КВАНТ ЎРАЛИ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР АСОСИДАГИ ЛАЗЕРЛАР

С.Зайнобидинов, Х.Маматкаримов, Ш.Эрматов, Д.Мамажонова

Мақолада ҳозирги кунда долзарб ва тез ривожланаётган соҳа – квант ўрали ва квант каскадли лазерлар кўриб чиқилган. Гетероқатламли яримўтказгичлардан фойдаланиш лазернинг фойдали иш коэффициенти ва ёруғлик дастаси ихчамлигининг юқори бўлишини таъминлаши кўрсатилган. Бундай лазерларнинг ишлаш механизмлари очиб берилган.

***Калит сўзлар**: квант ўра, гетероструктура, ультраюпқа, мини зона, дуализм*

В статье рассмотрены актуальные сегодня вопросы создания лазеров на квантовых ямах и квантово-каскадных лазеров. Использование полупроводниковых гетероструктур позволяет повысить коэффициент полезного действия и сходимость лазерного пучка. Описаны принципы работы таких лазеров.

***Ключевые слова**: квантовая яма, гетероструктура, ультратонкий, мини зона, дуализм.*

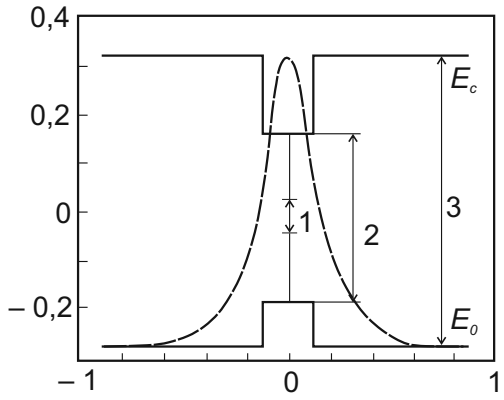
The article considers current issues of creating lasers based on quantum wells and quantum-cascade lasers. The use of semiconductor heterostructures makes it possible to increase the efficiency and convergence of the laser beam. The principles of operation of such lasers are described.

***Key words**: quantum well, heterostructure, ultra-thin, minizon, dualism.*

Биз одатда кўникиб қолган оламни ўраб турган жуда кенг қамровли электромагнит тўлқинлар (ЭМТ) ичида ёруғлик деб аталувчи ажойиб оптик нур борки, у қандайдир манбадан – Қуёшдан, ёритиш лампасидан ёки лазердан чиқаётган бўлиши мумкин. Оптик нурнинг бошқа узун тўлқинли ЭМТлардан фарқи шуки, у магнит майдонида оғмайди ва бир вақтнинг ўзида ҳам тўлқин, ҳам заррача хусусиятига – дуализм табиатига эгалигидир. Ёруғлик нурининг ўзига хос хусусиятларидан аждодларимиз бир неча минг йиллар аввал ҳам фойдаланиб келишган. Яъни ёруғлик инсон мавжудлигининг сув ва иссиқлик каби зарурий тамойилларидан бири бўлган. XX аср бошларида квант механикаси асосларининг яратилиши моддаларда мажбурий нурланиш назариясининг вужудга келишига олиб келди. Шу асосда икки ва ундан ортиқ турдаги молекула ёки атомлардан иборат легирланган қаттиқ жисмлар ёхуд яримўтказгичларда, икки хил таркибли суюқликларда мажбурий нурланиш, яъни лазер нурлари ҳосил қилиш имкониятларини очиб берди [1]. Айтиш керакки, ҳозиргача юқорида келтирилган моддаларда лазер нурланишлари ҳосил қилиш ва нурларнинг параметрларини бошқариш шартлари назарий жиҳатдан асосланиб, амалиётда кўплаб турдаги ҳар хил табиатли нурланишлар ҳосил қилинмоқда. Шунга қарамасдан, ҳаётий эҳтиёжлар нурланишлар ҳосил қилишни яна ҳам чуқуроқ ўрганиш ва, муҳими, лазерлар яратиш технологияларини такомиллаштиришни тақазо қилмоқда [2]. Шундай вазифалардан бири яримўтказгичли иккиланган гетероўтишда (ИГ) бўладиган жараёнларни ўрганишдир. Агар бундай лазер фаол қатлами қалинлигини де Бройл тўлқин узунлиги ($\lambda \approx h/p$)га яқин ўлчамга олиб келинса, бу соҳада квант ўралар ҳосил бўлади. ИГли лазерларнинг бошқа яхлит ҳажмий тузилмалардан фарқли жиҳатларидан бири дифференциал кучайтиришнинг ортиши ва бу кучайтиришнинг ҳароратга боғлиқ бўлмаслигидир. Бунга асосий сабаб, ҳажмий кристаллардан фарқли равишда, квант ўлчамли тузилмаларда ҳолатлар зичлигининг ҳосил бўлиш механизмида ўралар йўналиши бўйича квант чекланишлар бўлишидир [3]. Аммо якка ва кўп квант ўрали қатламлар қалинлигининг кичрайиши туфайли нур дастасининг ихчамлашиш фактори кескин камайиб кетади. Шунинг учун нур дастасининг квант ўра йўналишларида ўлчамини чеклаш учун алоҳида бўлаклаб, чекловчи тузилмалардан фойдаланиш керак бўлади. Шундай тузилмалардан бири 1-расмда кўрсатилган.

GaAs учун 10 нмли квант ўра ва унинг икки ёнида қалинлиги 0,1 мкм бўлган тақиқланган соҳаси E_g каттароқ, демак, синдириш кўрсаткичи кичикроқ бўлган моддадан иборат ички тўсиқ қатламлари улардан кейин яна ҳам қалинроқ (~1мкм) ва E_g си ундан ҳам каттароқ бўлган яримўтказгичли моддадан ташқи тўсиқ қатламлари ҳосил қилинади. Булар худди диоднинг p- ва n- соҳалари каби ишлайди. Бу ҳолатда нур дастасини ихчамлаштириш ташқи қатламларникидан каттароқ синдириш кўрсаткичига эга бўлган ички қатламлар томонидан таъминланади. Бунда дастани ихчамлаштиришни

чеклашга квант ўранинг ҳиссасини ҳисобга олмаса ҳам бўладиган даражада кичик. Бундай тўлқин ўтказувчи тузилма учун нур дастаси жадаллигининг кўриниши расмдаги узуқ-узуқ чизиқ бўлади. Бундан кўринадики, квант ўлчамли қатламнинг қалинлиги нур дастаси кенглигидан кўп марта кичик бўлса ҳам, оптик чеклаш дастанинг ихчамлашиши юқори даражада бўлишини таъминлайди. Бундан эса фаол қатлам қалинлиги d ни камайтириш орқали чегаравий ток зичлиги j_{th} ни камайтириш мумкин деган хулоса келиб чиқади.



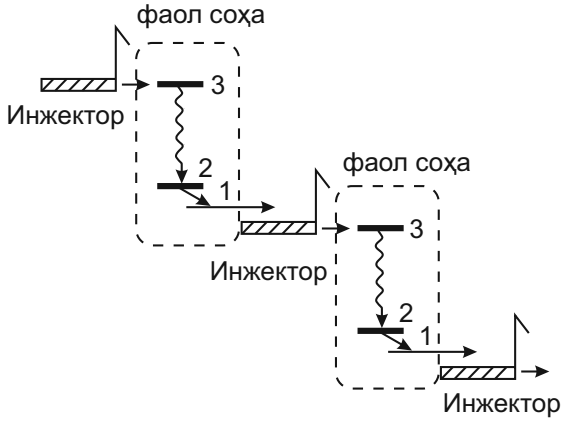
1-расм. *Синдириш кўрсаткичи кескин ва квант ўралари алоҳида чекланишли $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ гетероструктураниng энергетик соҳалари кўриниши. Оптик модда жадаллигининг якуний кўриниши узуқ-узуқ чизиқ билан кўрсатилган. 1- 10нмли квант ўра, 2- 0.1мкмли ички қатлам, 3- 1мкмли ташқи қатлам*

Шундай қилиб, механик кучланишли квант ўралар чегаравий токнинг паст зичликларида аввалари олиб бўлмайдиган тўлқин узунликлардаги лазер нурларини юқори самарадорлик билан ҳосил қилишга имкон беради деган хулоса келиб чиқади. Маълумки, одатдаги диодли лазерлар электрон ва ковакларни ўтказувчанлик ва валент соҳалар орасидаги тақиқланган соҳа орқали нурланишли рекомбинациясига асосланган. Бу ҳолда лазернинг нурланиш энергияси, асосан, фаол модда тақиқланган соҳаси энергияси катталиги билан белгиланади [4]. Ҳатто квант ўрали лазерларда ҳам бу энергияни фазовий ўрам ҳодисалари ҳисобига фақат қисман назорат қилиш ва кўпайтириш мумкин. Бунинг учун зарур бўлган юқори аниқликдаги характеристикали яримўтказгичли лазерлар махсус (III ва V гуруҳ элементлари A^{III}, B^{V}) бирикмалардан иборат гетеротузилмалардан (масалан: In GaAsP/JnP, CaAs/AlGaAs,JnGaN/GaN/AlGaN) ясалади. Бундай лазерлар 0.3÷2 мкм узунликдаги нурланишлар учун яроқли бўлиб, бундан юқори узунликдаги ёруғлик нурлари учун материаллар сифати етарли даражада бўлмаганлиги, оптик йўқотишларнинг ортиб кетиши ва нурланишсиз Оже-рекомбинацияларнинг нур чиқарувчи ўтишларда юқори бўлиши туфайли лазер характеристикалари кескин пасайиб кетади [5].

Квант каскадли (КК) лазерлар, диод асосдаги лазерлардан фарқли равишда, электрон ва коваклар орасидаги ўтишларга эмас, боғланган электрон ҳолатлари, яъни ўтказувчанликнинг минизоналар орасидаги ўтишларига асосланган. Бундай минизоналар ультра юпқа яримўтказгичли тузилмаларда фазовий чегараланиш туфайли ҳосил бўладиган квант ўралардан иборат бўлади. КК лазерлар нурларининг тўлқин узунликларини квант ўралар тузилмаларини ва фаол қатлам тўсиқлари қалинликларини назорат қилиш билан бошқариш мумкин [6].

Ҳозирги замон саноатида ишлаб чиқарилаётган яримўтказгичли материаллар ва гетероструктуралар олиш технологиялари ёрдамида 3-200 мкм тўлқин узунлигидаги лазер нурларини ҳосил қилиш мумкинлиги кўрсатилди ва уни яна ҳам кенгайтириш технологиялари борлиги башорат қилинмоқда.

КК лазерларда ҳар бир электроннинг кетма-кет бир неча босқичлар (каскадлар)дан ўтиб, бирдан кўпроқ фотонлар чиқара олиши ички квант-самарадорлик 1 дан катта бўлиши ва қувватнинг юқори даражада бўлишига олиб келади. Бундан ташқари, ички мини соҳали ўтишлар ток ташувчиларнинг ўта юқори тезликли динамикаси туфайли КК ларнинг қисқа импульсли режимларда жуда тез уланишларига имкон беради. Тадқиқотлар натижасида соддалаштирилган схемаси 2-расмда келтирилган КК лазерлар яратилди.



2-расм. Учта квант ўрали квант-каскадли лазерда мини соҳали тузилма. Тўлқинсимон чизиқлар - нурланишли ўтишлар

Бундай лазер туннел тўсиқ билан чегараланган, ҳар бир инжекция ва фаол соҳадан иборат

кетма-кет босқичлардан ташкил топган. Электр майдони қўйилганда электронлар лазернинг юқори сатҳи бўлган 3-қўзғотилган сатҳга туннелланиш орқали инжекцияланади. У ҳолда квант ўранинг 3- ва 2-сатҳлари орасидаги ўтиш туфайли нурлар генерацияси вужудга келади. Аммо бундай 3→2 ёки 2→1 ўтишлар ўз-ўзидан (спонтан) бўлганда, фотон-фонон ўзаро таъсирлашуви туфайли нурланишсиз бўлади. Агар 2-сатҳдаги электронларнинг яшаш вақти τ_2 ва 3→2 ўтиш вақти $\tau_{3,2}$ бўлиб, $\tau_{3,2}>\tau_2$ шарт бажарилса, бу сатҳлар учун лазер нурланишларини ҳосил қилишнинг муҳим шарти инверс тўлатилганлик ҳолати вужудга келади. Бунинг учун 2- ва 1-сатҳлар энергетик фарқини оптик фонон энергиясига яқин қилиб олиш керак. Бу ҳолда 2-сатҳдан 1-га ўтиш вақти $\tau_{21}\approx$0,2-0,3 пс гача бўлиши мумкин. Демак, 2-сатҳ жуда қисқа вақтда 3-сатҳдан тушаётган электронни қабул қилиб олишга тайёр бўлади. Бунда 3-сатҳга электронлар тўхтовсиз инжекцияланиб турилса ва улар 1-сатҳдан жуда тез чиқариб турилса, 3→2 ўтишда лазер нурланиши ҳосил бўлади.

1-сатҳдан чиқиб кетаётган электронлар кейинги босқич инжекциясига ўтказилиб, юқорида келтирилган жараён такрорланиши мумкин. Кўриниб турибдики, бундай схеманинг самарали ишлашининг асосий тамойилларидан бири 3-сатҳга электронлар инжекциялашининг юқори даражада самарали бўлиши, τ_3 нинг катта ва τ_2 нинг жуда қисқа бўлишидан иборат. Лекин бу жараёнларда инжектордан тўғридан-тўғри 2-сатҳга ўтиш эҳтимоллигини эътиборга олиш керак. Яна бир ҳолат – актив соҳа электронларининг кейинги босқич инжекция соҳасига ўтиши 1-соҳадан туннелланиш самарадорлиги билан чекланган. Шунга кўра, 2-сатҳдан электронларнинг 1-сатҳга ўтиши, демак, 3→2 ўтиш ҳам каскадлараро тунелланиш самарадорлигига боғлиқ бўлган маълум бир чекланишларга эга. Шунга қарамасдан, замонавий технологиялар ёрдамида 20÷100 каскаддан иборат квант ўрали яримўтказгичларнинг юпқа қатламлари асосида 4-9 мкм узунликдаги ИК-соҳали КК лазерлар яратилмоқда. Лекин ҳозиргача бу турдаги мукаммал лазерлар яратилди деб айта олмаймиз. Чунки лазернинг фаол қисми материалларининг катта аниқликдаги параметрларини ҳосил қилиш ва лазерлар технологияларини яна ҳам такомиллаштириш давом этмоқда.

Адабиётлар:

1. Альферов Ж.И. Нанотехнологии.- М.: Магистр-пресс, 2011.- 268 с.

2. Звельто О. Принципы лазеров.- М.: Мир, 1990.- 717 с.

3. Богатаев А.П., Иолгинов Л.М., Дружинина Л.В. и др. Гетеролазеры на основе твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}As_y$ и $P_{1-y}Al_xGa_{1-x}Sb_yAs_{1-x}$. // Квантовая электроника.- 1974., Т.1.- С.2294-2297.

4. Мириноятов М.М. Лазер физикаси ва техникаси.- Т., 2009.- 84 б.

5. Альферов Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.И. и др. Инжекционные свойства гетеропереходов n-Al_xGa_{1-x} As-p-GaAs ФТП. 1968 г., Т.2. стр. 1016-1020.

6. J.Fast, F.Capasso, et el. Quantum cascade lazer. Science, 1994, pp. 553-557.

7. Каримов И.Н., Эрматов Ш., Носиров М.З., Абдуазимов В.А. Лазер физикаси ва техникаси.- Андижон, 2016.- 188 б.

Андижон давлат университети,
2017 йил 15 ноябрда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. И.Каримов)