УДК 621.315.592
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-343-349

КАДЫШЕВ С., БАЯЗОВА А.А.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
КАДЫШЕВ С., БАЯЗОВА А.А.
КНУ имени Жусупа Баласагына
S. KADYSHEV, A.A. BAYAZOVA
KNU Jusup Balasagyn

“МИКРО-ЖАНА НАНОЭЛЕКТРОНИКАНЫН ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНЫН СУРООЛОРУ КУРСУНДА” СУПЕРКАПТАМДУУ СТРУКТУРАЛАРДЫ ӨСТҮРҮҮ ПРОЦЕССТЕРИНДЕ ЛЕГИРЛӨӨНҮН ЖОЛДОРУН ОКУТУУГА КАРАТА

К ПРЕПОДАВАНИЮ МЕТОДОВ ЛЕГИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССАХ РОСТА СВЕРХРЕШЁТОЧНЫХ СТРУКТУР В КУРСЕ “ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИЙ МИКРО - И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ”

ON TEACHING METHODS OF DOPING IN THE GROWTH PROCESSES OF SUPERLATTICE STRUCTURES IN THE COURSE “ISSUES OF MICRO- AND NANOELECTRONICS TECHNOLOGIES”

Кыскача мүнөздөмө: Заманбап микро- жана наноэлектрониканын технологияларынын кайсы ыкмасы болбосун, сөзсүз түрдө *p* - жана *n* - түрүндөгү өткөрүмдүүлүккө ээ болгон жука катмарларды өстүрүү талап кылынат. Мындай өткөрүмдүүлүктөгү катмарларды өндүрүүдө ар түрдүү группаларга таандык жарым өткөргүчтөр үчүн легирлөөчү элементтер көп түрдүү болушат жана технологияларга жараша айырмачылыктары дагы көп болот. Сунушталган макалада молекулярдык нур эпитаксиясы, газдык фазадан эпитаксия, лазердик эпитаксия учурларында керектүү өткөрүмдүүлүккө ээ болгон жука катмарларды алуу үчүн легирлөөчү кошундуларды колдонуу жолдору тастыкталган.

Аннотация: Любой метод современных технологий микро- и наноэлектроники обязательно требует выращивания тонких слоёв с p- и n-типом проводимости. Легирующие элементы для полупроводников разных групп, используемые для получения слоёв с требуемой проводимостью, весьма разнообразны и ещё более различаются в зависимости от технологии. В представленной статье показано применение легирующих примесей для получения тонких слоёв с требуемой проводимостью в случаях молекулярно-лучевой, газофазной, лазерной эпитаксии и др.

Abstract: Any method of modern micro- and nanoelectronics technologies necessarily requires the growth of thin layers with p- and n-type conductivity. Doping elements for semiconductors of different groups used to obtain layers with the required conductivity are very diverse and differ even more depending on the technology. The presented article shows the use of alloying compounds to obtain thin layers with the required conductivity in cases of molecular beam, gas phase, laser epitaxy, etc.

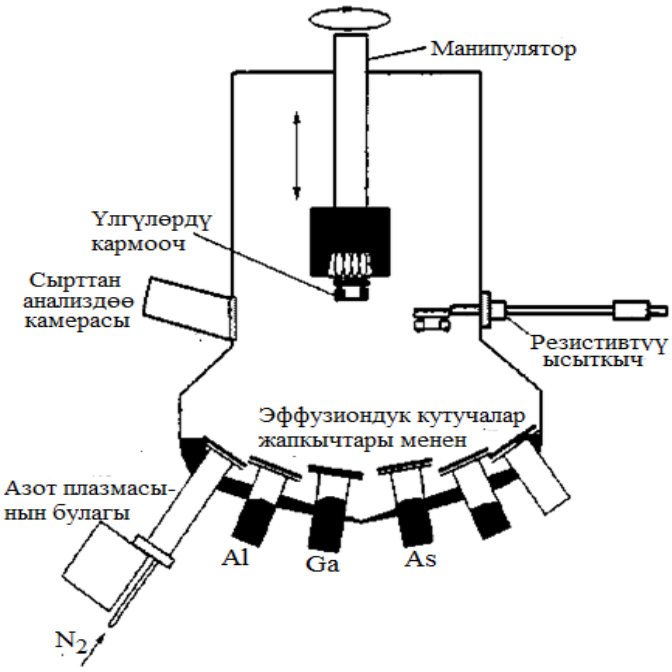
Негизги сөздөр: молекулярдык-нур эпитаксиясы; газ фазасынан эпитаксия; легирлөө; суперторчо; өсүү ыкмасы; донордук кошундулар; акцептордук кошундулар; реакция; технология; кристаллдашуу.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия; газофазная эпитаксия; легирование; сверхрешётка; метод роста; донорные примеси; акцепторные примеси; реакция; технология; кристаллизация.

Keywords: molecular beam epitaxy; vapor-phase epitaxy; doping; superlattice; growth method; donor impurities; acceptor impurities; reaction; technology; crystallization.

Жусуп Баласагын атындагы КУУнун физика жана электроника факультетинин ”Электроника жана наноэлектроника” багытында билим алган студенттерге “Микро-жана наноэлектрониканын технологияларынын сүроолору” курсунда (IV курс, VII семестр) опто - микро- наноэлектроника приборлорунун активдүү элементтеринде катуу заттуу монокристаллдардын ордуна монокристаллдык жука (эпитаксиялык) катмарларды кеңири колдонууга өтүү жолдору жана технологиялары окутулат. [1] макалада металл органикалык бирикмелердин (МОБ) - гидриддик технология ыкмасын “Микро-жана наноэлектрониканын технологияларынын сүроолору” курсунда окутуунун өзгөчөлүктөрү жөнүндө сөз болгон.

Монокристаллдык жарым өткөргүч материалдын бетине бөлөк жарым өткөргүчтүн монокристаллдык катмарынын багытталган өсүү процесси, эпитаксия деп аталып, электрониканын жарым өткөргүчтөр технологиясында жана опто- нанотехнологияда кеңири колдонуулары курстун баштапкы лекцияларында маалымдалышы керек. [2] эмгекте жарым өткөргүч материалдардын эпитаксиялдык катмарларынын өсүү процесстери газдык (буу) фазада, суюк же катуу фазада өткөндүктөн, металл органикалык бирикмелерден (МОБ) эпитаксия (кээ бир илимий булуактарда газдыкфазалык эпитаксия (ГФЭ)), суюк фазалык эпитаксия СФЭ), молекулярдык нур эпитаксия (МНЭ) жана лазердик эпитаксия (ЛЭ) болуп бөлүнүшөөрү баяндалып, өсүп жаткан катмар менен подложканын составдары дал келишсе, процесс гомоэпитаксиялык, ар-түрдүү болсо гетероэпитаксиялык деп аталаары белгиленген. Ошондой эле, жогорку монокристаллдык жеткиленгиктеги эпитаксиалдык катмарларды алуу үчүн катмарларды өстүрүү процессинде подложканын бетинин тазалыгы, процесстин температурасы жана материалды жалгаштыруу (нанесение) ылдамдыгы каралып жаткан технологиялардын негизги маанилүүлүктөрү болуп эсептелери жана өсүп жаткан катмар подложканын параметрлерин толугу менен кайталай тургандыгы, б. а. катмардын кристаллдык торчосу жана ориентациясы подложканын структурасы менен ориентациясына дал келүүчүлүгү каралган. Жогоруда айтылган тезистер студенттерге жеткиликтүү деңгээлде түшүндүрүлүп, эпитаксиянын белгиленген технологияларын пайдаланып, ар түрдүү легирлөөчү кошундулардын жардамы менен p- жана n- өткөрүмдүүлүктөргө ээ болгон катмарларды өндүрүү жолдоруна көңүл бөлүнөөрүнө студенттердин көңүлүн бөлүү зарыл.



1 - сүрөт. $Al_xGa_{1-x}As$ – GaAs гетероструктурасын молекулярдык – нур эпитаксия ыкмасы менен өстүрүү тутумунун схемалык түзүлүшү.

Лекциянын негизги материалдарына өтүүдө наноэлектрониканын технологиясында биринчилерден болуп колдонулуп, негизгилерден болуп калган “Молекулярдык нур эпитаксия” (МНЭ) менен (1-сүрөт) Ge_xSi_{1-x}/Si суперкатмарларын өндүрүүнү мисал катары караса болот. Студенттерди МНЭ түзүмүнүн иштөө принциптери менен тааныштырып, жогорку тазалыктагы, электрондук кремний жана германий ар бир элемент үчүн керектүү параметрлер коюлган өзүнчө

эффузиондук кутучаларга жайгаштырылып, (100) багытында тандалган кремний подложкасында өстүрүлөөрүнө токтолуу керек.

Мурда жүргүзүлгөн изилдөөлөр көрсөткөндөй [3; 4], талап кылынган параметрлерге ээ болгон суперкаптамдарды өстүрүү үчүн, башкача айтканда, дислокациялардын пайда болушунун критикалык калыңдыгынан ашкан эпитаксиалдык катмарларда дислокациялардын жаралышын натыйжалуу кечеңдетүү максатында подложканын температурасын 823 K аймагында орнотуу талап кылынат. Теориялык жактан МНЭ ыкмасы менен өстүрүлгөн легирленген Ge_xSi_{1-x} суперкаптамдардын физикалык касиеттери [5-8] эмгектерде кеңири изилденген.

Адабиятта [2] белгиленгендей легирленген суперкаптамдарды өстүрүүдө жогорку тазалыктагы легирлөөчү элементтер негизги элементтердей эле өзүнчө кутучаларга жайгаштырылат. Бул учурда эң негизги көйгөй – МНЭ, МОБ (ГФЭ), СФЭ жана ЛЭ процесстеринде өзгөрүп турган легирлөө деңгээлин так контролдоо болуп саналат. Өсүп жаткан катмарларды легирлөөнүн үч жолу: 1) легирлөөчү материалды кошумча булактан буулантуу, 2) кошулманы ошол материал менен легирленген Si булагын буулантуу, 3) өсүү учурунда жай иондорду имплантациялоо жолдору колдонууларына студенттердин көңүлдөрүн буруу зарыл.

МНЭ ыкмасында кремнийдин, германийдин жана алардын катуу эритмелеринин n-тип өткөрүмдүүлүктөгү суперкаптамдарын өндүрүү үчүн мышьякка (As) жана фосфорго (P) караганда буусунун басымы төмөн жана химиялык жактан активдүүлүгү аз сурьма (Sb) кошунду катары колдонууларын, ал эми галлий (Ga), аллюминий (Al) жана индий (In) элементтерин p – өткөрүмдүүлүктөгү кошунду катары колдонсо болоорун, бирок алардын ичинен галлий гана кремний жана германийдин катмарларында кошулмалуу профилди түзүп, подложканын $873^{O}K \div 1073^{O}K$ температура аймагында жана $10^{14} \div 5 \cdot 10^{17} см^{-3}$ кошулма концентрацияга чейин, легирлөөчү элемент жайгашкан эффузиондук кутучанын температурасын өзгөртүү менен оңой көзөмөлгө алынаарын студенттер билүүсү зарыл. $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ жарым өткөргүчтөрүнүн кошумча булактан легирленген катмарларын өстүрүүдө дагы Si, Ge жана алардын катуу эритмелерин үчүн кеңири колдонууга ээ болгон **М**НЭ ыкмасы колдонулат [2].

Жарым өткөргүч электрондук приборлордо колдонулган материалдардын ичинен кремнийден көп колдонулган материалдарга $A^{III}B^{V}$группасынын монокристаллдык кошулмалары GaAs(Sb,P), InAs(Sb,P), AlAs(Sb,P) жана алардын катуу эритмелери кирет. Бул материалдардын негизинде ар түрдүү параметрге ээ болгон көп катмарлуу күн элементтеринде колдонулуучу диоддор (мисалга космостук аппараттарда кеңири колдонууга ээ болгон $In_xGa_{1-x}As$ катуу эритмесинин катмарларын монокристаллдык GaAs подложкасынын бетине In (индийди), Ga (галлийди) жана ашыкча сандагы As_4 багыттоо менен өстүрсө болот. Индий менен галлийдин жабышуу коэффициенти бирге жакын болгондуктан, эпитаксиялдык катмардын курамын In менен Ga элементтеринин агымынын тыгыздыгын өзгөртүү менен оңой эле ишке ашырса болот. МНЭ ыкмасында бирикмелерди легирлөө, керектүү кошулуучу элемент жайгашкан, кошумча эффузиондук кутучанын жардамы менен жүргүзүлөт. Өстүрүлгөн катмарлардын электрдик, оптикалык касиеттери негизинен эки фактор менен аныкталат. Биринчиден, өзгөчө белгилөө керек, катмардын негизги элементтеринин агымы көп кезинде, ал касиеттер өсүү бетинде легирлөөчү атомдордун агымынан, алардын жабышуу коэффициентинен, беттеги жашоо убактысынан көз каранды. Экинчи фактор - бул аралашмалардын торчого чыныгы жайгашуу мүнөзү жана алардын электрдик активдүүлүгү. Эпитаксиянын бөлөк ыкмаларында колдонулган легирлөөчү кошундулар МНЭ үчүн көпчүлүк учурларда жараксыз. Бул ыкмада өсүү параметрлеринин бардык диапазонунда, жабышуу коэффициенти бирге барабар болгон материалдар гана ийгиликтүү колдонулат. Конкреттүүлүк үчүн, студенттерге GaAs мисалына кайрылуу зарыл. $A^{III}B^{V}$ жарым өткөргүчтөрүнүн p – тип өткөрүмдүүлүккө ээ болгон катмарларын өстүрүүдө төрт акцептордук элемент колдонулат: Zn+(иондошкон цинк). Mg (магний), Be (бериллий) жанаGe (германий).

Булардын ичинен концентрациясы $2\cdot10^{20}см^{-3}$, жеткиликтүү беттик морфологияга ээ болгон, p-GaAs легирленген катмарды алуу үчүн Be ыңгайлуу лигатура болоорун студенттерге түшүндүрүү керек.

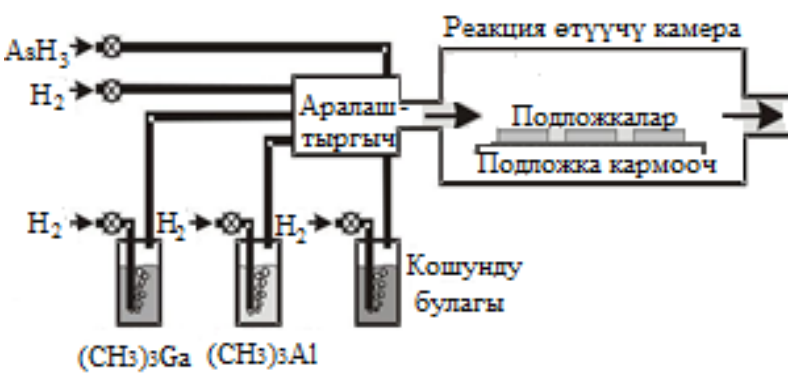
МНЭ технологясынын жардамында n-тип өткөрүмдүүлүктөгү GaAs катмарларын үч түрдөгү донордук кошундуларды (кремний (Si), германий (Ge) жана калай (Sn)) колдонуп өстүрсө болот. Булардын ичинен GaAs катмарлары үчүн эң ыңгайлуусу калай (Sn), анткени анын компенсирленүү даражасы өтө кичине болгондуктан торчодогу активдүү донорлордун концентрациясы молекулярдык нурдагы Sn агымына түз пропорционалдуу жана $5\times10^{19}см^{-3}$кө чейин оңой эле жеткирилет. Бирок калайдын МНЭ учурунда өсүп жаткан GaAs бетинде топтолуу жөндөмдүүлүгү бирден-бир олуттуу жетишпеген жагы болгондуктан $A^{III}B^{V}$ жарым өткөргүчтөрү үчүн эң активдүү изилденген жана пайдаланылган донорлук кошунду кремний (Si) болуп эсептелет [2].

A^2B^6 группасынын жарым өткөргүчтөрүнүн ичинен кадмий теллуриди (CdTe), анын кристаллдык торчосуна марганец (Mn) атому кошулган жана тыюу салынган тилкесинин кеңдиги *x* ке карата өзгөрүүгө дуушар болгон $Cd_{1-x}Mn_xTe$ спиндүү (жарым-магниттик) жарым өткөргүч суперкаптамдарды түзүү үчүн кызыктуу материал болуп эсептелет.

CdTe жарым өткөргүчүнүн монокристаллынын торунда Mn иондорунун болушу алардын локалдаштырылган магниттик моменттери менен өткөргүч электрондордун ортосунда спин-спиндик алмашуу аракеттенишүүлөрү орун алаары [9-10] эмгектерде белгиленип, $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (x = 0,06 ÷ 0,50) жана CdTe (111) катмарларынан түзүлгөн суперкаптамдар **М**НЭ ыкмасын колдонуп, ар кандай түрдөгү GaAs, $A1_2O_3$, CdTe подложкаларында ийгиликтүү өстүрүү мүмкүнчүлүктөрү тастыкталаган. Ошондой эле CdTe дан башка подложкалар GaAs (100) багытта, $A1_2O_3$ (0001) багытта болгондуктан, бул подложкалардын бетине алдын-ала калыңдыгы 2÷5 мкм болгон CdTe (111) багытка ээ болгон буфердик катмары өстүрүлүүсү зарыл. Жыйынтыгында суперкаптамдар дагы (111) багытта өсөт.

[2] де белгиленгендей МНЭ ыкмасы менен өстүрүү, адатта, подложканын температурасы 580^O Кге жакын, 0,1 ÷ 0,2 нм/с ылдамдыкта жүргүзүлөт. Эң жөнөкөй учурда, эки эффузиондук кутучасы аркылуу молекулярдык нур түзүлөт: алардын бири вакуумда тазаланган Mn (болжол менен 1120^OКге чейин ысытылат), ал эми экинчисинде 6 тогуздуктагы (99,9999) тазалыктагы CdTe (болжол менен 600^OКге чейин ысытылат). Жогорудагы өсүү шарттары, CdTe катмарлары менен пайда болгон калыңдыгы 1,6нм кванттык чуңкурчалар, калыңдыгы 2,1нм болгон $Cd_{0,75}Mn_{0,25}Te$ тоскоолдук катмарлары менен [9-10] курчалган жогорку сапаттагы 240-мезгилдүү CdTe/$Cd_{1-x}Mn_xTe$ суперкаптамдарын өстүрүүгө мүмкүндүк бereерин, бул суперкаптамдардын жогорку сапаты рентгендифракциялык изилдөөлөрү менен гана эмес, ошондой эле фотолюминесценциянын эң жарык спектрлери менен тастыкталгандыгын студенттерге түшүндүрүү зарыл. МНЭ технологиясы менен өстүрүлгөн теллурид кадмий суперкаптамынын люминесценттик нурлануусу, жылмаланган (полированный) беттүү CdTe монокристаллынын жана $A1_2O_3$ (сапфир) беттеринде өстүрүлгөн эпитаксиалдык катмарларында байкалган нурлануудан эки эсе чоң болоорун жана гетерочектердеги экситондордун локалдашуусу менен байланышкан [10] фотолюминесценциянын интенсивдүүлүгүнүн жогорулашына студенттердин көңүлүн бөлүп, мындай суперкаптамдардын заманбап оптоэлектроникада жана интегралдык оптикада кеңири колдонууга ээ болгондугуна токтолуу керек.

A^3B^5 жарым өткөргүчтөр группасынын, мисалы триметилгаллий $(CH_3)_3Ga$ органометаллдык кошулмасы менен мышьяк гидридинин (арсин) AsH_3 газ аралашмасынын H_2 атмосферасында 600 - 700°C



2 - сүрөт. МОБ – гидрид технологиясында $GaAs - Al_xGa_{1-x}As$ суперкаптамдарын өстүрүү түзүмүнүн схематикалык сүрөттөлүшү

температурада ачык реактордо реакция жүргүзүү менен жука GaAs эпитаксиалдык катмарларын МОБ - гидрид ыкмасы менен өстүрүү мүмкүн экендигин [11] 2-сүрөттө көрсөтүлгөн схеманын жардамында түшүндүрүү зарыл.

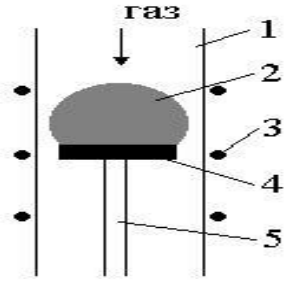
Реакция процессине катышкан бир тектүү газдардын аралашмасы суутектин молекуласы H_2 (ташуучу газ) менен муздак дубалдуу реактордо жайгашкан ысык подложканын үстүнөн өткөрүү жолу менен кристаллдашат (2 - сүрөт). Алынган катмарлардын көпчүлүк касиеттери өсүү учурундагы температурага сезимтал болбогондуктан, андагы кичине өзгөрүүлөр анчалык мааниге ээ болбосо дагы подложкалардын температурасын көзөмөлдөп туруу керек [12].

Алынган натыйжалардын кайталануучулугун камсыз кылуу үчүн ар бир булактан келген газ компоненттеринин парциалдык басымдары, алардын агымдарынын ылдамдыгы электрондук тутумдун жардамы менен көзөмөлдөнүп, башкарылат. Каралып жаткан технология жарым өткөргүчтөрдүн көп компоненттүү катмарларын өндүрүүдө негизинен метиллүү жана этилдүү металлорганикалык кошулмалар колдонулаарын, өсүп жаткан эпитаксиалдык катмарды легирлөө, газдын агымына тиешелүү легирлөөчү кошундуну (реагентти) киргизүү менен жүргүзүлөөрүн жана бул реагент катмарды түзгөн негизги курамдар сыяктуу эле, чектик катмар аркылуу диффузияланаарын, кристаллдык торчого кошундулардын тизилүүсү, подложканын бетиндеги реакциялар (адсорбция - десорбция же беттеги катализ) же болбосо реагенттердин термохимиясы аркылуу аныкталаарын, окутуучу кенен түшүндүрүп, студенттерге жеткирүү зарыл. Булардан сырткары студенттер $A^{III}B^{V}$ кошулмаларын p-тибиндеги кошундулар менен легирлөө үчүн металлорганикалык реактивдер (DEZn $Zn(C_2H_5)_2$, $Cp_2Mg(C_5H_5)_2$, ал эми гидриддер (H_2Se), (SiH_4) n-типтүү кошундулар менен легирлөө үчүн колдонулаарын, металлорганикалык булактардан легирлөөдө, кошундулардын агымы беттик кинетика менен чектелеерин, кээ бир n-тибиндеги кошундулар менен легирлөөнүн натыйжалуулугу (атап айтканда, SiH_4 менен легирлөө) колдонулган гидриддердин термохимиясы менен чектелерин [2] студенттер билүүсү зарыл.

Мындан сырткары химиялык элементтердин III группасынын нитриддеринин (A_3N) p-тип өткөрүмдүүлүктөгү жука катмарларын МОБ – гидрид технологиясынын негизинде өндүрүүдө бисииклопентадиенил магний [$Mg(C_5H_5)_2 Cp_2$] гана колдонууларын белгилеп кетүү зарыл [13-15].

Адабиятта [2] белгиленгендей лазердик эпитаксия (ЛЭ) ыкмасы негизинен A^4B^6 жана A^2B^6 жарым өткөргүчтөр группаларынын жана алардын катууэритмелеринин эпитаксиялык катмарларын өндүрүүдө колдонулат. ЛЭ ыкмасында легирлөөчү кошулма буулантылуучу бута – монокристаллдын решёткасына монокристаллды суюуктук же буу фазасынан өстүрүү учурунда MnTe катуу эритме аралашма болуп кошулаары жана өстүрүлгөн монокристалл p -типтеги өткөрүмдүүлүккө ээ болуу шарттарын студенттерге маалымдалат. ИК-лазер нурунун таасиринде кристалл бууланып, подложкада өскөн монокристаллдык эпитаксиялык катмар негизинен n-тип өткөрүмдүүлүккө ээ боло тургандыгын студенттерге түшүндүрүү зарыл. A^4B^6 жарым өткөргүчтөрүнүн n-тип өткөрүмдүүлүктөгү моно кристаллдарын өндүрүүдө легирлөө негизинен жогорку тазалыктагы жез (Cu) жана галлий (Ga) элементтери колдонулат.

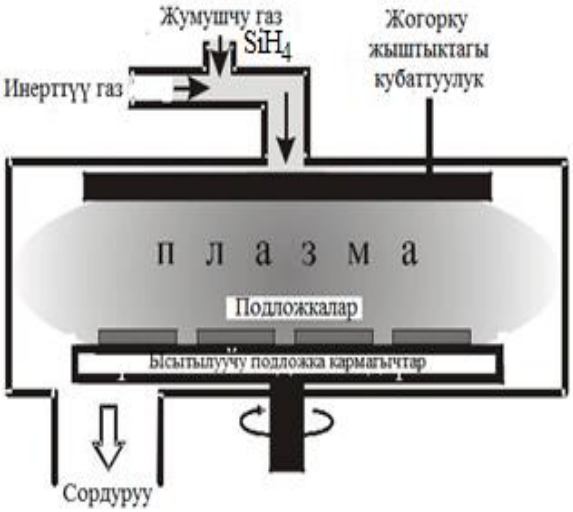
Суутектелген аморфтук кремнийдин (α-Si:H САК) жука катмарлары “Күн” элементтерин, жука катмарлуу транзисторлорду, суюк кристаллдуу дисплейлерди силанды (SiH_4) разряд плазмасында ажыратуу технологиясынын жардамы менен даярдоо кеңири колдонууга ээ болгон. Бул технологияда атайын даярдалган подложкалар жумушчу камерага жайгаштырылып, силан газынын суутек менен аралашмасы камера аркылуу 0,1 ÷ 30 $см^3$/мин ылдамдыкта өткөрүлөт, Газ разряды электромагниттик талаанын жардамы менен кызытылып, кармалып турат жана силан молекулаларынын подложкага жалгаштырылуучу суутек (H) жана



3 - сүрөт. Разрядды электродсуз жогорку жыштыкта кызытып жана кармап туруучу тутумдун схемасы:
1 – реактордук түтүк жана камера, 2 – плазма, 3 – жогорку жыштыктагы индуктор, 4 – подложка, 5 – подложка кармагыч.

кремний (Si) атомдоруна ажырашы разряд плазмасында өтөөрүн түшүндүрүп, разряддын дүүлүгүү ыкмасына жараша (α-Si:H САК) жука катмарларын өстүрүү үчүн орнотмолор бир нече түрлөргө бөлүнөөрүнө токтолуу зарыл .

Суутектелген кремнийдин жука катмарларынын 10 ÷ 100 нм/мүн ылдамдыкта жалгашуусун камсыз кылуу үчүн бүлбүлдөгөн газ разрядын электродсуз жогорку жыштыкта (f=0,5÷1,3,5МГц) жана силандын басымы (10÷270 Па) болгондой кызытып жана кармап туруу үчүн жумушчу камеранын сыртында жайгашкан индуктор колдонулат (3-сүрөт). Мындай технологиянын кемчилиги - жумушчу камеранын өлчөмдөрүнүн кичинелиги менен байланышкан α-Si:H катмарларынын бир тектүү эместиги. Бул кемчиликти 4-сүрөттө келтирилген жумушчу камеранын ичинде эки жалпак параллелдүү электроддор жайгашкан тутумдун жардамында четтетсе болот. Мындай тутумда разрядды кызытып жана кармап туруу үчүн электроддорго f = 13,5 МГц чыңалуу берилип, силандын басымы 0.7 ÷ 30Па маанилерине ээ болгондо катмарлардын өсүү ылдамдыгы 50 нм/мүнөттүн тегерегинде болооруна студенттердин көңүлүн бөлүү зарыл. Кремний камтыган жумушчу газ моносилан (SiH_4) жана керектүүлүгүнө жараша легирлөөчү газдар: n - тип өткөрүмдүүлүк үчүн суутектеги 5% фосфин (PH_3 + H_2) жана p-тип өткөрүмдүүлүк үчүн аргондогу 3% диборан (B_2H_6 + Ar) форсунка системасы аркылуу реакциялык вакуумдук камерага берилип [16], каалаган өткөрүмдүүлүккө ээ болгон жарым өткөргүч катмарларды алууга боло тургандыгын студенттер түшүнүшү керек.



4 - сүрөт. Разрядды эки электроддуу сыйымдуулук системасы менен кармап туруучу тутумдун схемасы

Колдонулган адабияттар

1. Кадышев, С. О преподавании особенностей МОС-гидридной технологии в курсе «Спец. вопросы технологии микро- и наноэлектроники» / С. Кадышев // Ж. Баласагын атындагы КУУнун Жарчысы. – 2024. – № 3 (119). – 176–181-бб.
2. Кадышев, С. Электроника. I том. Электрониканын материалдары жана технологиялары: ЖОЖдордун студенттери үчүн окуу китеби / С. Кадышев. – Бишкек, 2025. – 320 б.
3. Esaki, L. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors / L. Esaki, R. Tsu // IBM Journal of Research and Development. – 1970. – Vol. 14. – P. 61.
4. Chang, L. L. The growth of a GaAs–GaAlAs superlattice / L. L. Chang, L. Esaki, W. E. Howard, R. Ludeke // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1973. – Vol. 10. – P. 11.
5. Chang, L. L. Resonant tunneling in semiconductor double barriers / L. L. Chang, L. Esaki, R. Tsu // Applied Physics Letters. – 1974. – Vol. 24. – P. 593.
6. Esaki, L. New transport phenomenon in a semiconductor superlattice / L. Esaki, L. L. Chang // Physical Review Letters. – 1974. – Vol. 33. – P. 495.
7. Эсаки, Л. Молекулярно-лучевая эпитаксия и развитие технологии полупроводниковых сверхрешеток и структур с квантовыми ямами / Л. Эсаки // Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / пер. с англ.; под ред. Л. Ченга, К. Плога. – М.: Мир, 1989. – С. 7–36.
8. Херман, М. А. Полупроводниковые сверхрешетки / М. А. Херман. – М.: Мир, 1989. – 240 с.
9. Furdyna, J. K. / J. K. Furdyna // Journal of Applied Physics. – 1982. – Vol. 53. – P. 7637.

10. Kolodzijski, L. A. / L. A. Kolodzijski, T. C. Bonsett, R. L. Gunshor, S. Datta, R. R. Bylsma, W. M. Becker, N. Otsuka // Applied Physics Letters. – 1984. – Vol. 45. – P. 440.
11. Manasevit, H. M. / H. M. Manasevit // Applied Physics Letters. – 1968. – Vol. 12. – P. 156.
12. Manasevit, H. M. / H. M. Manasevit // Journal of Crystal Growth. – 1981. – Vol. 55. – P. 1.
13. Amano, H. Effects of the buffer layer in metalorganic vapour phase epitaxy of GaN on sapphire substrate / H. Amano, I. Akasaki, K. Hiramatsu, N. Koide, N. Sawaki // Thin Solid Films. – 1988. – Vol. 163. – P. 415.
14. Nakamura, S. Hole compensation mechanism of p-type GaN films / S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh, T. Mukai // Japanese Journal of Applied Physics. – 1992. – Vol. 31. – P. 1258.
15. Neugebauer, J. Hydrogen in GaN: Novel aspects of a common impurity / J. Neugebauer, C. G. Van de Walle // Physical Review Letters. – 1995. – Vol. 75. – P. 4452.
16. Щукин, В. Г. Физика и техника полупроводников / В. Г. Щукин, Р. Г. Шарафутдинов, В. О. Константинов // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53. – Вып. 1. – С. 132–136.

Рецензент: педагогика илимдеринин кандидаты, доцент Карасартова Н.А.