УДК 621.315.592
DOI 10.58649/1694-5344-2025-2-99-106

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

"МИКРО- ЖАНА НАНОЭЛЕКТРОНИКАНЫН ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНЫН СУРООЛОРУ" КУРСУНДА КӨК ЖАРЫК ДИОДДОРДУ ӨНДҮРҮҮНҮН ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ОКУТУУ

ОБУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЯМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИНИХ СВЕТОДИОДОВ В КУРСЕ «ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ»

TRAINING TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF BLUE LEDS IN THE COURSE "PROBLEMS OF TECHNOLOGY OF MICRO- AND NANOELECTRONICS"

Кыскача мүнөздөмө: Макалада, нурдануусу көзгө көрүнгөн спектрдин кыска толкундуу (445÷480 нм) диапазонуна жана 2,6 ÷ 2,8 эВ тилкелүү аралыкка туура келген көк жарыкдиодду өндүрүү технологиясынын көйгөйлөрү жана аларды окутуу маселелери каралган. Менделеевдин таблицасынын III группасынын металлорганикалык бирикмелеринин [$Ga(CH_3)_3$, $In(CH_3)_3$, $Al(CH_3)_3$] жана аммиактын (NH_3) негизинде МОБ – гидрид эпитаксия ыкмасын колдонуу менен p - жана n - типтеги GaN, InN, AlN жарым өткөргүч материалдардын супер торчолуу структураларын өстүрүү учурунда пайда болгон кээ бир өзгөчөлүктөргө көңүл бөлүнгөн.

Аннотация: В статье рассматриваются проблемы технологии изготовления синих светодиодов, излучение которых соответствует коротковолновому диапазону видимого спектра (445÷480 нм) и шириной запрещенной зоны 2,6÷2,8 эВ и их преподавания. Уделено внимание некоторым особенностям, возникающим при выращивании сверхрешеточных структур полупроводниковых материалов GaN, InN, AlN p- и n-типа методом МОС-гидридной эпитаксии на основе металлоорганических соединений III группы таблицы Менделеева [$Ga(CH_3)_3$, $In(CH_3)_3$, $Al(CH_3)_3$] и аммиака (NH_3).

Abstract: The article considers the problems of the manufacturing technology of blue light-emitting diodes, the emission of which corresponds to the short-wavelength range of the visible spectrum (445÷480 nm) and the band gap of 2.6÷2.8 eV and their teaching. Attention is paid to some features that arise during the growth of superlattice structures of GaN, InN, AlN p- and n-type semiconductor materials by MOS-hydride epitaxy based on organometallic compounds of group III of Mendeleev's table [$Ga(CH_3)_3$, $In(CH_3)_3$, $Al(CH_3)_3$] and ammonia (NH_3).

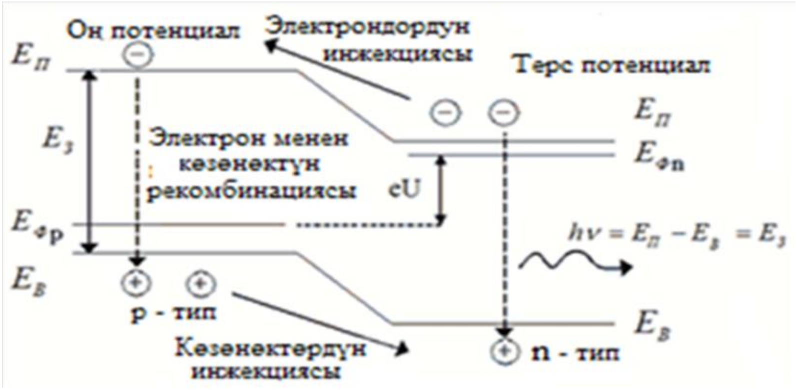
Негизги сөздөр: реакция; технология; кристаллдашуу, эптаксия; газ фазасы; металлорганика; суперторчо; өсүү ыкмасы; иштөө курамы; галий; индий; ташуучу газ.

Ключевые слова: реакция; технология; кристаллизация, эптаксия; газовая фаза; металлорганика; сверхрешётка; метод роста; установка; галлий; индий; газ носитель.

Keywords: reaction; technology; crystallization, eptaxy; gas phase; organometallics; superlattice; growth method; installation; gallium; indium; carrier gas.

Күн энергиясын өзгөртүп түзүүчү шаймандардан (Күн элементтеринен) айырмаланып [1], жарыкдиоду (ЖД) же жарык чыгаруучу диод (ЖЧД); англисче: light-emitting diode (LED) – түз багыттагы электр тогунун таасиринде оптикалык нурданууну жараткан электрон-көңдөйчө өткөөлдүү жарым өткөргүчтүү шайман. Электр тогу p-n – өткөөлү аркылуу түз багытта өткөндө, заряд алып жүрүүчүлөр – электрондор жана көңдөйчөлөр – бири-бирин көздөй кыймылынын учурунда, электрондордун бир энергетикалык деңгээлден экинчисине өтүүсүнүн себебинен инверсиялык катмарда фотондорду бөлүп чыгаруу менен рекомбинацияланыша тургандыгын угуучуларга 1-сүрөттүн жардамы менен түшүндүрүү зарыл.

Жарым өткөргүчтөрдүн бардыгы эле рекомбинация учурунда жарыкты натыйжалуу чыгара бербейт. Лектор жарыкдиоддун спектралдык диапазону негизинен колдонулган жарым өткөргүчтөрдүн түрүнөн, чыгарган дүйнөдөгү биринчи жарым өткөргүч жарыкдиоду болуп эсептелет. 1968-жылы Р.А. Логан жана анын кесиптештери азот кошулган галлий фосфидинин (GaP:N) негизинде жашыл жарыкдиодду түзүшкөн. Бирок, ошол учурда,



1- сүрөт. P - n – өткөөлүндө жарык нурун бөлүп чыгаруу механизми

химиялык курамынан жана тыюу салнган тилкесинин кеңдигинен (E_g) көз карандылыгына токтолуусу керек.

[2] маалымдамада белгиленгендей, биринчи кызыл жарык диодун 1962-жылы Н. Холоняк жана С.Ф. Беваккуа галлий арсенид фосфидинин (GaAsP) негизинде иштеп чыгышкан. Бул көзгө көрүнгөн жарык нурлануусу көзгө көрүнгөн спектрдин кыска толкундуу (445÷480 нм) диапазонуна жана 2,6 ÷ 2,8 эВ тилкелүү аралыкка туура келген көк жарыкдиодду түзүү технологиялык жактан мүмкүн эмес болгондугун түшүндүрүп, ага байланыштуу көк жарык нурдантуучу диоддорду түзүү үчүн талап кылынган эки шартка токтолуу зарыл:

I шарт. Жарым өткөргүчтөрдү 2,6 эВтон жогору же барабар болгон тыюу салынган тилкенин E_g маанисинде колдонуу керек, бул 480 нмден кем эмес же ага барабар толкун узундугуна туура келет (көк жарык). Мынчалык чоң тилкедеги ажырымга ээ болгон жарым өткөргүчтөр кең тилкелүү жарым өткөргүчтөр деп аталаары белгилүү. Салыштыруу үчүн, эң көп колдонулган жарым өткөргүч – кремнийдин тыюу салынган тилкесинин кеңдиги 1,1 эВ.

II шарт. Өткөрүмдүүлүк тилкесинин түбүндөгү электрондордун импульсу валенттүүлүк тилкесинин төбөсүндө жайгашкан көзөнөкчөлөрдүн импульсуна барабар болгон, түз зоналуу жарым өткөргүчтөрдү колдонуу зарыл. Көк жарыкдиодду түзүүдө GaN жарым өткөргүчүндө жогорку нурдануу рекомбинациясынын жогорку ыктымалдуулугу жетишиле тургандыгы далилденген. Кыйыр ажырымдагы жарым өткөргүчтөрдө (мисалы, Si) тескерисинче, нурдануу рекомбинациясынын ыктымалдуулугу кыйла төмөн.

Бирок, I жана II шарттары ар дайым эле жетиштүү боло бербейт. Жогорку натыйжалуу жарыкдиоддорду түзүү үчүн:

а) жогорку сапаттагы монокристаллдарды өстүрүү;

б) p-n-өткөөлдөрүн ийгиликтүү өндүрүү талап кылынат.

Тыюу салынган тилкесинин кеңдиги I шартты канаттандыруучу жарым өткөргүчтөр үчүн а) жана б) шарттарды аткаруу ошол кезде технологиялык жактан өтө татаал маселе болгондуктан, көп жылдар бою жогорку эффективдүү көк жарыкдиоддорду чыгарууга мүмкүнчүлүк болгон эмес.

1960-жылдардын аягында жана 1970-жылдары көк жарыкдиоддорду өндүрүү үчүн материалдардын потенциалдуу талапкерлеринин катарында E_g = 3,0 эВ менен кремний карбиди (6H-SiC), E_g = 2,7 эВ менен цинк селениди (ZnSe) жана E_g = 3,4 эВ менен GaN болушкан. Булардын ичинен p-n-өткөөлүн даярдоо үчүн жалгыз кеңири тыюу салынган тилкелүү монокристааллдык жарым өткөргүч – кремний карбиди болгондуктан, көптөгөн изилдөөчүлөр ушул материалдын

негизинде көк жарыкдиоддду иштеп чыгууга аракет жасап, изилдөөлөрдү жүргүзүшкөн. Бирок, бул материал кыйыр тилкелүү түзүлүшкө ээ болгондуктан жарыкты натыйжалуу чыгара албай тургандыгы аныкталган. Ошол эле учурда, ZnSe жана GaN түз тилкелүү жарым өткөргүчтөр болгону менен, бул материалдардан монокристаллдарды өстүрүү технологиялык жактан оор маселе болуп, алардын p-типтеги монокристаллдары али өстүрүлө элек болучу. Бирок көптөгөн изилдөөлөр ZnSe жарым өткөргүчүнүн энергиялык байланышынын жана кристаллдын өсүү температурасынын төмөндүгү кристаллдашуу деңгээлин начарлатып, анын кристаллдык торчосунун туруксуздугуна алып келүүсүн тастыктаган

1980-жылдардын аягынан 1990-жылдардын башына чейин GaN материалындагы жана шаймандарындагы өзгөчө жетишкендиктер көптөгөн илимпоздордун көңүлүн буруп, илимдин бул тармагындагы изилдөөлөр улантылып, III группанын нитриддеринин (GaN, InN, AlN) касиеттерин изилдөө физиканын эң кызыктуу багыттарынын бирине айланып, көптөгөн макалалар илимий журналдарда жарыяланган. Мындай изилдөөлөрдүн ичинен өзгөчө GaN жарым өткөргүчүнүн негизиндеги жарыкдиоддорду жана лазердик диоддорду өндүрүү жолдору эл аралык конференцияларда сунушталгандыгын студенттерге маалымдоо керек.

Кристаллдын сапатына аны өстүрүүдө пайдаланылган химиялык реакциялардын мүнөзү катуу таасир тийгизери белгилүү. Башка сөз менен айтканда, өсүү ыкмалары жана параметрлери маанилүү. Демек, бул багытта изилдөө аймагынын келечеги өсүү ыкмасын тандоо менен аныкталган. Эпитаксиалдык GaN катмарларын башка жарым өткөргүчтөрдөгүдөй эле молекулярдык нур эпитаксия (MBE), газ фазалык-хлориддик эпитаксия (HVPE) же металл-органикалык газ абалдык фазадан МОС-гидрид эпитаксиясы – (MOVPE) өстүрсө боло тургандыгы, бул убакытка чейинки изилдөөлөрдө тастыкталгандыгы жөнүндө айтып, бирок молекулярдык нур эпитаксия (МНЭ) ыкмасы менен [3] (1982-ж.) өстүрүлгөн галлий нитридинде:

$$Ga\ (газ) + NH_3(газ) = GaN\ (к.з.) + \frac{3}{2}H_2(газ) \quad (1)$$

азоттун жетишсиздиги (вакансиясы) көп болуп, ошол кездеги технологиянын шартында өсүү темпинин өтө төмөндүгү байкалгандыгын, ал эми галлий нитридинин монокристаллдык эпитаксиалдык катмарын газ фазалык-хлориддик эпитаксия (HVPE) [4] (1969-ж.) ыкмасы менен өстүрүүдө:

$$GaCl\ (газ) + NH_3(газ) = GaN\ (к.з.) + HCl\ (газ) + H_2(газ) \quad (2)$$

реакциянын тетири кайталанып кетүүсү жана жогорку ылдамдыгы кристаллдын сапатын начарлатып, көйгөйлөрдү жаратышынын себептерин түшүндүрүү зарыл.

Металлорганикалык кошулмалардын газдык фазасынан галлий нитридинин монокристаллдык эпитаксиалдык катмарын MOVPE ыкмасы менен өстүрүүдө Х.М.Манасевит ж.б. (1971-ж.) [5] тетири кайталануучу реакциянын жоктугун, реакциянын ылдамдыгын контролдоп, легирленген катмарларды өстүрүү мүмкүнчүлүгүн:

$$Ga\ (CH_3)_3(газ) + NH_3(газ) = GaN\ (к.з.) + 3CH_4(газ) \quad (3)$$

көрсөткөндүгү, бирок, Манасевит Х.М. подложка катары пайдаланган сапфир (Al_2O_3) ал кезде анча белгисиз материал болгондуктан, технологияда колдоого алынбагандыгы айтылыш керек.

GaN технологиясынын багытында изилдөөлөрдүн жыйынтыктарын анализдөөлөрдүн негизинде, профессор Исаму Акасаки (Matsushita Research Institute Tokyo, Inc.) 1964-1981 жж., андан кийин Нагоя университети (Nagoya University) бул жаатта подложка катары сапфир гана колдонулаарын түшүнүп, 1979-жылы MOVPE ыкмасын оптималдаштыруу боюнча илимий иштерди кайра жандандырган. Чындыгында, сапфир MOVPEнин катаал шарттарында, айрыкча 1000°Сден жогорку температурада жана аммиак (NH_3) атмосферасында туруктуу, ошондой эле ал кристаллографиялык симметриясы боюнча GaNге окшош.

Буга чейин MOVPE ыкмасы негизинен $A^{III}B^{V}$ жарым өткөргүчтөрүнүн жука катмарларын өстүрүүдө колдонулгандыктан пайдаланылган түзүмдөрдү GaN, AlN, InN жана алардын кошулмаларынын өсүү

шарттарына ылайыктап өзгөртүп түзүп, өркүндөтүү зарыл болучу.

Биринчи өркүндөтүү – GaN жана AlGaN катмарларынын өсүшүн камсыз кылуучу триметилгаллий (TMGa) жана триметилалюминий (TMA1) сыяктуу металлорганикалык бирикмелердин, ташуучу газдар (NH_3) жана суутек (H_2) менен аралашуусу реактордун түтүгүнүн карама-каршысында өткөндөй шарт түзүлгөн. Андан кийин бул аралашма газ жеткирүүчү түтүккө жөнөтүлүп, мурунку эксперименттердеги горизонталдык абалдан айырмаланып, 45° бурчка кыйшайган подложкага багытталган. Ошондой эле, реактордун түтүгүндөгү газдардын агымынын ылдамдыгы 2 см·с$^{-1}$ден болжол менен 110 см·с$^{-1}$ ге чейин көбөйтүлгөн. Ошентип, алар баштапкы металлорганикалык заттардын жана NH_3 кошулмаларынын аддуктарынын пайда болушун төмөндөтүү менен подложканын жогорку температуралык аймагындагы газдардын конвекция агымын басууга жетишип, натыйжада газ агымынын бирдей болушуна жана бир тектүү GaN катмарларынын пайда болушун шартташкан.

Бирок, алынган катмардын калыңдыгы подложканын бардык аймагында болжол менен бирдей болгондугуна карабастан, анын бетинде жаракалар жана ойдуңдар пайда болуп. электрдик жана оптикалык касиеттеринде олуттуу жакшыруу байкалган эмес.

Исаму Акасаки негизинен сүрөттөлгөн көйгөйлөр GaN менен сапфирдин ортосундагы эркин энергиянын чоң маанисине байланыштуу деп божомолдоп, кристаллдардын турактуулуктарынын 16% га дал келбестигинен улам келип чыгуусу менен түшүндүргөн. Эпитаксиалдык торчонун турактуулугунун толугу менен дал келиши, GaAs подложкасында GaAs өстүрүү сыяктуу эле, GaN жарым өткөргүч кристаллдарынын өсүшүндө да маанилүү деп эсептеген. Гетероэпитаксиалдык өсүш менен, 1%га дал келбестик жакшы сапаттагы кристаллдардын өсүшүн бир топ татаалдаштырат.

Бул көйгөйдү чечүү үчүн 1985-жылы И.Акасакинин тобу GaN үчүн төмөнкү температуралык (ТТ) буфердик катмар технологиясын иштеп чыгышкан [6-9]. Бул ыкманын маңызы, физикалык касиеттери GaN жана сапфирге окшош материалдан турган, калыңдыгы 20÷50 нм болгон жука буфердик катмар түзүүдөн турат. Буфердик катмардын өсүү температурасы тиешелүү түрдө бир нече жүз градус Цельсий болушу мүмкүн, бул GaN монокристаллдык катмарынын типтүү өсүү температурасынан кыйла төмөн. Андан кийин температура көтөрүлүп, GaN монокристаллдык катмарынын өсүшү үчүн зарыл болгон чоңдукка жеткирилет – болжол менен 1000°С.

Бул идеянын максаты подложка менен GaN катмарынын ортосунда монокристаллдык структуралык түзүлүшкө ээ боло элек, жумшак жана ийкемдүү жука катмарды түзүү болгон. Буфердик катмар, негизинен, бөлүү чегинин бош энергиясы жок болгон, гомоэпитаксиянын шарттарына мүмкүн болушунча жакын шарт түзүшү керек болучу. Ал буфердик катмар үчүн материалдар катары A1N, GaN, цинк оксиди (ZnO) жана SiC деп эсептеген. Биринчиси, Исаму Акасаки буга чейин билген A1Nди колдонушкан [3].

Биринчи өркүндөтүүдөн тышкары, A1N буфердик катмардын ТТ технологиясы колдонулуп, газдын чыгымы болжол менен 430 см·с$^{-1}$ге чейин көбөйтүлгөн. Ушул ыкманы колдонуп, 1985-жылы алар эң жогорку сапаттагы дүйнөдөгү биринчи эпитаксиалдык GaN катмарын (жарым өткөргүч түрүн) өстүрүүгө жетишишкен [9] жана бул GaNди изилдөө жаатында чоң жетишкендик болгон.

Оптималдуу шарттарда өстүрүлгөн ТТ буфердик катмарын колдонуу кристаллдын сапатын гана эмес, электрдик жана люминесценттик касиеттерин да жакшырткан [6-9].

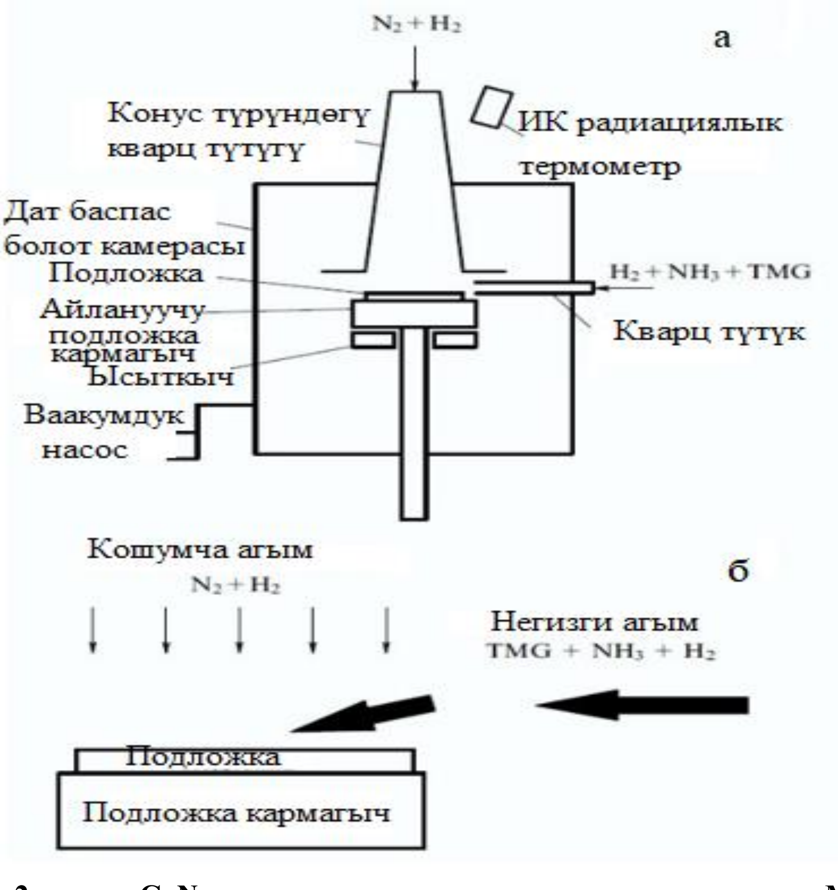
Алюминий нитридинин (A1N) буфердик катмарынын колдонулушу Акасаки жана анын шакирттери тарабынан чоң жылыш болуп, бети жылмакай болгон GaN жогорку сапаттагы катмарлардын өсүшүнө мүмкүндүк берген [5], бирок алюминийди колдонуу реактордун абалына жана GaN катмарларынын ырааттуу өсүшүндө кайталануучулуктун төмөндөшүнө алып келген. Алюминийдин жогорку концентрациясын колдонуудан баш тартуу негизги маселе болгон.

Ошол эле мезгилде “Nichia Chemical Corporation” химиялык корпорациясынын изилдөөчү профессору Ш. Накамура, шакирттери менен газ агымынын төмөнкү ылдамдыгындагы МОС гидриддик эпитаксиясы үчүн реактордун жаңы түрүн ойлоп тапкан, аны эки агымдуу МОС гидриддик эпитаксия деп атаган (2,а-сүрөт) [10]. Бул реактордун жардамы менен ал GaN кристаллынын бирдей жана сапаттуу өсүшүн ишке ашырган. Бул реактордун негизги өзгөчөлүгү кошумча газ агымынын болушу (2,б-сүрөт), ал ташуучу газдарды подложкага

бирдей багыттап, ошондой эле жылуулук чек ара катмарын жакшырткан. Бул шаймандын жардамы менен алынган маанилүү жетишкендиктердин бири, A1N буфердик катмарынын колдонулушун жокко чыгарган, GaN буфердик катмары болгон. Кош агымдуу MOS гидриддик эпитаксия жана GaN буфердик катмарын ойлоп табуу менен, GaN кристаллдарын дүйнөдөгү эң мыкты сапатта өстүрүү мүмкүн болду.

Кристаллдын сапатын мүнөздөөчү чоңдуктардын бири – бул заряд алып жүрүүчүлөрдүн кыймылдуулугу. Кристаллдагы дефекттер канчалык аз болсо, ошончолук заряд ташуучулардын чачыроо процесси азайат жана алардын кыймылдуулугунун мааниси ошончолук үчүн кыймылдуулук болжол менен 50см^2·В$^{-1}$с$^{-1}$ [7,8] жетсе, эки агымдуу МОС- гидрид эпитаксиясын колдонуу менен өстүрүлгөн катмарда ал 200 см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$ түзгөн.

A1N буфердик катмарын колдонуу И.Акасаки жана Х.Аманого кыймылдуулукту 450 см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$ чейин көбөйтүүгө мүмкүнчүлүк берсе [9], GaN буфердик катмарын жана эки агымдуу MOCVD эпитаксия ыкмасын колдонгондо, бөлмө температурасында ченөөлөр кыймылдуулуктун 600 см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$ маанисин көрсөткөн [11]. Бул эки агымдуу МОС гидриддик эпитаксия чоң аянттагы (2 дюйм, (3,08 см)) подложкаларда жакшы сапаттагы GaN монокристаллдык катмарларын өндүрүү мүмкүнчүлүгүн айкын кылды, бул GaNге



2 - сүрөт. GaN монокристаллдык катмарларын эки агымдуу МОС-гидриддик эпитаксия ыкмасы менен өстүрүү түзүмү (а), биринчи сунушталган газ-ташуучулардын кошумча агымынын аракети (б) [10]

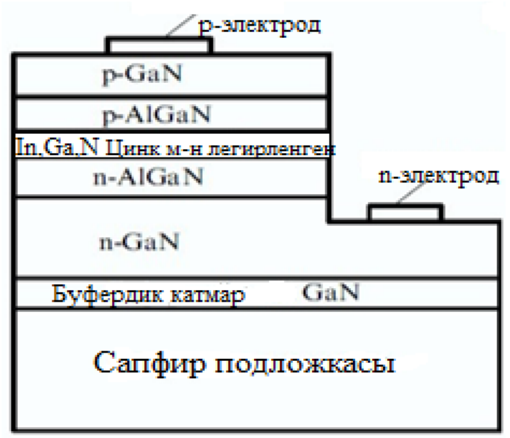
жогору болот. И.Акасаки жана Х.Амано тарабынан сапфирде буфердик катмарсыз өстүрүлгөн GaN монокристаллдык катмарлар негизделген түзүмдөрдү коммерциялаштырууда негизги фактор болуп эсептелет.

Натыйжалуу көк жарыкдиоддорду өндүрүүдөгү кийинки олуттуу кадам 1992-жылы жасалган, анда Ш. Накамура, эмне себептен p-типтеги GaN кристаллдары 20 жыл бою алынбагандыгын аныктай алган. 1989-жылы Акасаки жана Амано магний кошулган GaN монокристаллдык (GaN:Mg) катмарларын төмөнкү энергетикалык электрондук агым (ТЭЭА) менен нурдантуунун негизинде p-типтеги GaN алып, чоң ийгиликке жетишкен

[12]. Бирок, бул процесстин механизми үч жыл бою белгисиз бойдон калган. 1992-жылы Ш.Накамура суутектин атому р-тибиндеги GaNде пассивдешүүнүн булагы экендигин түшүнгөн [13]. Бир нече жылдан кийин Йорг Нойгебауэр менен Крис Ван де Валле магний кошулган GaNдин суутек пассивдешүүсүн тастыктаган теориялык эсептөөлөрдү жүргүзүшкөн [14].

МОС гидриддик GaN эпитаксиясында аммиак (NH_3) азот булагы катары колдонулат. Өсүү учурундагы пиролиз процессинде аммиак ажырап, суутек атомдору GaN кристаллына кошулат. Эгерде кристаллдык торчодо магний бар болсо, анда суутек атомдору аны менен суутектик **(Mg – H)** байланыш түзүшөт жана магнийдин акцептордук борбор болушуна жол бербейт [15]. 400°C дан жогорку температурадагы суутексиз чөйрөдө GaN:Mg үлгүсүн термикалык ысытууда, суутектин кристаллдык торчодон чыгып, магний менен байланыштын үзүлүшүнө шарт түзүлөт [16]. Мындай термикалык ысытуу чоң өлчөмдөгү бир нече үлгүлөргө бир эле учурда тез колдонулушу мүмкүн болгондуктан (бул ТЭЭА менен мүмкүн эмес), заманбап технологиянын бул тармагында p-GaN катмарларын активдештирүүнүн стандарттуу жалгыз ыкмасы болуп калгандыгын угуучулардын назарына белгилеп коюу зарыл.

ТЭЭАны колдонуу менен р-типтеги GaNдин локалдуу пайда болушун, электрондук нурдун таасиринде GaN:Mg кристаллынын ысытылышы менен түшүндүрсө болот. Бул ысытуу суутектин атомунун кристаллда локалдык диффузиясына алып келет жана бошогон магний атомдору акцепторлордун ролун аткарып, өткөрүмдүүлүктү жүзөгө ашыраарын ырастайт.



3 - сүрөт. Кошгетерокаптамдуу көк жарыкдиодунун (InGaN/AlGaN) структурасы [18]

Мына ушундай көптөгөн жылдар бою аткарылган изилдөөлөрдүн натыйжасында n- жана р-типтеги GaN кристаллдарын өндүрүүнүн ыкмалары пайда болгондон кийин, жөнөкөй p-n-өткөөлүнүн негизинде жарыкдиоддорду (бирок активдүү катмарсыз) түзүү мүмкүн болду. Алгачкы көгүлтүр жарыкдиодду 1989-жылы И. Акасаки, Х. Амано ж. б. төмөнкү температуралык A1N буфердик катмарын жана р-типтеги GaN катмарларын өстүрүүдө колдонулган ТЭЭА процессин пайдаланып өндүрүшкөн [12]. Алар өндүрүлгөн жарыкдиоддун электролюминесценциясын жана вольтампердик мүнөздөмөсүн көрсөтүшүп, анын чыгуу кубаттуулугу же эффективдүүлүгү жөнүндө маалымат беришкен эмес.

1991-жылы, Ш. Накамура ж.б. төмөнкү температурадагы GaN буфердик катмарын жана ТЭЭА технологиясын колдонуп, GaN p-n-өткөөлүнүн негизинде 20 мА токто жана түз чыңалуусу 4 В, кубаттуулугу 42 мкВт болгон жарыкдиодду иштеп чыгышкан [17;18]. Диоддун сырткы кванттык эффективдүүлүгү жана нурдануунун максималдуу толкун узундугу тиешелүүлүгүнө жараша 0,18% жана 430 нм түзгөн (3-сүрөт). Студенттер бул кошгетерокаптамдуу жарык чыгаруучу диод

төмөнкү түзүлүшкө ээ: p-GaN/p-AlGaN/цинк кошулган InGaN/n-AlGaN/n-GaN болгондугун жана калыңдыгы 45нм болгон цинк кошулган InGaN активдүү катмарын структурага киргизгенде, жарыктын көбөйүшү байкалганын билиши абзел.

Ш. Накамуранын макаласынын [17] жарыяланышы менен бир мезгилде, ал иштеген “Nichia Chemical Industries Ltd.” корпорациясы 1993-жылдын 30-ноябрында кошгетерокаптамдуу жана р-типтеги катмарлуу, жаркырак көк жарык нурдантуучу диоддорду чыгаргандыгын, анын чыгуу кубаттуулугу 1,5 мВт жана жарыктыгы 1000 микроканделадан ашкандыгын жарыялаган [19]. Бул окуя “Toyoda Gosei Co. Ltd.” компаниясы тарабынан 1993-жылы 20-октябрда чыгуу кубаттуулугу 70 мкВт МДЖӨ типтеги жарыкдиодду түзүү жөнүндө жарыядан бир ай өткөндөн кийин болгон [20].

2014-жылы ак диоддорду иштеп чыгууга жол ачкан ачык көк жарыкдиоддордун технологиясын ойлоп таап, ишке киргизген эмгектери үчүн Исаму Акасаки, Хироши Амано жана Шуджи Накамура Нобель сыйлыгына татыктуу болушкандыгын маалымдап, лекцияны аяктаса болот.

Колдонулган адабияттар

1. Кадышев С., Жусупкелдиев Ш. Кремнийге негизделген Күн батареяларын Кыргызстанда өндүрүүнү уюштуруу жөнүндө // Жусуп Баласагын атындагы КУУнун Жарчысы, 2023, атайын чыгарылыш (S), 62-67-бб.

2. Кадышев С. Об особенностях преподавания МОС-гидридной технологии в курсе “Спец. вопросы технологии микро- и наноэлектроники” // Вестник КНУ им. Ж. Баласагына, 2024, № 3, с.176-181.

3. Ohki Y., Toyoda Y., Kobayashi H., Akasaki I. IOP Conf. Ser. 63 479, 1982.

4. Maruska H.P., Tietjen J.J. The preparation and properties of vapor-deposited single-crystalline GaN // Appl. Phys. Lett. 15 327, 1969.

5. Manasevit H. M., Erdmann F. M., Simpson W. I. The use of metalorganics in the preparation of semiconductor materials: IV. The nitrides of aluminum and gallium" J. Electrochem. Soc. 118 1864, 1971.

6. Amano H., Sawaki N., Akasaki I., Toyoda Y. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an A1N buffer layer // Appl. Phys. Lett. 48 353, 1986.

7. Akasaki I, Amano H. Breakthroughs in improving crystal quality of GaN and invention of the p - n junction blue-light-emitting diode // Jpn. J. Appl. Phys. 45 9001, 2006.

8. Amano H., Akasaki I., Hiramatsu K., Koide N., Sawaki N. Effects of the buffer layer in metalorganic vapour phase epitaxy of GaN on sapphire substrate // Thin Solid Films 163 415, 1988.

9. Akasaki I., Amano H., Koide Y., Hiramatsu K., Sawaki N. Effects of A1N buffer layer on crystallographic structure and on electrical and optical properties of GaN and $Ga_{1-x}Al_xN$ ($0 < x < 0.4$) films grown on sapphire substrate by MOVPE // J. Cryst. Growth 98 209, 1989.

10. Nakamura S., Harada Y., Seno M. Novel metalorganic chemical vapor deposition system for GaN growth // Appl. Phys. Lett. 58 2021, 1991.

11. Nakamura S. GaN growth using GaN buffer layer // Jpn. J. Appl. Phys. 30L1705(1991).

12. Amano H., Kito M., Hiramatsu K., Akasaki I. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI) // Jpn. J. Appl. Phys. 28 L2112 (1989).

13. Nakamura S., Iwasa N., Senoh M., Mukai T. Hole compensation mechanism of p-type GaN films // Jpn. J. Appl. Phys. 31 1258, 1992.

14. Neugebauer J., Van de Walle C. G. Hydrogen in GaN: Novel aspects of a common impurity // Phys. Rev. Lett. 75 4452, 1995.

15. Nakamura S., Mukai T., Senoh M., Iwasa N. Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films // Jpn. J. Appl. Phys. 31 LI 39, 1992.

16. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. High-power GaN^p – junction blue-light-emitting diodes // Jpn. J. Appl. Phys. 30 L1998, 1991.

17. Nakamura S., Mukai T. High-quality InGaN films grown on GaN films // Jpn. J. Appl. Phys. 31 L 1457, 1992.

18. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. 64 1687, 1994.

19. P - n junction DH Blue LEDs with a brightness of more than l000mcd were developed by Nichia Chemical Industries Ltd. // Nikkei Sangyo Shinbun, Japanese Newspaper Press Release, 1993, November 30th.

20. MIS type blue LEDs with a brightness of 200 mcd were developed by Toyoda Gosei // Nikkan Kogyo Shinbun, Japanese Newspaper Press Release, 1993, October 20.

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