



Rustam USANOV,
Samarqand davlat universiteti assistenti
E-mail: usanov.rustam1989@gmail.com
Uchkun ASHIROV,
Samarqand davlat universiteti tayanch doktoranti
Tolganoy SHARAFOVA,
Samarqand davlat universiteti tayanch doktoranti
Alisher NURIMOV,
Samarqand davlat universiteti tayanch doktoranti

PhD I.Turapov taqrizi asosida

ELECTRICAL PROPERTIES AND ELECTRONIC STRUCTURE OF ZN DIFFUSION COMPENSATED AND STRONGLY COMPENSATED SILICON

Annotation

This scientific article presents the synthesis of heavily compensated $p(n)$ -Si<P, Zn> substrates with various conductivity types and a wide range of specific electrical resistances at room temperature by diffusing Zn into the semiconductor substrate to form additional levels in the energy diagram of MOS structures. The aim is to enhance the sensitivity of the substrate to external influences. The experimental results provide values for mobility, charge carrier concentration, and specific resistance, based on which certain additives were introduced into the energy diagram of the silicon substrate, considering the experimental data.

Key words: compensated silicon, diffusion, thermal evaporation in vacuum, electron beam evaporation, thin film.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ZN-ДИФФУЗИОННО-КОМПЕНСИРОВАННОГО И СИЛЬНОКОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Аннотация

В данной научной статье представлено синтезирование сильно компенсированных подложек $p(n)$ -Si<P,Zn> с различными типами проводимости и широким диапазоном удельного электрического сопротивления при комнатной температуре. Это достигается диффузией Zn в полупроводниковую подложку с целью формирования дополнительных уровней на энергетической диаграмме МОП-структур и повышения её чувствительности к внешним воздействиям. В результатах эксперимента приведены значения подвижности, концентрации носителей заряда и удельного сопротивления, на основе которых в энергетическую диаграмму кремниевой подложки были внесены определённые добавки с учётом экспериментальных данных.

Ключевые слова: компенсированный кремний, диффузия, термическое испарение в вакууме, электронно-лучевое испарение, тонкая плёнка.

SO/SIO₂/SI<P,ZN> GIBRID STRUKTURASI UCHUN KUCHLI KOMPENSIRLANGAN SI<P,ZN> TAGLIKLARNING ELEKTRIK XOSSALARI VA ENERGETIK DIAGRAMMASI

Annotatsiya

Ushbu ilmiy maqolada MOY strukturalarining energetik diagrammasida yarimo'tkazgich taglikka Zn diffuziya qilish orqali uning tashqi ta'sirlarga sezgirligini oshirish maqsadida turli o'tkazuvchanlik turi va xona haroratida keng oraliqdagi solishtirma elektr qarshiligiga ega bo'lgan kuchli kompensirlangan $p(n)$ -Si<P,Zn> tagliklarini sintez qilish, ularning elektr xossalari o'zgarishining tajribaviy natijalari va tahlillari keltirilgan. Tajriba natijalarida harakatchanlik, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va solishtirma qarshilik qiymatlari keltirilgan va ular asosida kremniy taglikning energetik diagrammasiga tajriba natijalariga asoslangan holda ma'lum qo'shimchalar kiritilgan.

Kalit so'zlar: kompensirlangan kremniy, diffuziya, vakuumda termik bug'latish, elektron nurli bug'latish, yupqa qatlam.

Kirish. Spintronika, biotibbiyot fizikasi, magnitooptika kabi sohalar ehtiyoji uchun zarur bo'lgan diskret asboblari, magnit xotiralar, turli xil tashqi ta'sirlarga nisbatan o'ta sezgir bo'lgan sensorlar va h.k.larni yaratishda xilma-xil gibridd strukturalardan foydalanish muammolarini tadqiq qilish jadal sur'atlar bilan davom yetmoqda [1]. Mana shunday gibridd strukturalar orasida monokristall kremniy asosida hosil qilingan metall-diyelektrik-yarimo'tkazgich (MDY) yoki metall-oksid-yarimo'tkazgich (MOY) strukturalar istiqbolli hisoblanadi [2]. Ma'lumki MDY strukturalar asosida allaqachon transistorlar, magnit xotiralar va sensorlar, turli integral hamda diskret qurilmalar yaratilgan va ular zamonaviy elektronika sanoati ishlab chiqarishiga salmoqli hissa qo'shib kelmoqda [3]. Shunga qaramasdan ularning sezgirliqi, barqaror ishlash darajasi va h.k.lar kabi asosiy parametrlarini yaxshilash bo'yicha ilmiy tadqiqotlar davom etmoqda [4]. Shu paytgacha o'rganilgan MDY yoki MOY strukturalarda yarimo'tkazgichli taglik parametrlariga chuqur e'tibor qaratilmaganligini, ayniqsa kompensirlangan va kuchli kompensirlangan yarimo'tkazgichlardan

umuman foydalanilmagan, yarimo'tkazgichli taglik sifatida kompensirlangan kremniy materialidan foydalanish yaxshi natijalar berish mumkin.

Ushbu ishda monokristall kremniy taglikka Zn atomlarini diffuziya qilish va uning taglik xossalari tasiri haqida so'z yuritilgan. Rux atomlarini kremniyga yuqori temperaturali diffuziya usulida kiritish birinchi marotaba [6] ishda qaralgan. Unga ko'ra rux atomlari kremniyda ionlashish energiyasi $E_v+0,31$ eV bo'lgan akseptor va ionizatsiya energiyalari $E_v+0,08$, $E_i+0,09$ va $E_v+0,13$ eV bo'lgan hamda rux atomlarining kimyoviy elementlar davriy tizimining III guruh elementlari bilan komplekslariga tegishli deb qaralgan, sayoz akseptor sathlarini kuzatishgan. Keyinroq, Karlson [7] tomonidan rux atomlarining kremniydagi holatini o'rganish bo'yicha nisbatan keng qamrovli tadqiqotlar o'tkazilgan. Uning tadqiqotlariga ko'ra rux atomlari avval [6] tomonidan qayd qilingan $E_v+0,31$ sathdan tashqari yana bitta $E_c-0,55$ eV akseptor sathi hosil qilishini aniqlagan. Si<P,Zn> namunalari bunday sathlarining paydo bo'lishi uning o'tkazuvchanlik turiga bog'liq bo'lar yekan. Masalan, n – tipli namunalarda $E_c-0,55$ eV akseptor sathi namoyon bo'lsa, p – tipli namunalarda esa har ikkala akseptor sath ham o'zini namoyon qilar ekan. [8] ish mualliflari tomonidan n-Si<P,Zn> namunalari optik yutilishlar bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar haqiqatan ham unda ikkita chuqur energetik sath borligini ko'rsatgan va muallif bu sathlarni [6] ish mualliflaridan farqli o'laroq rux atomlari yoki "rux-vakansiya" komplekslari bilan bog'langan. 1200 °C temperaturada diffuziya qilingan va keyinchalik 900 °C da 2 soat davomida qayta ishlov berilgandan keyin Si-Zn qattiq qorishmasining yemirilishi natijasida yuzaga kelgan ikkita donor $E_c-0,1\pm0,03$ eV va $E_c-0,4\pm0,03$ eV sathlarni ham qayd qilishgan va ularni yemirilish tufayli yuzaga keladigan komplekslar yoki tugunlar orasidagi rux atomlariga tegishli deb hisoblashgan. Bu sathlardan tashqari ionizatsiya energiyasi $E_v+0,17$ eV [9], [10] bo'lgan yana bitta sath qayd qilishgan va bu sathni rux atomlarining III guruh elementlari bilan hosil qilgan komplekslariga tegishli deb hisoblashgan.

Tajriba tafsilotlari. Yuqorida ta'kidlanganidek xona haroratida turli o'tkazuvchanlik turi va solishtirma qarshilikka ega bo'lgan, diffuziya usuli bilan legirlangan Si<P,Zn> namunalari [11] ishda keltirilgan, diffuzant gazi elastik bosimini hisobga oluvchi usul yordamida olindi. Yuqori haroratli diffuziya jarayonida yuzaga kelgan kremniy sirtidagi rux bilan boyigan qatlamlarni olib tashlash uchun mexanik va kimyoviy ishlov berish usulidan foydalanildi va namunaning har bir yon tomonidan o'rta hisobda 50 μ m qalinlikdagi qatlam olib tashlandi. Natijada nisbatan bir jisli legirlangan, o'tkazuvchanligi n – yoki p – tipli, solishtirma qarshiligi xona temperaturasida $10^2\div10^4$ $\Omega\cdot$ cm oraliqda yotuvchi, kuchli kompensirlangan Si<P,Zn> namunalari ega bo'lindi. Olingan bu namunalar asosida MDY strukturalar tayyorlandi. Yarimo'tkazgichli taglik sifatida rux atomlari bilan kuchli kompensirlangan kremniy monokristallaridan foydalanildi. Taglikdagi aralashmalar konsentratsiyasi va o'tkazuvchanlik turi diffuziya jarayonida rux atomlarining parni bosimini o'zgartirish orqali boshqarildi. Dastlabki taglik sifatida o'sish jarayonida fosfor atomlari bilan legirlangan, geometrik o'lchamlari $8\times3\times1$ mm³, xona haroratida solishtirma qarshiligi 1 $\Omega\cdot$ cm atrofida, uzun tomonining kristallografik yo'nalishi [111] bo'lgan, monokristall kremniy (n-Si<P>) namunalari tanlab olindi. Tanlab olingan n-Si<P> namunalari rux atomlarini diffuziya qilish uchun tozaligi 99.96 % bo'lgan Zn elementidan foydalanildi. Rux atomlarining kremniydagi diffuziya koeffitsiyenti va eruvchanligining temperaturaga bog'liqlik ifodalaridan foydalangan holda turli solishtirma qarshilikli va o'tkazuvchanlik turiga ega bo'lgan namunalarni olish uchun diffuziya temperaturasi va vaqti [11] ishdagi kabi aniqlandi. Diffuziya jarayoni quyidagi ketma-ketlikda amalga oshirildi:

1). n-Si<P> bo'lagi sirtida mavjud bo'lgan tabiiy oksid qatlamini olib tashlash uchun namunalar fluorid kislotasi (HF) ga botirilib 15 s davomida ushlab turildi.

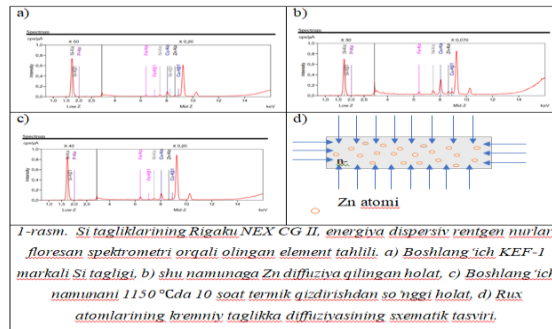
2). Rux atomlarining kremniy difuziyasini amalga oshirish uchun diffuziya haroratidagi rux bug'larning elastik bosimini aniqlash uchun rux massasi va absolyut temperaturani bilgan holda ideal gazlar uchun Medeleyev-Klaypeyron tenglamasidan foydalanildi.

3). Massasi o'lchangan Zn elementining bo'lagi haroratga chidamli, bir uchi kavsharlangan kvarts shisha naycha ichiga n-Si<P> bilan birgalikda joylashtirildi va uning ichidagi havo bosim $5\cdot10^{-4}$ mm Hg ustuniga teng bo'lgunga qadar so'rib olindi.

4). Kvarts naychani ochiq uchi qizdirish yo'li bilan kavsharlab yopiladi va u 1150 °C haroratni ± 0.5 °C aniqlikda ushlab tura oladigan gorizontal diffuzion pechga joylashtirildi. Berilgan sharoitlarda rux atomlarining kremniyga diffuziyalanish vaqti 10 soatni tashkil qildi.

5). Diffuziya jarayonidan so'ng namunalarning xona haroratidagi qarshiliklari 188 va 348 $\Omega\cdot$ cm ga teng bo'lib, ular kovakli o'tkazuvchanlikka ega bo'ldi.

Natijalar va muhokama. Yangi avlod energiya dispersli rentgen nurlari floresan spektrometrlari bu ikkinchi avlod Energiya dispersiv rentgen-fluoresans (EDXRF) spektrometrlari bo'lib, ular tez, sifatli va miqdoriy ko'rsatkichlarni ta'minlaganligi bois biz ushbu ilmiy tadqiqot ishida foydalanilgan Si tagliklarimizning element tahlilini Rigaku NEX CG II spektrometri orqali tahlil qildik (1-rasm). Spekt tahlilidan ko'rinib turibdiki boshlang'ich kremniy taglikda Zn miqdori 0.0010 % massa ulushga ega. Bu miqdor o'zgarishi diffuziyadan qariyb 3 baravar oshib, 0.0033 % ga etganligini (b) rasmda keltirilgan rentgen spektr tahlilidan ko'rish mumkin. Demak, bundan ko'rinadiki boshlang'ich kremniy namunasiga Zn atomlari diffuziya qilinishiga erishilgan. Biroq, (1-b rasm) spektr tahlilida ko'rishimiz mumkinki diffuziyadan so'ng Fe, Ni, va Cu atomlarining ham massa ulushlarining kichik ortishini ko'rish mumkin. Bu o'zgarish kremniy taglik namunasining solishtirma qarshiligiga ta'sirini o'rganish maqsadida kremniy taglikning yakka o'zi alohida ampulada, tashqi sharoit diffuziya qilingan boshqa ampulalarnikidek, termik qizdirildi. Ushbu kremniy taglikning Spektral talili (c) rasmda keltirilgan bo'lib, undan ko'rish mumkinki kvarts ampula va atrof muhitning iflosligi hisobiga kremniy taglikda begona atomlarning ulushi biroz oshgan, xususan Ni 0.0019 %, Fe 0.0021 %, Cu 0.0069 %, ammo uning solishtirma qarshiligi deyarli o'zgarishsiz qolgan.



Bundan kelib chiqqan holda, diffuziya qilingan kremniy taglikning solishtirma qarshiligi va tashuvchilar tipi o'zgarishi Zn atomlarining diffuziyasi bilangina bog'liq ekanligini aytish mumkin bo'ladi. Si tagliklarga Zn atomlarini diffuziya qilish natijasida solishtirma qarshilikni keng diapazonda o'zgartirish va o'tkazuvchanlik tipini ham boshqarish imkoniga ega bo'ldik.

Tekshirilayotgan namunalarning diffuziya jarayonidan oldingi va keyingi asosiy parametrlari (solishtirma elektr qarshiligi, harakatchanligi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi) ularda Xoll effektini o'lchash orqali aniqlandi. Dastlabki namunalardagi oksid qatlami, diffuziya qingandan keyingi namunalarda rux atomlari bilan boyigan qatlamlar olib tashlangandan keyin namunalar yon tomonlariga kumush asosidagi o'tkazuvchan yelimdan foydalangan holda omik kontaktlar hosil qilindi va tegishli o'lchashlar [12] ishda ko'rsatilgani kabi amalga oshirildi.

Kremniy namunalarning diffuziya jarayonidan oldingi va keyingi holatlardagi parametrlari quyidagi 1 – jadvalda keltirilgan. Ushbu jadvalda berilgan diffuziya sharoitida o'ta kompensasiyalangan namunalarni olishga muvoffaq bo'linganligi ko'rinib turibdi. Kompensirlangan yoki kuchli kompensirlangan namunalar olish uchun diffuziya jarayonining boshqa parametrlarini o'zgartirmasdan diffuziya temperaturasini bir oz pasaytirish kerak bo'ladi.

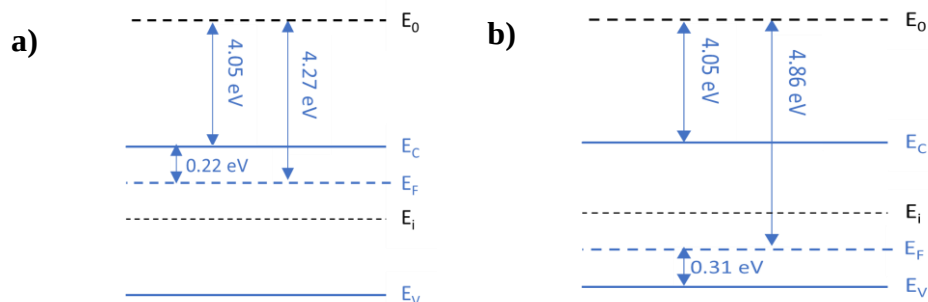
1-jadval

Namuna	$\rho, \Omega \cdot \text{cm}$	$\mu, \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	n, sm^{-3}
n-Si<P>	1,27	1334	$4,63 \cdot 10^{15}$
p-Si<P,Zn>	348,07	338,33	$5,24 \cdot 10^{13}$
p-Si<P,Zn>	188,44	242,79	$1,35 \cdot 10^{14}$

Shuni alohida ta'kidlash kerakki kremniydan elektronlarning chiqish ishi legirolovchi aralashma turi va uning konsentratsiyasiga bog'liq bo'ladi. Ushbu tadqiqotlarda biz fosfor atomlari bilan o'sish jarayonida legirlangan KEF-1 rusumli sanoat kremniysidan tayyorlangan taglik hamda yuqori temperaturali diffuziya usulida olingan kuchli kompensirlangan p-Si<P,Zn> namunalaridan foydalandik. Kremniydan elektronlarning chiqish ishini quyidagi tenglama orqali baholash mumkin:

$$q\varphi_s = q\chi_{Si} + (E_C - E_F), \quad (1)$$

bu yerda $q\chi_{Si} = 4,05 \text{ eV}$ – kremniy atomining elektronga yaqinligi energiyasi va $E_C - E_F$ – Fermi sathidan o'tkazuvchanlik sohasining chegarasigacha bo'lgan energetik masofa. n-Si<P> holida $E_C - E_F = kT \ln(N_C/N_D)$ ifoda bilan aniqlanadi, bu yerda N_C o'tkazuvchanlik zonasining chegarasidagi holatlarning effektiv zichligi bo'lib, u 300 K temperaturada $N_C = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ga teng, N_D esa xona temperaturasida namunadagi elektronlar konsentratsiyasi.



2-rasm. p-Si<P> (a) va p-Si<P,Zn> (b) namunalari uchun hisoblash natijalariga asoslangan energetik soha diagrammasi.

Solishtirma qarshiligi $\rho = 1,27 \Omega \cdot \text{cm}$ li n-Si<P> (111) namunasi uchun $N_D = 4,63 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ va $E_C - E_F = 0,22 \text{ eV}$ bo'lib elektronlarning chiqish ishi esa $4,27 \text{ eV}$ ga teng bo'ladi. p-Si<P,Zn> (111) namunalari uchun esa $E_C - E_F = E_g - E_F - E_V$ bo'lib E_g – kremniy monokristallining taqiqlangan sohasi kengligi, $E_F - E_V$ – esa $E_F - E_V = kT \ln(N_V/N_A)$ formula bilan hisoblangan (bu formuladagi N_V valent sohasining chegarasidagi holatlarning effektiv zichligi bo'lib, u 300 K temperaturada $N_V = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ga teng, N_A esa xona temperaturasida namunadagi kovaklar konsentratsiyasi. Xona haroratidagi solishtirma elektr qarshiligi $\rho = 348,07 \Omega \cdot \text{cm}$ bo'lgan p-Si<P,Zn> namunasida $N_A = 5,24 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ $E_F - E_V = 0,31 \text{ eV}$ bo'lib namuna uchun elektronlarning chiqish ishi $4,86 \text{ eV}$ ga teng (2-rasm). MOY strukturalarda vujudga keladigan "o'rnatilgan potensial" metall va yarimo'tkazgichlarning chiqish ishlari ayirmasiga teng bo'ladi. Kremniyning chiqish ishi, ya'ni Fermi sathidan to vakum chizig'igacha bo'lgan energiya oralig'i, unga legirlangan kirishma turi va konsentratsiyasiga bog'liq bo'ladi. n-Si<P> kremniy taglikning chiqish ishi va harakatchanlik tipini unga Zn atomini yuqori haroratda diffuziya qilish orqali boshqarish mumkin ekanligini va bu bilan MOY strukturalarda hosil bo'ladigan. O'rnatilgan potensial qiymatini va uning yo'nalishini boshqarish imkoniyati paydo bo'layotganini da'vo qilish mumkin. 1a-rasmga ko'ra, n-Si<P> kremniy taglikning o'tkazuvchanlik turi n-tip bo'lib, chiqish ishi $4,27 \text{ eV}$ ga teng bo'ladi, ya'ni ushbu taglik asosida chiqish ishi $4,27 \text{ eV}$ dan katta bo'lgan metallardan foydalangan holda MOY strukturasini hosil qilganda, Shottki to'siqli struktura vujudga keladi. Ammo, ushbu taglikka Zn atomlari diffuziya qilish orqali kuchli kompensirlangan kremniy sintez qilingan uning o'tkazuvchanlik turi p-tip va chiqish ishi $4,86 \text{ eV}$ ga teng bo'lgan va ushbu kuchli

kompensirlangan kremniy taglik asosida chiqish ishi 4.86 eV dan kichkina bo'lgan metallar bilan MOY struktura olinganda Shottki to'siqli, biroq dastlabki holatdagiga nisbatan teskari yo'nalgan potentsial maydon hosil qilish mumkin bo'ladi.

Xulosa. Solishtirma qarshiligi $\sim 1 \Omega \cdot \text{cm}$ bo'lgan n-Si<P> kremniy tagligiga vakuumda Zn atomlarini diffuziya qilish orqali solishtirma qarshiligi $\sim 348 \Omega \cdot \text{cm}$ bo'lgan kuchli kompensirlagan kremniy, o'tkazuvchanlik turi n-tipdan p-tipga o'zgargan, va bu bilan uning chiqish ishi ham 4.27 eV dan 4.86 eV ga o'zgaradi. Bunday kuchli kompensirlangan kremniy tagliklar yordamida o'rnatilgan potentsial kattaligi va potentsial maydon yo'nalishi turlicha bo'lgan gibrid MOY strukturalar hosil qilish mumkin bo'ladi.

ADABIYOTLAR

1. N.V. Volkov, A.S. Tarasov, D.A. Smolyakov, S.N. Varnakov, and S.G. Ovchinnikov, "Bias-voltage-controlled ac and dc magnetotransport phenomena in hybrid structures," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 383, pp. 69–72, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.jmmm.2014.11.014.
2. N.V. Volkov, A.S. Tarasov, D.A. Smolyakov, A.O. Gustaitsev, V.V. Balashev, and V.V. Korobtsov, "The bias-controlled giant magnetoimpedance effect caused by the interface states in a metal-insulator-semiconductor structure with the Schottky barrier," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 22, p. 222406, Jun. 2014, doi: 10.1063/1.4881715.
3. Z. Liang *et al.*, "A review of doped metal oxide semiconductors in the stability of thin film transistors," *J. Alloys Compd.*, vol. 1010, p. 177434, Jan. 2025, doi:10.1016/j.jallcom.2024.177434.
4. T.J. Theka, H.C. Swart, and D.E. Motaung, "Recent trends, advances, and challenges in MOF-derived metal oxide semiconductor-based sensors for BTEX detection: A review," *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 168, p. 112884, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.inoche.2024.112884.
5. К.С. Аюпов, М.К. Бахадирханов, Н.Ф. Зикриллаев, Х.М. Илиев "Физические явления в кремнии в крайне неравновесном состоянии". *Lambert Academic Publishing*, Group 17 Meldrum Street. Beau Bassin 71504. 2019
6. C.S. Fuller and F.J. Morin, "Diffusion and Electrical Behavior of Zinc in Silicon," *Phys. Rev.*, vol. 105, no. 2, pp. 379–384, Jan. 1957, doi: 10.1103/PhysRev.105.379.
7. R.O. Carlson, "Double-Acceptor Behavior of Zinc in Silicon," *Phys. Rev.*, vol. 108, no. 6, pp. 1390–1393, Dec. 1957, doi: 10.1103/PhysRev.108.1390.
8. М.К. Бахадирханов, Б.И. Болтакс, Т.Дж. Джафаров, Г.С. Куликов, "Оптическое поглощения в кремнии с примесями Co и Zn." *ФТТ*, vol. T. 11. B. 12., pp. 36–42.
9. J.M. Herman III and C.T. Sah, "Thermal ionization rates and energies of holes at the double acceptor zinc centers in silicon," *Phys. Status Solidi A*, vol. 14, no. 2, pp. 405–415, 1972, doi: 10.1002/pssa.2210140203.
10. В.М. Арутюнян "Физические свойства и функциональные возможности для кремниевых структур компенсированным цинком," *Микроэлектроника*, vol. T. 11. B. 6., pp. 45–54, 1982.
11. "М.К. Бахадирханов, Н.Ф. Зикриллаев, Э.У. Арзикулов, "Влияние упругости паров диффузанта на концентрацию электроактивных атомов и степень компенсации образцов Si{Zn}", *Письма в ЖТФ*, 17:12 (1991), 1–4.
12. Е.В. Кучис, "Гальваномагнитные. эффекты и методы. их исследования," *Радио И Связь*, vol. . – 264 с: pp. 140-147;., Москва: Редакция литературы по электронике, 1990.