



n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ geteroo‘tishlarining elektrofizik xossalari va ulardagi tok o‘tish mexanizmlari.

Soliyev Iqboljon Maxammadjonovich

Andijon davlat pedagogika instituti, Andijon, O‘zbekiston

Annotatsiya: Mazkur maqolada n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ geterotuzilmalarining elektrofizik va rekombinatsion xususiyatlari tadqiq qilindi. Qattiq qorishmalarda omik kontaktlar hosil qilish texnologiyasi, Hall effektiga asoslangan o‘lchov natijalari hamda volt-amper va volt-sig‘im xarakteristikalari o‘rganildi. Tadqiqotlar davomida zaryad tashuvchilarning harakatchanligi va konsentratsiyasining haroratga bog‘liqligi aniqlandi. Geterotuzilmalarda tunnel-rekombinatsion hamda fazoviy zaryad bilan chegaralangan tok mexanizmlari kuzatildi. Shuningdek, geterochegarada yuqori qarshilikli qatlam hosil bo‘lishi va uning qalinligi texnologik parametrlar bilan bog‘liqligi ko‘rsatildi.

Kalit so‘zlar: geterotuzilma, GaAs, Hall harakatchanligi, volt-amper xarakteristikasi, omik kontakt, epitaksial qatlam, fazoviy zaryad, tunnel-rekombinatsiya.

Аннотация: В данной статье исследованы электрофизические и рекомбинационные свойства гетероструктур n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$. Изучены технологии формирования омических контактов, результаты измерений на основе эффекта Холла, а также вольт-амперные и вольт-емкостные характеристики. Установлены температурные зависимости концентрации и подвижности носителей заряда. В гетероструктурах наблюдались туннельно-рекомбинационный механизм переноса тока и токи, ограниченные пространственным зарядом. Показано формирование высокоомного слоя на гетерогранице и его зависимость от технологических параметров роста.

Ключевые слова: гетероструктура, GaAs, подвижность Холла, вольт-амперная характеристика, омический контакт, эпитаксиальный слой, пространственный заряд, туннельно-рекомбинационный механизм.

Abstract: This article investigates the electrophysical and recombination properties of n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ heterostructures. The technology of ohmic contact formation, Hall-effect-based measurements, and current-voltage and capacitance-voltage characteristics were studied. The temperature dependence of carrier concentration and mobility was determined. Tunnel-recombination and space-charge-limited current transport mechanisms were observed in the heterostructures. In addition, the formation of a high-resistance interfacial layer and its dependence on



growth conditions were identified.

Keywords: heterostructure, GaAs, Hall mobility, current-voltage characteristic, ohmic contact, epitaxial layer, space-charge-limited current, tunnel recombination.

Kirish

Hozirgi vaqtda ko'ptarkibli yarimo'tkazgichli qattiq qorishmalar asosidagi geterotuzilmalar mikroelektronika va optoelektronika qurilmalarida keng qo'llanilmoqda. Ayniqsa, galliy arsenid asosidagi geterotuzilmalar yuqori tezkorlik, past shovqin darajasi va yuqori sezgirlikka ega bo'lganligi sababli ilmiy va amaliy jihatdan katta qiziqish uyg'otadi.

$n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ geterotuzilmalari murakkab tarkibli yarimo'tkazgich tizimlari bo'lib, ularda tok o'tish mexanizmlarini, zaryad tashuvchilarning harakatchanligi hamda rekombinatsion jarayonlarni o'rganish muhim hisoblanadi. Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi mazkur geterotuzilmalarning elektrofizik xususiyatlarini aniqlash va texnologik parametrlarning tok o'tish mexanizmlariga ta'sirini baholashdan iborat.

Tadqiqot metodi

Yarimo'tkazgichli qattiq qorishmalarning elektrofizik xususiyatlarini o'rganishda omik kontaktlarning sifati alohida o'rin tutishini hisobga olgan holda ularning tarkibiga va qo'llanilish shartlariga katta e'tibor qaratildi. Chunki, kontaktda zaryad tashuvchilar injeksiyalanishini oldini oladi va har ikkala kuchlanish maydonlarida tokning kuchlanishga bog'liqligi chizikli, ya'ni qat'iy omik kontakt bo'lishini ta'minlaydi. Bizning hol uchun, bunga metall va yarimo'tkazgich o'rtasida yarimo'tkazgichning kuchli legirlash sohasini hosil qilish orqali erishiladi. $(\text{GaAs})_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ yarimo'tkazgichli qattiq qorishmalarga omik kontakt olish uchun Au, Ag, Ge-Ag(1/10), In, In-Ga(1/1), Sn, In-Ga(1/2) materiallaridan foydalanildi. Olingan kontaktlarning omik sifati dastlab xarakterografda baholandi va keyinchalik kuchlanish pasayishini o'lchash, shuningdek, ularning qarshiligini aniqlash orqali tekshirildi.

Tadqiqot natijalari.

Yarimo'tkazgichli $(\text{GaAs})_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ qattiq qorishmalarning akseptor turidagi o'tkazuvchanlikka ega ekanligini inobatga olgan holda, eng past qarshilik va yaxshi chizikli bog'lanishga ega bo'lgan kontaktlar Au va Ag ni epitaksial qatlamlar sirtiga vakuumda purkash, so'ngra 150 °C haroratda tovlanish orqali olingan. Bundan tashqari, epitaksial qatlamlar sirtida kichik tomchilar shaklida alohida joylarda mavjud bo'lgan aralashma eritma (Sn+GaAs+ZnSe+Ge) qoldiqlari ham omik kontaktlar



sifatida foydalanish mumkinligi ham aniqlandi. Olingan $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial qatlamlarning elektrofizik xususiyatlari Van der Pau usuli bilan 77-330 K harorat oralig'ida o'rganildi va qattiq qorishmalarning o'tkazuvchanlik turi termazonda, shuningdek, Holl doimiysi qiymati bo'yicha aniqlandi.

Legirlanmagan qattiq qorishmaning qatlamlari asosan akseptor tabiatiga mansub ekanligi aniqlanib, bunday namunalarda, ya'ni akseptor o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan qattiq qorishmalar asosan tadqiqot uchun foydalanildi.

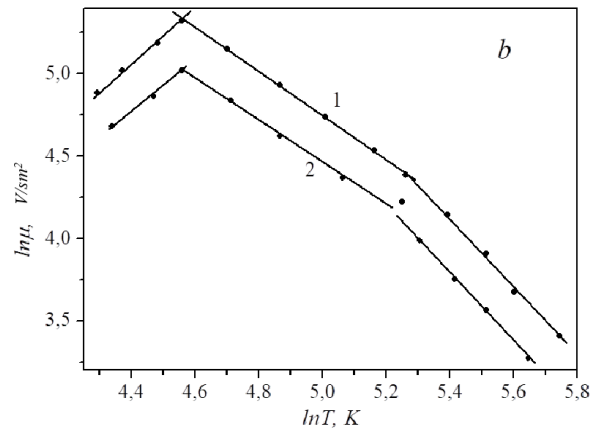
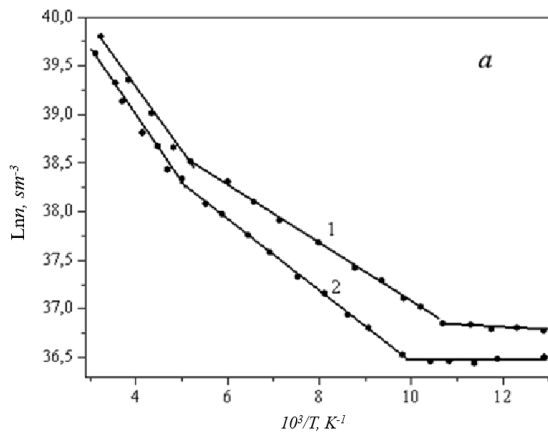
Namunalarning alohida guruhlari uchun 77 va 300 K haroratlarda konsentratsiya, qarshilik va harakatchanlik qiymatlari aniqlanib, olingan natijalar 4- jadvalda keltirilgan.

1- jadval

$(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial qatlamlarining bir qator elektrofizik xossalari

Qatlamlarni o'sish harorati intervali (°C)	300 K			77 K		
	n, sm^{-3}	$\rho, \Omega \cdot \text{sm}$	$\mu, \text{sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	n, sm^{-3}	$\rho, \Omega \cdot \text{sm}$	$\mu, \text{sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
650-550	$3 \cdot 10^{16} - 10^{17}$	2-7	30-35	$10^{15} - 7 \cdot 10^{15}$	6-12	110-135
730-630	$10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$	0.07-2	18-26	$9 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{16}$	0.1-6	70-105

$(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ qattiq qorishmalarining 77-300 K harorat oralig'ida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining haroratga bog'liqligi. 1-a rasmda keltirilgan. Rasmdan yarimlogarifmik masshtabda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini haroratga teskari bog'liqligi grafigidan turli xil qiyaliklarga ega bo'lgan bir qator to'g'ri chiziqli sohalarni ko'rish mumkin. To'g'ri chiziqlar qiyaliklari bilan aniqlangan ushbu sohalarga mos keladigan tashuvchilarning faollashuv energiyalari 0.19 eV, 0.07 eV, 0.029 eV, qiymatlariga yega bo'lib, ular galliy arseniddagi Sn, Ge, Zn kirishma atomlarining ionlanish energiyasiga mos keladi [1; 0197628 b].



1-rasm. Turli kristallanish haroratlarida olingan $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ epitaksial qatlamlardagi zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi (a) va harakatchanligi (b) ning haroratga bog'liqligini 1 – $T_{n.k.} = 730^{\circ}C$, 2 – $T_{n.k.} = 650^{\circ}C$.

Ko'ptarkibli yarimo'tkazgichli qattiq qorishmalarda tok o'tish mexanizmlari alohida ahamiyatga ega ekanligini hisobga olgan holda, zaryad tashuvchilar harakatchanligining haroratga bog'liqligi o'rganildi. Bundan tashqari, qattiq qorishmalarda zaryad tashuvchilarning tarqalish mexanizmlari kristalni nuqsonlari va tuzilmaviy mukammalligi haqida qo'shimcha ma'lumot beradi. Shu munosabat bilan $\rho=10^6-10^8$ Om·smli yarimzolyatsiyalangan GaAs tagliklariga o'stirilgan qatlamlardagi Holl harakatchanligini zaryad tashuvchilari 77-300 K harorat oralig'ida kuchlanganligi $5 \cdot 10^3$ T bo'lgan magnit maydonida o'rganildi. Aksar hollarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi pastki tagliklarda o'stirilgan epitaksial qatlamlarda nisbatan yuqoridagi tagliklarga o'stirilgan qatlamlarda bir necha baravar yuqori bo'lganligi aniqlandi, ya'ni morfologik ma'lumotlar va difraksiya o'lchovlariga ko'ra pastki tagliklarga o'stirilgan epitaksial plyonkalarda tuzilmaviy mukammallik kuzatiladi.

O'rganilayotgan namunalarning Holl harakatchanligining haroratga bog'liqligi 1-b rasmda keltirilgan. Nisbatan quyi haroratlarda, haroratning qisman ortishi bilan zaryad tashuvchilarning harakatchanligi ionlashgan kirishmalardan kovaklarning sochilishiga mos keluvchi $\mu \sim T^{3/2}$ qonunga muvofiq ortib boradi. Bundan tashqari, ushbu bog'lanish egri chizig'i maksimal $\ln \mu = f\left(\frac{1}{T}\right)$ orqali o'tadi, so'ngra zaryad tashuvchilarning harakatchanligi $\mu \sim T^{-2}$ teskari harorat kvadratiga mutanosib ravishda kamayadi. Binobarin, o'rganilayotgan $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ qattiq qorishmalardagi zaryad tashuvchilarning harakatchanligi qiymati nisbatan yuqori haroratlarda panjara tebranishlari (fononlar) bilan ta'sirlashishi natijasida haroratni $\mu \sim T^{3/2}$ ko'rsatgichli



ortishi bilan keskin kamaya boshlaydi. Bu esa o'z navbatida qattiq qorishmaning kristall tuzilishining o'ziga xos xususiyatlari bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Kovaklarning harakatchanligi oshishi qattiq qorishmadagi germaniy tarkibining ko'payishi bilan aniqlanadi [2; 408-412 b].

Geterodiodlarning asbob xususiyatlari asosan tok o'tish mexanizmlari bilan aniqlanganligi sababli, geteroo'tish tuzilmalarining oqim-kuchlanish va kuchlanish-sig'im xususiyatlarini va ularga turli xil tashqi omillarning ta'sirini o'rganish dolzarb vazifalardan biridir. Shuning uchun ushbu bo'limda $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ geterotuzilmalarining to'k-kuchlanish va sig'im -kuchlanish xususiyatlarini o'rganish natijalari keltirilgan.

Volt-ampere xarakteristikasi (VAX) o'rganish bo'yicha eksperimental tadqiqotlarni o'tkazish uchun turli xil texnologik (epitaksiya boshlanish harorati, o'sish vaqti oralig'i, eritma tarkibi, aralashma eritma hajmi va boshqalar.) sharoitlarda kristallangan $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$, geterotuzilmalari tanlab olindi. O'lchovlar namunalarni turlari bo'yicha ikki guruhga bo'lib tadqiqot ishlari o'tkazildi. Namunalarning bir guruh VAX [53;51-56 b] ishda ta'kidlagani kabi, geteroo'tish orqali o'tayotgan tok tunnel-rekombinatsiyaviy mexanizmini namoyon qilib (2-*a* rasm), ya'ni, tok kuchining kuchlanishga bog'liqligida ikki ketma-ket eksponensial sohalar kuzatiladi va bunday sohalar turli haroratlarda ham kuzatildi (2- *b* rasm). Va bunday bog'lanishini quyidagi formula yordamida approksimatsiya qilish mumkin:

$$I = I_{01}\exp(\alpha_1 V) + I_{02}\exp(\alpha_2 V) \quad (1)$$

Bu yerda $\alpha_1=6$ va $\alpha_2=3,5$. Ushbu geterotuzilmaning to'g'rilash koeffitsiyenti, texnologik sharoitga mutunosib ravishda 10 dan 300 gacha o'zgargan. Ushbu geteroo'tishlarning teskari tarmog'ini quyidagi ifoda bilan tavsiflash mumkin:

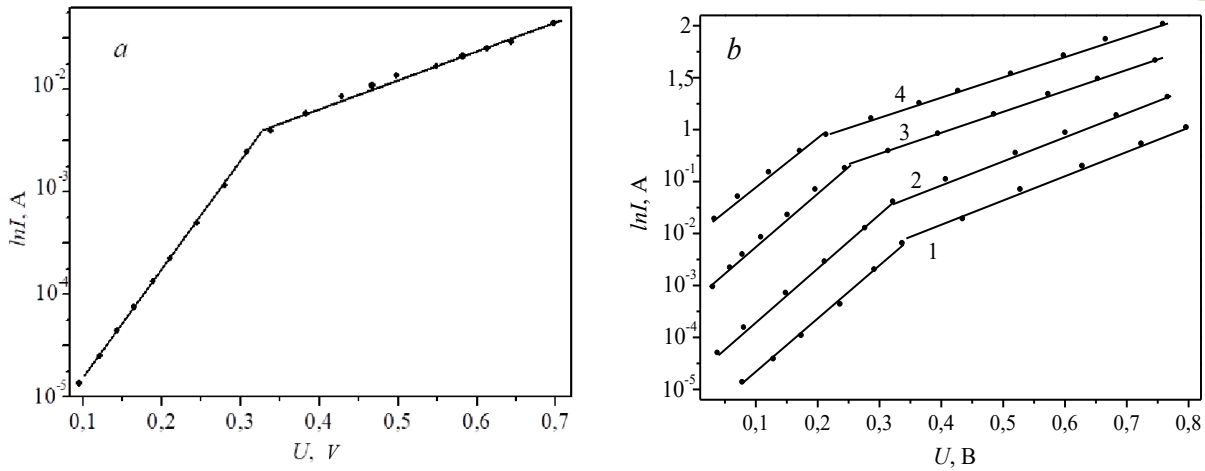
$$I = AV^m \quad (2)$$

Bu yerda $m - 1$ V gacha kuchlanishlar uchun 1 ga teng, yuqori kuchlanishlar uchun esa 8 ga teng.

Namunalarning boshqa guruhi uchun tipik VAXda quyidagi ketma-ket sohalar kuzatilgan (3. rasmda)

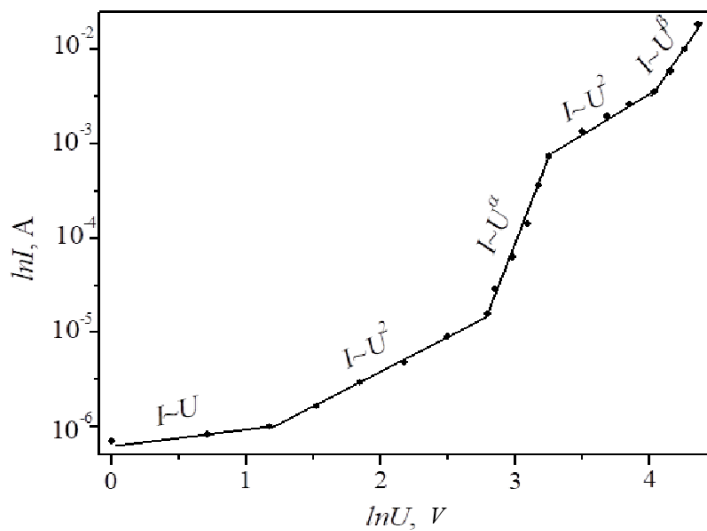
$$I \sim V, I \sim V^2, I \sim V^\alpha, I \sim V^2, I \sim V^\beta \quad (3)$$

bu yerda " α " va " β " qiymatlari o'sish meyoriga qarab 7-12 oralig'ida o'zgaradi. Bu esa o'z navbatida fazoviy zaryad bilan cheklangan toklar (FZBCHT) bunday geterotuzilmalar orqali oqib o'tayotganligidan dalolat beradi [3; 408-412 b].



2-rasm. $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})$ geterotuzilmasining volt-amper xarakteristikasi. (a) xona va (b) turli haroratlarda: 1 – 325 K, 2 – 350 K, 3 – 375 K, 4 – 400 K. ($T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$)

Turli xil texnologik sharoitlarda o‘stirilgan namunalarning qiya kesmalaridan foydalangan holda olib borilgan tadqiqotlar, shuningdek, geterotuzilmalarning sirtiy morfologik tadqiqotlar birinchi guruh namunalari uchun qattiq qorishmalarning epitaksial qatlamlari aslida ozgina erigan GaAs tagliklarida yoki yuqori qarshilik qatlamlari bo‘lmagan GaAs tagliklarida kristallanishini tasdiqladi [4].



3-rasm. $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ geterotuzilma voltamper xarakteristikasi. $T_{d.k.} = 730 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ikkinchi guruh namunalari plyonka va taglik o‘rtasida yupqa hamda yuqori qarshilikka ega bo‘lgan qatlam aniqlangan bo‘lib, bu geteroo‘tish orqali o‘tayotgan tokning tabiatini o‘zgarishiga olib kelgan bo‘lishi mumkin. Yuqori qarshilik qatlamining shakllanishi, ehtimol, epitaksiya boshlanishidan oldin, nisbatan yuqori haroratda joylashgan aralashma eritmadan ruxning intensiv bug‘lanishi va uning qattiq



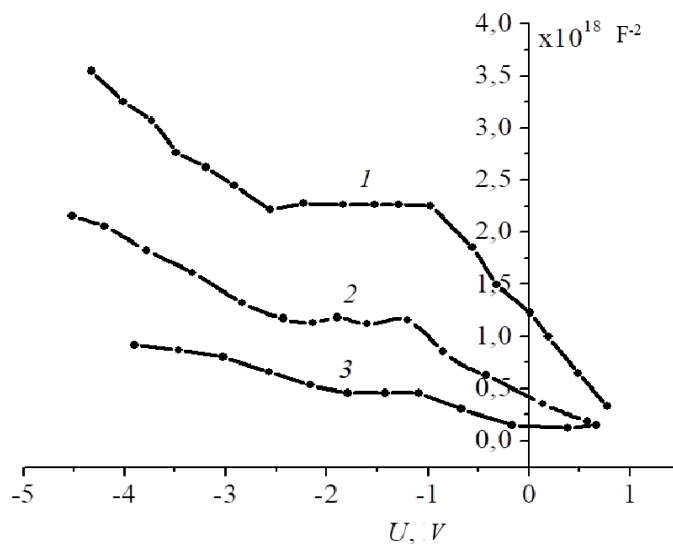
qorishmaga yaqin joylashgan n -GaAs tagligining sirtida diffuziyalanishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin.

Shu bilan birga, taglikning donor tabiatiga egaligi rux atomlari bilan qoplash imkonini beradi. Ushbu taxmini eksperiment qo‘llab-quvvatlaydi, bu holatda taglikning ta’sir qilish vaqtining ko‘payishi yuqori qarshilikli qatlam qalinligining ortishiga olib keldi. Shuning uchun namunalarning ikkinchi guruhi n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ ko‘rinishni namoyon qiladi.

n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ geterotuzilmalarining volt-sig‘im xarakteristikasi xona haroratida EC-12 qurilmasida 1 MGs da tekshirildi.

Ushbu C-V bog‘liqliklar bo‘yicha sohalar topildiki, (4- rasm, 1, 2, 3 egri chiziqlar) bu yerda tuzilmaning sig‘imi deyarli ularga berilayotgan kuchlanishga bog‘liq emas ekan. Bunday bog‘liqliklar n -CdS/ p -CdTe va n -ZnS/ p -CdTe geterotuzimlarda ham namoyon bo‘lgan [5; 415746 b].

[6; 63-78 b] tadqiqot ishida tadqiq etilayotgan n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ tuzilmalari yuqori qarshilik qatlamini shakllanish mexanizmi muhokama qilingan. Kuzatilayotgan sohalarga mos keladigan kuchlanishlarning qiymatlari yordamida aniqlangan yuqori qarshilikli qatlamlarning qalinligi turli namunalar uchun 0.51, 0.35 va 0.22 mkm larni tashkil etdi.



4-rasm. n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ geterotuzilmalarining volt-sig‘im xarakteristikasi: 1 – $T = 730$ °C, $t = 150$ min; 2 – $T = 730$ °C, $t = 100$ min. 3 – $T = 650$ °C, $t = 100$ min.

Yuqori qarshilikli qatlamlarning qalinligi bevosita aralashma eritma ustida GaAs tagliklarini cho‘ktirish jarayonidan oldin ushlab turish haroratiga, va ushlab turish davomiyligiga bog‘liq bo‘ladi. Shunday qilib, plyonkalar o‘stirish uchun zarur



texnologiyalarni tanlab, mikroelektronikada alohida qiziqish uyg'otadigan, geteroo'tishlar orqali o'tayotgan toklar u yoki bu mexanizmga ega bo'lgan $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ tuzilmalarini olish mumkin.

Shunday qilib, $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial qatlamlardagi kovaklarning Holl harakatchanligi past haroratlarda ionlangan kirishmalarga tarqalishi va yuqori haroratlarda panjara tebranishlariga tarqalishi bilan aniqlanadi. Kovak harakatchanligining boshqa turli sharoitlarda epitaksial qatlamlarning tarkibi va tuzilmaviy mukammalligiga bog'liqligi aniqlandi; turli haroratli sharoitlarda olingan ($T = 730\text{ }^\circ\text{C}$ va $T = 650\text{ }^\circ\text{C}$) $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ geterotuzilmalarining VAX tekshirildi. $T = 750\text{ }^\circ\text{C}$ da olingan $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ geterotuzilmalardan tok o'tishi tunnel-rekombinatsiyaviy mexanizmi bilan aniqlandi, shuningdek, $T=730\text{ }^\circ\text{C}$ da olingan $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ tuzilmalarida esa hajmiy zaryad bilan chegaralangan toklar o'tishi aniqlandi. $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ geterotuzilmalarining volt-farad xarakteristikasi o'rganilganda, geterochegarada yuqori solishtirma qarshilikka ega bo'lgan sohalar shakllanishi aniqlanib, bunday sohalarning qalinligi plyonkalarining o'sish sharoitiga bog'liq ravishda 0.2-0.5 mkm oralig'ida o'zgarishi qayd etildi.

Xulosa

Ushbu tadqiqotda $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ geterotuzilmalarining elektrofizik xususiyatlari o'rganildi. Tadqiqot natijasida $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ qattiq qorishmalarida asosan akseptor turdagi o'tkazuvchanlik mavjudligi aniqlandi. Hall o'lchovlari asosida zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi, harakatchanligi va solishtirma qarshiligining haroratga bog'liqligi tadqiq qilindi. Aniqlanishicha, past haroratlarda kovaklar harakatchanligi ionlashgan kirishmalar ta'sirida ortadi, yuqori haroratlarda esa fononlar bilan sochilish natijasida kamayadi. Faollashuv energiyalarining 0,19 eV, 0,07 eV va 0,029 eV qiymatlari Sn, Ge va Zn kirishmalarining ionlanish energiyalariga mos kelishi qayd etildi.

Volt-amper xarakteristikalarini tahlil qilish natijasida turli texnologik sharoitlarda o'stirilgan geterotuzilmalarda tunnel-rekombinatsion hamda fazoviy zaryad bilan chegaralangan tok mexanizmlari kuzatildi. Volt-sig'im xarakteristikalari asosida esa geterochegarada yuqori qarshilikli qatlam hosil bo'lishi aniqlanib, uning qalinligi 0,2–0,5 mkm oralig'ida ekanligi belgilandi.

Olingan natijalar $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ geterotuzilmalarini mikroelektronika va optoelektronika qurilmalarida qo'llash imkoniyatlari mavjudligini ko'rsatadi.



Adabiyotlar ro'yxati:

1. Otajonov, S., Ergashev, R., Shuxratov, S., Botirov, K., Usmonov, Y., & Baxromov, M. (2024). Efficient effect of deep levels on the photoelectric properties of a heterostructure based on p CdTe – n CdS and p CdTe – n CdSe. AIP Conference Proceedings, 3045, 030001. <https://doi.org/10.1063/5.0197628>
2. Boboev A.Y, Kalanov M.U., Zainabidinov S.Z., Saidov A.S., Leiderman A.Yu. Research of current transport mechanism in n-GaAs-p-(GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y heterostructure at various temperatures. Доклады Академии Наук РУз. 2016. №6. - С. 43-45.
3. Boboev A.Y., Soliyev I.M., Yunusaliyev N.Y., Xotamov M.M Effect of temperature on the current-voltage characteristics of n-GaAs-p-(ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y heterostructures. // East European Journal of Physics. – 2025, №3. – P. 408-412. (Scopus:IF: 1)
4. Nawar, A. M., Wassel, A. R., Ali, S. E., & El-Mahalawy, A. M. (2023). Realization temperature roles of in-situ ZnSe films growth toward efficient photodetection performance. Surfaces and Interfaces, 42, 103415. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103415>
5. Zainabidinov, S. Z., Utamuradova, Sh. B., & Boboev, A. Y. (2022). Structural Peculiarities of the (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y Solid Solution with Various Nano-inclusions. Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 16(6), 1130–1134. <https://doi.org/10.1134/s1027451022060593>
6. Boboyev A.Y. GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalarida nanoo'lchamli obyektlarning shakllanish jarayonlari. Diss.....DSc fiz.-mat. Toshkent-2024.