadə olunur.

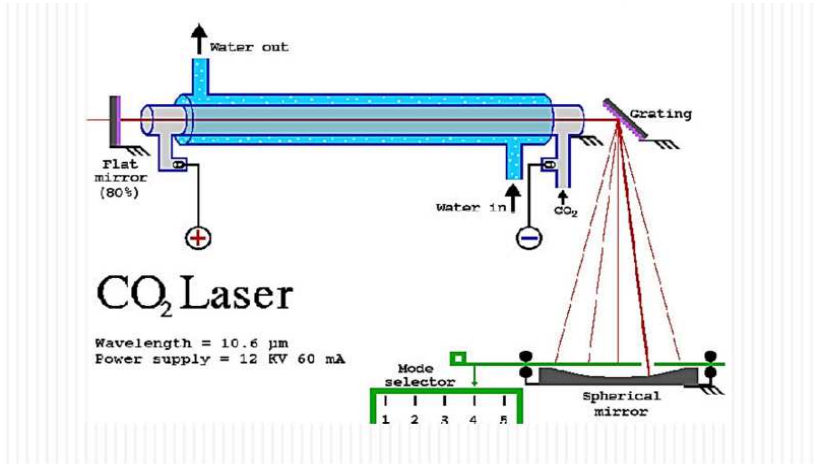
1970-ci illərin ortalarında SSRİ və ABŞ-da elektroionizasiyalı adlandırılmış yüksək təzyiqli (onlarla atmosfer) CO₂ lazerləri yaradılmışdır. Fəal mühitin təzyiqinin əhəmiyyətli yüksəlməsi doldurma sisteminin prinsipial çətinləşdirməsini tələb etdi. Belə lazerdə molekulların həyacanlanması iki etapda həyata keçirilir. Birinci mərhələdə fəal mühit elektronların xüsusi sürətləndiricisindən güclü elektron dəstəsi ilə şüalanır. Yüksək elektron dəstələr fəal

mühiti keçir və öz yolunda qaz molekulları ilə toqquşur, sonuncunu ionlaşdırır, yəni ikinci elektronları bütün həcm



Şəkil 4.6. CO₂ lazerin prinsipal quruluşu

boyunca yaradır. Belə ilkin ionlaşma sıx qaz mühitində boşalmanın sonrakı alovlanması üçün həmçinin bütün həcm üzrə bərabər şərait yaradır.



Şəkil 4.7. CO₂ lazer quruluşun modifikasiyas

Elektron dəstə və ya hər hansı istənilən digər ilkin ionlaşdırıcı təsir (məsələn, yüksək enerjilərin kvantlarının daxil olan şüası) olmadıqda, yəni yalnız yüksək gərginlikli boşalmanın köməyi ilə, molekulların həyəcanlanması və yüksək təzyiqli qazda inversiyanın yaradılması mümkün deyil. Elektroionlaşmış lazerlərin yaranması yüksək enerjili lazerlərinin alınmasının prinsipial olaraq yeni yolunu açdı.

Qarışıq katalizatorlardan keçirilir, $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$ reaksiyasından sonra CO₂ –nin konsentrasiyasının effektiv bərpa olunması üçün qarışığın qismən dəyişilməsi baş verir və tamamilə qaynaq olunmuş rejimdə lazerin fəaliyyəti mümkündür. Bu lazərdən metalın kəsilməsi üçün istifadə olunur və s.

3. Əgər birinci tip lazer qurğusunda ötürməni dayandır

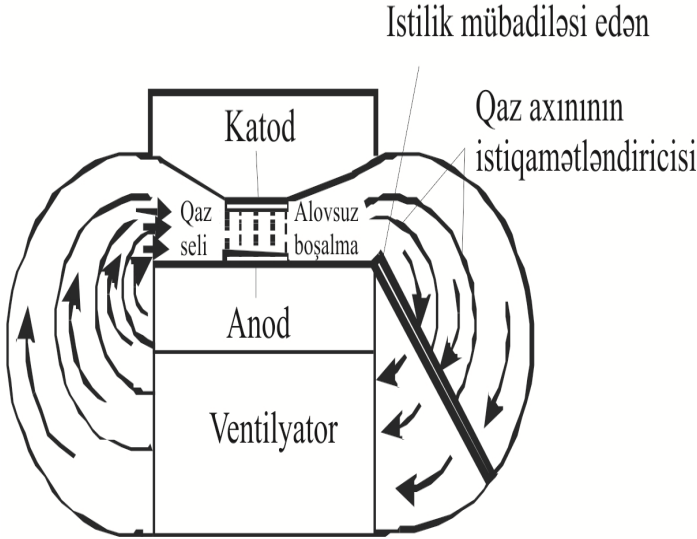
saq, onda reaksiya komponentləri CO_2 –nin dissosiasiyası nəticəsində qarışığın lazımlı tərkibini pozurlar. CO_2 –nin regenerasiyası üçün su buxarı və ya hidrogen əlavə edirlər və yaxud CO_2 –nin regenerasiyasının katalizatoru kimi qaynar nikel katoddan istifadə edirlər. Bu lazerlərin gücü uzununa ötürmə tipli lazerlərin tərtibindədir.

4. Əgər lazer borusunun diametrini 2-4 mm-ə qədər azaltsaq, onda boruda lazer şüalanması dalğaötürücüdə olduğu kimi yayılır, belə lazerlər aşağı difraksiya itkilərinə malikdirlər. Borunun çox da böyük olmayan diametrinə görə qarışıqda təzyiq yüksək ola bilər, bu isə vahid uzunluğuna düşən gücün artmasına səbəb olur və qısa lazerlər –50 sm uzunluğunda hazırlamaq mümkündür, bu halda rezonatorda itkilərin azalmasına çalışmaq lazım deyil. Belə lazerlər böyük güc olmadığı zaman, kompaktlıq tələb olmadıqda istifadə olunur.

5. Eninə ötürmə tipli lazerlər aşağıdakı sxemə malikdirlər (şək. 4.8). Lakin bu sxemin realizasiyası üçün yüksək gərginlik tələb olunur və bunu elə edirlər ki, qaz boşalması rezonatorun oxu istiqamətində axsın. Belə TE-lazerlər (transverse electric field) daha sadə quruluşa malikdirlər, çünki eninə doldurma zamanı sürət kiçik ola bilər.

6. Əgər qaz boşalmasında təzyiqi artırıbsaq, onda dayanıqsızlıqlar əmələ gələr, bu isə boşalmada qövslərin yaranmasına səbəb olur, bu prosesdən qaçmaq üçün impuls gərginlik yaradırlar. İmpulsun müddəti azdır, yükdəki dayanıqsızlıqlar inkişaf etməyə macal tapmırlar və qazdakı işçi təzyiqi artırmaq olar. Bu prinsiplə TEA -lazerlər (transversaly excited at atmospheric pressure) işləyirlər. Nəticədə yükün həcmi vahidində böyük enerji udumu alınır (10-50 C/l).

7. Qaz dinamiki lazerə xüsusi diqqət yetirmək lazımdır, çünki ondakı inversiya qabaqcadan qızdırılmış qaz qarışığının genişlənməsi hesabına yaranır.



Şəkil 4.8. Eninə ötürmə tipli CO₂ – lazer qurğusunun sxemi.

Qarışıq borudan axır, genişlənmə adiabatik gedir, irəliləmə hərəkətin temperaturu çox aşağı olur. Yuxarı səviyyənin yaşama vaxtı aşağı səviyyəyə nisbətən çox olduğundan, aşağı səviyyənin relaksasiyası tez baş verir və seldən aşağıda inversiyaya malik olan kifayət qədər geniş sahə olacaq. Genişlənmə işıq sürətindən böyük sürətlə baş verməlidir.

Güzgülərin qızdırılması ilə bağlı böyük çətinliklər var və bu tip lazerlərin sənayedə tətbiqləri hələ də tapılmamışdır.

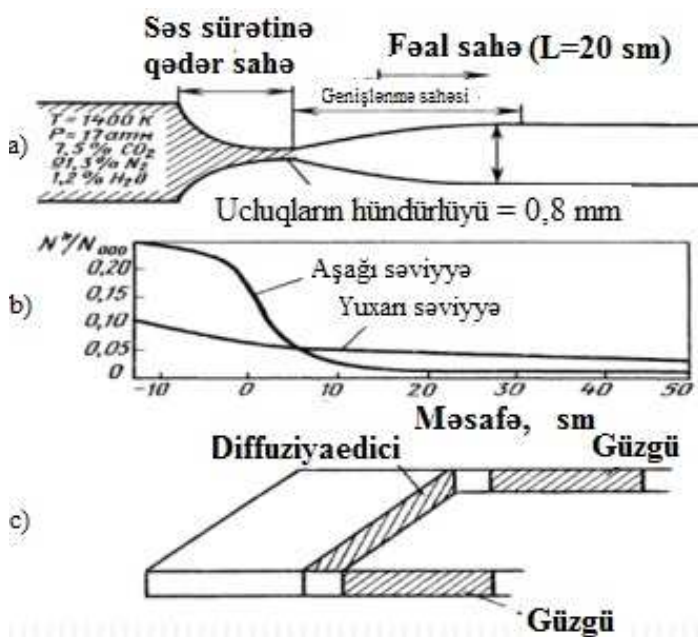
Molekulun rəqsi və fırlanma hallarının kifayət qədər effektiv məskunlaşması üçün istilik həyacanlanması istifadə

oluna bilər. Bunun üçün qaz molekullarının 1000-2000 K temperatürə qədər qızdırmaq və bu qazı hər hansı T_1 temperatürə qədər sürətlə soyutmaq lazımdır. Bu halda termodinamik qeyri-tarazlıq halı yaranır: W_1 səviyyəsinin məskunlaşması T_1 aşağı temperatürə uyğun gələcək, $W_2, W_3, \dots$ yuxarı səviyyələrin məskunlaşması isə yüksək T_2 temperatürə uyğun olacaq, bu da öz növbəsində birinci və ikinci həyacanlanmış rəqsi səviyyələr arasındakı keçiddə inversiyaya səbəb olacaq. Əgər τ – temperaturun dəyişilmə müddətindərsə, onda səviyyələrin relaksasiya müddəti uyğun olaraq $\tau E_1 \ll \tau \ll \tau E_2$ olar.

Doldurmanın qeyri-elektrik üsulundan istifadə edən xüsusi tip lazerlər. Parametrləri: $T = 1400\text{K}$, $p = 17 \text{ atm.}$, $7.5\% \text{ CO}_2$, $91.3\% \text{ N}_2$, $1.2\% \text{ H}_2\text{O}$.

Qaz dinamik CO₂ lazerlər. Bu, doldurulmanın qeyri-elektrik metodunu istifadə edən lazer növüdür. Onda məskunlaşmanın inversiyası yüksək temperatürə qədər qabaqcadan qızdırılmış $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ -un qaz qarışığının adiabatik olaraq sürətli genişlənməsi hesabına yaranır. Belə lazerlər ən yüksək şüalanma gücünü generasiya edirlər.

Qaz dinamik lazerin iş prinsipi şəkil 4.9-da izah edilmişdir. Yüksək temperaturda (təxminən 1400 K) və yüksək təzyiqdə (10 atm-dən çox) rezervuarda olan qaz qarışığı kritik bölmənin (1- mm-dən az) kiçik hündürlüklü xüsusi ifrat səli ucluqlar vasitəsilə buraxılır. Yüksək temperaturlu kamerada qaz termodinamik tarazlıqdadır. Yüksək temperatürə görə CO_2 molekullarının təxminən 10% -i yuxarı lazer 00^01 səviyyəsində yerləşirlər. Əlbəttə, aşağı işçi səviyyələrin məskunlaşması yuxarı səviyyələrdən böyükdür və CO_2 molekullarının ümumi sayının təxminən 25%-ni təşkil edir.



Şəkil 4.9. Qaz dinamiki lazerin quruluşunun prinsipal sxemi

İfrat səslə (Maxa qiyməti $M=4$) ucluqlardan keçərək, qaz adiabatik tez genişlənir və onun effektiv temperaturu kəskin enir. Səviyyələrin məskunlaşmaları yeni tarazlıq qiymətlərinə cəhd edəcəklər. Belə ki, 00^01 yuxarı lazer səviyyəsinin yaşama müddəti 10^00 aşağı səviyyənin yaşama müddətindən böyükdür, onda aşağı səviyyə yuxarı səviyyədən əvvəl tarazlıq vəziyyətinə çatır və şəkil 4.9b –də göstəriləndiyi kimi genişlənmə zonasından sel istiqamətində məskunlaşmanın inversiyası ilə kifayət qədər geniş sahə mövcud olacaq.

Fəal sahəsinin uzunluğu L azot molekullarından CO_2 molekullarına həyacanlanmanın ötürülmə müddəti ilə müəyyən edilir. Rezonatorun güzgüləri qaz axını boyunca yerləşir, belə ki, rezonatorun oxu qazın hərəkətinə perpendikulyar yönəldilmişdir (şək. 4.9 c).

Mövcud olan qaz dinamik CO_2 -lazerlər fasiləsiz rejimdə şüalanmanın rekord gücünü ~ 100 kVt verirlər, lakin onların $\text{FİƏ} \sim 1\%$ -dir. Məlum olduğu kimi bu lazerlərdə inversiya CO_2 molekulunun $(001) \rightarrow (100)$ və $(001) \rightarrow (020)$ keçidlərində yaranır. (001) yuxarı işçi səviyyənin məskunlaşmasında azot molekulundan həyacanlanma enerjisinin rezonans ötürülmə proseslər mühüm rol oynayır. Qarışıqda maye buxarı (010) səviyyəsinin relaksasiyasının sürətlənməsinə təsir edir. Burada yuxarı və aşağı səviyyələrin müxtəlif müddətləri relaksasiyaları prinsipial vacibdir.

§ 4.7. Digər molekulyar lazerlər

Rəqsi-fırlanan keçidlərdə qaz lazerinə misal olaraq CO lazerini göstərmək olar. O, uzunluğu 5 mkm olan dalğada şüalanır, yüksək, 60%-ə qədər FİƏ -yə və yüksək çıxış gücünə

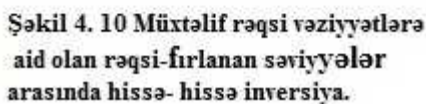
(~100 kVt) malikdir. Lakin belə parametrlərə çatmaq üçün qaz qarışığını $T=77-100\text{ K}$ -ya kimi soyudurlar. Lazerin generasiyasına $V=7 \rightarrow V=6$ -dan başlayaraq $V=11 \rightarrow V=10$ -a qədər $\Delta V=1$ -ə malik bir neçə rəqsi – fırlanmazolaqları əlavə olunur. CO molekulunun səviyyələrinin doldurulması elektron zərbələrlə həyata keçirilir, çünki CO bu prosesdə rəqsi səviyyənin həyəcanlanmasının böyük kəsiyinə malikdir. Boşalmada elektronların enerjisinin, demək olar ki, 90%-i CO-nun rəqsi enerjisinə çevrilə bilər. CO-nun başqa xüsusiyyəti odur ki, rəqsi relaksasiyanın sürəti böyükdür, bunun nəticəsi isə yuxarıdakı səviyyələrin yerləşməsinin Bolsman paylanmasına tabe olmamalarıdır və bu halda anharmonik doldurma adlanan proses çox böyük rol oynayır. Anharmonik doldurma aşağıdakı tip toqquşma prosesləri vasitəsilə baş verir:

$$CO(V = n) + CO(V = m) \rightarrow$$

$$CO(V = n+1) + CO(V = m-1), \quad n > m.$$

Anharmonizmin nəticəsində rəqsi səviyyələr arasındakı məsafə rəqsi səviyyələr üzrə yuxarıya doğru istiqamətdə azalır. Bu, o deməkdir ki, $n > m$ olduqda yuxarıda göstərilmiş tipli toqquşma zamanı CO-nun iki molekulunun cəmləmə rəqsi enerjisi toqquşmadan sonra azdır, nəinki toqquşmaya qədər. Buna görə də göstərilmiş istiqamətdə toqquşma prosesi əksinə istiqamətə nisbətən böyük ehtimalla baş verir. Buradan alınır ki, daha da qaynar CO ($V=n$) molekulaları rəqsi səviyyələr üzrə yuxarıya qalxa bilərlər, bu isə rəqsi səviyyələr arasında yerləşmələrin Bolsman olmayan paylanmasına səbəb olur. Baxmayaraq ki, baxılan hadisə səviyyələrin məskunlaşmasının tam inversiyasını almağa imkanvermir, lakin hissə-

Hissə-hissə inversiya zamanı kaskad generasiyası adlanan hadisə yarana bilər. Doğrudan da, generasiya yuxarı səviyyənin məskunlaşmasının azalmasına və aşağı səviyyənin məskunlaşmasının artmasına səbəb olur, nəticədə aşağı səviyyənin məskunlaşmasının artması mümkündür, deməli, nisbətən sonrakı aşağı səviyyənin inversiyası yaranacaqdır, generasiya baş verəcəkdir, yəni azalacaqdır və yenidən fərq yaranacaqdır.



122

CO₂ lazerində olduğu kimi, CO lazeri də qaz qarışığının uzununa ötürmə tipi ilə, impulsu eninə elektrik boşalmada elektron dəstəsi vasitəsilə ionizasiya ilə, həmçinin qazodinamiki həyəcanlaşma zamanı işləyir.

Sənaye istehsalı belə lazerlərin işini aşağı temperaturlarda vacib hesab edir, lakin hal – hazırda bu lazerin iş prinsipini normal temperaturlarda reallaşdırmağa imkan verən yeni üsullar tapılır və bu lazerlər rəqabətə davamlı olurlar.

FƏSİL V

METAL BUXARI ƏSASINDA LAZERLƏR

§ 5.1. Metal buxarı əsasında geniş istifadə olunan lazerlər

Metal buxarı əsasında lazerlərdən ən çox yayılmış Cd və Se –dir. Cd lazerinə olan maraq onunla əlaqədardır ki, bu lazer etibarlı, həyacanlaşmanın aşağı həddinə malik olan göy və UB spektrdə ($\lambda = 441.6$ mkm və 325 nm uyğun olan) fasiləsiz koherent işıq mənbəyidir. Qeyd edək ki, burada ən qısa dalğalı fasiləsiz rejimdə işləyən lazer yaradılıb. Belə lazerdə çıxış gücü 10mVt olanda qida mənbəyi 100Vt –a bərabər olmalıdır. Bundan başqa burada su soyuducusundan istifadə olunmur. Bu da təcrübəni asanlaşdırır. He–Cd lazer şüalanması yüksək dərəcədə monoxromatikliyi ilə səciyyələnir. Aşağı həyacanlaşma həddinin olması ona gətirib çıxarır ki, güclü qızdırılmış mühit olmur və generasiya xəttinin dopler eni 1~1.5 QHs intervalında yerləşir. Ona görə də generasiya spektrində Cd xətlərinin izotopik parçalanması yaxşı görünür. ¹¹⁴Cd izotopundan istifadə olunması yalnız bir ensiz generasiya xəttini verir. Nəticədə He–Cd lazerində asanlıqla bir tezlikli və bir modalı rejim alınır.

Metalların buxarında bir çox lazer keçidləri kəşf olunmuşdur. Lakin tədqiqatçılar hər dəfə ümumi bir çətinliklə qarşılaşırlar. O da elektrik boşalmasında metal buxarının bir-

cinsli saxlanmasıdır. Cd lazeri halında bu problem qazboşalma borusunda müsbət Cd^+ ionların kataforezindən istifadə etməklə həll olunur. Kataforez dedikdə qaz borusunda sabit cərəyanın təsiri ilə ionların istiqamətlənmiş hərəkəti düşünülür. Bu zaman metal buxarının müsbət ionları (Cd^+) anoddan katoda tərəf hərəkət edir. Anod yaxınlığında boruda metal rezervuarı yerləşir. Boruda bizə lazım olan metal buxarının təzyiqini yaratmaq üçün bu rezervuar yüksək temperatura (250°C -yə) qədər qızdırılır. Buxar boşalma sahəsinə çatdıqda atomların yarı hissəsi ionlaşır və katoda tərəf hərəkət edir. Boşalmada güclü istilənmə baş verir ki, bu da borunun divarlarında buxarın kondensasiyasının qarşısını alır. Buxarın kondensasiyası o vaxt baş verir ki, temperatur lap aşağı olsun. Bu da katoda yaxın sahədə boşalma olmayan yerdə olur. Beləliklə, borunun uzun müddət işləməsini təmin etmək məqsədilə kafi dərəcədə Cd ehtiyatı lazımdır (1q Cd min saat lazer işini təmin etmək üçün).

He-Cd lazerdə He köməkçi, Cd buxarı isə işçi qazdır. Əsas fərq və əsas çətinliklər boşalmış borunun aktiv həcmində kadmium buxarının bircins paylanması saxlamaq vacibliyi ilə əlaqəlidir.

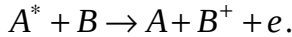
Bu məsələ aşağıdakı şəkildə həll olunur. Çox da böyük olmayan aralıqda (rezervuarda) olan anodun yaxınlığında yerləşən qazboşalma boruda metal Cd yerləşdirirlər. Bu rezervuar $230^{\circ}\dots 250^{\circ}\text{S}$ temperatura qədər qızdırılır, nəticədə metal buxarlarının lazımlı təzyiqi təmin olunur. Buxarlar sıranın oblastına çatdıqda, kataforezin hesabına Cd ionları anoddan katoda doğru boşalmış aralıq boyu qovulurlar. Boşalma enerjisinin sayəsində kapillyar borunun temperaturu yüksəlir, bu isə metal buxarlarının səthi üzərində

kondensasiyaya mane olur. Katodun yaxınlığında ikinci rezervuar yaradılır, onun soyuq divarları üzərində metal Cd-nin çökməsi baş verir. Müasir konstruksiyalar rezervuardan kadmiumun tam buxarlanmasından sonra katod və anodun yerlərini dəyişməyə və işi davam etdirməyə imkan verirlər. Beləliklə, borunun uzun müddət işləməsini təmin etmək məqsədilə kafi dərəcədə Cd ehtiyatı lazımdır (1q Cd min saat lazer işini təmin etmək üçün).

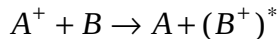
He-Cd lazerinin 325 nm dalğa uzunluğunda çıxış gücü fasiləsiz rejimdə 50...200 mVt-yə çatır, bu zaman boşalmış borunun uzunluğu 1...1,5 m, onun diametri 2-2,5 mm və rezonatorun çıxış güzgüsünün optimal şəffaflığı 5...7%-dir. Heliumun optimal təzyiqi bir neçə yüz paskal təşkil edir. Əvvəlcə He-da aloysuz boşalma yandırılır, sonra isə Cd-li rezervuarın qızdırıcısı 230...250 °C-yə qədər qoşulur.

§ 5.2. He-Cd lazerdə Penningq ionlaşması

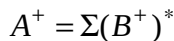
Metal buxarı lazerində doldurmanı iki üsulla yerinə yetirmək olar. Bu üsullardan *Ar* lazerində istifadə etmək olmaz, çünki orada lazer səviyyələri ionlaşmış He atomun enerji səviyyələrindən yüksəkdədirlər (~35eV). Birinci üsul –Penningq ionlaşması, ikinci –yenidən elektrik yüklənmə ionlaşmasıdır. Bu proseslər bir pilləli olduğuna görə dolma sürəti ion lazerindəki kimi cərəyanın kvadratına yox, cərəyanın birinci dərəcəsi ilə mütənasibdir. Ona görə də Cd lazerində kiçik cərəyan sıxlığı və vahid uzunluğa düşən kiçik elektrik gücü tələb olunur. Gəlin indi birinci üsulu nəzərdən keçirək. Penningq ionlaşması prosesini düstur şəklində yazaq:



B^+ - burada son haldakı iondur. O, həm həyəcanlaşmış, həm də həyəcanlaşmamış ola bilər. Proses o vaxt gedir ki, A^* enerjisi B -nin ionlaşmasına sərf olunan enerjiden çox olsun. Qalan enerji elektronların kinetik enerjisinə keçir. Əgər A^* metastabildirsə, onda ionlaşma effektivdir. Rezonans prosesindən fərqli olaraq Penning ionlaşması rezonans xarakter daşımır. Buna görə də zəruridir ki, A^* enerjisi “ionlaşma enerjisi üstəgəl B -nin həyəcanlaşma enerjisi” -dən böyük olsun. Yuxarıda qeyd etdiyimiz kimi, həyəcanlaşma enerjisinin artığı buraxılan elektronların kinetik enerjisinə keçir. İkinci üsulu yazaq:



A -nın ionlaşma enerjisi B -nin ionlaşmasına və həyəcanlaşmasına sərf olunur. Burada elektron buraxılışı olmadığından proses rezonans xarakteri daşıyır. Nəticədə A -nın enerjisi bütövlükdə sərf olunur və ox işarəsi əvəzinə bərabərlik yazılır.

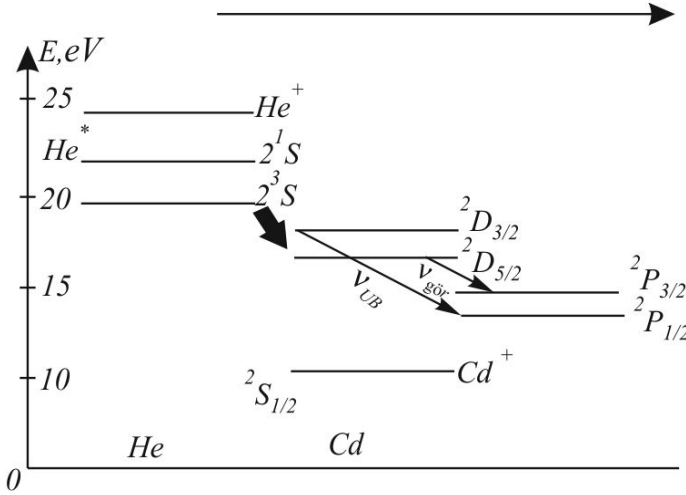


Bu proses o vaxt effektivdir ki, A^+ ionu metastabil vəziyyətdə olsun.

§ 5.3. He-Cd lazerində enerji səviyyələrinin sxemi

Gəlin enerji səviyyələrinin sxeminə baxaq (şək. 5.1). Şəkildə göstərilən diaqramlar He və Cd hallarına uyğundur. Dolma prosesi Penning ionlaşmasına əsaslanır. Məlum olduğu kimi He atomlarının yaşama müddəti çox olan metastabil

səviyyələri 2^1S , 2^3S vardır. Onlar Cd-nın səviyyələrindən yuxarıda yerləşirlər. Şəkildə Cd atomunun və ionunun əks halları və Cd^+ həyəcanlaşmış iki qrup səviyyələri göstərilib.



Şəkil 5.1. He və Cd –um enerji səviyyələri

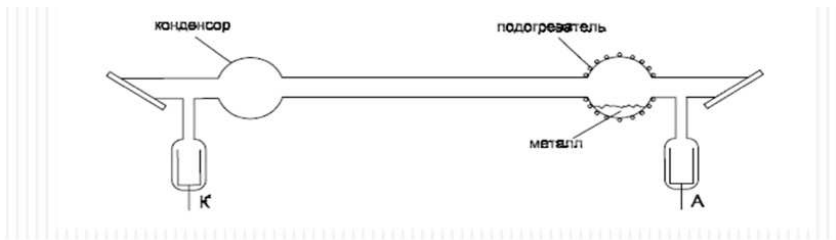
He atomları elektrik boşalmasının köməyi ilə həyəcanlaşaraq Cd^+ ionun, yaxud $^2D_{3/2} - ^2D_{5/2}$ qrup səviyyələri və ya $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ səviyyələrini həyəcanlaşdırır. Həyəcanlaşma prosesi rezonans xarakterli olmasına baxmayaraq *p* halı üçün həyəcanlaşmanın kəsiyi üç dəfə *D* halı üçün olan kəsikdən kiçikdir. Lakin bundan da vacib odur ki, *D* halında yaşama müddəti τ_D 10^{-7} san-dir və bu da *p* halının yaşama müddətindən çox böyükdür. ($\tau_P \sim 10^{-9}$ san). Buna görə də *D* ilə *p* arasındakı inversiyanı asanlıqla almaq olar. Lazer generasiyası aşağıda göstərilən səviyyələr arasında alınmışdır:

$$^2D_{3/2} \rightarrow ^2p_{1/2} \quad \lambda = 325 \text{ nm} \quad \text{və} \quad ^1D_{5/2} \rightarrow ^2p_{3/2} \quad \lambda = 441.6 \text{ nm}.$$

Bu halda relaksasiya hesabına müsbət Cd^+ ionları Cd ionunun əsas halına $^2S_{1/2}$ termə keçir.

§ 5.4. He-Cd lazerinin quruluşu

Boşalmış cərəyan 100 mA və boruda gərginlik (4...5) kV olduqda, Cd buxarlarının təzyiqi 0,5 Pa-ya yaxın, kadmium ionlarının seli isə 10 mq ç-yə yaxın olur. Kadmiumun işçi ionlarının yaranma və həyəcanlanma prosesi reaksiya üzrə baş verərsə, birpilləli olarsa, onda Aq lazerindən fərqli olaraq, He-Cd lazer doldurmanın sürəti boşalmanın cərəyan sıxlığına mütənasibdir. Bu, Ar-lazerinə nisbətən, doldurmanın astana cərəyanının əhəmiyyətli dərəcədə az sıxlığına səbəb olur. He-Cd lazerinin ən böyük çatışmayan cəhəti aşağı FİƏ-nin olmasıdır, o, 0,1...0,01% təşkil edir.



Şəkil 5.2. He-Cd lazerinin quruluşu

Bunun səbəbi (He-Ne) və Ar lazerlərində olduğu kimidir. He-Cd lazeri UB-də və spektrin göy oblastlarında kəsilməz monoxromatik şüalanmanın mənbəyi kimi maraq kəsb edir. Spektrin göy oblastları optik spektroskopiya, lazer fotokimya, biologiya, fotolitoqrafiya, işığın molekulyar səpilməsi (kombinasiyalı, releli, Mandelştam - Brillyuen səpilməsi)

proseslərindən istifadə etməklə dağılmayan nəzarət və s. üçündür.

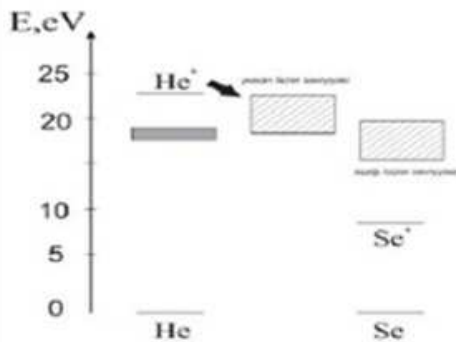
Ar lazerdən fərqli olaraq He-Cd lazerdə birmodalı iş rejimi daha sadə formada həyata keçirilə bilər. Bu onunla əlaqədardır ki, He-Cd lazerdə fəal mühit zəif qızdırılır və işçi keçidlərdə xəttin dopler eni 1..L,5QHs təşkil edir.

Generasiya spektrində kadmium xətlərinin izotopik parçalanması yaxşı görünür.

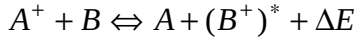
§ 5.5. He-Se lazer, enerji səviyyələri və yenidən elektrik yüklə

He-Cd lazerdən başqa digər metalların - Sn, Pb, Zn, Se – buxarlarında da ion lazerləri vardır. Onların arasında He-Se lazeri maraq kəsb edir, bu lazer ən azı 19-20 dalğa uzunluğunda intensiv (200 mVt-yə qədər) fasiləsiz generasiya verir, dalğalar isə, demək olar ki, bütün görünən diapazonu örtürlər. Həyəcanlanmanı He-dən Se-yə ötürmək üçün He-də Penning ionizasiyası deyil, yenidən yüklənmiş ionizasiyanın rezonans prosesi istifadə olunur.

He-dən Se-ə həyəcanlanmanın ötürülməsi üçün Penning ionizasiyasından deyil, **yenidən elektrik yüklənmə** ionizasiyasının rezonans prosesindən istifadə olunur.



Şəkil 5.3. . He və Se –nin enerji səviyyələri



A -atomunun ionlaşma enerjisi B -atomunun ionlaşma enerjisinə və həyacanlaşmasına sərf olunur.

Qarşılıqlı təsir **rezonans xarakter** daşıyır. A -atomunun ionizasiya enerjisi B -atomunun ionizasiyaa və həyacanlaşma enerjilərinin ($\Delta E \leq kT$ dəqiqliyilə) cəminə bərabərdir.

Bu şəkildə He və Se-nin enerji səviyyələri göstərilir: Se atomunun və Se^+ müsbət ionunun əsas halları göstərilib. İki həyacanlaşmış Se ionu qrup halları arasında generasiya oluna bilər.

Gəlin bunun necə olmasını nəzərdən keçirək: He-Se lazerində yuxarı işçi səviyyələrin (Se^+) enerisi təxminən 250-ə bərabərdir. Se ionunun həyacanlaşma enerjisi ($Se^+)^*$ ionizasiya və onun həyacanlaşma enerjilərinin cəminə bərabərdir. Bu da He atomunun heyacanlaşmış metastabil səviyyələrinin enerjisindən çoxdur. Ona görə də burada ikinci dolma prosesi istifadə olunur. Bu proses effektivdir, çünki He ionunun yaşama müddəti τ_{He} böyükdür, yalnız elektronların rekombinasiyası ilə məhdudlaşır. FİƏ

$$\eta = \frac{h\nu}{E_{yux.laz.sev.}} \approx 10^{-3} \div 10^{-4}.$$

$$\text{Təcrübədə } \eta = \frac{P_{cix.laz.}}{JU} = \frac{10mVt}{4.5kV \cdot 0.1A} \approx 10^{-3} \div 10^{-4}.$$

FƏSİL VI

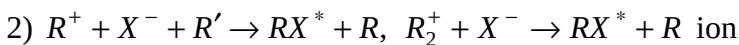
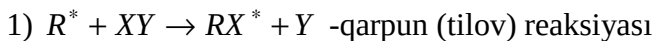
EKSİMER LAZERLƏR

§ 6.1. Eksimer molekullar

Eksimer lazerlər müəyyən molekulların dayanıqlı həyəcanlama və kimyəvi cəhətdən qeyri-sabit əsas halları arasında elektron-rəqsi keçidlərinə əsaslanan molekulyar lazerlərin xüsusi sinifini təqdim edir. Öyrilərin bu forması molekulun yalnız həyəcanlanmış halda olmasını nəzərdə tutur, əsas halda isə kimyəvi cəhətdən qeyri-sabitdir: istənilən A üçün atomlar bir-birlərini itələyir. Yalnız həyəcanlanmış halda olan belə molekula eksimer adlanır. Xe, KrJ, ArF, XeF, XeCl, KrFs ArF və s. Təsirsiz qazların bəzi birləşmələri eksimerlərin xüsusiyyətlərinə malikdirlər: Xe, KrJ, Arf, XeF, XeCl, KrFs ArF və s. Əgər iş həcmində eksimer molekullarının böyük konsentrasiyası yaranarsa, onda generasiya E yuxarı və aşağı qeyri-sabit E_0 arasında keçidlərdə əldə edilə bilər. Bu, müəyyən bir genişzolaqlı keçiddə lazerin şüalanma spektrini yenidən qurmağa imkan verir. Bu günə qədər eksimer lazer qurğusuna görə mürəkkəb quruluşa malikdir.

Hal-hazırda 126 nm-dən (Ar_2^* molekulu) 1100 nm-ə (LiHe^* molekulu) qədər olan diapazonda təxminən iyirmi eksimer molekulunun keçidlərində generasiya alınmışdır. Eksimer lazerlərdən ən məhsuru KrCl ($\lambda = 223$ nm), KrF ($\lambda = 248$ nm), XeCl ($\lambda = 308$ nm), XeF ($\lambda = 351$ və 483 nm)

təsirsiz qazların halogenlərinin molekullarındakı lazerlərdir. Eksimer lazerlərin fəal mühiti RX^* təsirsiz qazların halogenlərində ($R' - \text{He, Ne}$ və ya Ar bufer təsirsiz qazdır, $XY -$ halogen tərkibli maddədir) tam $1-10$ atm təzyiqdə və $(10^3 - 10^2) : (10^2 - 10) : 1$ komponentlərin nisbətində $R' - R - XY$ üç qat qarışıqlardır. RX^* eksimer molekullarının yaranması aşağıdakı reaksiyalar hesabına olur:



-ion rekombinasiyası.

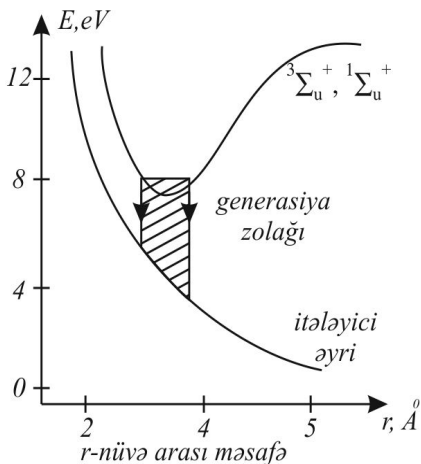
Eksimer lazerlərin həyacanlanması doldurmanın yüksək xüsusi gücünü tələb edir. Buna görə də bu məqsədlər üçün əsasən impuls nanosaniyəli elektron dəstəsi və ya qaz boşalması istifadə olunur. Eksimer KrF- və XeF- lazerlər üçün spektrin UB sahəsində kifayət qədər yüksək enerji parametrləri alınıb: elektron dəstəsi ilə doldurmada lazer şüalanmasının enerjisi 10% -ə qədər FİƏ-da $5-10 \text{ kCoul}$ və lazer impulsunun müddəti $\leq 1 \text{ mks}$ olur.

§ 6.2. Eksimer lazerlərinin enerji səviyyələri

Eksimer lazerlərinin iş prinsipini *ksenon lazerinin timsalında aydınlaşdıraraq*. Xe lazerində generasiya $\lambda = 172,5 \text{ nm}$ -də baş verir. Həyacanlaşma proseslərinin təhlili üçün Xe lazerinin enerji səviyyələrinə baxaq. Qeyd edək ki, burada işçi maddə təsirsiz Xe qazıdır. Şəkildə (Şək. 6.1) göstərilən ayrılar Xe_2 lazerinin yuxarı və aşağı işçi səviyyələrinə aiddir. Yuxarı işçi səviyyəsinin parçalanma müddəti 3 nsan ($^1\Sigma_U^+$ term) və 40

nsan ($^3\Sigma_U^+$ term üçün) olur. ($^3\Sigma_U^+$ term $^1\Sigma_U^+$ termə yaxın yerləşir).

Şəkildə göstərilən iki potensial enerji ayriləri molekulun iki halını təmsil edir. İki ox işarəsi generasiya zolağını məhdudlaşdırır. İki atomlu Xe_2 molekulunun əsas halı dayanıqsızdır. Həyacanlaşmamış qaz əsasən atomlardan ibarət olur. Yuxarı lazer halının dolması, daha doğrusu həyacanlaşmış dayanıqlı Xe_2^* molekulunun yaranması, sürətli elektron dəstəsinin ardıcıl toqquşmaları prosesində baş verir. Həyacanlaşmış halın potensial enerji ayrısı minimuma malik olduğundan molekula həyacanlaşmış halda mövcud olur.

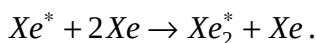


Toqquşma prosesləri

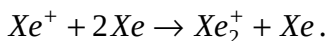
Şəkil 6.1. Xe enerji səviyyələri.

İçərisində ksenon atomunun

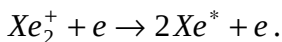
elektronlarla həyacanlaşması və ionlaşması vacibdir. Həyacanlaşmış molekular həyacanlaşmış Xe atomunun həyacanlaşmamış atomla üç hissəcikli toqquşması nəticəsində yaranır:



Ümumi balansda molekulyar ionlara Xe atomar ionların konversiyası əsas rol oynayır:

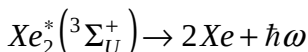
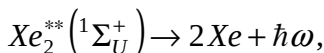


Bundan sonra dissosiativ rekombinasiya baş verir, bu da belə şəkildə yazılır:



Bu rekombinasiya həyəcənlanmış Xe atomlarının sonrakı həyəcənlanmış molekularda birləşməsi üçün zəmin yaradır.

Eksimer molekulun yaranmasında üç hissəcikli toqquşma təzyiqin yüksək olmasına gətirib çıxarır. Xe lazeri $\rho > 10$ atm. təzyiqində işləyir. Həyəcənlanmış molekul aşağıdakı radiasiya proseslərində həyəcənlaşma enerjisini itirir:



parçalanma müddəti uyğun olaraq 5 və 40 ns-ə-dir. Yəni salıq ki, ${}^1\Sigma_U^+$ termi ${}^3\Sigma_U^+$ terminə yaxın yerləşir. Generasiya keçidləri nəticəsində molekul əsas səviyyəyə düşən kimi parçalanaraq dissosiasiya edir. Bu avtomatik olaraq aşağı lazer səviyyəsinin boşalmasına gətirir.

Eksimer və eksipleks lazerlərə misal: F_2 (153 nm), ArF (193 nm), KrF (248 nm), $XeCl$ (308 nm), XeF (351 nm) göstərmək olar. $XeCl$ -də lazer impulsları Xe və Cl_2 qarışığında qaz boşalması zamanı almaq olar. Qısdaldığı şüalanma adətən materiallara dərin yayılır, bu da həmin şüalanmanı istilik ayrılmayan nazik kəsmə üçün istifadə etməyə imkan yaradır. Onların bu keyfiyyəti və lazer impulslarının böyük gücü mikrolitoqrafiyada, mikromexanikada, fotokimyada, və cərrahiyyədə (xüsusilə göz cərrahiyyəsində) geniş tətbiqinə səbəb olur.

§ 6.2. Kimyəvi lazerlər

Aktiv mühitin komponentləri arasında kimyəvi reaksiya prosesində bilavasitə məskunlaşmanın inversiyası yaradılan lazer kimyəvi lazer adlanır. Qeyd edək ki, kimyəvi lyuminessensiya – iki və ya daha çox birləşmə arasında kimyəvi reaksiya zamanı sərbəst ayrılan enerjinin, reaksiya məhsullarını həyəcandırılmış bir vəziyyətə gətirə biləcəyi bir kimyəvi reaksiyaya görə işıq şüalanmasıdır. Qaz qarışığını özündə saxlayan kimyavi lazerlər o mənada öz-özünə doldurmadır ki, doldurulmanın enerjisikimyəvi lyuminessensiyanəticəsində fəal mühitin kimyəvi reaksiyasından çıxarılır. Kimyəvi lazerin şüalanması kimyəvi enerjinin elektromaqnit sahəsinin enerjisinə çevrilməsi nəticəsində yaranır. Belə bir lazerdə şüalanma ilə müşahidə olunan proseslər, bir fotonun atom və ya molekul tərəfindən udulmasının birbaşa (dolayı olmayan) nəticəsi kimi baş verən reaksiyada fotokimyəvi reaksiyalara gətirib çıxaranəks proseslərdir.

O vaxt ki, endotermik reaksiyaların gedişi üçün fotokimyəvi stimullaşdırmasının aparılması vacibdir, kimyəvi lazerlər yalnız ekzotermik reaksiyalar (enerji ayrılması ilə kimyəvi reaksiyalar) əsasında işləyə bilər. Qaz qarışıqlarında ekzotermik reaksiyaların nəticəsində ayrılan enerjinin çox hissəsi molekulların rəqsi enerjisinə keçir. Buna görə, əksər hallarda, kimyəvi lazerlər 3-10 mikron spektral diapazonda rəqsi-fırlanma keçidlərdə işləyirlər. Onların üstünlükləri

- kimyəvi enerjinin yüksək FİƏ ilə (10%-dən çox) koherent lazer şüalanmasının enerjisinə bilavasitə çevrilməsi imkanı,

- aktiv maddənin vahid həcmindən çıxardılan enerjinin yüksək qiymətlərində (10 Coul l-a qədər) fasiləsiz rejimdə şüalanmanın yüksək gücünün (10 kVt -dan çox) alınmasının imkanı və
- bəzi hallarda böyük nataraz avadanlıqların olmaması.

Kimyəvi lazerlərin istifadəsini əhəmiyyətli dərəcədə məhdudlaşdıran çatışmazlıqlar, istifadə edilən maddələrin çoxunun yüksək zəhərliyiylə, onların partlama təhlükəsiylə və iş prosesində aktiv mühitin əvəz edilməsinin zəruriliyi ilə bağlıdır.

Qaz kimyəvi lazerləri iki növə: kimyəvi reaksiyanın xarici səbəbdən başlanğıcıyla işləyən lazerlərə və tam kimyəvi (xarici səbəb olmadan) lazerlərə bölürlər. Kimyəvi lazerdə fəal hissəciklərin keçidində məskunlaşmanın inversiyası ya kimyəvi reaksiya nəticəsində, ya da kimyəvi reaksiya hesabına yaranan ilk həyacanlanan hissəciklə və digər lazer hissəciklər arasında baş verən enerji mübadiləsindən sonra yaranır. Kimya lazerlərinin (onlardan bəzilərinin yüksək şüalanma gücü ilə yanaşı) üstünlüklərindən biri də 1,3-dən 26 mkm-a qədər lazer dalğa uzunluğu zəngin spektridir.

Kimyəvi lazerlərə praktiki maraq onunla bağlıdır ki, bəzi ekzotermik reaksiyalar prosesində reaksiya olunan maddənin vahid kütləsinə görə əhəmiyyətli enerji ayrılır. Bu halda ayrılan enerjilərin 70%-ə qədər (məsələn, $F + H_2 \rightarrow HF^* + H$ reaksiyada) molekulaların rəqsi həyacanlanmasına sərf olunur. Buna görə də bir çox kimyəvi lazerlərdə molekulaların rəqsi səviyyələrinin arasında keçidlər istifadə olunur. Kimyəvi lazerlərdə (CO-lazerlərində olduğu kimi)

relaksasiya prosesləri nəticəsində məskunlaşmanın qismən inversiyası yaranır.

Rəqsi həyacanlandırılmış molekulların yaranması üçün istifadə olunan kimyəvi reaksiyalar iki tipə bölmək olar – zəncirvari və qeyri-zəncirvari. Bu halda zəncirvari proses generasiya nöqtəyi-nəzərindən effektiv olur, yəni proses zəncirin lazer uzunluğu vahiddən böyük olduğu prosesdir. Qeyri-zəncirvari proseslər əsasında kimyəvi lazerlərin fəal mühitlərindən $H_2 - Cl_2$ (HCl^* ; $\lambda = 3,5 - 3,9$ mkm molekulu) qarışığını, həmçinin $H_2 - RF_n$, burada RF_n – fltor tərkibli maddədir (HF^* ; $\lambda = 2,7 - 3,0$ mkm molekulu) qarışığını qeyd etmək olar. Zəncirvari kimyəvi reaksiya ilə lazer mühitinin nümunəsi kimi $H_2 - F_2$ qarışığı misal göstərmək olar.

Kimyəvi lazerlər həm impuls, həm də fasiləsiz rejimdə işləyə bilər. Fasiləsiz kimyəvi lazerlərin işləməsi üçün fəal lazer həcmində reaktivlər selinin birləşməsi və sürətli dəyişməsini təşkil etmək lazımdır.

Kimyəvi lazerlərin inisiyasiyası üçün stabil molekulların dağıdılmasına və sərbəst radikalların yaranmasına gətirən müxtəlif proseslər istifadə olunur. İnisiyasiyanın əsas üsulları aşağıdakılardır:

- Fotoinisiyasiya – UB şüalanma ilə işığa verilən molekulların fotodissosiasiyası nəticəsində sərbəst radikalların yaranmasıdır: $AB + h\nu \rightarrow A + B$.
- Elektron dəstəsi – sürətli elektronların qazdan keçməsi ilə molekulların dissosiasiyası və sərbəst radikalların yaranması baş verir, məsələn, $F_2 + e \rightarrow F^+ + F^-$ (dissosiativ yapışma).

- Qaz boşalma–dissosiasiya mexanizmi yuxarıda göstərilən inisiyasiya üsulları ilə eynidir. Kimyəvi lazerlərdə qaz boşalmasının yanmasının xüsusiyyəti onlarda elektronların konsentrasiyasının azalmasına və qaz qarışığının təzyiqini məhdudlaşdırmağa gətirib çıxaran mənfi elektron tərkib hissəciklərinin (atom, molekul və radikallar) olması ilə əlaqələndirilir.
- Termoinisiyasiya – ilkin molekulların termik dissosiasiyasıdır. Ftor tərkibli molekullardan F_2 molekul (əlaqə enerjisi 1,4 Ev) ən zəif birləşən molekuldur.
- Kimyəvi inisiyasiyası – atomların və ya sərbəst radikalların yaranması kimyəvi reaksiya nəticəsində baş verir, məsələn, $F_2 + NO \rightarrow NOF + F$. Doldurulmanın belə üsulu $DF^* + CO_2 \rightarrow CO_2^* + DF$ həyacanlanmanın ötürülməsi ilə kimyəvi lazerlərdə tətbiq edilir.

Hal-hazırda müxtəlif parametrləri olan çox sayda kimyəvi lazerlər hazırlanmışdır. İmpuls kimyəvi lazerlərdən görünən HF -lazerlər ($SF_6 - H_2$ qarışığında), nüvə partlayışının qamma–şüalanması ilə inisiyasiya edilən maksimal enerji parametrlərinə malikdirlər: xarici FİƏ 5%-ə qədər olan 10 ns müddətdə lazer impulsunun enerjisi 70 kCoul təşkil edir. Fasiləsiz kimyəvi lazerlərdə qövs boşalmasında istilikdaşıyıcı qızdırması ilə ifrat səs sürətli $HF(DF)$ lazerlər üçün maksimal enerji xarakteristikaları qeydə alınıb: 3%-i xarici FİƏ və təxminən 10%-i kimyəvi FİƏ ilə şüalanmanın gücü 15 kVt-dır.

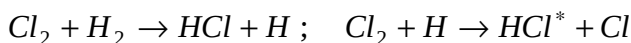
§ 6.3. HF-lazer

HF-lazer kimyəvi lazerin tipik nümunəsidir. Onun generasiyası 2.6 ... 3.3 mkm diapazonda bir neçə rəqsi-fırlanma keçidlərdə baş verir. Fasiləsiz rejimində çıxış gücü 10 kVt tərtibdədir. Kimyəvi FİƏ 10% -ə yaxın impulsda enerji bir neçə kilodcoultdur. Kimyəvi lazerlərlə yanaşı, foto dissosiativ (və ya fotokimyəvi dissosiativ) lazerlər hazırlanmışdır, tipik bir nümunə 1.315 mkm dalğa uzunluğunda işləyən atomar yod lazeridir.

Birinci kimyəvi lazer molekulyar H_2 və Cl_2 qatışığı ilə keçən reaksiyaya əsaslanır. $H_2 + Cl_2$ zəncirvari kimyəvi proseslərin klassik nümunəsidir. UB şüalanma ilə Cl_2 molekulu parçalanır:



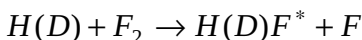
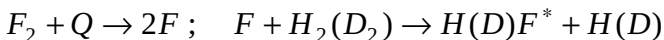
bunlar uzun zəncirvari reaksiyanı başlayırlar:



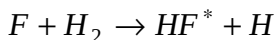
və s. Birinci pillədə HCl molekulları həyəcanlaşmamışdır. İkincidə çoxlu enerji ayrılmaqla HCl molekulları həyəcanlaşır və bunun hesabına generasiya baş verir. Elə görünür ki, hər şey qaydasındadır, zəncirvari proses elə birbaşa kimyəvi lazerdə işlədi. Əslində isə xlorun atomlarının yaranmasına sərf olunmuş enerji lazer şüalanmasının enerjisindən 10^3 dəfə çoxdur. Məlum olur ki, bu reaksiyada birinci pillə zəif kədir və buna görə də bütünlükdə zəncirin inkişafı sürətə görə həyəcanlaşmış molekulların aktivləşmə prosesinə nəzərən geri qalır. Lazer nöqtəyi –nəzərindən H_2 və Cl_2 molekullarının qarışığında olan

kimyəvi reaksiya zəncirvari deyil.

H₂ molekulu və ftor qarışığından istifadə edərək böyük xemolazer uzun zəncirvari reaksiya tapmaq mümkün oldu. Zəncirvari prosesin inkişafı kinetik nöqtəyi–nəzərindən hidrogen və xlor qarışığında zəncirin inkişafına tamamilə oxşardır:



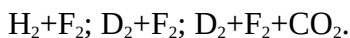
və s. Zəncirdə hər iki pillədə rəqsi – həyəcanlaşmış $H(D)F^*$ molekulardır. H və F reaksiya etdiyi zaman ayrılan enerji H və Cl enerjisindən üç dəfə çoxdur və ən vacibi odur ki, H və F arasındakı reaksiyanın hər iki pilləsinin sürətiləksasiya proseslərinin sürətindən böyükdür. Bu da F–H prosesində uzun xemolazer zəncirinin əmələ gəlməsinə imkan yaradır. Göstərilən nümunədə sərbəst (F) radikallar enerji sərf etmə hesabına yaranır. Lakin sərbəst F xalis kimyəvi yolla da alınə bilər. Misal üçün, nəzərə cərpacaq F sərf etməklə H_2 və F_2 qarışığı düzəldək. Bu qarışıq yandıqda çoxlu miqdarda enerji ayrılır və qarışıq qızacaq. 1500 – 2000⁰K və $p = 1 \div 20$ atm. halda bütün sərf olunmuş molekulyar F atomlara dissosiasiya edir, belə ki, qarışığın əsas komponentləri HF və F–dır. Bu mərhələdə molekulaların heç bir qeyri –tarazlıq həyəcanlaşması baş vermir –kimyəvi reaksiyanın bütün enerjisi F_2 -nin dissosiasiyasına və qarışığın qızmasına sərf olunur. Çoxlu miqdarda F almaqla qeyri – tarazlıq həyəcanlaşmış HF^* molekulaları və nəhayət lazer şüalanması əldə etməklə



-ın sürətli prosesi yaratmaq olar. Bunu necə etməli? Radikalların iştirakı ilə gedən reaksiyalar çox sürətlidir və reagentlərin qabaqcadan qarışdırılması mümkün deyil. Burada sürətli qaz axınında reagentlərin qarışma texnikası köməyə gəlir. İmpuls təsirli kimyəvi lazerlərin quruluşunun əsas hissələri aşağıdakılardır:

1. Reaktor. Burada sürətli kimyəvi reaksiya gedir və bunun nəticəsində fəal mühit yaranır.
2. Optik rezonator.
3. Reaksiyanı törədən sistem.
4. Reagent qarışığının hazırlanması və reaktora daxil olunması.
5. İşlənmiş məhsulların çıxarılması sistemi.

Reaksiyanın törənməsi impuls lampasından gələn UB şüalanma ilə həyata keçirilir. Bunu habelə yüksək enerjili elektronlar seli və ya elektrik cərəyanının reaktordakı kimyəvi reagent qarışığından keçməsi ilə almaq olar. Aşağıdakı qatışıqlardan istifadə etmək olar:



Çox vaxt inert bufer qazından istifadə olunur ki, bu qatışığın qızmasına və fəal mühit yaradan relaksasiya proseslərin sürətlənməsinə səbəb olur.

Zəncirvari HF reaksiyası əsasında lazerin xarakteristikalarını araşdıraraq. Aydındır ki, optimal iş rejimini tapmaq olar: yüksək xüsusi enerji ayrılması $100\text{C/l}\cdot\text{atm}$ reaksiyanın başlanmasına sərf olunan kiçik enerji qiymətinə uyğundur. Tətbiq olunan lazerdə reaksiyanın başlanmasına sərf olunan hər bir coul enerjiyə lazer 9.4 C şüalandırır. Bu istifadə olunan qatışıqda xemolazer zənciri vastəsilə həyata keçirilir.

Reaksiyanın daha güclü törənməsi hesabına sürətlənməsi lazer şüalanmasının böyük kimyəvi FİƏ 22% ilə rekord xüsusi enerjisinə 400 C/l·atm nail olmağa imkan verir. Lakin reaksiyanın törənməsinə sərf olunan enerji artır: sərf olunan hər bir coul enerji lazer şüalanmasının 1,5 C enerjisinə çevrilir.

Şüalanma enerjisinin qeyri –mütanasib artımı aşağıdakı kimi izah olunur: a). Reaksiya prosesi zamanı H_2 və F_2 komponentlərinin konsentrasiyası yavaş –yavaş azalır, reaksiya yavaşlayır. b) Qatışıq çox qızır, bu da fəal mühitə mənfi təsir göstərir. Nəhayət, həyəcanlaşmış molekulların aktivsizləşməsini sürətləndirərək sərf olunan HF molekullar eləcə də mühiti pozurlar. Bu vəziyyət eyni zamanda H_2 -ni D_2 ilə əvəz etdikdə və qatışıq (D_2+F_2) karbon qazının molekullarını əlavə etdikdə də baş verir.

Hal –hazırda aşağıdakı impuls lazerləri yaradılmışdır: $SF_6 + H_2$ və $H_2 + Br_2$ və s.

Fasiləsiz generasiya əldə etmək üçün reaktordakı reagentləri tez dəyişmək və fasiləsiz rejimdə kimyəvi fəal mərkəzləri yaratmaq lazımdır. Reaksiyalar tez getdiyindən reaktordakı maddələri dəyişmək məqsədi ilə axının səsə yaxın və ya ifrat səs sürətləri yaratmaq vacibdir.

Fasiləsiz kimyəvi lazerlər kimyəvi fəal mərkəz mənbəyindən, sərbəst atom və ya molekulyar radikalların digər komponentlə qatışıq sistemindən (burada digər komponentlə reaksiya həyəcanlaşmış molekullar verir), fəal mühit yaradan reaktordan və nəhayət optik rezonatordan ibarətdir. Bundan başqa giriş komponentlərin daxil olması və istifadə olunmuş reagentlərin çıxarılması lazımdır. Reaksiyası istiliklə başlanan $HF(DF)$ lazerin quruluşu ilə tanış olaq. Atomar yaranan yanma kamerasına molekulyar F_2 , H_2 və He daxil edilir. Ftorun miqdarı

hidrogenə nisbətən çoxdur. Kameranı hidrogenin fforda adi tarazlıq yanması baş verir. Bu zaman F_2 artığın dissosiasiyasına lazımı istilik ayrılır. Yanma kamerasında komponentlərin nisbəti elə götürülür ki, F molekulların artığının tam dissosiasiyası təmin edilsin. Bunun üçün $T = 1500 \div 1800^\circ K$ tələb olunur.

Çox qızdırılmış qatışıqda mühit yaratmaq üçün reaksiyadan istifadə etmək olmaz çünki qatışıqı soyutmaq vacibdir. Bunun üçün qatışıq selin ifrat səs sürətlərə qədər qovaraq ucluqlar çeşidindən buraxırlar. Ucluq çıxışında D molekulları selə qarışdırılır, nəticədə $F + D_2 \rightarrow DF^* + D$ bu reaksiya generasiya edən rəqsi –həyəcanlaşmış molekullar yaradır.

Burada əsas məsələ qarışdırılmadır, bu da tez edilməlidir. Bunun üçün ucluq bloku mono yox, kiçik ucluqlardan ibarət olan qəfəsdır. Bu kiçik ucluqlar ümumi seli kəsiyi kiçik $1 \div 2$ mm olan axınlara bölür. D molekulları da reagentlərin effektiv qarışması məqsədi ilə eləcə kəsiyi kiçik olan axın formasında verilir. Ucluq blokunda axının qovulması digər məsələləri də həll edir. Sel kiçik sürətdə olduqda onun istiqamətində generasiya zonasının eni kiçik olur, bunun üçün də lazer şüasının alınması çətinləşir. Əks halda onun eni santimetr tərtibindədir. Bu isə yaxşı keyfiyyətli şüanın alınması üçün kifayətdir. İfrat səs sürəti ilə yayılan sel maddənin sürətli axınını təmin edir, bu da nisbətən ucluq qəfəslərinin kiçik səthlərində güclü şüalanma alınmasına imkan verir.

He nə üçündür? Ftorun D ilə reaksiyasında böyük enerji alınır. Bunun bir hissəsi (15) lazer şüası ilə aparılır, qalan hissəsi isə seli qızdırır. Qaz dinamikasından məlum olduq

kimi qızma ifrat səs axınını kəskin şəkildə sürətini azalda bilər, ifrat səs axın prosesini boğa da bilər (onları səsə çatdırana qədər). Bu isə generasiyaya lazım olan şərtləri poza bilər. İfrat səs axınının kimyəvi reaksiyada iştirak etməyən inert qaz ilə qarışdırılması 1 ton qaz selində ayrılan istiliyi azaldır, bu da qızmanın qarşısını alır.

Ftor və He seli ilə çıxan HF reaksiya prosesində eyni zamanda alınan məhsuldur. Bu lazerdə şüalandırıcı yox, əksinə lazer zonasında həyəcanlaşmış molekulları aktivsizləşmiş etməklə mənfi rol oynayır. Bunun üçün yanma kamerasında hidrogen istifadə olunduqda lazer zonasına D əlavə edilir. Əgər generasiya HF –da alınarsa, onda yanma kamerasına ya D , ya da reaksiya məhsulları arasında rəqsi həyəcanlaşmış HF^* -u söndürən molekullar olmayan başqa yanacaqlar əlavə edilir.

FƏSİL VII

QAZ LAZERLƏRİNİN TƏTBİQİ

§ 7.1. Texnoloji işlənmiş qaz lazerlərinin çıxış xassələri

Lazer şüasının xarakterik xüsusiyyətləri — yüksək istiqamət və monoxromatiklik qaz lazerinin şüalanmasında aydın görünür. Qaz lazerlərinin əhəmiyyətli üstünlüyü fasiləsiz rejimdə işləmək qabiliyyətidir. Həyacanlanmanın yeni üsullarının tətbiqi və qazın daha yüksək təzyiqlərinə keçidi qaz lazerinin gücünü kəskin artırma bilər. Qaz lazerinin köməyi ilə uzaq infraqırmızı diapazonun, ultrabənövşəyi və rentgen şüalarının diapazonlarının sonralar mənimsəməsi mümkündür. Qaz lazerlərinin yeni tətbiq edilmə sahələri açılır, məsələn kosmik tədqiqatlarda.

Bərk cisimlərlə və mayelərlə müqayisədə qazlar daha kiçik sıxlığa və daha yüksək bircinsliyə malikdir. Buna görə qazda işıq şüası praktik olaraq təhrif edilmir, səpilmir və enerji itkisi yaşanmır. Qaz lazerlərində elektromaqnit dalğaların yalnız bir rəqs növünü həyacanlandırmaq nisbətən sadədir. Nəticədə lazer şüasının istiqamətlənməsi işığın difraksiya həddüdü ilə müəyyən olunur. Görünən işıq sahəsində işıq şüasının səpilməsi 10^{-5} - 10^{-4} rad-ır, İQ sahədə isə 10^{-4} - 10^{-3} rad təşkil edir.

Bərk cisimlərdən və mayelərdən fərqli olaraq, qaz tərkibli hissəciklər (atomlar, molekullar və ya ionlar) bir-biri

ilə yalnız istilik hərəkəti prosesində toqquşmalar zamanı qarşılıqlı təsirdə olurlar. Bu qarşılıqlı təsir hissəciklərin enerji səviyyələrinin yerləşməsinə zəif təsir edir. Buna görə qazın enerji spektri ayrı-ayrı hissəciklərin enerji səviyyələrinə uyğundur. Hissəciklərin bir enerji səviyyəsindən digər səviyyəyə keçidinə uyğun olan spektral xətlər qazda az genişləndirilmişdir. Qazda spektral xətlərin kiçik eni ona gətirir ki, spektral xətdərezonatorun az modu yerləşir. Belə ki, qaz rezonatorunda şüanın yayılmasına praktik olaraq təsir etmir, şüanın tezliyinin sabitliyi əsasən güzgülərin və rezonatorun bütün konstruksiyasının sabilliyindən asılıdır. Bu şüalanmanın tezliyinin son dərəcə yüksək sabitliyinə gətirir. Şüalanmanın tezliyi 10^{-11} dəqiqliklə yenidən bərpa olur, tezliyin nisbi sabitliyi isə $\Delta\omega/\omega = 10^{-14}$.

Bərkisimli lazerlər deyil müəyyən növ qaz lazerlərindən istifadənin əsas səbəbi, müxtəlif lazer növlərində əldə etmək çətin olan xüsusi dalğa uzunluğunun reallaşması qaz lazerlərində mümkündür. Başqa maraqlı cəhət isə nisbətən yüksək optik güc bərkisimli lazerlərlə müqayisədə diod doldurulmalı qaz lazerlərində alına bilər.

Hal hazırda müasir texnoloji işlənmiş qaz lazerlərinin çıxış xassələrini sadalayaq və onların tətbiq dairəsi ilə tanış olaq.

Helium - neon qırmızı lazer şüalanmanın generasiyası üçün geniş istifadə olunurdu, lakin indi tez-tez daha ucuz və daha kompakt lazer diodlarla əvəz olunurlar. Helium-neon lazerin konstruksiyası **açıq kosmosda** istifadə üçün işlənilmişdir. Bu korund keramikalı 1,5 mm daxili diametrlə boşalma boru sərt silindr formalı berillium borusunda quraşdırılmış yarı şəffaf güzgünün və əks etdirən prizmanın

arasında yerləşdirilmişdir. Boşalma ümumi mərkəzi katodla iki seksiyada (hər biri 12 mm uzunluğunda) sabit cərəyanda (8 mA, 1000 V) həyata keçirilir. Soyuq oksidantal katod (48 mmdiametrlə və 51 mm uzunluqla) 2 yarı dielektrik üzləməylə bölünür. Bu üzləmənin köməylə katodun səthinin üzərində cərəyanın daha bircins paylanmasını təmin edilir. Anod olan paslanmayan poladdan vakuum silfonları güzgünün və prizmanın tutğacı ilə hər bir borunun hərəkətli birləşməsini yaradırlar. Örtük sol sondan çıxış güzgu ilə bağlanır. Lazer 10000 saat ərzində kosmosda işləmək üçün nəzərdə tutulmuşdur.

Yüksək çıxış gücüylə unikal uzundalğalı mənbə olan karbonun dioksidində lazer yaxşı misaldır. **Molekulyar CO₂ lazerlər** yüksək gücə (fasiləsiz rejimdə lazer şüasının ən böyük gücü) və yüksək FİƏ-a malikdir. Elektron zərbəylə CO₂ molekulalarının həyacanlanması və 200 m qaz boşalması borunun uzunluğu ilə CO₂ lazer 9 kVt gücəmalikdir. 1 kVt-da çıxış gücü ilə kompakt konstruksiyalar mövcuddur. Yüksək çıxış gücündən başqa, CO₂ lazerlər 15-20% çatan böyük FİƏ-a malikdir (hətta 40% FİƏ mümkündür). CO₂ lazerlər prinsipial olaraq həm də impuls rejimində effektiv işləyə bilərlər. CO₂ lazerlərin sadalanan xüsusiyyətləri onların tətbiqinin müxtəlifliyinə səbəb olur: texnoloji proseslər (kəsmə, qaynaq), lokasiya və rabitə (yer atmosferi 1-10 mkm qədər dalğalar üçün şəffafdır), yüksək temperaturlu plazmanın (şüalanmanın yüksək gücü hesabına) öyrənilməsi və alınması ilə bağlı fiziki tədqiqatlar, materialların tədqiqatı və s.

Hal-hazırda **ion lazerlərinin** qaz boşalma borularının istehsalı üçün cərəyanın yüksək sıxlığına görə yüksək istilikkeçirmə xassəsinə malik olan berillium keramika boruları və ya metalkeramik konstruksiyalar istifadə olunurlar. İon

lazerlərinin FİƏ-ı 0,01%-i ötmür. Görünən işıq sahəsində arqon lazerləri fasiləsiz rejimdə nisbətən yüksək gücə malikdir. Arqon ion lazeri $\lambda = 0,5145$ mkm-la (yaşıl şüa) bir neçə on vatta qədər gücə malik şüalanma yaradır. O bərk materialların emalı texnologiyasında, fiziki tədqiqatlarda, optik rabitə xətlərində, Yer kürəsinin süni peyklərinin optik lokasiyasında tətbiq edilir. Bundan başqa, arqon ionan lazerləri tez-tez titan-sapfir (göy) lazerin doldurulması üçün istifadə olunurdu, lakin hal-hazırda ikinci harmonika generasiyası hesabına bərkcisimli lazerlərlə tez-tez əvəz olunur.

Spektrin göy (0,4416 mkm) və ultrabənövşəyi (0,3250 mkm) sahələrində fasiləsiz rejimdə işləyən və yüksək monoxromatikliyə malik olan kadmium buxarı əsasında lazer olduqca perspektivlidir. Cd buxarları anodun yaxınlığında yerləşdirilmiş buxarlandırıcıda –rezervuarda yaranır. Onlar He güclü qarışdırılmışdır. Qaz boşalma boruda Cd-in bərabər paylanması və onun konsentrasiyasının seçilməsi Cd buxarlarının He ionları ilə anoddan katoda doğru artması ilə əldə edilir. Cd buxar sıxlığı qızdırıcının temperaturu ilə təyin edilir. Katod yaxınlığında soyuducu–rezervurda Cd kondensasiya olunur. Hal-hazırda 2,5 mm diametrli və 140 sm uzunluqlu boru He 4,5 mm c.s. təzyiqdə, qızdırıcının 250^0 C temperaturunada, boşalmanın 0,12 A cərəyanında və 4 kV gərginlikdə spektrin göy 0,1 Vt və ultrabənövşəyi 0,004 Vt sahələrində gücünü almağa imkan verir. Kadmium lazeri optik tədqiqatlarda, okeanoqrafiyada, həmçinin fotobiologiyada və fotokimiyada istifadə olunur.

Eksimer lazerlərin şüalanmasının parametrlərinin fiziki xarakteristikaları tibbi məqsədlərdə onların tətbiqi sferasını müəyyən etmişdir. Bundan başqa, eksimer lazer şüalanmasının

spektrinin ultrabənövşəyi sahəsində geniş diapazonu təmin edir. Güclü impuls işıq dəstəsi cərrah bıcağı (neştəri) əvəz edərək abilyasiya (buxarlanma) rejimində olan toxumalara təsir edir. Faktiki olaraq toxumaların idarə olunan səthi fotokimyəvi dağılması baş verir, onların temperaturunun artmasına və tam istilik dağıtmasına gətirməyən və dərin oturmuş toxumalara təsir etməyəcəkdir. Tibbi eksimer lazerlər əksər halda UB spektrində şüalanma diapazonu: 157-dən 351 nm olan qaz mənbələridir.

Kimyəvi lazerlər elmi eksperimentlərdə - kimyəvi kinetikada, lazer kimyasında və spektroskopiya geniş şəkildə istifadə olunur. Bu əsasən 3-4 mkm dalğa uzunluğunda koherent şüalanmanın kifayət qədər intensiv mənbəyi olmadığı ilə bağlıdır. Kimyəvi lazerlərin texniki istifadəsi işlənib hazırlanma prosesindədir. İdarə olunan termonüvə sintezi üçün güclü ftor hidrogen və oksigen-yod kimyəvi lazerlərindən istifadənin layihələrinə baxılır. Yaxın IQ diapazonda şüalanmayaradan oksigen-yod kimyəvi lazeri materialların emalı üçün maraq kəsb edir.

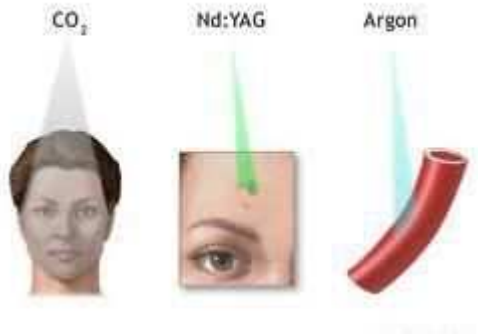
Ftor-hidrogen və oksigen-yod kimyəvi lazerlərin şüasının spektri böyük saylı müxtəlif molekulların udulmasının diapazonunu ötüb keçir. Bir lazer impulsunda tezliklərin böyük sayda generasiyasının imkanı bu kimyəvi lazerləri qaz qarışıqlarının tərkibinin diaqnostika sistemlərinin (lidarların) yaradılması və kontrolu üçün, həmçinin atmosferin tərkibini və distansiyalı lokasiyası üçün perspektivli edir. İstisna deyil ki, istifadə olunan reaktivlərin vahid kütləsi üçün şüalanmanın böyük gücünə malik olan kimyəvi lazerlər kosmosda texnologiyanın inkişafında faydalı ola bilərlər (məsələn, lazer qaynağı). Xarici ədəbiyyatda kimyəvi lazerlərinin hərbi tətbiqləri müzakirə edilir.

§ 7.2. Tibbdə lazerlər

Lazer şüalanmasının bioloji sistemlərə təsirinə çox sayda tədqiqatlar həsr edilmişdir. Bu tədqiqatların nəticələri demək olar ki, müstəqil bilik sahəsi təşkil edir. Əsas diqqət kliniki patologiyaların aspektlərinə yönəlmişdir. Bununla belə, bioloji sistemlər fiziki tədqiqatların əhəmiyyətli bir obyektidir və lazer şüalanmasının bioloji obyektlərə effekti nəzərə alınmalıdır. Əlbəttə, insan orqanlarına lazer şüasının təsirinin tədqiqi ən böyük maraq kəsb edir. Lazer terapiyasının biomexanizmi çox mürəkkəbdir və sonuna kimi tam öyrənilməyib. Müalicə məqsədilə aşağı enerjili lazer şüasıyla canlı orqanizmə təsir fiziki terapiya metodlarına aiddir.

Hal - hazırda tibbdə inkişafı lazer texnologiyalarısız təsəvvür etmək çətindir, belə ki, çoxsaylı tibbi problemlərin həllində lazerlər yeni imkan-ları

açdılar. Müxtəlif dalğa uzunluğu və müxtəlif enerji səviyyəli lazer şüalanmalarının bioloji toxumalara təsiri mexanizmlərinin öyrənilməsi elə çoxfunksiyalı tibbi lazer cihazlarının yaradılmasına imkan verir ki, onların kliniki təcür-bədə tətbiqi diapazonu çox genişdir və ona görə də belə bir cavab vermək çətindir: hansı xəstəliklərin müalicəsi zamanı lazerlərdən istifadə olunmur?



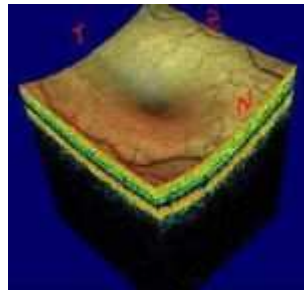
Lazer tibbinin inkişafı üç əsas yolla gedir:

- - lazer cərrahiyyəsi
- - lazer terapiyası
- - lazer diaqnostikası.

Tibbi lazer anlayışı yeni, müasir istiqamət kimi XX əsrin sonlarında sürətlə inkişaf etmişdir. Bu günə qədər tibbi lazeri elektromaqnit şüalardan, kvant proseslərindən və canlı materiyanın dalğa informasiya xüsusiyyətlərindən istifadəyə əsaslanan biliklərin, vasitələrin və metodların məcmusu kimi müəyyən etmək olar. Tibbdə lazerin təsiri yalnız molekulların və hüceyrələrin səviyyəsində olur, sonra isə zəncirvari reaksiya vasitəsilə enerji bütün bədəninə ötürülür. Lazer tibbinin prinsiplərinə əsaslanan aparatların təsirinin geniş terapevt diapazonu zülal sintezin prosesləri ilə qarşılıqlı təsirə xüsusi uyğunluqla və qabiliyyətlə izah olunur.

Optik koherent tomoqrafiya

(Optical coherence tomography (OCT)) – bu materialın həcmində işığın səpələnməsinin hesabına nümunənin daxili strukturunun üçölçülü təsvirlərinin alınması üçün optik signalın alınması və emal edilməsi metodudur. O mikrometrlə ayırdetmə ilə yayan mühitin içindən üçölçülü təsvirlərini almağa imkan verir, məsələn, bioloji toxumaların. Faktiki olaraq, bu "optik ultrasəsdir", səthin eninə təsviri vasitəsi ilə toxumanın daxilində əks etdirmələrin görünüşüdür. OCT-un əsas üstünlükləri aşağıdakılardır:



- demək olar ki, mikroskopik ayırdetmə ilə real zamanda təsvir

- toxumaların morfologiyasının ani, yönəldilən görünüşü

- nümunənin və ya obyektin hazırlığını tələb etmir - ionlaşdırıcı şüa yoxdur.

OCT yüksək ayırdetməni təmin edir, çünki, o səs və ya radiotezliyə deyil, işığa əsaslanır. Üçölçülü təsvir sonarın (ultrasəs lokatorun) və ya radarın sistemində olduğu kimi skanetmə yolu ilə qurula bilər.

Lazer cərrahiyyəsi.

Cərrahiyyə məqsədi ilə 50-70° C-dən yuxarı bioloji toxumanı qızdırmaq üçün lazer şüası kifayət qədər güclü olmalıdır ki, bu da toxumanın koagulyasiyasına, kəsməyə və ya buxarlanmasına gətirib çıxarır. Buna görə lazer cərrahiyyə-sində, bu və ya digər cihazın lazer şüasının gücündən



danışarkən, onlarla və yüzlərlə vattı ifadə edən rəqəmlərdən istifadə edirlər.

Lazer şüası toxumaları vizual kontrol zamanı uzaqlaşdırmağa imkan verir, patoloji mərkəzi əhatə edən sağlam toxumalar zədələnmir, lazer əməliyyatları demək olar ki, qansız olduğundan, lazer yaralarının sağlması digər cərrahi müalicə metodlarından daha sürətli və daha keyfiyyətli olur. Lazer şüası bakterisid təsirə malikdir, buna görə lazer yaraları sterildir. Lazerin fəal mühitin növündən asılı olaraq cərrahilazərər həm fasiləsiz, həm də impulsu olur. Şərti olaraq onları güc səviyyəsinə görə üç qrupa bölmək olar:

- koaqulyasiya edənlər: 1 - 5 Vt,
- buxarlanma və dərin olmayan kəsmə: 5 - 20 Vt,
- dərin kəsmə: 20 - 100 Vt.

Ölbəttə, bu bölmə əsasən şərtidir, belə ki, şüalanmanın dalğa uzunluğu və iş rejimi cərrahi lazerin çıxış gücünə böyük təsir göstərir.

Bildiyimiz kimi lazerin hər bir növü ilk növbədə şüalanmanın dalğa uzunluğuyla xarakterizə olunur. Dalğa uzunluğu bioloji toxuma ilə lazer şüalanmasının udulması dərəcəsini, və deməli, nüfuzetmənin dərinliyini, həm cərrahiyyə sahəsinin, həm də ətraf toxumasının isitmə dərəcəsini müəyyənləşdirir. Suyun bioloji toxumanın bütün növlərinin tərkibində olduğunu nəzərə alsaq, demək olar ki, cərrahiyyə üçün suda lazer şüa udulma əmsalı 10^{-1} sm bərabər və ya daha çox olan və ya nüfuzetmə dərinliyi 1 mm yuxarı olmayan lazer növü üstündür.

Tibbdə cərrahi lazerlərin tətbiqini müəyyən edən başqa əhəmiyyətli xarakteristikalarından aşağıdakıları qeyd etmək olar:

- şüalanma gücü;
- fasiləsiz və ya impuls iş rejimi;
- qanla dolmuş bioloji toxumanın koaqulyasiya etmək qabiliyyəti;
- optik liflərlə lazer şüalanmanın ötürülməsi imkanı.

Bioloji toxumalara lazer şüasının təsirində əvvəlcə onun isitməsi, qızdırılması, sonra isə buxarlanması baş verir. Bioloji toxumanın effektiv kəsilməsi üçün bir tərəfdən kəsiyin yerində sürətli buxarlanma, digər tərəfdən ətrafdakı toxumaların minimal müşayiəti ilə istiləşməsi tələb olunur. Aydındır ki, şüalanmanın eyni orta gücündə qısa impuls fasiləsiz

şüalanmaya nəzərən toxumanı daha sürətli qızdırır, və bu zaman ətraf toxumalara istiliyin yayılması minimaldır. Amma, əgər impulsar aşağı təkrar tezliyinə (5Hs -dən az) malikdirsə, onda fasiləsiz kəsik keçirmək çətinidir, bu daha çox perforasiya bənzəyir. Beləliklə, lazer 10 Hs –dən çox impulsların təkrar tezliyi ilə impuls iş rejiminə malik olmalıdır, impulsun müddəti isə- yüksək pik gücünün alınması üçün minimum olmalıdır. Lazerin orta gücünə gəldikdə isə, o praktikada lazer şüalanmasının dalğa uzunluğuna və tətbiq edilmə sahəsinə görə cərrahi əməliyyatlar üçün lazerlərin optimal çıxış gücü 15-60 Vt diapazonda olur.

Koaqulyasiya. Lazer şüalanmasının cərrahiyyə üçün əhəmiyyətli xüsusiyyəti – qanla dolmuş (vaskulyə olunmuş) bioloji toxumasını koaqulyasiya etmək qabiliyyətidir. Əsasən, koaqulyasiya lazer şüalanmasının qanla udulması, qaynamaya və qan laxtalarının yaranmasına qədər onun güclü qızdırması hesabına olur. Beləliklə, qanın hemoglobin və ya su komponentinin koaqulyasiya zamanı udma hədəflə ola bilər. Bu da spektrin narıncı-yaşıl (titanil fosfat kalium kristalı - Nd:YAG lazer, mis buxarında lazer) və infra-qırmızı (neodim, holmium, şüşədə erbium, CO₂-lazer) sahəsində lazerlərin şüalanması bioloji toxumanı koaqulyasiya etmək üçün yaxşıdır. Lakin, bioloji toxumada çox yüksək udmada, məsələn, 2,94 mkm dalğa uzunluğuna malik erbium narıncı lazerin şüalanması 5- 10 mkm dərinliyində udulur və hədəf obyektinə - kapilyarlara çatmaya bilər.

Lazer şüalanmasının bioloji toxumalara təsirinə görəcərrahiyyə təcrübəsində lazerlərin bir sıra üstünlükləri vardır. Kiçik həcmlərdə işıq enerjisinin yüksək konsentrasiyasının mümkünlüyü bioloji toxuma lokal təsir etməyə və bu

təsirin dərəcəsini koaqulyasiyadanbuxarlanma və kəsiyə qədər idarəetməyə imkan verir.

§ 7.3. İnformasiya və kommunikasiya texnologiyalarında lazerlər

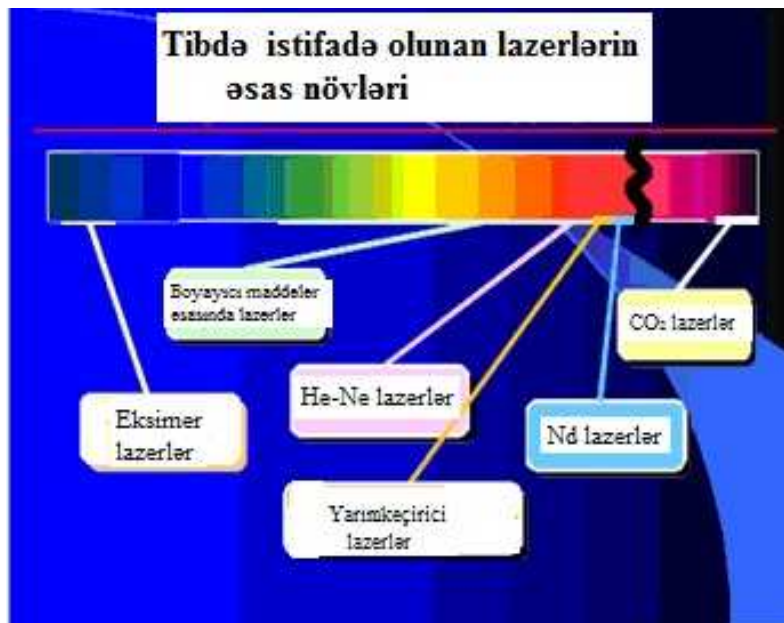
Bu gün həyatımızı kompütersiz və şəbəkəsiz təsəvvür etmək mümkün deyil. Bəşəriyyət vahid informasiya məkanının yaradılacağı yeni bir dünyanın kəndarında durur. Bu dünyada kommunikasiyaların həyata keçirilməsinə nə fiziki sərhəd, nə vaxt, nə məsafə daha mane olmayacaqlar. İndi bütün dünyada müxtəlif funksiyaları yerinə yetirən və bir çox müxtəlif məsələləri həll edən çoxlu sayda şəbəkələr mövcuddur. Əvvəl axır, amma həmişə şəbəkənin keçirtmə qabiliyyəti bitirilmiş olan və rabitənin yeni xətlərini çəkmək tələb olunan an başlayır. Bina daxilində bunu etmək nisbətən asandır, amma artıq iki qonşu binanı birləşdirərkən çətinliklər başlanır. Xüsusi icazələr tələb olunur, razılaşmalar, işlərin görülməsi üçün lisenziyalar, həmçinin bir sıra mürəkkəb texniki tələblərin yerinə yetirilməsi və göstəriş verən torpaq və ya kanalizasiya idarələrindən böyük maliyyə tələblərinin ödənilməsi tələb olunur. Bir qayda olaraq, dərhal aydınlaşır ki, iki binanın arasında ən qısa yol - birbaşa deyil və tamamilə məcburi deyil ki, bu yolun uzunluğu bu binaların arasındakı məsafə ilə müqayisə ediləcəkdir.

Əlbəttə, müxtəlif radio avadanlıqlarına (radiomodemlər, aşağı kanal radiorele xətləri, mikrodalğalı rəqəmsal ötürücülər) əsasında simsiz həll hamıya məlumdur. Lakin çətinliklərin sayı azalmır. Efir doyurulmuşdur və radio avadanlığından istifadə etmək üçün icazə çox çətin, bəzən isə mümkün deyil. Bu

avadanlığın ötürülmə qabiliyyəti əhəmiyyətli dərəcədə onun dəyərindən asılıdır.

Hal hazırda lazerlər yeni yaranan simsiz rabitənin qənaətli növündən istifadə etməyə imkan verir, bu da lazer rabitəanlayışının yaranmasına gətirir. Bu texnologiya işlənib hazırlanmış olan ABŞ-da ən böyük inkişafa nail olmuşdur. Lazer rabitəsi müxtəlif binaların telekommunikasiya sistemlərini birləşdirərkən ortaya çıxma biləcək etibarlı və yüksək sürətli yaxın əlaqə (1,2 km) probleminin qənaətli həllini təmin edir. Onun istifadəsi lokal şəbəkələrin qlobalşəbəkələrlə integrasiyasını, bir-birindən uzaqlaşdırılmış lokal şəbəkələrin integrasiyasını həyata keçirməyə, həmçinin rəqəmsal telefonlara ehtiyaclarını təmin etməyə imkan verəcəkdir. Lazer əlaqəsi bütün bu hədəflər üçün lazım olan interfeysləri - RS-232-dən ATM-a qədər dəstəkləyir (RS –siqnal ötürülməsinin diferensial üsulu, ATM- STM-in (Synchronous Transfer Mode) inkişafıdır, uzun məsafələrə paket məlumatlarının və danışıqın ötürülməsi texnologiyaları, adətən telekommunikasiya magistralının və telefon şəbəkələrin qurulması üçün istifadə olunur.

Lazer qurğuları düz və əks istiqamətlərdə optik lif və ya mis kabelinin köməyi ilə çatdırılmış istənilən şəbəkə axınının ötürülməsini həyata keçirə bilər. Ötürücü sistem 820 nm dalğa uzunluqlu və 40 mVt-a qədər gücə malik İQ diapazonda elektrik siqnallarını lazerin modullaşdırılmış şüalanmasına çevirir. Lazer rabitəsi üçün yayılma mühiti kimi atmosferdən istifadə olunur. Sonra lazer şüası şüalanmanın dalğa uzunluğunda maksimal həssaslığı olan qəbuledici tərəfindən qəbul olunur. Qəbuledici lazerin şüasını istifadə edilən elektrik və ya optik interfeysin siqnallarına çevirir. Beləliklə, lazer sistemlərinin köməyi ilə lazer rabitəsi belə həyata keçirilir.



İşçi cisim	Tətbiqləri
He-Ne lazer	Holoqrafiya, spektroskopiya, ştrix-kodların oxunması, oprik effektlərin nümayişi
Ar lazer	Gözün torunun müalicəsi, litoqrafiya, digər lazerlərin doldurulması
Kr lazer	Elmi tədqiqat, arqon ilə qarışıqda “ağ işıq” lazerləri, lazer şousu
N ₂ lazer	Boyayıcı maddələr əsasında lazerlərin doldurulması, havanın çirklənməsinin tədqiqi, elmi tədqiqat, tədrisdə istifadə olunan lazerlər
HF lazer	Meqavatt gücündə olan sahələrdə fasiləsiz rejimdə işləmək qabiliyyətindədir. Elmi tədqiqatda, hərbi lazerlər kimi. Materialların işlənməsində. lazer termonüvə sintezində. Nd və rentgen lazerlərin doldurulmasında istifadə olunur.
CO ₂ lazer	Materialların işlənməsi (kəsmə, qaynaq), cərrahiyyə
CO lazer	Materialların işlənməsində (qaynaq), fotoakustik spektroskopiya
Eksimer lazer	Yarımkeçirici istehsalatda UB litoqrafiya, lazer cərrahiyyəsi, görmənin bərpası

Yarımkəçirici lazerlər



Kimyəvi



Boya mərkəzlərində lazer (color centers laser)



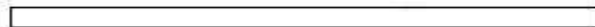
Boyayıcı maddələr əsasında lazerlər (dye laser)



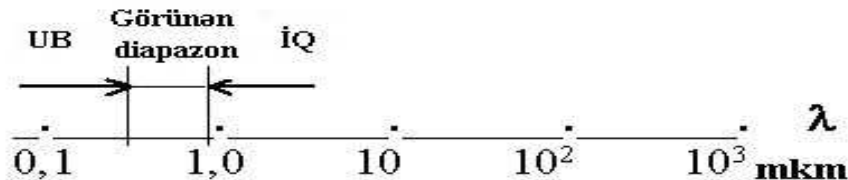
Qaz lazerləri



Bərk cisimli lazerlər



Sərbəst elektronda



NƏTİCƏ

Beləliklə, qaz lazeri - qaz, buxar və ya onların qarışıqları şəklində fəal mühitə malik olan lazerdir. İxtiyari lazer kimi qaz lazeri spektrin optik diapazonunda yerləşən bir və ya bir neçə spektral xətt üzərində gücləndiriciyə malik olan fəal mühiti və optik rezonatoru (sadə halda, iki güzgüdən ibarətdir, güzgülər arasında fəal mühit yerləşmişdir) özündə birləşdirir.

Qaz lazerinin xüsusiyyətləri fəal mühitin xassələri ilə təyin olunur, fəal mühitin sıxlığı geniş intervallarda dəyişilir (təzyiq 10^{-3} mm c.s.-dan onlarla atmosferə kimi olur), lakin sıxlıq kondensə olunmuş mühitlərdəkinə nisbətən əhəmiyyətli dərəcədə kiçikdir. Bu səbəbdən qaz fəal mühiti əksər hallarda spektrin geniş oblastında şəffafdır və udulmanın, şüalanmanın kiçik spektral xətlərinə malikdir.

Qaz lazerləri spektrin geniş oblastında, eyni zamanda, uzaq qısdalğalı (harada ki, şəffaf kondensə olunmuş mühitlər yoxdur) oblastında yerləşən şüalanmanın kiçik spektral xətlərini generasiya edə bilər. Qaz lazerləri generasiyanın son dərəcə kiçik və stabil spektral xətlərini almağa imkan verir.

Fəal mühitin kiçik sıxlığa malik olması sındırma əmsalının temperatur dəyişməsinin azlığını təyin edir. Məskunlaşma inversiyasının yaranmasına səbəb olan fiziki proseslərin geniş çeşidi qaz lazerinin növlərinin, xüsusiyyətlərinin və iş rejimlərinin çoxlu müxtəlif formalarını yaradır. Optik rezonatordan qaz fəal mühitinin sürətli sorulmasının mümkünlüyü qaz lazerində şüalanmanın böyük orta güclərinin rekord həddinə çatmasına imkan verir.

Fasiləsiz və impuls rejimlərdə işləyən qaz lazerləri həm konstruktiv, həm də xüsusiyyətlərinə görə əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənirlər. Fasiləsiz generasiya üçün tələb olunur ki,

doldurma mexanizmi işçi keçidin səviyyələrindəki məskunlaşmanın zamana görə stasionar inversiyasını təmin etsin. Bunun üçün yuxarı səviyyənin effektiv həyəcanlanması və aşağı səviyyənin mümkün qədər sürətli boşalması vacibdir. İmpuls rejimində doldurmanın yüksək sürətini təmin etmək və fəal mühitin həddindən artıq qızmasından qaz lazerlərində asanlıqla qurtulmaq olar.

Fəal mühitin həyəcanlanmasının xarakterinə görə qaz lazerlərini aşağıdakı siniflərə bölmək qəbul olunmuşdur: qaz boşalma lazerləri, optik həyəcanlanmaya malik olan qaz lazerləri (bax. Optik doldurma), yüklənmiş hissəciklər tərəfindən həyəcanlanan qaz lazerləri, qazdinamiki lazerlər, kimyəvi lazerlər.

Qaz lazerinin generasiyası keçidlərdə həyəcanlanır, bu keçidlərin növünə görə lazerləri belə fərqləndirirlər: atom keçidlərindəki qaz lazerləri, ion lazerləri, molekulların elektron, rəqsi və fırlanan keçidlərindəki molekulyar lazerlər və eksimer lazerlər. Məskunlaşma inversiyasının əmələ gəlmə mexanizmlərinə görə isə qaz lazerlərə aşağıdakı növlərə bölünür:

- elektron zərbə nəticəsində həyəcanlanan qaz lazerləri,
- köməkçi qazların hissəciklərindən yaranan həyəcanlanmanın ötürülməsinə malik olan qaz lazerləri,
- rekombinasiyalı qaz lazerləri,
- birbaşa optik həyəcanlanmaya malik olan qaz lazerləri,
- fotodissosiasiyalı qaz lazerləri və s.

Bir sıra hallarda inversiyanın kombinasiyalı həyəcanlanması və mürəkkəb mexanizmləri həyata keçirilir.

Qaz lazerindən spektrin çox geniş – vakuum UF-dən submillimetrlı dalğalara kimi, oblastında 6000-dən daha çox ayrıca spektral xətlər üzərində generasiya alınmışdır.

Lazerlərə aid elmi nəşrlərin təxminən yarısı qaz lazerinə həsr olunmuşdur, onlardan 60%-dən çoxu qaz boşalma lazerlərin payına düşür. Qaz lazerinin konstruktiv xüsusiyyətləri, generasiyanın gücü, FİƏ və s. xassələri çox geniş sərhədlərdə dəyişilirlər.

Ədəbiyyat

- 1 R.C. Qasımova, R.Ə. Kərəməliyev. Kvant Elektronikasının Əsasları, Bakı, “Bakı Universiteti” nəşriyyatı, 1991, -112s.
- 2 R.C. Qasımova, F.H. Hacıyev, Ş.Ş. Əmirov. “Kvant Elektronikasını üzrə ixtisas praktikumu.” Bakı, “Bakı Universiteti” nəşriyyatı, 1994, -102s.
- 3 R.C. Qasımova. “Kvant Elektronikasının kursu üzrə məsələlər toplusu həlli ilə,” Bakı, “Bakı Universiteti” nəşriyyatı, 2008, -65s.
- 4 Z.H. Tağıyev, R.C. Qasımova, G.Ə. Səfərova Qeyri-xətti optika, Bakı, “Bakı Universiteti” nəşriyyatı, 2017, 281s.
- 5 R.C. Qasımova, G.Ə. Səfərova. Lazerlər fizikasıdan məsələlər. Bakı, “Bakı Universiteti” nəşriyyatı, 2018, 79 s.
- 6 A. Yariv. Quantum Electronics. 3rd edition. John Willey and Sons, 2016, -675p.(A. Ярив, Квантовая электроника, М., Мир, 1978, -488с.).
- 7 Н.В. Карлов. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1983. — 319 с.
- 8 Ф. Качмарек. Введение в физику лазеров, М., Мир, 1981, 386с.
- 9 O. Svelto. Principles of Lasers, Springer, 2010, 620p.(O. Звелто. “Физика лазеров”, М., “Лань”, 2008, -720с.).
- 10 Справочник по лазерам. /Под ред. А.М. Прохорова. В 2-х томах. М.: Советское радио, 1978. т.1-504 с., т.2-400 с.

- 11 И.В. Тимофеев, В.П. Тимофеев, Д.А. Бадаев. Концентрированные потоки энергии и физические основы их генерации. Метод. указ.к практ. занятиям. Красноярск, 2007, 54с.
- 12 А. Мэйтленд, М. Данн. Введение в физику лазеров, М., Наука, 1978, 408с.
- 13 Г.М. Зверев, Ю.Д. Голяев, Е.А. Шалаев, А.А. Шоктн. Лазеры на алюмоиттриевом гранатом с неодимом, М. радио и связь, 1985, 144с.
- 14 Химические лазеры, под ред. Р. Гросса и Дж. Ботта, пер. с англ.. М., 1980
- 15 Химические лазеры, под ред. Н. Г. Басова, М., 1982
- 16 Басов Н. Г., Ораевский А.Н., Химические лазеры, в кн.: Наука и человечество, М., 1983, с. 259 73.
- 17 Т.Х. Hüseynov. Fizika üzrə e. d. avtoreferatı, 2018.

Mündəricat

Ön söz.....	3
-------------	---

Giriş.....	6
------------	---

FƏSİL I . QAZ LAZERLƏRİNDƏN ÜMUMİ

MƏLUMAT	20
§ 1.1. Qaz lazerlərinin işçi maddələri.....	20
§ 1.2. Atomların enerji səviyyələri	22
§ 1.3. Qeyri-elastiki qarşılıqlı təsir	30
§ 1.4. Lazerlərin fəal mühitinə doldurulma üsulları.....	32
§ 1.5. Qaz boşalmalarda fiziki proseslər.....	35
§ 1.6. Qaz boşalma növləri.....	38
§ 1.7. Aşağı təzyiqli qaz lazerləri.....	39

FƏSİL II ATOMAR QAZ LAZERLƏR.....

§ 2.1. Helium-neon lazer.....	42
§ 2.2. He-Ne lazerinin fəal mühitində qarşılıqlı təsir prosesləri.....	57
§ 2.3. Lazer şüalanmasının generasiyası üçün optimal şərtlər.....	67
§ 2.4. He-Ne lazerində həyəcanlanma mexanizmlərin FİƏ-nin hesablanması.....	73
§ 2.5. He-Ne lazerinin quruluşu.....	74

FƏSİL III İON LAZERLƏR

§ 3.1. Ar lazerin işçi səviyyələri.....	82
---	----

§ 3.2. Həyacanlanma mexanizmlərin	
FİƏ-nin hesablanması.....	84
§ 3.3. Ar lazerinin quruluşu.....	86
§ 3.4. Həyəcanlaşmanın optimal şərtləri.....	88
§ 3.5. Ar lazerinin spektri.....	91

FƏSİL IV MOLEKULYAR LAZERLƏR.....95

§ 4.1. Molekulların spektrləri.....	95
§ 4.2. CO ₂ lazer.....	98
§ 4.3. CO ₂ lazerinin enerji səviyyələri.....	99
§ 4.4. CO ₂ lazerinin FİƏ-1.....	106
§ 4.5. CO ₂ lazerinin spektri.....	109
§ 4.6. CO ₂ lazerinin quruluşu. Müasir	
güclü qaz lazerlər.....	111
§ 4.7. Digər molekulyar lazerlər	119

FƏSİL V. METAL BUXARI ƏSASINDA

LAZERLƏR.....	123
§ 5.1. Metal buxarı əsasında geniş	
istifadə olunan lazerlər.....	123
§ 5.2. He-Cd lazerdə Penning ionlaşması.....	125
§ 5.3. He-Cd lazerində enerji səviyyələrinin	
sxemi	126
§ 5.4. He-Cd lazerinin quruluşu	128
§ 5.5. He-Se lazer, enerji səviyyələri,	
yenidən elektrik yüklənmə.....	129

FƏSİL VI. EKSİMER VƏ KİMYƏVİ LAZERLƏR.....131

§ 6.1. Eksimer molekullar.....	131
§ 6.2. Eksimer lazerlərinin enerji səviyyələri.....	132

§ 6.3. Kimyəvi lazerlər.....	135
§ 6.4. HF-lazer.....	139
 FƏSİL VII QAZ LAZERLƏRİNİN TƏTBİQİ.....	145
§ 7.1. Texnoloji işlənmiş qaz lazerlərinin çıxış xassələri.....	145
§ 7.2. Tibdə lazerlər.....	150
§ 7.3. İnformasiya və kommunikasiya texnologiyalarında lazerlər.....	155
 Nəticə.....	161
Ədəbiyyat.....	164
 Mündəricat.....	166

R.C. Qasimova,
G.Ə. Səfərova

QAZ OPTİK
KVANT GENERATORLAR

Dərslik

Çapa imzalanmışdır XX
Universiteti Nəşriyyatı”, Bakı, AZ 1148, Z. Xəlilov, 23

