УДК 621.315.592
DOI 10.58649/1694-9099-2026-1-153-158

КАДЫШЕВ С.
Ж. Баласагын атындагы КУУ
КАДЫШЕВ С.
КНУ имени Жусупа Баласагына
KADYSHEV S.
KNU Jusup Balasagyn

“МИКРО ЖАНА НАНОЭЛЕКТРОНИКА ТЕХНОЛОГИЯСЫНЫН АТАЙЫН МАСЕЛЕЛЕРИ” КУРСУНДА ЛАЗЕРДИК ЭПИТАКСИЯ ЫКМАСЫН ОКУТУУ ЖӨНҮНДӨ

О МЕТОДИКЕ ПРЕПОДАВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ЭПИТАКСИИ В РАМКАХ КУРСА «СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ»

ON TEACHING THE METHOD OF LASER EPITAXY IN THE COURSE "SPECIAL ISSUES IN MICRO-AND NANOELECTRONICS TECHNOLOGY"

Кыскача мүнөздөмө: Макалада лазердик эпитаксия технологиясын колдонуу менен A^4B^6 жарым өткөргүч группасынын (PbTe, PbSe, PbS, SnTe, SnSe, SnS) кош жана үч компоненттүү эпитаксиалдык катмарларынын өсүү процесстерин түшүндүрүүнүн айрым маселелери келтирилген**.** Лазердик эпитаксия ыкмасын колдонуу менен A^4B^6 жарым өткөргүч материалдарынын супер торчолуу структураларын өстүрүү учурунда пайда болгон кээ бир өзгөчөлүктөргө көңүл бөлүнгөн. Алгылыктуу электрдик жана оптикалык мүнөздөмөлөргө ээ болгон монокристаллдык торчолорду алуу үчүн студенттер лазердик технологиялык процессти талдап башкарууну билүүсү зарыл, деген тыянак чыгарылган.

Аннотация: В статье рассмотрены отдельные аспекты интерпретации процессов роста двух- и трёхкомпонентных эпитаксиальных слоёв полупроводниковой группы A^4B^6 (PbTe, PbSe, PbS, SnTe, SnSe, SnS) с использованием технологии лазерной эпитаксии. Особое внимание уделено ряду характерных особенностей, возникающих при формировании сверхрешёточных структур на основе указанных полупроводников посредством лазерной эпитаксии. Сделан вывод о необходимости овладения студентами навыками анализа и управления лазерным технологическим процессом для получения монокристаллических структур с требуемыми электрическими и оптическими характеристиками.

Abstract: The article considers individual aspects of interpreting the growth processes of two- and three-component epitaxial layers of the A^4B^6 semiconductor group (PbTe, PbSe, PbS, SnTe, SnSe, SnS) using laser epitaxy technology. Particular attention is paid to a number of characteristic features that arise during the formation of superlattice structures based on the specified semiconductors by laser epitaxy. A conclusion is made about the need for students to master the skills of analysis and control of the laser technological process to obtain single-crystal structures with the required electrical and optical characteristics.

Негизги сөздөр: эпитаксия; лазер нуру; подложкалар; катмарлар; фотондун энергиясы; өсүү ыкмасы; иштөө курамы; кубаттуулук тыгыздыгы; технология; кристаллдашуу.

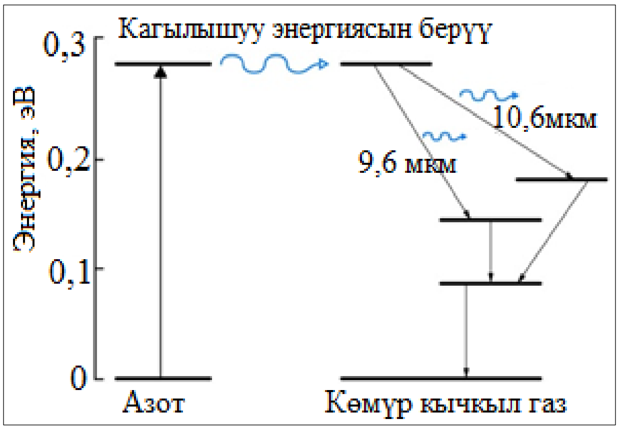
Ключевые слова: эпитаксия; лазерный луч; подложки; слои; энергия фотона; метод роста; рабочий состав; плотность мощности; технологии; кристаллизация.

Keywords: epitaxy; laser beam; substrates; layers; photon energy; growth method; working staff; power density; technologies; crystallization.

“Микро жана наноэлектроника технологиясынын атайын маселелери” курсунда жарым өткөргүчтөр технологиясында кремнийден Күн элементтерин өндүрүү маселелери жана эпитаксиалдык катмарларды өстүрүүнүн – молекулярдык нур эпитаксиясы жана газдык фазадан МОС гидриддик өсүү ыкмаларына [1; 3] макалаларда кеңири токтолгонбуз. Сунушталган макалада жогоруда каралган ыкмаларга салыштырмалуу оңой жана каражатты аз талап кылган, CO_2 – лазеринин нурдануусу колдонулган, лазердик ыкманын жардамы менен A^4B^6 жана A^2B^6 жарым

өткөргүчтөрүнүн жука катмарларын өстүрүү жолдоруна студенттердин (690100 - Электроника жана наноэлектроника багытында билим алган) көңүлүн бөлүп, алынган материалдардын физикалык касиеттерин аныктоо ыкмалары менен изилденген параметрлерди анализдөөгө кеңирирээк токтолуу зарыл. Анткени бул багытта билим алган студенттер окуу процессинин VI семестринде “Электрониканын материалдарынын физикалык параметрлерин аныктоонун ыкмалары” аталыштагы курсту(көлөмү 3 кредит) окушат.

Лазердик технологияда CO_2 -лазери – көмүр кычкыл газында активдүү чөйрөсү бар лазер (1-сүрөт). Анын иштөөсүнүн негизги принциби азот (N_2) молекулаларын колдонуу менен дүүлүктүрүү энергиясын (CO_2) газынын молекулаларына өткөрүп берүү болуп саналат. Бул принцип CO_2 молекуласынын термелүү жана айлануу деңгээлдеринин ортосундагы өтүү касиетине негизделген. CO_2 – лазери генерациясы 0001 жана 1000 деңгээлдеринин ($\lambda \cong 10{,}6$ мкм) ортосундагы өтүүдө пайда болгон нурдануунун негизинде иштейт. Жогоруда белгиленген жагдайларды жана азот молекулалары өз кезегинде CO_2N_2He газдарынын аралашмасы болгон газ чөйрөсүндө электр разрядынын электрондору менен дүүлүктүрүлө тургандыгын студенттерге түшүндүрүү зарыл.



1-сүрөт. CO_2-лазеринин нурдануусунун схемасы

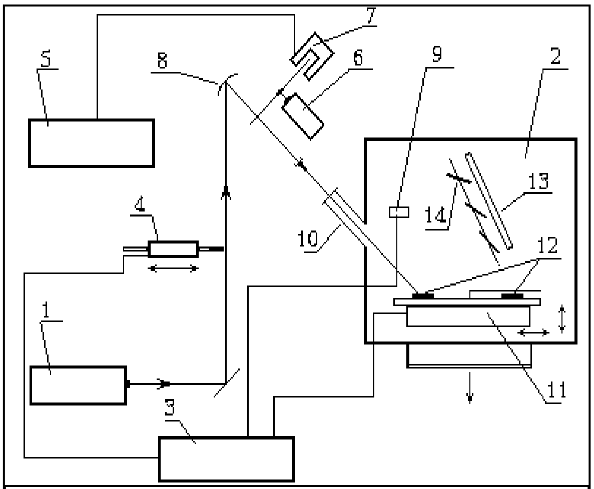
Жарым өткөргүчтөр технологиясынын эпитаксиалдык катмарларды өстүрүү ыкмаларына коюлган талаптар, алардын негизги касиеттеринин кайталануучулугу жана алардын параметрлеринин кеңири топтомун башкара билүүгө байланыштуу. Салттуу жана жакшы иштелип чыккан ыкмалардын арасында, коюлган технологиялык талаптарды канааттандыруучулардын катарына лазердик эпитаксия ыкмасы да кире тургандыгын белгилеп коюу абзел.

Жарым өткөргүч кристалл-бутаны буулантуу үчүн колдонулган лазер нурдануулары, фотондун энергиясы боюнча эки диапазонго бөлсө болот: а) кубаттуулук тыгыздыгы ($W > 10^6$ Вт/см^2) жана $\hbar\omega > E_g$ шарты (мында, E_g – жарым өткөргүчтүн тыюу салынган тилкенин кеңдиги, $\hbar\omega$ – фотондун энергиясы) аткарылган спектралдык диапазондогу импульстук Nd:Glass - лазери (λ_{Nd} = 1,06мкм.) колдонулуп, шарттуу түрдө лазердик молекулярдык эпитаксия (ЛМЭ), деп аталат; б) кубаттуулук тыгыздыгы $W = 0.5 \div 9{\times}10^4$ Вт/см^2, $\hbar\omega < E_g$ шарты аткарылган, фотондун энергиясы $\hbar\omega = 0.118$эВ (λ_{CO2}=10,6мкм.) болгон CO_2-лазеринин модуляцияланган нурдануусу колдонулуп, шарттуу түрдө лазердик квазиүзгүлтүксүз (квазинепрерывный) эпитаксия (ЛКҮЭ), деп атала тургандыгы студенттерге маалымдалышы абзел .

Лазердик эпитаксиянын эки ыкмасында тең, эң маанилүү параметр болуп лазер нурдануусунун кубаттуулук тыгыздыгы (W) эсептелет. Ошондуктан, катмарлардын өсүү процесстерин Wдан көз карандылыкта карап, бирок кубаттуулуктун өзгөрүүсү менен буулланган заттын жалпы массасынын (M) көбөйүшүнө жараша катмарлардын өсүү ылдамдыгынын чоңойушу жана да буу агымынын энергетикалык структурасынын өзгөрүүсү катары кароо зарыл. ЛМЭ ыкмасында импульстук Nd:Glass – лазеринин колдонулушу, нурдануунун кубаттуулук тыгыздыгын багыттуу башкаруу мүмкүнчүлүгү төмөн болгондуктан [4], биз ЛКҮЭ ыкмасынын өзгөчөлүгүн, иштөө принцибин жана өстүрүлгөн катмарлардын кээ физикалык касиеттерин изилдөөлөрдүн жыйынтыктарын студенттерге түшүндүрүүгө токтолобуз.

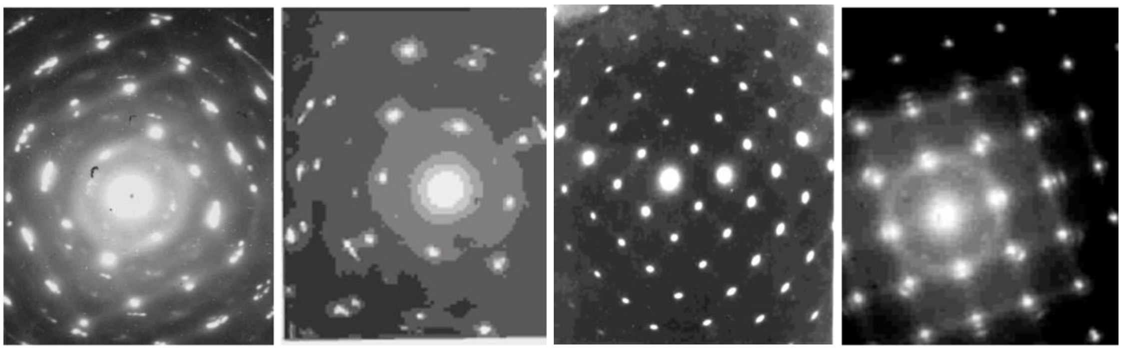
2 - сүрөттө келтирилген ВУП-5М маркасындагы универсалдык вакуумдук тутумдун негизинде ЛКҮЭ ыкмасы колдонулуп түзүлгөн курамдын принципиалдык схемасына, колдонуусуна жана иштөөсүнө студенттердин көңүлүн буруп, ар бир тетиктин зарылчылыгына көңүл буруу зарыл.

Вакуумдук камерадагы (2) басым ≈ 10^{-6} мм. сым мам. барабар. Үзгүлтүксүз CO_2 - лазер (λ_{CO2}=10,6мкм.) нурдануусу (1) механикалык модулятордун (6) жардамы менен 10 < f < 100 Герц жыштыкта модуляцияланат. Кристалл - бута (12) катары стехиометриялык составдагы $A^{IV}B^{VI}$ жана $A^{II}B^{VI}$ группаларынын монокристаллдарынын жана алардын катуу эритмелеринин ≈ 15мм – диаметрдеги, ≈ 1мм – калыңдыктагы шайбалары колдонулат. Эпитаксия процессинде буталардын бетинде кратерлердин пайда болушуна жол бербеш үчүн, алар айлануу кыймылына келтирилет. Кристалл - бутага фокусталган лазер нуру анын бети боюнча сканирленет. Сканирлөө кадамы (шаг), бутаны ар-бир чекитте буулантып - чачыратуу убактысы жана кристалл - бутанын өз огунда айлануу ылдамдыгы, программаланып компьютер (3) тарабынан башкарылат. Сканирлөө X - Y же спиралдык геометрияда аткарылат. Сканирлөө учурунда бутадагы чектеш зоналардын бири-бирине дал келүүсүнө жол берилбейт жана лазер нурунун таасири токтогондон кийин, чекиттин температурасы баштапкы деңгээлге чейин түшүүсү үчүн жумушчу цикли тандалган.



2 - сүрөт. 1– CO_2 - лазер; 2 – вакуумдук камера; 3 – компьютер; 4 – механикалык прерыватель; 5 – осциллограф; 6 – модулятор; 7 – жыштык ченегич; 8 – ИК күзгү; 9 – калыңдык ченегич; 10 – ИК терезе; 11 – X, Y- сканер; 12 – кристалл - буталары; 13 – ысыткыч; 14 – подложкалар.

Эпитаксиялык катмар өсүүчү подложкалар үчүн жогорку тазалыктагы KCl, KBr, LiF, BaF_2,

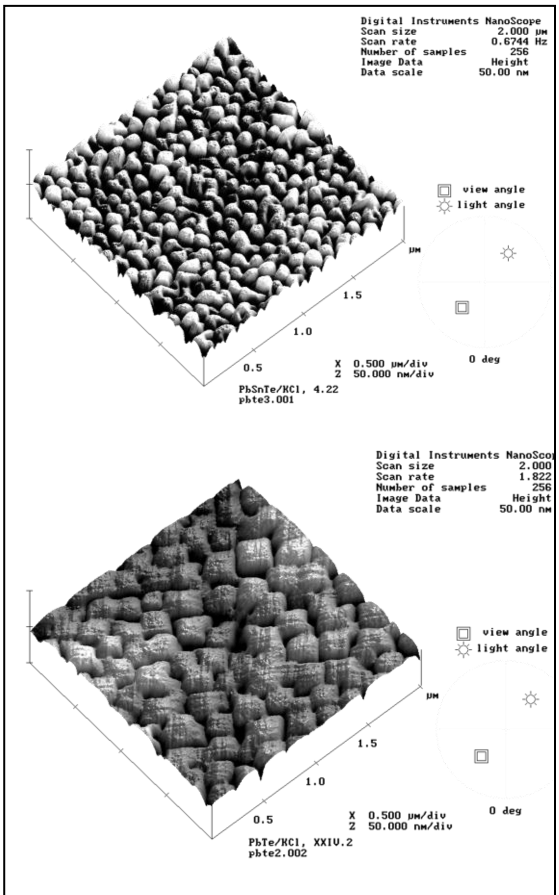


3 - сүрөт. Температура (T = 373K) жана бутадагы кубаттулуктун тыгыздыгы (катары менен) W = 0.5; 1.5; 5; 9 ×10^4 Вт/$см^2$ шартында өстүрүлгөн PbTe/KCl катмарынын электронограммалары [5.6]

PbTe, CdTe, Si ж.б. монокристаллдык материалдардын пластиналары пайдаланыла тургандыгына студенттердин көңүлүн буруу менен бутадан подложкага чейинки аралыктын (r) өзгөрүшү өсүү ылдамдыгына, лазердик эрозиондук факелдин (бууланган заттын факелинин) энергетикалык структурасына таасир тийгизүүчү фактор болуп саналып, подложканын температурасы T_{Sub} (өсүү учурунда беттин температурасы эмес) технологиянын талаптарына ылайык туруктуу сакталышы керектигин жана ошол эле учурда конденсация ылдамдыгынын мааниси катмардын калыңдыгынан (in situ) жана конденсация убактысынан ($\tau_к$) бир аз айырмаланган өсүү импульсунун узактыгы (лазердик нурдануу $\tau_{имп}$ = (0,5÷3)·10^{-3} сек.) боюнча аныкталаарына өзгөчө токтолуу керек.

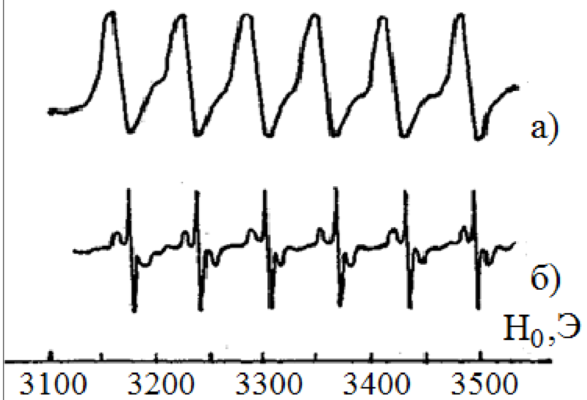
PbTe/KCl катмарларынын ар бир структуралык зоналарга мүнөздүү электронограммасынын үлгүлөрү 3 - сүрөттө келтирилген.

Изилденген кубаттуулуктун тыгыздыгынын интервалында катмарлар жакшы текстураланган жана өнүккөн (001) ориентациядагы структурага ээ. CO_2 - лазер нурунун кубаттуулук тыгыздыгынын кичине маанилеринде $0.5 \le W \le 2{\cdot}10^4$ Вт/см^2 катмарлар жакшы текстурага жана (001) ориентацияга ээ болот, бирок монокристаллдык абалына жете элек (подложканын беттик температурасы монокристаллдык катмар өсүүчү чектеги мааниге ээ). $W \ge 5{\cdot}10^4$ Вт/см^2 маанилеринде подложканын беттик температурасы монокристаллдык катмар өсүүчү чекте жайгашып, өсүү механизмине лазердик эрозиондук факелдин жогорку энергетикалык бөлүктөрү таасир бере тургандыгын белгилеп кетүү зарыл. 4 - сүрөттө атомдук күч (атомно силовая) микроскопиясынын (АКМ) жардамы менен алынган, калыңдыгы 1,5мкм келген PbTe/KCl катмарынын сүрөттөлүшү көрсөтүлгөн. W = const кезинде төмөнкү $T_{Sub} \le 100°C$ температурадан жогоркуга өтүү, монокристаллдык фазанын жайылышы менен коштолот. Бирок регулярдык кристаллдар пайда болбостон, өлчөмдөрү ≥1000 Å болгон, тыгыз жайланышкан тик бурчтук формасындагы кристаллиттердин пайда болушунун натыйжасында эпитаксиалдык структура түзүлөт. Башкача айтканда, подложканын температурасынын көбөйүшү менен монокристаллдык катмар пайда болууга түрткү берген кристаллиттердин өлчөмдөрү адегенде өсүп, алгач толук эмес, андан кийин иш жүзүндө өлчөмдөрү бирдей кристаллиттер коалесценциясыз пайда болот. Бириүү учурунда коалесценциянын жоктугу, жогорку сапаттагы структуранын пайда болушу менен коштолот, себеби коалесценция түйүлдүктөрдүн баштапкы ориентациясын бузат. Өсүү механизминдеги бардык өзгөрүүлөр катмарлардын электрдик параметрлериндеги өзгөрүүлөр менен түздөн-түз байланышкан. Бул ыкманын негизинде лазер нурунун кубаттуулук тыгыздыгынын ($W \ge 5{\cdot}10^4$Вт/см^2) маанилеринде жана подложканын салыштырмалуу төмөнкү температурасында ($T_{Sub} \le 150°C$), концентрациясы ($n_{77} \le 1{\cdot}10^{17}$см$^{-3}$), ток алып жүрүүчүлөрү жогорку кыймылдуулуктагы ($\mu_{77} = (2{\div}4){\cdot}10^4$см^2/В·с) катмарларды өстүрүүгө болот.



4-сүрөт. PbTe/KCl.катмарынын АКМ сүрөттөлүштөрү [6;7]

Өстүрүлгөн жука катмарлар жетишээрлик монокристаллдык структурага ээ болгондугун такташ үчүн катмарлардын ЭПР спектрлерине кайрылабыз. VARIAN-E-12 спектрометринде, T = 20 K температурада (5-сүрөт) Mn менен легирленген PbTe:Mn монокристаллынын (а) жана аны лазердик буулантуудан пайда болгон жука катмардын (б) ЭПР спектрлери келтирилген. Спектрлер $3d^5$-электрондор менен Mn^{2+} изотобунун ядролук моменти (I = 5/2) өз ара аракеттешүү натыйжасында пайда болгон алты изотроптук жука структуралык (ЖСТ) сызыктардан турат. PbTe:Mn жука катмарларынын спектрлеринде бул алты ЖСТ сызыктан тышкары, ар бир сызыктын жанында кошумча сызыктар байкалат [8]. Алар $3d^5$-электрондор менен координациялык сферадагы ядролук спини I = 1/2 болгон теллурдун (Te) ядролук моменттери менен болгон супержука структуралык өз ара аракеттешүү (СЖСТӨА) менен байланыштуу. Мындан тышкары, жука катмарлардагы жука структура сызыктарынын



5-сүрөт. PbTe:Mn монокристаллынын (а) жана аны лазердик буулантуудан пайда болгон жука катмардын (б) ЭПР спектрлери. H_0 – магнит талаасының чыңалышы, Эрстед менен.

жарым-жартылай кеңдиги, монокристаллдардыкына караганда салыштырмалуу азыраак экендигин белгилей кетүү керек. Бул өзгөчөлүк алардын жогорку сапатын жана түзүлүштүк кемчиликтеринин аз экендигин көрсөтөт.

T = 20 K температурада PbTe:Mn жука катмарларындагы Mn^{2+} иондорунун ЭПР спектрлеринин бурчтук көз карандылыгын талдоо, спин-гамильтониандын төмөнкү турактуулуктары колдонулганда теориялык жана эксперименталдык сызыктар эң жакшы дал келерин аныктоого мүмкүндүк берет:

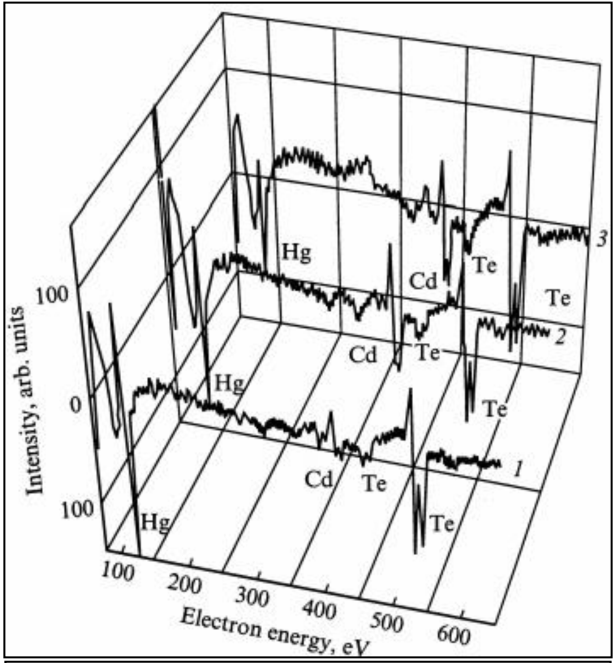
$$g = 1{,}9975 \pm 0{,}0005;\ A = -(60{,}4 \pm 0{,}2) \times 10^{-4} cm^{-1};\ a_{Te} = (15{,}83 \pm 0{,}2) \times 10^{-4}\ cm^{-1}$$

мында: g – спектроскопиялык бөлүнүү фактору; A – өтө так өз ара аракеттешүүнүн турактуулугу; a_{Te}– теллурдун атомдору менен супержука структуралык аракеттешүүдөн пайда болгон турактуулук.

Жогоруда белгиленгендей ЛКҮЭ ыкмасы $A^{II}B^{VI}$ кошулмаларынын дагы эпитаксиялык катмарларын алууга мүмкүнчүлүк берет. 6 - сүрөттө кошумча сымап колдонулбастан, подложканын температурасы 190°С, кубаттуулук тыгыздыгы $10^4 \le W \le 10^5$ Вт/см^2 кезинде алынган $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x = 0.2) эпитаксиялык катмарынын Оже-спектрлери көрсөтүлгөн [9]. $A^{II}B^{VI}$ кошулмаларынын эпитаксиялык катмарларын өстүрүүдө лазер нурунун кубаттулук тыгыздыгы $A^{IV}B^{VI}$ кошулмаларына караганда кыйла жогору экендигин белгилөө зарыл.

Колдонулган тутумда көп катмарлуу гетероструктураларды өстүрүү учурунда буталар ИК – лазер нурунун агымына автоматтык түрдө жылдырылып, алмаштырылып турат.

Окулган лекциянын жыйынтыгында студенттер эс тутумунда калган “Электрондук техниканын материалдары” (2-курс), “Электрониканын физикалык негиздери” (3-курс), “Электрониканын материалдарынын физикалык параметрлерин аныктоонун ыкмалары” (3-курс) аталыштагы курстардын материалдарын эстеп, жаңы материалдарды (курстарды) өздөштүрүүгө кызыгдар болушат, деген үмүт - ойдо каласың.



6-сүрөт. HgCdTe катмарынын Оже - спектрлери:1–монокристаллдык-бутадан алынган катмар; 2 – прессотелген таблеткадан алынган катмар; 3 – монокристалл – бутанын спектри [9].

Колдонулган адабияттар

1. С. Кадышев, Ш. Жусупкелдиев. Кремнийге негизделген күн батареяларын Кыргызстанда өндүрүүнү уюштуруу жөнүндө. Ж.Баласагын атындагы КУУнун Жарчысы, Атайын чыгарылыш, 2023, 62 – 67 б.б.
2. Кадышев С. Об особенностях преподавания МОС-гидридной технологии в курсе “Спец. вопросы технологии микро - и наноэлектроники”. Вестник КНУ им. Ж. Баласагына. №3, 2024, – с. 176 – 181.
3. Кадышев С. МНЭ ыкмасы менен суперкаптамдарды өстүрүүдө өтүүчү процесстерди окутуу жагдайлары. //Кыргызстандагы илим, жаңы технологиялар жана инновациялар. №8, 2024, 82 – 85 б.б.
4. Анисимов С.И., Имас А.Я., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970, 272 с.
5. Пляцко С.В., Кадышев С. Физические свойства тонких пленок PbTe (PbSe), выращенных методом лазерной эпитаксии. // Материалы VIII - Международной научной конференции” Физика твёрдого тела”, 15-17 августа 2004 г., г. Алматы, Республика Казахстан, часть 2, – с. 431 – 437.

6. Пляцко С.В., Кадышев С. Структурные свойства пленок PbTe, полученных в неравновесных условиях методом лазерной эпитаксии на [001] подложках. // Известия НАН КР, №3, 2005, – с. 23 – 29.

7. Пляцко С.В., Кадышев С. К вопросу выращивания эпитаксиальных слоев халькогенидов свинца методом лазерной эпитаксии. // Вестник КазНУ им. аль Фараби, серия физическая, №,1 (21), 2006, – с. 130 – 135

8. Ройцин А.Б., Пляцко С.В., Громовой Ю.С., Климов А.А., Кадышев С.К. Проявление механических напряжений в электронном парамагнитном резонансе гетеросистем на основе соединений $A^{IV}B^{VI}$, легированных примесью марганца. Физика и техника полупроводников, 1992, т. 26, вып.12, – с. 2091 – 2097.

9. Пляцко С.В., Вергуш Н.Н. Лазерная эпитаксия гетероструктур HgCdTe/Si. Физика и техника полупроводников, 2001, том 35, вып. 4, с. 387 – 389.

Рецензент:т.и.к., доцент Кармышаков А.К.