$(GAAS)_{1-X-Y}(ZNSE)_X(GE_2)_Y$ ЭПИТАКСИЯВИЙ ҚАТЛАМЛАРИНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК ВА ФОТОЭЛЕКТРИК ХОССАЛАРИ

С.З.Зайнобидинов, А.С.Саидов, М.У.Каланов, А.Й.Бобоев, Ж.Н.Усмонов, А.М.Абдуллаев, М.У.Эргашев

Арсенид-галлий тагликларда қалай эритма аралашмасидан суюқ фазали эпитаксия усулида $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ узлуксиз қаттиқ қоришмаларини ўстириш мумкинлиги кўрсатилди. Юпқа пардаларнинг 300К да вольтампер ва спектрал тавсифлари токнинг кучланишга боғлиқлиги, ҳар хил кўрсаткичли даражали функция $J \sim V^{\alpha}$ кўринишидалигини кўрсатди. Вольтампер тавсифи ва ёруғлик сезувчанликнинг ўзига хос спектрал боғланиши турли зарядланган таркибли комплексларнинг ўзаро боғланиш қонуниятлари билан аниқланди.

Калит сўзлар: *галлий, маргимуш, германий, спектрал тавсиф, қаттиқ аралашма, қатлам, эпитаксия, фотосезгирлик, рекомбинация, ҳаракатчанлик, валентлик.*

Показана возможность выращивания непрерывного твердого раствора $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ на арсенид галлиевых подложках методом жидкофазной эпитаксии из оловянного раствора-расплава. Исследованиями вольтамперных и спектральных характеристик пленок при 300 К обнаружены несколько участков, в которых зависимости тока от напряжения описываются степенной функцией типа $J \sim V^{\alpha}$ с различными значениями показателя. Установлено, что такой вид ВАХ и особенности спектральных зависимостей фоточувствительности обусловлены образованием различных комплексов заряженных компонентов.

Ключевые слова: *галлий, мышьяк, германий, спектральный анализ, твердый раствор, соединение, эпитаксия, фоточувствительность, рекомбинация, подвижность, валентность.*

Thearticle describes the possibility of growing solid solution $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ on arsenide-gallium substbrates by liquid phase epitaxy from a tin solution-melt. With studies of current-voltage and spectral characteristics of layers at 300 K a number of plots in which the current from the voltage dependence of the type described by $J \sim V^{\alpha}$ with different values of the indicator are detected. This type of CVC and features of the spectral dependence of photosensitivity due to the formation of various complexes of charged components are established.

Key words*: gallium, arsenic, germanium, solid – solution, compound, epitaxy, photosensitivity, recombination, mobility, valence.*

С.З.Зайнобидинов *– АДУ физика кафедраси профессори, физика-математика фанлари доктори;*
А.С. Саидов *– ЎзР ФА С.В. Стародубцев номидаги Физика-техника институти профессори, физика-математика фанлари доктори;*
М.У. Каланов *– ЎзР ФА Ядро физика институти катта илмий ходими, физика-математика фанлари номзоди;*
А.Й. Бобоев *– ЎзР ФА Ядро физикаси институти катта илмий ходими;*
Ж.Н.Усмонов *– Андижон машинасозлик институти ўқитувчиси;*
М.У.Эргашев *– АДУ физика йўналиши талабаси.*

Ушбу ишда узлуксиз $(GaAs)_{1-x-y}(ZnSe)_x(Ge_2)_y$ қаттиқ аралашмаси ҳақидаги назарий қарашлар ва амалий тадқиқот натижалари тақдим этилган. Эпитаксиявий қатлам [1,2] келтирилган технологиялар асосида суюқ фазали эпитаксия усулида ўстирилди.

Маълумки, мураккаб таркибли эпитаксиявий юпқа парда қатламларини ўстиришда унинг таркибий элементлари атомларининг ковалент радиуслари муҳим аҳамият касб этади. Ушбу ҳолатда GaAs, ZnSe ва Ge_2 молекулалари атомларининг радиуслари бир-бирига яқин қийматга эга:

$$Dr_1 = |(r_{Ga} + r_{As}) - (r_{Ge} + r_{Ge})| = |2{,}41Å - 2{,}41Å| = 0,$$
$$Dr_2 = |(r_{Ga} + r_{As}) - (r_{Zn} + r_{Se})| = |2{,}41Å - 2{,}42 Å| = 0{,}01 Å < 0{,}1\cdot(r_{Ga} + r_{As}), \quad (1)$$
$$Dr_3 = |(r_{Ge} + r_{Ge}) - (r_{Zn} + r_{Se})| = |2{,}41Å - 2{,}42 Å| = 0{,}01 Å < 0{,}1\cdot(r_{Ga} + r_{As}),$$

бу ерда r_{Ga} =1,22Å, r_{As} = 1,19 Å, r_{Ge} = 1,205 Å, r_{Zn} = 1,22 Å ваr_{Se} = 1,20 Å галлий, маргимуш, германий, рух ва селен атомларининг ковалент радиуслари [3]. (1) формуладан кўринадики, GaAs, Ge_2 ва ZnSe молекула атомларининг ковалент радиуслари айирмасининг фарқи 1% дан ошмаган, бу эса юпқа парда қатламларининг кристалл панжараларида деформацияланиш ҳодисаси кузатилмаслигига олиб келади. Бинобарин, ушбу таркибий элементлар ўзаро ўрин алмашинувчи услуксиз қаттиқ аралашманинг ҳосил бўлиш шартини қаноатлантиради. Бундан ташқари, таркибий элементлар изовалентлиги уларнинг молекула атомлари валентлиги айирмаси билан ўзаро тенгдир, шунингдек, улар ўзаро электронейтронлик шартини ҳам бажаради [4].

$$\Delta z_1 = (z_{Ga} + z_{As}) - (z_{Ge} + z_{Ge}) = 0 \qquad \Delta z_2 = (z_{Ga} + z_{As}) - (z_{Zn} + z_{Se}) = 0,$$
$$\Delta z_3 = (z_{Ge} + z_{Ge}) - (z_{Zn} + z_{Se}) = 0, \quad (2)$$

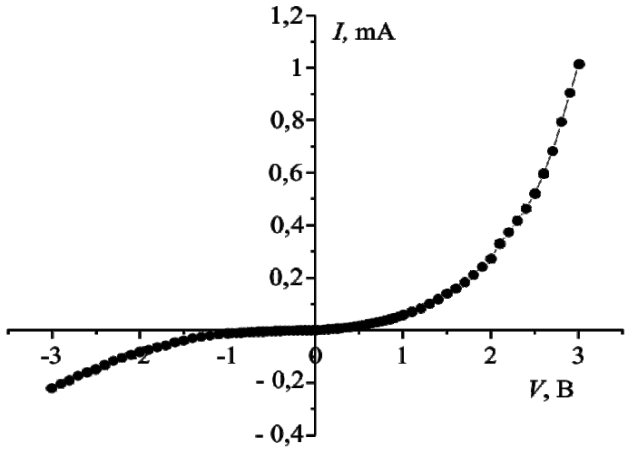
бу ерда Z_{Ga}=+3, Z_{As}=+5, Z_{Se}=+4, Z_{Zn}=+2 ва Z_{Ge}=+6 галлий, маргимуш, селен, рух ва германий атомларининг мос равишдаги валентлиги.

Эпитаксиявий қатламнинг рентгенотузилмавий тадқиқотлари ДРОН-3М тўлқин узунлиги (l = 0.15418 нм, CuK_a – нурланиш) мукаммаллаштирилган рентген дифрактометрида ўтказилди. Тузилмавий таҳлил натижалари ўстирилган қатламлар (100) ориентацияли сфалерит тузилмага эга монокристалл эканлигини кўрсатди. Қатламлар (a_f = 0.56692 nm) ва тагликлар (a_s = 0.56464 nm) панжара қийматларининг фарқи мос равишда 0,5 % ташкил этди [5].

nGaAs – $p(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ тузилмасининг вольтампер характеристикасини (ВАХ) ўрганиш мақсадида вакуумда ўтқазиш усули ёрдамида эпитаксиявий қатлам томонидан 4 мм^2 юзали тўртбурчак ва орқа томонидан тўла юзали кумушли омик контакт олинди.

1-расмда тузилманинг хона ҳароратидаги вольтампер характеристикасининг тўғри ва тескари йўналишлари тасвирланган.

Шунингдек, қоронғуликдаги токнинг кучланишга боғлиқлигидан олинган намуна токни тўғрилаш хусусиятига эга эканлиги аниқланди. ВАХнинг 3 В гача бўлган тўғри йўналишли кучланиш оралиғида тўйиниш токи кузатилмади, бу эса сиртий ҳолатлар зичлиги камлигидан далолат беради.



1-расм. nGaAs – p(GaAs)1-x-y(Ge2)x(ZnSe)y тузилмасининг хона ҳароратидаги вольтампер характеристикаси

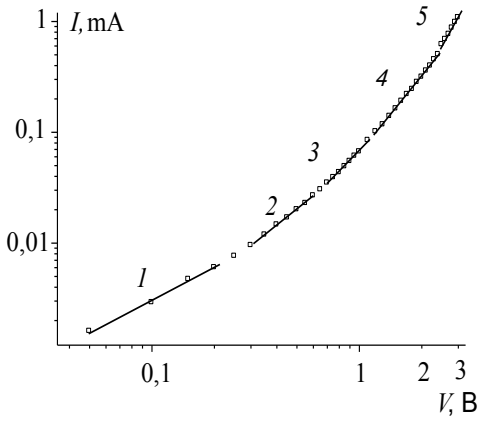
ВАХнинг кучланиши тўғри йўналишдаги шаклининг таҳлили токнинг кучланишга боғланиши турли кўрсаткичдаги α даражали I ~ Vα кўринишга эга эканлигини кўрсатади. 0 дан 0,3 В гача бўлган кучланишнинг бошланғич соҳасида α1 = 1 кўрсаткичли, яъни $I = AV^{a_1}$ – боғланишли омик соҳага тегишли эканлиги аниқланди (2-расм). Кучланишнинг 0,3 дан 0,7 В гача бўлган оралиғида токнинг кучланишга боғланиши В.И.Стафеев томонидан ишлаб чиқилган экспоненсиал боғланиш қонунига мос келади [6] ва у қуйидаги ифодада ўз аксини топди:

$$I = I_0 e^{\frac{qV}{ckT}} \qquad (3)$$

Бу ерда I_0 – экспоненсиал қиймат, с – экспонента кўрсаткичи бўлиб, уни ВАХнинг амалий натижалари қийматларидан қуйидаги формула ёрдамида ҳисоблаш мумкин.

$$c = \frac{q(V_2 - V_1)}{kT \cdot \ln(I_2 / I_1)} \qquad (4)$$

ВАХнинг тажрибавий қийматларидан ҳисобланганда, мос равишда с = 9,56 ва $I_0 = 2{,}6 \cdot 10^{-6}$ А ни ташкил этиши кузатилди. [6] адабиётда келтирилаган маълумотларга кўра: “узун” базали диод бўлиши учун с > 2 шарт бажарилиши керак. Бизнинг тузилмалар учун с = 9,56, яъни, у етарли даражадаги узун базага эга.



2-расм. nGaAs – p(GaAs)$_{1-x-y}$(Ge$_2$)$_x$(ZnSe)$_y$ тузилмасини вольтампер характеристикасининг тўғри йўналишини иккиланган логорифм масштабидаги кўриниши.

1– $I = AV^{a_1}$, (α_1 = 1); 2 – $I = I_0 \cdot exp(eV/ckT)$;

3 – $I = A_2V^{\alpha_2}$, (α_2=2); 4 – $I = A_3V^{\alpha_3}$ (α_3 = 2,33); 4 – $I = A_4V^{\alpha_4}$ (α_4 = 3,17).

Бошқа томондан “с” қиймати [7] адабиётда кўрсатилган усул ёрдамида қуйидаги ифода билан аниқланади.

$$c = \frac{2b + ch\left(\frac{W}{L_p}\right) + 1}{b + 1} \qquad (5)$$

бу ерда b = μ_n / μ_p– электрон ва ковак ҳаракатчанликлари нисбати, μ_n – асосий ва μ_p – ноасосий заряд ташувчилар ишнинг Холл усулида аниқланган ҳаракатчанликлари, улар мос равишда 2300 ва 360 см^2/В×с ларни ташкил этади; W – база қалинлиги, у тажрибавий натижалар асосида W = εε$_0$S/C ифодаси орқали аниқланди; *ε* - эпитаксиявий қатламнинг диэлектрик киритувчанлиги, ε_0– диэлектрик доимийси, *S* ва *C* эса намунанинг юзаси ва электр сиғими. *W* = 20 мкм ва *b* = 6,2 эканлигидан фойдаланиб ҳисобланган ток ташувчилар ноасосий диффузион узунлиги L_p = 4,8 мкм ни ташкил этди. Ноасосий заряд ташувчилар яшаш вақти ва ҳаракатчанлиги ($\tau_p \cdot \mu_p$) кўпайтмаси қуйидаги формула орқали ифодаланади:

$$\mu_p \tau_p = \frac{qL_p^2}{kT} \qquad (6)$$

Хона ҳароратидаги ($\tau_p \cdot \mu_p$) ифода кўпайтмаси ~ $8{,}9\times10^{-6}$ см^2 / В қийматни беради, бу эса ўз вақтида ноасосий заряд ташувчилар яшаш вақтини аниқлаш имконини берди ва у τ_p = $2{,}47\times10^{-8}$ с ни ташкил этди.

ВАХнинг экспоненсиал соҳасидан кейин, кучланишнинг 0,7 дан 1,4 В гача бўлган оралиғида берилаётган кучланиш ортиши билан токнинг тез суръатда ортиши кузатилди ($I = A_2 V^{\alpha_2}$, (α_2=2)) (2 – расм). Бу ҳолда ҳосил бўлган бирикмалар ичида эркин заряд ташувчилар алмашинувини юзага келтирувчи рекомбинация тезлиги (бирикмадаги киришма нуқсонлардаги рекомбинация) қуйидаги ифода билан аниқланади [8].

$$u_r = N_r \frac{c_n c_p (pn - n_i^2)}{c_n (n + n_1) + c_p (p + p_1) + \alpha \tau_i pn} \qquad (7)$$

бу ерда N_r – рекомбинациявий марказлар; n, p – электрон ва коваклар; n_i– яримўтказгичнинг хусусий ток ташувчилари зичликлари; c_n, c_p– электрон ва ковакларнинг тутилиш коэффициентлари; n_1, p_1 – электрон ва ковакларнинг мувозанатий зичлиги, τ_i – бирикмалар ичидаги зарядлар алмашинуви жараёни учун кетган вақт, α – нуқсон турига боғлиқ бўлган коэффициент.

Кичик сатҳли уйғонишларда, яъни (7) ифода махражининг охирги қисми учун $c_n(n+n_1) + c_p(p+p_1) >> \alpha\tau_i pn$ шарт бажарилганда, рекомбинациявий тезлик Шокли – Рид статистикаси билан таърифланади. Ушбу ҳолатда ВАХ умумий ток ўтиши дрейф режими кўринишини олиб, у ҳажмий зарядниинг омик релаксациясига тегишли бўлади [9]:

$$V = \sqrt{\frac{8d^{3J}}{9q\mu_n\mu_p\tau_p N_d}} = B_0\sqrt{J}\ . \qquad (8)$$

Бу ерда J – ток зичлиги. Тажрибавий натижалар таҳлилига асосан, ВАХнинг бу соҳаси (8) қонуниятга бўйсунади, рекомбинациявий тезлик (7) ифодаси махражининг охирги қисми фақат $c_n(n+n_1) + c_p(p+p_1) >> \alpha\tau_i pn$ бўлганида юзага келади ва бу ҳолда токнинг кучланишга боғлиқлиги қуйидаги қонуниятга бўйсунади [10]:

$$V = M(J) B_0 \sqrt{\frac{J}{2}}. \qquad (9)$$

Бу ерда $M(J) \approx 1 + 3m\left[2 + C(\alpha\tau_i / c_n)\sqrt{J}\right]^2$. $I \sim V^{\alpha}$ боғланишдан B_0 қиймати B_0=59 В.ат.А$^{-1}$ эканлиги аниқланди.

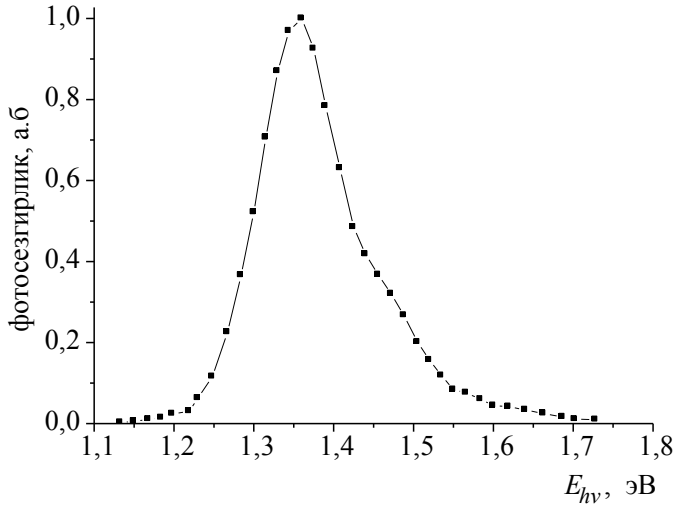
ВАХнинг 1,4 дан 3 В гача бўлган соҳасида $I \sim V^{\alpha}$ боғланишда α > 2 бўлган $I = A_3 V^{\alpha_3}$ (α_3 = 2,33) ва $I = A_4 V^{\alpha_4}$ (α_4 = 3,17) ифодалар билан таърифланувчи соҳалар кузатилди (2-расм).

Маълумки, ВАХнинг бундай боғланишлари кўпинча номувозанатий ток ташувчилар рекомбинациясида кечикиш содир бўлганда амалга ошади, яъни бирикмаларнинг айрим қисмларида ички электронлар алмашинуви жараёни юзага келади. Шу сабабли (7) ифода махражининг охирги қисми учун $c_n(n+n_1) + c_p(p+p_1) < \alpha\tau_i pn$ тенгсизлик шарти бажарилади ва ВАХ қуйидаги аналитик кўринишга эга бўлади [11]:

$$V = A + B_0\sqrt{J} - \frac{D}{\sqrt{J}}. \qquad (10)$$

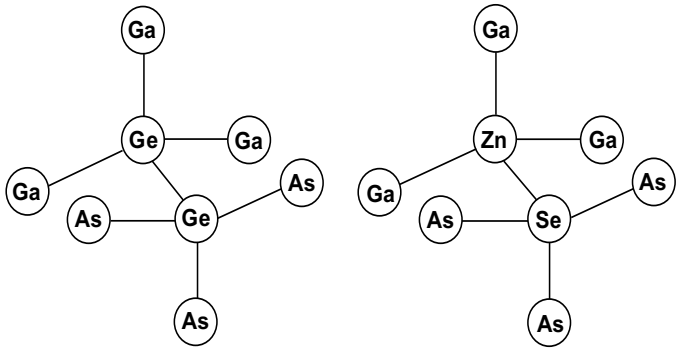
Бу ерда A = 1,57 В, B_0 = $48{,}6\cdot10^{-3}$ В·м·А$^{-1/2}$ ва D = 5,51 В·А$^{1/2}$·м$^{-1}$. Амалий тадқиқот натижалари таҳлилининг кўрсатишича, (10) ифода квадратик бўлмаган (α > 2) соҳаларда қўлланади.

Келтирилган жараёнларда қаттиқ аралашма элементлари ролини аниқлаш мақсадида тайёрланган тузилмаларнинг фотосезгирлигини оптик кварц шиша призмали монохроматри (спектрал ёруғлик нурланишининг 0,35 дан 2,5 мкм гача тўлқин узунлиги диапазонида ишлайдиган) ёрдамида тадқиқ этилди. 3-расмда nGaAs – $p(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ тузилмаси фотосезгирлигининг спектрал боғланиши тақдим этилган.



3-расм. nGaAs – $p(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ тузилмасининг хона ҳароратидаги спектрал фотосезгирлиги.

Расмдан кўринадики, тадқиқ қилинаётган тузилма фотосезгирлигининг спектрал боғланиши 1,13 дан 1,73 эВ гача бўлган фотон энергияси диапазонини ўз ичига олган. Спектрал фотосезгирлик 1,13 эВ дан бошланди, бу эса $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ қаттиқ аралашма таркибида кичикроқ соҳали Ge_2 компоненти борлигидан далолат беради [11]. Бундан кўринадики, қаттиқ аралашма ўстириш жараёнида Ge_2 ва ZnSe компонентлари GaAs тетраэдрик кристал панжарасида Ga ва As атомлари билан ўзаро ўрин алмашиб жойлашади (4-расм). Ga – As боғланиш германий молекуласи атомлари томонидан ўраб олиниши натижасида кучсизланади. Чунки Ge – Ge молекулаларининг боғланиши $E_{g,Ge}$=0,67 эВ, бу эса GaAs ман этилган зонаси кенглигидан ($E_{g,GaAs}$ = 1,4 эВ) кичик. Бундан ташқари, GaAs молекуласи атомлар билан ўраб олинганда, Ge – Ge боғланишининг ионланиш энергияси ортади. Яна ҳам кенгроқ тақиқланган соҳали ZnSe молекуласи атомлари эса GaAs нинг ман этилган соҳасига кучсиз таъсир этади.



4-расм. $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ эпитаксиявий қатламида а) $GaAsGe_2$ ва б) GaAsZnSe молекула атомлари боғланишининг фазовий тетраэдрик конфигурацияси.

Спектрал фотосезгирликнинг кескин ортмаслигига, $(GaAs)_{1-x-y}(ZnSe)_x(Ge)_y$ қаттиқ аралашмаси қатламида кичик энергияли квантлар ютилиши эффекти сабаб бўлади. $(GaAs)_{1-x-y}(ZnSe)_x(Ge)_y$ қаттиқ аралашмасининг максимал фотосезгирлиги (GaAs нинг ман этилган соҳасига жуда яқин жойда) 1,34 эВ фотон энергиялари спектрида кузатилди, бу эса қаттиқ аралашма таркибида GaAs молекуласи атомлари миқдори кўплигидан далолат беради. Эпитаксиявий қатлам қалинлиги 10 мкмни ташкил этгани учун p – n ўтишнинг ажралиш чегараси нисбатан чуқурроқ жойлашади. Бундан ташқари, юқорида келтирилган эпитаксиявий қатламнинг асосий бўлмаган заряд ташувчилари диффузия узунлиги 4,8 мкм га тенглиги ва унинг p – n ўтиш ажралиш чегараси чуқурлигидан кичиклиги фотосезгирликнинг 1,34 эВ дан катта энергияли фотонларда пасайиб кетишига олиб келади.

Тадқиқот натижаларидан қуйидаги хулосаларга келиш мумкин: nGaAs–p$(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ гетеротузилмасининг ВАХ си тўғри токи йўналишида бир қанча соҳалари кузатилди; токнинг кучланишга боғланиши $I \sim V^{\alpha}$ билан таърифланди; ВАХнинг тадқиқот натижалари $(GaAs)_{1-x-y}(ZnSe)_x(Ge)_y$ юпқа парда қатламида мусбат зарядланган донор – манфий зарядланган турли миқдорли вакансия ёки манфий зарядланган акцептор каби бирикма ҳосил бўлиши, бирикмалар маҳаллий марказлар ёки иккаласи иштирокидаги қаттиқ аралашмадаги рекомбинация тезликлари аниқланди; Ge_2 ва ZnSe молекула атомларининг GaAs тетраэдрик кристалл панжарасида Ga ва As атомлари билан ўзаро ўрин алмашиб жойлашиш жараёни вужудга келишини кўрсатди. Фотосезгирликнинг спектрал боғланиши ортишининг кескин эмаслигидан $(GaAs)_{1-x-y}(ZnSe)_x(Ge)_y$ эпитаксиявий қатламларда кичик энергияли квантлар ютилиши эффекти мавжудлиги кўрсатилди. Электрон – ковак жуфтлари тузилмасининг сиртий соҳасида қисқа тўлқинли фотонлар юзага келиши ва улар p – n ўтиш ажралиш чегарасида фототок ҳосил бўлишида иштирок этмаслиги, бу эса тузилманинг фотосезгирлигини нурланиш спектрини қисқа тўлқин соҳасига силжишига олиб келиши, тузилма фотсезгирлиги 1,13 дан 1,73 эВ гача бўлган дипазонида ишлайдиган оптик қурилмалар яратиш имконини бериши мумкинлиги аниқланди.

Адабиётлар:

1. A.S.Saidov, A.Sh.Razzakov, V.A.Risaeva, E.A.Koschanov. Materials chemistry and physics. № 68, 1-6 cc. 2001.

2. Саидов А.С., Саидов М.С., Кошчанов Э.А. Жидкостная эпитаксия компенсированных слоев арсенида галлия и твердых растворов на его основе.- Т.: Фан, 1986.

3. Никольский Б.П. Справочник химика. Т.1.- М-Л: Химия, 1982.

4. Саидов М.С. // Гелиотехника. 2001.- №.3.- Б.4-10

5. Зайнобидинов С.З. ва бошқалар. // Илмий хабарнома, АДУ.- 2013.- №.2.- Б.14-18

6. Стафеев В.И. // ЖТФ, Т.28.- 1958.- №.9.- С.1631-1641.

7. Лейдерман А.Ю. Карагеоргий-Алкалаев П.М. К теории полупроводниковых приборов при высоких уровнях инжекции.// Изв. АН РУз. Сер.физ.мат.наук.- 1965.- №5.- С.80-82

8. Адирович Э.И., Карагеоргий-Алкалев П.М., Лейдерман А.Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках.- М., 1978.

9. Лампер М.Т, Марк П. Инжекционные токи в твердых телах.- М.: Мир, 1973.

10. Лейдерман А.Ю., Минбаева М.К. // ФТП. Т. 30.- 1996.- №.10.- С. 1729-1738.

11. К.А.Амонов. // Материалы XLVIII международной научной студенческой конференции.- Новосибирск, 2010.

2015 йил 20 февралда қабул қилинган
(Тақризчи: ф.-м.ф.д. И.Каримов)