

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA
UNIVERSITETI**

SHOABDURAXIMOVA MANZURA MIRZOXID QIZI

**SELEN VA MARGANES KIRISHMA ATOMLARI BILAN
LEGIRLANGAN KREMNIYDAGI AVTOTEBRANISHLAR**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA–MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

**Fizika – matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiya avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по физико – математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on physical – mathematical sciences**

Shoabduraximova Manzura Mirzoxid qizi

Selen va marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniydagi
avtotebranishlar..... 3

Шоабдурахимова Манзура Мирзахид кизи

Автоколебания в кремнии легированном примесными атомами селена
и марганца..... 25

Shoabdurakhimova Manzura Mirzokhid kizi

Auto-oscillations in silicon doped with impurity atoms of selenium and
manganese 47

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 51

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI QOSHIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA
UNIVERSITETI**

SHOABDURAXIMOVA MANZURA MIRZOXID QIZI

**SELEN VA MARGANES KIRISHMA ATOMLARI BILAN
LEGIRLANGAN KREMNIYDAGI AVTOTEBRANISHLAR**

01.04.10 –Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA–MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.1.PhD/FM771 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Islom karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tikla (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.ispm.uz) va «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbari: **Zikrillayev Nurullo Fatxullayevich**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: **Azamatov Zakirjan Toxirovich**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Imamov Erkin Zunnunovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot: **Andijon davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.30.08.2019.FM/IT.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil «19» 09 soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel.(99871) 248-79-94, faks:(99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, O'zMU qoshidagi YaFM ITI majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (69 raqam bilan ro'yxatga olingan) (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel. (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «06» 09 kuni tarqatildi.
(2025 yil «06» 09 dagi 69 raqamli reyestr bayonnomasi).



Sh.B. Utamurodova
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash raisi,
f.m.f.d., professor

J. J. Humdamov
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash ilmiy kotibi,
(PhD), k. t. x.

N.A. Turgunov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi,
f.m.f.d. professor

KIRISH (Falsafa doktori dissertatsiyasining (PhD) annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi. Jahonda belgilangan va takrorlanuvchi elektrofizik parametrli yangi yarimo‘tkazgich materiallarni olish hamda ular asosida haroratga barqaror va radiatsion nurlanishlarga chidamli asboblari va qurilmalarni yaratishda keng ko‘lamda ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Rivojlangan mamlakatlardagi ilmiy markazlar hamda oliy ta‘lim muassasalaridagi tanilgan olimlar va mutaxassislar fizik xususiyatlari bilan mavjud yarimo‘tkazgich materiallardan tubdan farq qiladigan yarimo‘tkazgich materiallar va strukturalarni kashf etishda tadqiqotlar olib bormoqdalar. Taqiqlangan sohasida chuqur energetik sathlar hosil qiluvchi kirishma atomlar kiritilgan monokristall kremniy, yarimo‘tkazgichlar elektronika sanoatida istiqbolli materiallardan hisoblanadi. Bu materiallarda yarimo‘tkazgichlar fizikasida oldin kuzatilmagan yangi fizik effektlar va hodisalar kuzatilgan bo‘lib, ularni iqtisodiyotning ko‘plab sohalarida qo‘llash imkoniyatlari ko‘rsatib berilgan. Kuzatilgan fizik hodisalardan biri, o‘z-o‘zidan vujudga keladigan va so‘nmaydigan, barqaror tok avtotebranishlari bo‘lib, bu fizik hodisa mutaxassislarda katta ilmiy va amaliy qiziqish uyg‘otmoqda. Avtotebranish hodisaning tabiati va fizik mexanizmi shu kunga qadar olimlar tomonidan to‘liq ochib berilmagan. Bundan tashqari, kuzatilgan turg‘un va doimiy tok avtotebranishlari kremniy materialini mikroelektronikada qo‘llashni sezilarli kengaytirib, ko‘pfunksional fizik kattaliklarni o‘lchovchi amplituda-chastotali chiqishga ega datchiklarni hamda elektromagnit signallarni hosil qiluvchi qattiq jism generatorlarini yaratish imkoniyatlarini ochib berdi.

Jahonda yarimo‘tkazgichlarda kuzatilgan avtotebranish sohasi bo‘yicha mavjud ilmiy adabiyotlarning tahlili asosida, hozirgi kunga qadar tok avtotebranishlarini vujudga kelishida boshlang‘ich yarimo‘tkazgich materialning elektrofizik parametrlariga bog‘liqlik qonuniylari o‘rganilmaganligi aniqlandi. Dunyoning yetakchi mamlakatlaridagi ilmiy markazlarda tok avtotebranishlarining vujudga kelishi hamda parametrlarini (amplituda, chastota) materialning solishtirma qarshiligiga, kirishma atomlarining elektrofaol konsentratsiyasiga, o‘tkazuvchanlik turi va legirlangan elementlarning tabiatiga hamda kirishma atomlari hosil qilgan nanoklasterlar shakllanishiga va ularni boshlang‘ich materialning kristall panjarasida joylashishiga bog‘liqligini o‘rganish bo‘yicha tadqiqotlar olib borilmoqda. Dunyo olimlar hamjamiyati tok avtotebranishlarini vujudga kelishi va uning parametrlariga tashqi omillarning ta‘sirini o‘rganish hamda kuzatilgan hodisalarning fizik mexanizmini tushuntirib berish dolzarb masalalardan biri deb qaramoqda.

O‘zbekiston Respublikasida so‘nggi yillarda yarimo‘tkazgich materiallarda kuzatilgan hodisalarning fizik mexanizmlarini ochib berish hamda ular asosida yaratilgan asboblari va qurilmalarni elektronikaning turli sohalarida amaliyotga qo‘llashda ma‘lum darajada ilmiy yutuqlarga erishilgan. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 19-mart 2021-yildagi “Fizika sohasidagi ta‘lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”¹gi PQ-5032 son

¹ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, “Fizika sohasidagi ta‘lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”, 19.03.2021 yildagi PQ-5032-son

qarorida fizika sohasida ilmiy tadqiqot ishlarining natijalarini ishlab chiqish bilan uzluksiz aloqasining masshtabini kengaytirish, iqtisod sohalaridagi masalalarni hal qilishga yo'naltirish, ilmiy tadqiqotlarni hamda innovatsion faoliyatning natijadorligi va amaliy ahamiyatini oshirish masalalari qo'yilgan. Bu yo'nalishda yangi funksional imkoniyatlari mavjud kam energiya talab etadigan yarimo'tkazgich asboblarni yaratish, ularga sarf etiladigan energiyani tejashga va tannarxini kamaytirishga imkon beradi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022 — 2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"² hamda O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktyabrdagi PF-6097-son "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"³ farmonlar, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 3-martdagi PQ-5011-son "Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"⁴ Prezident Qarori, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-fevraldagi PQ-57-son "2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"⁵ Prezident Qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarning ijrosini ta'minlashda ushbu dissertatsiya ishida olingan ilmiy natijalar muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalarni rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Dissertatsiya ishi, respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. "Energiya, energiya resurslarini tejash, transport, raketa va kosmik texnikasi, aviatsiya, robototexnika, mashinasozlik va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish" dagi ustuvor yo'nalishlarga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. So'nggi yillarda muvozanatda bo'lmagan holatlarni yarimo'tkazgich materiallar va strukturalarda kuzatilgan avtotebranish jarayonlari asosida o'rganish va ularning fizik mexanizmlarini ochib berishga hamda elektromagnit tebranishlarni olish va ular orqali axborotlarni masofaga uzatish olimlar va mutaxassislar e'tiborini jalb qilmoqda.

Xorijiy olimlar A.Sh. Abdinov (Baku davlat universiteti, Baku sh., Azerbajon Respublikasi), Yu. Seki (Yaponiya), N. Xolonyak (AQSh Milliy muhandislik akademiyasi, Vashington sh., AQSh), Z. Chen (Fizika-kimy o Sinsyan texnologiya instituti, Urumchi sh., Xitoy Xalq Respublikasi) va boshqalarning ilmiy maktablarda va ilmiy markazlarda tok avtotebranishlari turli yarimo'tkazgich materiallarda o'rganilgan va tebranishlarning fizik mexanizmlari taklif etilgan hamda ular asosida

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni "2022 — 2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida", 28.01.2022 yildagi PF-60-son

³ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida", 29.10.2020 yildagi PF-6097-son

⁴ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Qarori "Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida", 03.03.2021 yildagi PQ-5011-son

⁵ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, "2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to'g'risida" 16.02.2023 yildagi PQ-57-son

qattiq jisimli generatorlar yaratilib, amaliyotda foydalanish imkoniyatlari ko'rsatib berilgan.

Rossiyalik olimlar S.G. Kalashnikov (Radiotexnika va elektronika instituti, Moskva sh.), Yu.I. Balkarey va L.L. Golik (Radioelektronika va elektronika instituti, Fryazina sh.), Ye.B. Astrova (A.F. Ioffe nomidagi fizika texnika instituti, Sankt-Peterburg sh.), V.V. Kolobayev (Moskva energetika instituti, Moskva sh.) va boshqalarning ilmiy maktablarda yarimo'tkazgich materiallar va strukturalarda aniqlangan tok avtotebranishlari tadqiq etilgan. S.G. Kalashnikov tomonidan CdS va CdSe yarimo'tkazgich birikmalarda kuzatilgan past chastotali tebranishlar o'rganilgan bo'lib, kuzatilgan hodisaning fizik mexanizmini tushuntirishda uchta energetik sathli fizik model taklif etilgan. Tok tebranishlarini o'rgangan olimlar, yarimo'tkazgich materiallarda tebranishlarni hosil qilish va tadqiq etish uchun turli diffuzion usullar bilan kiritilgan, (o'stirish jarayonida legirlangan, diffuzion legirlangan yoki ionlar implantatsiya qilingan) kirishma atomlar materialning taqiqlangan sohasida chuqur energetik sathlarni hosil qilish shartligini ko'rsatib berganlar. Bu olimlarning ilmiy ishlari va maqolalarining tahlili asosida tok tebranishlar turli materiallarda kuzatilgani uchun, taklif etilgan fizik mexanizmlari ham bir-biridan farq qilishi aniqlandi.

O'zbekiston Respublikasidagi olimlar, O'zbekiston Fanlar akademiyasining akademiklari R.A. Mo'minov, M.K. Baxodirxonov, A.M. Mamadalimov, S.Z.Zaynobbiddinov hamda professorlar K.P. Abduraxmonov, Sh.B. Utamurodova, E.Arziqulov, K. Ismailov va boshqa olimlar rahbarligida yaratilgan ilmiy maktablarda yarimo'tkazgich kremniyga kirishma atomlarni kiritish texnologiyasini takomillashtirish, olingan materiallarning elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlarini o'rganish hamda ular asosida zamonaviy qurilmalarni yaratish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Akademik M.K. Baxodirxonov, professorlardan E.Arziqulov, va T. Komilovning ilmiy maktablarida gaz holatidan diffuziya yoki ion implantatsiya usuli bilan kompensirlangan kremniyda tok avtotebranishlari tadqiq qilingan. Bu ilmiy maktablarda marganes, rux, oltingugurt va selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda ma'lum termodinamik sharoitlarda turli xil tok avtotebranishlarini vujudga kelishi, ya'ni uch xil tabiatga ega tok tebranishlari kuzatilgan.

Adabiyotlarning tahlili asosida shu davrgacha tok avtotebranishlarining parametrlarini kremniyning elektrofizik parametrlariga bog'liqligi bo'yicha takrorlanadigan natijalar olinmaganligi aniqlandi. Tok avtotebranishlarining fizik mexanizmini tushuntirishda mualliflar tomonidan kirishma atomlarni kremniy kristall panjarasida joylashishi va kremniyning taqiqlangan sohasida ular hosil qilgan chuqur energetik sathlarning holati o'rganilmaganligi aniqlandi.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasining ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi Toshkent davlat texnika universitetining "Raqamli elektronika va mikroelektronika" kafedrasida olib borilgan ilmiy tadqiqotlar bazasida, O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi tomonidan mablag'lashtirilgan F-OT-55 raqamli "Yangi funksional imkoniyatlarga ega nanomateriallarning yangi sinfi sifatida

kirishma atomlarining nanoklasterlarini shakllantirish asosida hajmli strukturali kremniyni olishning ilmiy asoslari” (2017-2020 yillar) mavzusidagi fundamental ilmiy tadqiqot loyihasi doirasida bajarildi.

Tadqiqotning maqsadi selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda avtotebranish jarayonlarini kompleks tadqiq qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarining solishtirma qarshiligi $\rho=10^3\div 10^5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ bo‘lgan oralig‘ida kerakli elektrofizik parametrlari p- va n- o‘tkazuvchanlikka ega namunalarni olishning texnologiyasini ishlab chiqish;

monokristall kremniy panjarasida selen yoki marganes kirishma atomlari hosil qilgan nanoklasterlarning element tarkibi va strukturasi o‘rganish;

tok avtotebranishlarining parametrlari (amplituda, chastota) va ulangan elektr maydon kuchlanishining qiymati bo‘yicha vujudga kelishiga haroratni, integral yorug‘lik qiymatini va monoxromatik nurlanishning to‘lqin uzunligini hamda magnit maydon kuchlanishining ta’sirlarini o‘rganish;

selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan tok avtotebranishlarining fizik mexanizmlarini tushuntira oladigan modelini ishlab chiqish;

selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan tok avtotebranishlarini qattiq jism elektronikasida qo‘llash imkoniyatlarini ko‘rsatib berish.

Tadqiqotning obyekti sifatida solishtirma qarshiligi $\rho\sim 1\div 100 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ (KDB-1, 10, 100 markali) oralig‘ida, qoldiq kislorod atomlarining konsentratsiyasi $N_0=5\div 7\cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ bo‘lgan monokristall kremniy olingan.

Tadqiqotning predmeti selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniydagi tok avtotebranishlarining parametrlari va vujudga kelish shartlarini kirishma atomlarining elektrofaol konsentratsiyasiga, elektr va magnit maydonlarning qiymatiga, integral yorug‘lik va monoxromatik nurlanishning qiymatlariga hamda kirishma atomlarni kremniyda nanoklasterlarni hosil qilish tabiatiga bog‘liqligini o‘rganish hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Dissertatsiya ishini bajarishda quyidagi: SEM Jeol JSM-IT 200 LA markali skanerlovchi elektron mikroskop, FSM-1202 markali Furrye-spektrometri, UVR-3M markali vakuum qurilmasi, Ecopis HMS-3000 markali qurilma asosida Xoll effekti, Van-der-Pau usullaridan hamda boshqa zamonaviy usullar va o‘lchov asboblardan foydalanib, kompensatsiyalangan kremniy namunalarining tarkibi, elektrofizik va fotoelektrik parametrlarini hamda tok avtotebranishlarining amplituda va chastotasining qiymatlari aniqlandi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi:

selen kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda harorat $T=1100\div 1250^\circ\text{C}$ va diffuziya vaqti $t=5\div 10$ soat, marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda harorat $T=950\div 1200^\circ\text{C}$ va diffuziya vaqti $t=0,5\div 1$ soat oralig‘ida bo‘lganda, boshlang‘ich monokristall kremniyning kristall panjarasida selen yoki

marganes kirishma atomlarining nanoklasterlarini shakllanishining ikki bosqichli takrorlanuvchi diffuzion texnologiyasi ishlab chiqilgan;

selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda avtotebranishning vujudga kelish shartlari (elektr maydon kuchlanganligi, harorat, yoritilganlik)ni boshqarib, uch xil tabiatdagi turg'un va takrorlanuvchi parametrli avtotebranishlar bitta namunada kuzatilgan hamda avtotebranishlarning vujudga kelishini termodinamik shartlari va harorat bo'yicha chegara sohasi $Si < B, Se >$ namunalari uchun $T = 80 \div 300$ K, $Si < B, Mn >$ namunalari uchun $T = 80 \div 350$ K oraliqda bo'lishi aniqlangan;

ilk marotaba selen kirishma atomlari diffuziya usuli bilan legirlangan kremniy namunalarda $T = 80 \div 300$ K harorat oralig'ida tok avtotebranishining chastotasi $f = 5 \cdot 10^{-3} \div 10^5$ Gs oralig'ida, amplitudasi $J = 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-1}$ A oralig'ida, marganes kirishma atomlari diffuziya qilingan kremniy namunalarda $T = 80 \div 350$ K harorat oralig'ida avtotebranishning chastotasi $f = 10^{-3} \div 5 \cdot 10^5$ Gs va amplitudasi $J = 3 \cdot 10^{-5} \div 2,5 \cdot 10^{-1}$ A oralig'ida bo'lishi hamda magnit maydoni 25 kEr gacha o'zgarishida avtotebranishining chastotasi $f = 10^2 \div 3,5 \cdot 10^3$ Gs oralig'ida, amplitudasi $J = 10^{-4} \div 6 \cdot 10^{-5}$ A oralig'ida bo'lishi aniqlangan;

selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda kuzatilgan tok avtotebranishlarining fizik mexanizmini tushuntirishda, bir jinsli bo'lmagan yarimo'tkazgichning modeli taklif etilgan va olingan tajriba natijalarining fizik mohiyatlari ushbu model asosida tushuntirilgan;

olingan tajriba natijalarining tahlilidan aniqlangan, kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan tok avtotebranishlarining parametrlari (amplituda, chastota)ni $T = 80 \div 300$ K harorat oralig'ida chiziqli o'zgarishi asosida fizik kattaliklarni o'lchaydigan amplituda-chastotali chiqishga ega datchiklarni hamda elektromagnit to'lqinli qattiq jism generatorlarini yaratish imkoniyatlari ko'rsatib berilgan.

Tadqiqotlarning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

boshlang'ich kremniydagi bor kirishma atomlarining konsentratsiyasini boshqarish asosida belgilangan elektrofizik parametrli selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalari olishning ikki bosqichli diffuzion texnologiyasi yaratilgan;

selen yoki marganes kirishma atomlarini legirlashda diffuzantlarning gaz holatidagi bosimini boshqarish asosida, sirtida eroziya bo'lmagan kompensatsiyalangan kremniy namunalari olishning termodinamik shart-sharoitlari va texnologik bosqichlari aniqlangan;

kompensatsiyalangan kremniy asosida fizik kattaliklarni o'lchovchi amplituda-chastotali chiqishga ega datchiklarni hamda elektromagnit signalli qattiq jism generatorlarini yaratish imkoniyatlari ko'rsatib berilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchligi zamonaviy yuqori aniqlikda o'lchovchi asboblardan foydalanish hamda bir-biriga bog'liq bo'lmagan tajriba usullari asosida kompensatsiyalangan kremniyda selen yoki marganes kirishma atomlari hosil qilgan nanoklasterlarning tarkibi va holati haqida ilmiy natijalar olingan. Tok avtotebranishlarini elektr maydon kuchlanganligida vujudga kelishi va

parametrlarini o'rganishda olingan tajriba natijalari nazariy hisoblar asosida aniqlanganlari bilan mos tushishi hamda dissertatsiya ishida tok avtotebranishlarini tushuntirishda taklif etilgan fizik mexanizmlar, bir jinsli bo'lmagan yarimo'tkazgichlar modeli va yarimo'tkazgichlar fizikasining fundamental tushunchalariga mos tushganligi bilan tasdiqlangan.

Tadqiqot natijalarini ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati bir jinsli bo'lmagan yarimo'tkazgich materiallarning fizik modelidan foydalanib, selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarda kuzatilgan tok avtotebranishlarining mexanizmlari tushuntirildi. Tadqiqotlarda olingan natijalar yarimo'tkazgich materiallar va strukturalarda kuzatilgan muvozanatda bo'lmagan jarayonlar haqida qo'shimcha ma'lumotlarni olishga va bu hodisalarning fizikasi haqidagi ilmiy tasavvurni kengayishiga hamda yarimo'tkazgichlar fizikasida yangi yo'nalishni rivojlantirishga imkon beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati tajriba natijalari asosida fizik kattaliklarni o'lchovchi datchiklar va elektromagnit signalli qattiq jism generatorlarini yaratish imkoniyatlari ko'rsatib berildi, qo'shimcha sxematexnik o'zgarishsiz katta amplitudali o'zgaruvchan signalni olish, axborotlarni uzoq masofalarga uzatishdagi muammoni hal qilishga imkon beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy qilinishi. Selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda avtotebranish jarayonlarini tadqiq qilish asosida:

selen yoki marganes kirishma atomlarini gaz holatidan diffuziya qilishda, kremniy sirt holatini eroziyasiz olishda yaratilgan texnologiya "FOTON" AJ da foydalanildi (O'zbekiston Respublikasi "Uzeltexsanoat" Assotsatsiyasining 2024-yil 1-apreldagi №-04-3/340 raqamli hamda "FOTON" AJ ni 2024-yil 27-martdagi 68-son ma'lumotnomalari). Ilmiy natijalardan foydalanish kerakli va turg'un elektrofizik ishchi parametrlari diodlar va tranzistorlarni olish imkonini bergan;

selen yoki marganes kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy namunalarda kuzatilgan tokning avtotebranishlarini o'rganishda olingan ilmiy natijalar Berdaq nomidagi Qoraqalpoq davlat universitetida, OT-Φ2-77 raqamli "Ichki nuqsonlar strukturasi modellashirish asosida yarimo'tkazgich asboblarning ishonchligini bashorat qilish usulini takomillashtirish" mavzusidagi fundamental loyihani bajarishda foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2024-yil 13-avgustdagi 4/14-4/4-13473-son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalar asosida amplituda-chastotali chiqish signalli datchiklarni hamda keng chastota $f=10^{-3}\div 10^5$ Gs oralig'ida ishlovchi qattiq jism generatorlarni yaratish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishini bajarishda olingan ilmiy natijalar 10 ta xalqaro va 4 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda ma'ruza va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Jami 23 ta ilmiy ish, jumladan, dissertatsiya mavzusi bo'yicha 7 ta maqola O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa va fan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya

etilgan ilmiy nashrlarda, shundan 3 tasi Scopus bazasida chop etilgan hamda marganes kirishma atomlarini kremniyga diffuziya qilish jarayonini hisoblash bo'yicha 2 ta dasturiy ta'minotga guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 25 ta rasm va 6 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda, 107 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiya ishining **kirish** qismida, tadqiqot mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqot fan va texnika rivojlanishining asosiy ustuvor yo'nalishlari bilan bog'liqligi ko'rsatilgan hamda ilmiy muammoni hal qilish holati aniqlangan, dissertatsiyaning maqsadi, vazifalari, obyektlari va tadqiqot usullari asoslangan, dissertatsiyaning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati, shuningdek, olingan ilmiy natijalarni amaliyotda qo'llash imkoniyatlari ko'rsatilgan. Dissertatsiya yakunida ilmiy tadqiqot natijalarini xalqaro va respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy konferensiyalarda ma'ruza va muhokama qilingani, chop etilgan maqolalar haqida hamda ishning hajmi va tarkibi haqidagi ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiya ishining **“Kirishma atomlarining nanoklasterlari mavjud kremniyning xususiyatlari hamda yarimo'tkazgich materiallarda va yarimo'tkazgich strukturalarda tok avtotebranishlari”** nomli birinchi bobi adabiyotlar sharhiga bag'ishlangan bo'lib, dissertatsiya sohasidagi mavjud ilmiy adabiyotlarning tahlili berilgan. Bob oxirida dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari aniqlangan.

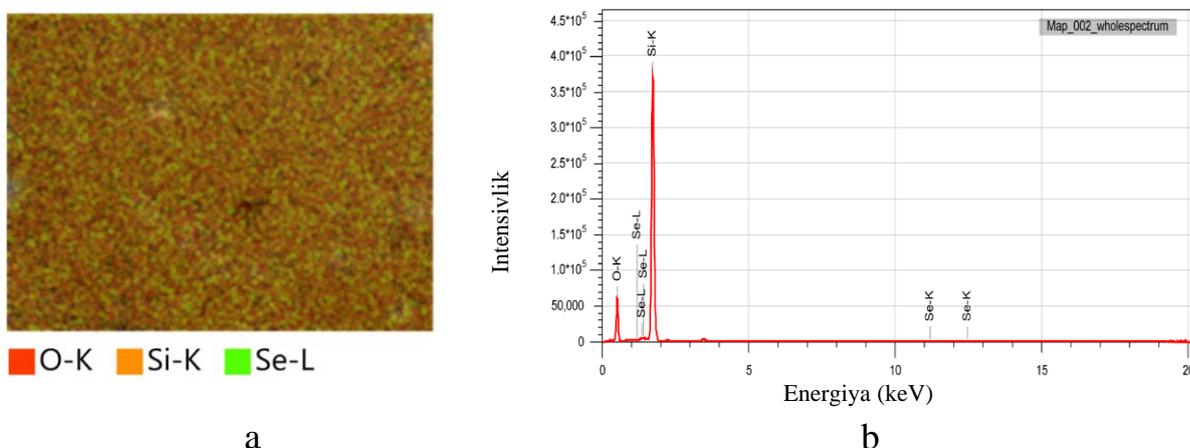
Dissertatsiya ishining ikkinchi bobi **“Kremniyda selen va marganes kirishma atomlarining nanoklasterlarini olish texnologiyasi, olingan namunalarning element tarkibi, elektrofizik va fotoelektrik parametrlarini o'rganishning zamonaviy usullari, kremniyda tok avtotebranishlarini kuzatish usullari”** deb nomlangan bo'lib, selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalari kerakli elektrofizik parametrdagi diffuzion texnologiyaga bag'ishlangan. Yaratilgan ikki bosqichli diffuzion texnologiya kremniy sirtida eroziya bo'lmasligini ta'minlovchi selen yoki marganes kirishma atomlarini legirlab, kompensatsiyalangan kremniy olish imkonini berdi. Kompensatsiyalangan kremniy olishning termodinamik shart-sharoitlari va texnologik bosqichlari aniqlandi, bu kremniyga kiritilgan selen yoki marganes kirishma atomlarining elektrofaol konsentratsiyasini nazorat qilish imkonini berdi.

Dissertatsiya ishini bajarishda foydalanilgan zamonaviy qurilmalarning imkoniyatlari va foydalanilgan usullar batafsil tavsiflangan. Bob oxirida selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy olish uchun yaratilgan ikki bosqichli diffuzion texnologiyaning ilmiy tahlili berilgan, olingan ilmiy natijalarni mavjud ilmiy ma'lumotlar bilan taqqoslaganda o'zaro mosligi asosida ularning ishonchliligi tasdiqlangan.

Dissertatsiya ishining **“Selen va marganes kirishma atomlarining nanoklasterlari mavjud kompensatsiyalangan kremniyning element tarkibi,**

elektrofizik xossalari, ularda kuzatilgan tok avtotebranishlarining xususiyatlari” deb nomlangan uchinchi bobida, tajribalar asosida olingan ilmiy natijalar keltirilgan bo‘lib, kompensatsiyalangan kremniy namunalarining elektrofizik parametrlari boshlang‘ich kremniyning elektrofizik parametrlaridan katta farq qilishi aniqlandi.

Selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyning element tarkibi Joel JSM-IT200LA markali skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida amalga oshirildi. Selen kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning element tarkibini aniqlashda bir xil termodinamik diffuziya sharoitida kirishma atomlarisiz boshlang‘ich kremniy namunalariga ham haroratli ishlov berildi. 1-rasmda kirishma atomlarisiz va selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarining sirt morfologiyasining mikrofototasviri va element tarkibi haqidagi ma’lumotlar berildi.



Element	Chiziq	Massa %	Atom %
O	K	31.65±0.05	44.97±0.08
Si	K	67.81±0.06	54.88±0.04
Se	L	0.54±0.01	0.16±0.00
Jami		100.00	100.00

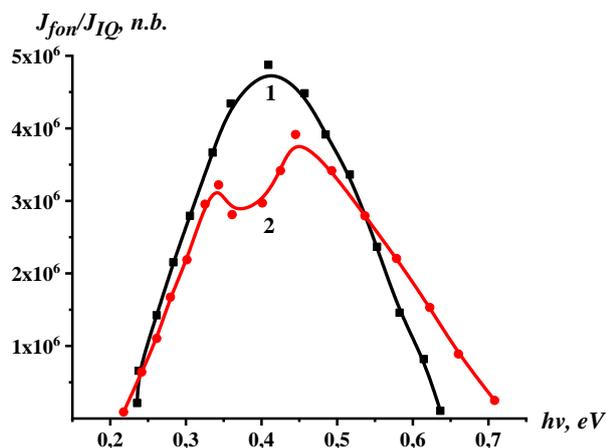
1-rasm. Jeol JSM-IT 200LA markali skanerlovchi elektron mikroskopda olingan selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy sirtining a- morfologiyasi va b-element tarkibining spektri

SEMga bir vaqtning o‘zida maxsus taglikka to‘rtta kremniy namunalarini o‘rnatish mumkinligi boshlang‘ich kremniy namunalarini va selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarining element tarkibini o‘zaro solishtirib, qiyosiy tahlilini olish imkonini berdi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, $T=1100\div 1250^{\circ}\text{C}$ diffuziya harorati oralig‘ida haroratli ishlov berilgan boshlang‘ich kremniy namunalarining sirtida kremniy oksid (SiO_2) qatlamini hosil bo‘lishi kuzatildi (1.a-rasmga qarang). Oksid qatlamni shakllanishi bilan bog‘liq bo‘lgan spektral cho‘qqining intensivligi oksid qatlamisiz boshlang‘ich kremniyning cho‘qqisiga qaraganda ancha past bo‘ldi. Olingan tajriba natijalari boshqa mualliflar tomonidan olingan ma’lumotlar bilan o‘zaro mosligi aniqlandi.

Skanerlovchi elektron mikroskop spektrida selen kirishma atomlari mavjud kompensatsiyalangan kremniy namunalarida qo‘shimcha cho‘qqilar kuzatildi (1.b-rasmga qarang), bu monokristall kremniyda bir nechta selen atomlaridan iborat nanoklasterlarni hamda alohida selen kirishma atomlari mavjudligini ko‘rsatdi.

Kompensatsiyalangan kremniyning element tarkibi aniqlanganda, selen kirishma atomlarining konsentratsiyasi massa bo'yicha ~0,54% ni, kremniy atomlarining konsentratsiyasi massa bo'yicha ~67,81% ni, kislorod atomlarining konsentratsiyasi massa bo'yicha ~31,65% ni tashkil qildi. Shunga o'xshash tadqiqot natijalari marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarda ham olindi.

Olingan namunalarning foto-o'tkazuvchanligini o'rganish shuni ko'rsatdiki, monoxromatik nurlanishning $h\nu=0,3\div 0,7$ eV fotonlar energiyasi oralig'ida fon integral nurda hosil bo'lgan fotoo'tkazuvchanlikning IQ-nur ta'siridagi so'nishi kuzatildi. Kremniyga kiritilgan elektrofaol selen kirishma atomlarining konsentratsiyasini ortib borishi bilan IQ-nur ta'siridagi so'nish oralig'i kamaydi, ya'ni fototokning qiymati keskin pasaydi hamda fototokning IQ-nur ta'siridagi so'nishining fotonlar energiyasi oralig'i toraydi. Shunga o'xshash natijalar marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarning fotoelektrik xususiyatlarini o'rganishda ham kuzatildi (2-rasm 1-chiziqqa qarang).



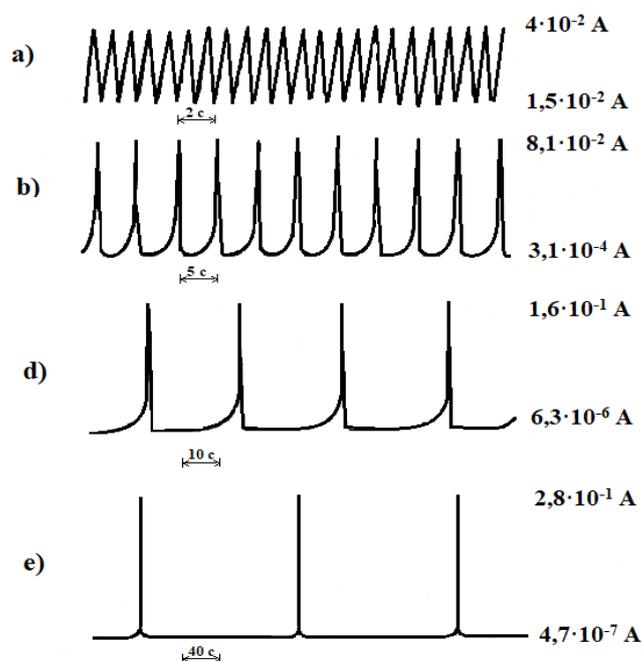
2-rasm. Selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarda fototokni IQ-nur ta'sirida so'nishining spektral bog'liqligi. 1- Si<Mn> namunasi uchun, 2- Si<Se> namunasi uchun, $T=80K$, $I_{ph}=10^{-6}$ Vt/sm²·s, $E=40$ V/sm

Boshlang'ich kremniyni legirlashda tanlangan elementlar kirishma atomlarining turiga bog'liq IQ-nur ta'siridagi so'nishning chuqurligi va oralig'ini aniqlash uchun selen hamda marganes kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy namunalarda fototokning IQ-nur ta'siridagi so'nishining chuqurligi va spektral oralig'i o'zaro solishtirildi. 2-rasmdan ko'rinib turibdiki, marganes kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy namunalarda fototokning IQ-nur ta'siridagi eng chuqur so'nishi kuzatildi. Shu bilan birga, selen kirishma atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy namunalarda fototokning IQ-nur ta'siridagi so'nishining qiymati boshqa boshqa yarimo'tkazgich materiallarda kuzatilgan fototokning IQ-nur ta'siridagi so'nishiga nisbatan ancha chuqur bo'lishi aniqlandi.

Se va Mn kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarda fotoo‘tkazuvchanlikni harorat ta’sirida so‘nishi (FHTS)ni o‘rganish natijalari shuni ko‘rsatdiki, fotoo‘tkazuvchanlikning so‘nishini boshlanishi va chuqurligi fon yorug‘ligining qiymatiga, namunalarning kompensatsiya darajasiga va elektrofaol kirishma atomlarining konsentratsiyasiga bog‘liqligi aniqlandi. Kompensatsiyalangan kremniyda fon yorug‘ligining va kompensatsiya darajasining qiymatlarini tanlab, monoxromatik nurlanish to‘lqin uzunligini va haroratning yetarlicha katta oralig‘ida infraqizil nurlar hamda harorat ta’siridagi fototokning so‘nishini kuzatish mumkinligi aniqlandi. Infraqizil nurlar va harorat ta’siridagi fototokning so‘nishini kuzatilishiga kompensatsiyalangan kremniyda ikki marta ionlashgan selen yoki marganes kirishma atomlari hosil qilgan chuqur energetik sathlar sababchi ekanligi aniqlandi. Bu ionlashgan kirishma atomlar chuqur energetik sathlarni hosil qilishi bilan birga Se va Mn kirishma atomlarining nanoklasterlarini ham hosil qilishi aniqlandi:

$Si\langle Se \rangle E_c = 0,51 \text{ eV}$, donor

$Si\langle Mn \rangle E_c = 0,5 \text{ eV}$, donor.



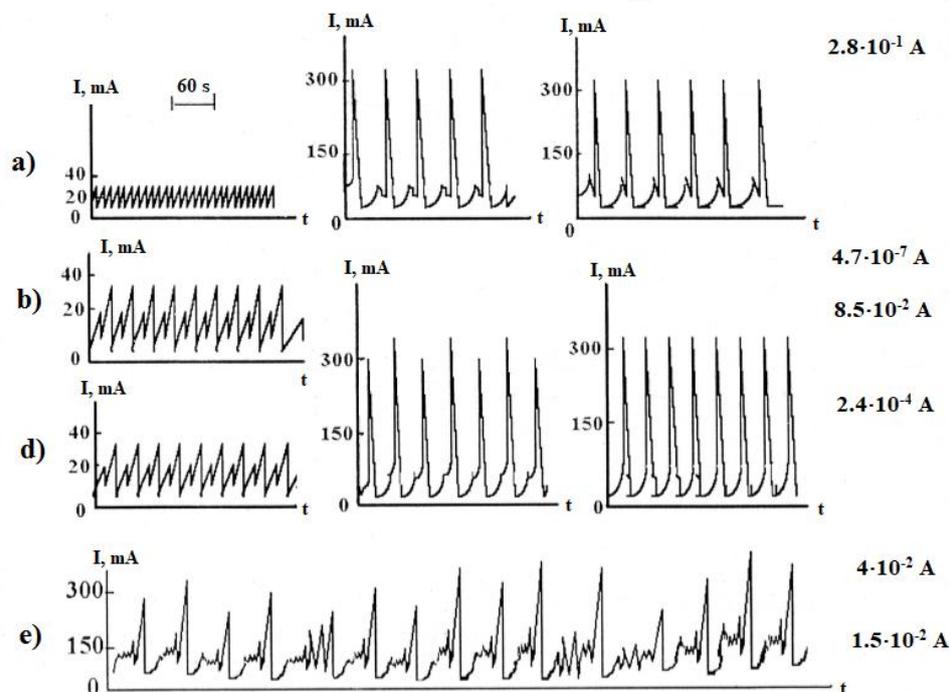
3-rasm. Kompensatsiyalangan kremniyda past chastotali tok avtotebranishining turli shakllari: a-kvazigarmonik, b-cho‘qqisimon, d-reflektiv, e-uzoq muddatli

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, ma’lum sharoit-larda (elektr maydon kuchlanishi va yorug‘lik) infraqizil nurlar va harorat ta’siridagi fotoo‘tkazuvchanlikni so‘nishi kuzatilgan selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarda turli shakldagi tok avtotebranishlarini vujudga kelishi aniqlandi (3- va 4-rasmlarga qarang).

Kompensatsiyalangan kremniydagi avtotebranish jarayonlarini har tomonlama va kompleks o‘rganish shuni ko‘rsatdiki, mavjud termo-dinamik sharoitlarni (elektr maydon kuchlanishi, yorug‘lik, harorat va boshqalar) boshqarish orqali turli tabiatga

ega bo‘lgan bir necha turdagi tok avtotebranishlarini bir materialda olish mumkinligi aniqlandi.

Diffuziya usuli bilan kremniyga kiritish uchun tanlangan kirishma atomlarning elementlaridan qat’iy nazar, avtotebranishlarni kuzatish uchun kremniyning taqiqlangan sohasida kirishma atomlarining chuqur energetik sathlari mavjud bo‘lishi kerakligi aniqlandi.

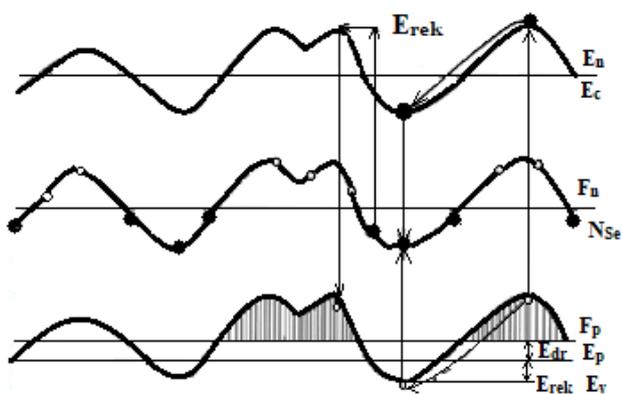


4-rasm. Yorug‘likning turli qiymatlaridagi tok avtotebranishlarning turli shakllari: T=80 K a - $5 \cdot 10^{-2}$ lyuks, b - 10^{-1} lyuks, d - 10 lyuks, e – 50 lyuks

Selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniydagi past chastotali tok avtotebranishining fizik mexanizmini tushuntirish uchun A.Ya.Shik va M.K.Sheynikman tomonidan taklif qilingan bir jinsli bo‘lmagan yarimo‘tkazgich materiallarning fizik modelidan foydalanildi. Bu modelga ko‘ra, bir jinsli bo‘lmagan yarimo‘tkazgichda o‘tkazuvchanlik sohasi va valent sohasining relyeflarida fluktuatsiyalar hosil bo‘ladi. Bunday bir jinsli bo‘lmagan notekisliklarning yuzaga kelishi uchun yarimo‘tkazgich material kirishma atomlari bilan kuchli legirlangan bo‘lishi, ya’ni kirishma atomlarning konsentratsiyasi $N \approx 10^{18} \div 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ oraliqda bo‘lib, ular hajm bo‘yicha bir xil taqsimlangani uchun ichki potentsial maydonlarni paydo bo‘lishi hisobiga yarimo‘tkazgich materialning o‘tkazuvchanlik va valent sohaslarining relyeflarini fluktuatsiya bo‘lishi bilan tushuntirilgan. Shu kabi fizik model nanoelektronikada o‘tapanjaralarda kuzatilgan fizik jarayonlarning mohiyatini tushuntirishda ham taklif qilingan “Legirlangan o‘tapanjara”ning fizik mexanizmi “Elektronika va nanotexnologiyaga kirish” darsligida mualliflar V.N. Lozovskiy, G.S.Konstantinova va S.V. Lozovskiy tomonidan to‘liq tushuntirib berilgan.

Bizning holatda, kirishma atomlarining (selen yoki marganes) konsentratsiyasi o‘talegrilgan holatdagi kirishma atomlarning konsentratsiyasiga qaraganda ikki-

uch daraja past bo'lsa-da, kremniyda bu kirishma atomlar ikki marta ionlashgan holatda bo'lib, bir necha atomlardan tashkil topgan nanoklasterlarni hosil qiladi, ularning zaryadi har doim ± 2 dan ortiq bo'ladi. Shakllangan nanoklasterlarning Dabayev ekranlashishining radiusi nisbatan katta o'lchamlarda bo'lib, ular bir-biri bilan o'zaro birlashishi natijasida kompensatsiyalangan kremniyning taqiqlangan sohasida o'tkazuvchanlik va valent sohalarni fluktuatsiyalanishiga va potentsiallar relyefini hosil bo'lishiga olib keladi. Selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan past chastotali tok avtotebranishlarining fizik mexanizmini o'tkazuvchanlik va valent sohalarning fluktuatsiyasiga asoslanib tushuntirishda quyidagi fizik model taklif etildi. Tok avtotebranishining mexanizmini tushuntirish uchun, misol sifatida, selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalari tanlab olindi.



5-rasm. Selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyning sohalar diagrammasini bir jinsli bo'lmagan fluktuatsiyali potentsial relyefi

Taklif etilgan modelga asosan, doimiy yorug'likda generatsiyalangan muvozanatda bo'lmagan elektronlar selen kirishma atomlarining +8 gacha musbat zaryadlangan nanoklasterlari hosil qilgan energetik sathlarda ushlanib qolinadi, kovaklar esa valent sohasining potentsial o'ralarida to'planadi. Bunday holda, elektr o'tkazuvchanlik (5-rasmga qarang) valent sohada joylashgan "oquvchanlik" sathidagi kovaklarning konsentratsiyasi hamda dreyf potentsial to'sig'ining qiymatiga bog'liq bo'ladi.

Taklif etilgan modelga asoslanib, kompensatsiyalangan kremniyda tokning past chastotali avtotebranishini vujudga kelishi va doimiy davriy takrorlanishining shartlarini matematik tarzda tavsiflash mumkin. Tok tashuvchilar konsentratsiyasining sathlarda ("oquvchanlik" va selen atomlarini chuqur energetik sathida) vaqt va haroratga bog'liq o'zgarishini tavsiflovchi tenglamalar tizimini quyidagicha yozish mumkin:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{jE}{\rho c} - b(T - T_0) \\ \frac{dP}{dt} &= L - C_{nr}rp - C_{pm}Sp \\ \frac{dn}{dt} &= L + BS - C_{np}(N_2 - r)n - C_{nm}(N_m - S)n \\ \frac{dr}{dt} &= C_{nr}(R - r)n - C_{pr}rp \\ S &= p - n - r; j = ep\mu E e^{-\frac{E_{\partial p}}{RT}} \end{aligned} \quad (1)$$

bunda E - elektr maydon kuchlanishi, S_n - issiqlik uzatish koeffitsiyenti; h - namunaning yon tomon sirti; r – material zichligi, C – solishtirma issiqlik sig‘imi; A – doimiy parametr; S_n – namunaning kesim yuzasi; L - elektronning valent sohasidan o‘tkazuvchanlik sohasiga o‘tish omili; S, r - selen kirishma atomlarining hamda elektronlarning konsentratsiyasi; C_{nr}, C_{pr} - rekombinatsiya sathida elektron va kovaklarning yutilish koeffitsiyentlari; N_{Se}, N_r -ionlashgan selen atomlarining hamda rekombinatsiya sathidagi konsentratsiyalar; B – so‘nish omili.

Tenglamalarni tuzishda issiqlik ajralishi asosan Djoul issiqligi sababli, past haroratlarda namunalarning fotoo‘tkazuvchanligi ancha yuqori bo‘lganda va issiqlik yo‘qotilishlar asosan kremniy sirti orqali sodir bo‘ladi deb qabul qilindi.

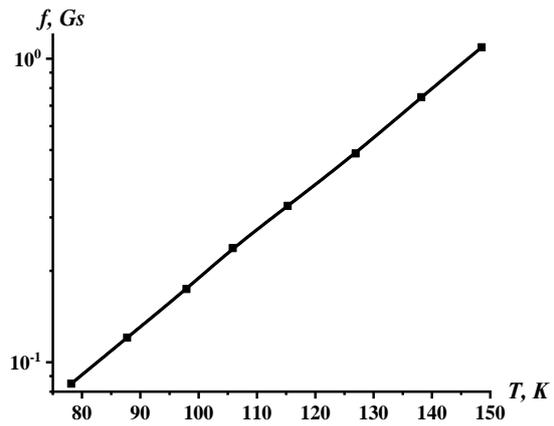
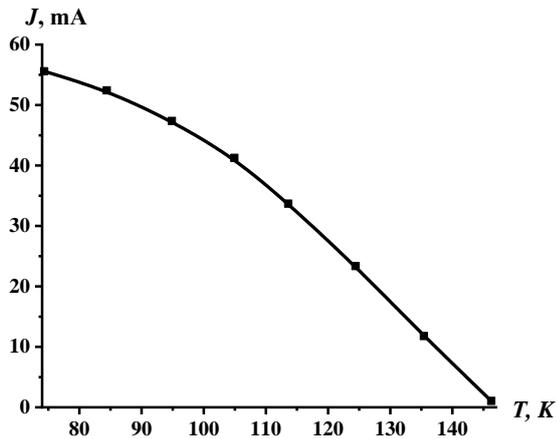
Tenglamalar tizimini umumiy shaklda yechishda ma’lum qiyinchiliklar yuzaga keladi. Shuning uchun, o‘rganilayotgan obyektning xususiyatlaridan kelib chiqqan holda, soddalashtirishlardan foydalanish mumkin. Bu holatdagi eng sekin jarayon namunalardagi issiqlikni uzatish jarayonidir, shuning uchun, sohalardagi va energetik sathlardagi tok tashuvchilarning konsentratsiyasini o‘zgarishi namuna haroratining o‘zgarishiga bog‘liq bo‘ladi deb tanlab olindi. Nazariy hisoblashlarda olingan natijalar tajriba natijalari bilan o‘zaro mos tushdi.

Dissertatsiya ishining **“Selen va marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda tok avtotebranishlarining parametrlariga tashqi omillarning ta’siri, avtotebranishlarni amaliyotda qo‘llash imkoniyatlari”** deb nomlangan to‘rtinchi bobida, selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalardagi tok avtotebranishlarning (rekombinatsion to‘lqinlar) parametrlariga integral yorug‘lik va monoxromatik nurlanishning intensivligi hamda to‘lqin uzunligi, shuningdek, haroratning ta’sirini o‘rganishda olingan natijalari berildi.

Selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalardagi kuzatilgan avtotebranishlarning xususiyatlarini o‘rganish natijalari namunalarda joylashgan taglik harorati $T=80\div 200$ K oralig‘ida o‘zgarganida juda katta o‘zgarishi kuzatildi (6-rasmga qarang). Bu harorat oralig‘ida tok avtotebranishining chastotasi quyidagi qonunga muvofiq o‘zgarishi aniqlandi:

$$f = f_T \exp\left(\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2)$$

bunda $E_T=0,38$ eV va $f_T=24,5$ Gs.



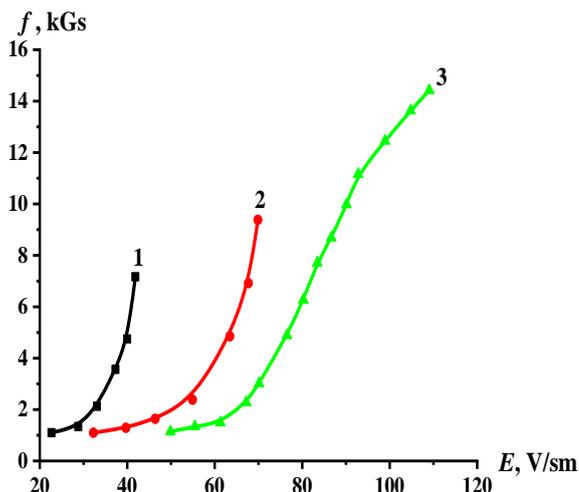
6-rasm. Si<Se> namunalaridagi tok avtotebranishlarning a- amplitudasi va b- chastotasini haroratga bog‘liq o‘zgarishi, $h\nu=1,18$ eV, $J=1,3\cdot 10^{-6}$ Vt/sm² ·s, $E=150$ V/sm, $\rho=9,3\cdot 10^4$ Om·sm

Tadqiqot natijalarini tahlil qilish asosida, harorat oshishi bilan tok avtotebranishlari amplitudasining qiymati kamaydi va $T\approx 200$ K bo‘lganda tok avtotebranishlari kuzatilmay qoldi, ya’ni avtotebranishlarni harorat ta’siridagi so‘nishi kuzatildi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, monoxromatik nurlanish yoki integral yorug‘lik intensivligi hamda ulangan elektr maydon qiymatini oshishi bilan tok avtotebranishlarining harorat ta’siridagi so‘nishi yuqori harorat qiymatlari tomon siljishi aniqlandi.

Kompensatsiyalangan kremniydagi tok avtotebranishlarining parametrlariga elektr maydoni qiymatining ta’sirini o‘rganish maxsus yaratilgan kriostatda amalga oshirildi. Kriostatda haroratni $T=80$ K gacha sovutish va haroratni $T=80\div 350$ K oraliqda ± 1 K aniqlikda ushlab turish va nazorat qilish mumkin. 7-rasmda $T=300$ K da turli solishtirma qarshilikdagi selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalari uchun tok avtotebranishining chastotasini (f) qo‘yilgan elektr maydon kuchlanishining qiymatiga bog‘liqligi ko‘rsatildi.

7-rasmdan ko‘rinib turibdiki, elektr maydon kuchlanishining qiymatini o‘zgarishiga bog‘liq rekombinatsion to‘lqinlarning (RT) chastotasini $f(E)$ o‘zgarishi, selen kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarning solishtirma qarshiligi qiymatidan qat’iy nazar, yaqqol ajralib turadigan ikki qismdan iborat bo‘lishi kuzatildi.

Kuzatishlarda harorat ta’sirida chastota o‘zgarishining birinchi qismida rekombinatsion to‘lqinlarning chastotasi ulangan elektr maydon kuchlanishining qiymatiga bog‘liq holda biroz o‘zgardi, ulangan elektr maydon kuchlanishining ma’lum $E>E_{cr}$ qiymatlarida ikkinchi qism boshlandi, bunda elektr maydonning ortishi bilan tok avtotebranishlarning chastotasi sezilarli darajada oshishi kuzatildi. Shuni ta’kidlash kerakki, Si<Se> namunalarning solishtirma qarshiligini ortishi bilan avtotebranishlar vujudga keladigan elektr maydonning chegara qiymati elektr maydon kuchlanishining yuqori qiymatlari tomon siljidi hamda chastotaning sezilarli darajada oshishi kuzatildi.

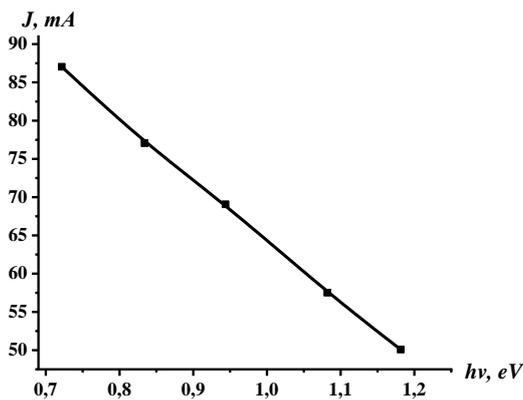


7-rasm. Turli qiymatdagi solishtirma qarshiliklarga ega kompensatsiyalangan kremniy namunalarida tok avtotebranishining chastotasini ulangan elektr maydon kuchlanishiga bog‘liqligi.
1- $\rho=3,5 \cdot 10^2 \text{ Om} \cdot \text{sm}$,
2 - $\rho=1,8 \cdot 10^3 \text{ Om} \cdot \text{sm}$,
3 - $\rho=4 \cdot 10^4 \text{ Om} \cdot \text{sm}$,
T=300 K

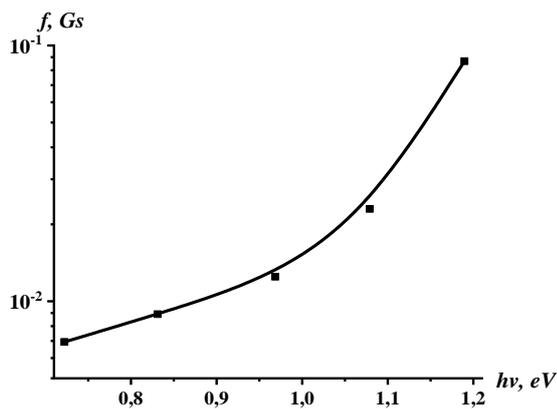
Bu tajriba natijalari shuni ko‘rsatdiki, ma’lum solishtirma qarshilikdagi Si<Se> namunalarga ulangan elektr maydon kuchlanishining ma’lum qiymatlarida tok avtotebranishlari kuzatilishi aniqlandi. Si<Se> namunalarining solishtirma qarshiligi ortib borishi bilan elektr maydoni qiymatida tok avtotebranishining (RT) kuzatilish sohasi kengaydi, shuningdek, avtotebranish chastotasi sezilarli darajada oshdi. Tajriba natijalari asosida T=300 K haroratda selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalari solishtirma qarshiligining qiymati $\rho=3,5 \cdot 10^2 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ dan $\rho=10^5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ gacha oralig‘ida o‘zgarganda, tok avtotebranishining chastotasi $f=5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^4 \text{ Gs}$ oralig‘ida o‘zgardi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarining solishtirma qarshiligini boshqarish orqali avtotebranishning (RT) chastotasini yetarlicha katta oraliqda o‘zgartirish mumkiligi aniqlandi.

Selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarini integral yorug‘lik bilan yoritilganda, qo‘shimcha muvozanatda bo‘lmagan tok tashuvchilarni, ya’ni elektronlar va kovaklarning generatsiyasi hosil bo‘ladi. Bunda erkin elektronlar ikki marta musbat zaryadlangan selen ionlaridan tashkil topgan musbat zaryadlangan klasterlarda ushlab qolinadi. Tok tashuvchi kovaklarning fluktuatsiyasi valent sohasida hosil bo‘lib, ular kontaktga yetib boradi va bu avtotebranishlarni vujudga kelishiga, ularning amplituda qiymatini oshishiga hamda kontaktga yetib boradigan ikki fluktuatsiya orasidagi vaqtning kamayishiga olib keladi, ya’ni RT larning chastota qiymati ortadi.

Olingan tadqiqot natijalarini tahlil qilish asosida yarimo‘tkazgichlarda RT larni hosil bo‘lishining fizik mexanizmidan farqli selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarida chuqur energetik sathlarni hosil qiluvchi selen ionlari Se^{++} yoki marganes ionlari Mn^{++} dan iborat ko‘p karrali musbat zaryadlangan nanoklasterlarni shakllanishi hisobiga bo‘lishi ko‘rsatib berildi.



a



b

8-rasm. Selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy (p-Si<Se>) namunalarida tok avtotebranishining a - amplitudasini va b - chastotasini spektral bog‘liqligi, $\rho=9,3 \cdot 10^4 \text{ Om} \cdot \text{sm}$, $E=150 \text{ V/sm}$, $T=80 \text{ K}$, $I_{hv}=1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Vt/sm}^2 \cdot \text{s}$

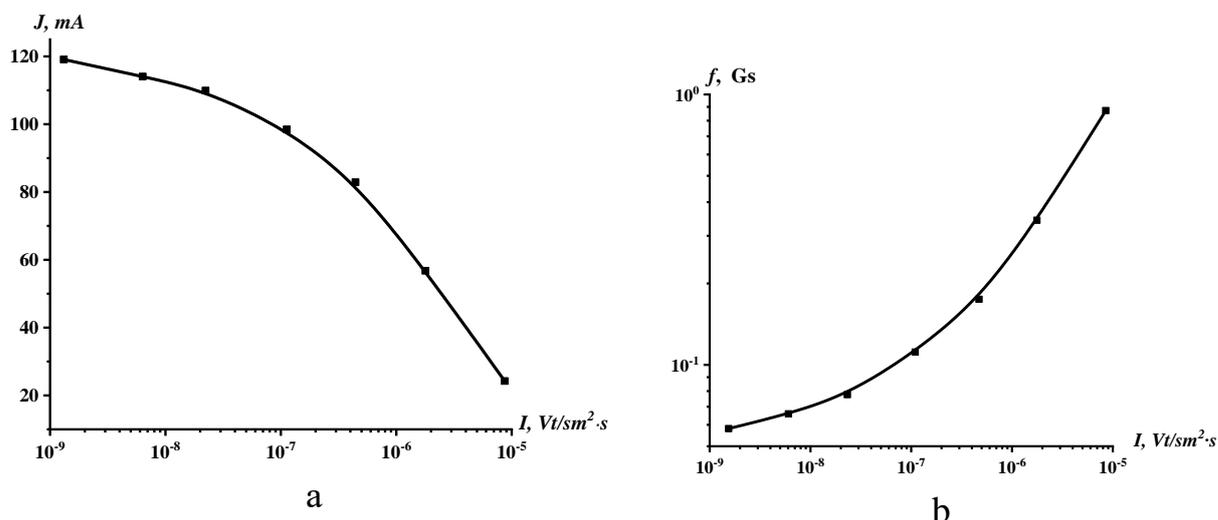
Bunday holda, hosil bo‘lgan nanoklasterlar RT larni vujudga kelishiga sababchi bo‘ladi, ya’ni tok tashuvchilarni (elektron va kovaklarni) yutish yuzasi bir-biridan katta farq qilgan nanoklasterlar hosil bo‘ladi. Bizning holatda, bu $S_n \gg S_p$ shart selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda bajariladi. Marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari uchun rekombinatsion to‘lqinlarni hosil bo‘lishining fizik mexanizmini ham yuqoridagi kabi tushuntirish mumkin.

Olingan tadqiqot natijalarning tahlilidan aniqlandiki, Si<Se> kremniy namunalarida past chastotali tok avtotebranishlarining katta harorat oralig‘ida $T=80 \div 200 \text{ K}$ va kremniyning taqiqlangan soha energiyasidan kichik bo‘lgan fotonlar energiyasi ($E_g > h\nu$) ta’sirida kuzatildi. Tok avtotebranishlarining parametrlarini monoxromatik nurlanishning spektriga bog‘liqligini o‘rganishda selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalarida kuzatilgan tokning harorat-elektr tebranishlarining (THET) bir qator xususiyatlarini aniqlash imkonini berdi.

Solishtirma qarshiligi $\rho_0 > 10^3 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo‘lgan p-Si<Se> namunalarida doimiy katta amplitudali tok avtotebranishlari ($J=200 \text{ mA}$ gacha) kuzatildi. Tok avtotebranishlari tushayotgan fotonlarning energiya qiymati $h\nu \geq 0,7 \text{ eV}$ bo‘lganidan boshlab vujudga keldi. Tushayotgan fotonlarning energiyasi $h\nu=1,1 \div 1,2 \text{ eV}$ oralig‘ida avtotebranishlarning amplitudasi tushayotgan fotonlar energiyasiga kuchsiz bog‘liq bo‘lib, quyidagi qonunga asosan tok avtotebranishining chastotasi qiymati keskin oshishi kuzatildi (8-rasmga qarang):

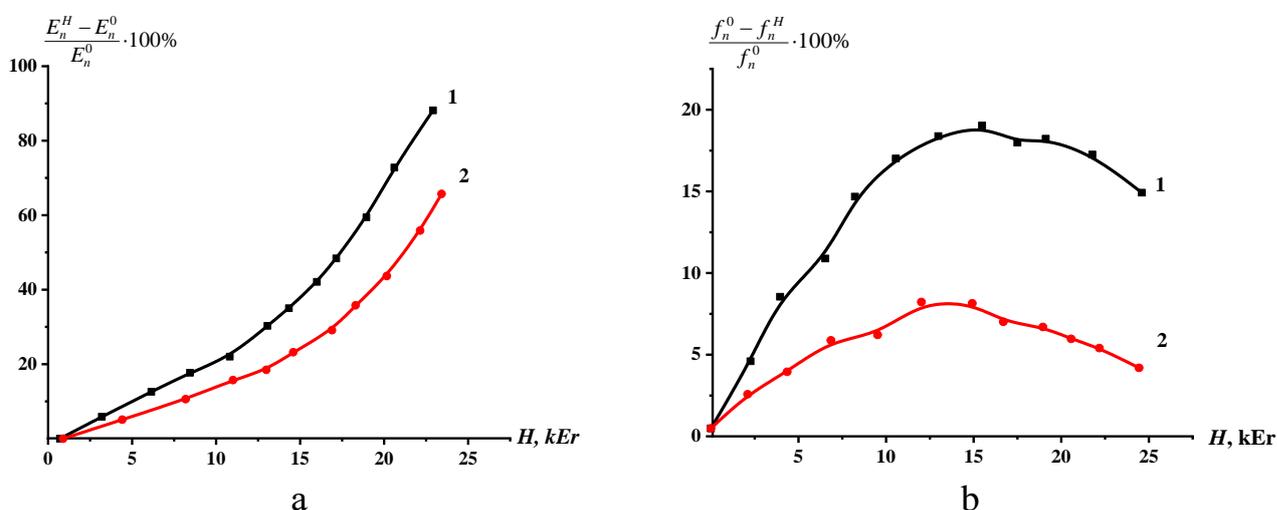
$$f = f_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_0}\right) \quad (3)$$

bunda $E_0=0,27 \text{ eV}$ va $f_0=4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Gs}$.



9-rasm. Selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy (Si<Se>) namunalarida tok avtotebranishlarining a-amplitudasi va b-chastotasini monoxromatik nurlanishning intensivligiga bog‘liqligi, $h\nu=1,18$ eV va $\rho=9,3 \cdot 10^4$ Om·sm, $T=80$ K, $E=150$ V/sm

Bu holda tok avtotebranishlarining shakli deyarli o‘zgarmadi. Tadqiqot natijalari asosida selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy namunalarida kuzatilgan tok avtotebranishlari boshqa yarimo‘tkazgich materiallarda kuzatilganlaridan farqli, nisbatan katta amplitudada hamda monoxromatik nurlanishning yetarlicha kichik intensivligida vujudga kelishi aniqlandi. (9-rasmga qarang).



10-rasm. Magnit maydon kuchlanganligining yo‘nalishi tok oqimining yo‘nalishiga 1-ko‘ndalang va 2-parallel bo‘lganda, a-avtotebranishlarni vujudga kelishini elektr maydon qiymatiga va b-chastotasini magnit maydon qiymatiga bog‘liqligi, $T=300$ K da $E_{n0}=55$ V/sm; $f_{n0}=3,25$ kGs, $\rho=5 \cdot 10^3$ Om·sm

Magnit maydon qiymatining tok avtotebranishlarini maydon kuchlanishining qiymati bo‘yicha vujudga kelish shartlariga hamda p-turdagi selen kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniydagi tok avtotebranishlarining (RT)

parametrlariga (amplitudasi, chastotasi) ta'sirini o'rganish shuni ko'rsatdiki, magnit maydonning qiymati avtotebranishlar parametrlarini sezilarli darajada o'zgartirar ekan. 10-rasmdan ko'rinib turibdiki, magnit maydon kuchining ortishi bilan ulangan tok kuchining ko'ndalang bo'ylama yo'nalishidan qat'iy nazar, avtotebranishlarni vujudga kelishidagi maydon kuchlanishining chegara qiymati ortdi va chegara chastotasi f_p dastlab ma'lum bir kritik qiymatgacha oshdi, so'ngra magnit maydon kuchlanishining qiymati ortishi bilan kamaydi.

Tadqiqot natijalarining tahlili shuni ko'rsatdiki, tok avtotebranishining parametrlari qo'yilgan magnit maydon qiymatida sezilarli o'zgardi. Bu magnit maydon qiymatini boshqarish orqali belgilangan parametrli (amplituda va chastota) avtotebranishlarni olish mumkinligi ko'rsatildi.

Tajriba tadqiqotlari va olingan natijalarning tahlili asosida selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan tok avtotebranishlari asosida amplituda-chastotali chiqishga ega turli xil fizik kattaliklarni o'lchovchi datchiklarni hamda qattiq jism generatorlarini yaratish imkoniyatlari taklif etildi (1-jadvalga qarang).

1-jadval.

Selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlab, kompensatsiyalangan kremniy asosida fizik kattaliklarni o'lchovchi datchiklarning sezgirlik koeffitsiyentlari

Qo'llanish sohasi	Sezgirlik koeffitsiyenti			
	chegaraviy maydon kuchlanishi bo'yicha	chegaraviy chastota bo'yicha	tebranishlar amplitudasi bo'yicha	tebranishlar chastotasi bo'yicha
Termodatchik	$-(2\div 5) \text{ V/sm}\cdot\text{K}$	$(2\div 4) \cdot 10^2 \text{ Gs/K}$	$(2\div 5) \cdot 10^{-6} \text{ A/K}$	$(2\div 4) \cdot 10^2 \text{ Gs/K}$
Fotodatchik	$-(4\div 6) \text{ V/sm}\cdot\text{lyuks}$	$(3\div 5) \cdot 10^2 \text{ Gs/lyuks}$	$(3\div 5) \cdot 10^{-6} \text{ A/lyuks}$	$-(3\div 5) \text{ Gs/lyuks}$
Tenzodatchik	$-(3\div 5) \cdot 10^{-8} \text{ V/sm}\cdot\text{Pa}$	$(2\div 5) \cdot 10^{-8} \text{ Gs/Pa}$	$(2\div 5) \cdot 10^{-10} \text{ A/Pa}$	$-(1\div 3) \cdot 10^{-5} \text{ Gs/Pa}$
Magnitodatchik	$-(2\div 5) \cdot 10^{-3} \text{ V/sm}\cdot\text{Er}$	$-(5\div 6) \cdot 10^{-3} \text{ Gs/Er}$	$-(5\div 7) \cdot 10^{-11} \text{ A/Er}$	$(3\div 5) \cdot 10^{-2} \text{ Gs/Er}$

Olingan tadqiqot natijalarining tahlili asosida turg'un chiqish parametrlariga ega bo'lgan funksional elektronikada fizik kattaliklarni o'lchovchi datchiklarni hamda qattiq jism generatorlarini yaratish mumkinligi ko'rsatib berildi.

XULOSA

Dissertatsiya ishini bajarish davomida olingan tadqiqot natijalari asosida quyidagi ilmiy natijalar aniqlandi:

1. Olingan tajriba natijalari asosida selen kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda harorat $T=1100\div 1250^\circ\text{C}$ va diffuziya vaqti $t=5\div 10$ soat, marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda harorat $T=950\div 1200^\circ\text{C}$ va diffuziya vaqti $t=0,5\div 1$ soat oralig'ida bo'lganda, boshlang'ich monokristall kremniyning kristall panjarasida selen yoki marganes kirishma atomlarining nanoklasterlarini

shakllanishining ikki bosqichli takrorlanuvchi diffuzion texnologiyasi ishlab chiqildi.

2. Kremniyni selen kirishma atomlari bilan legirlashdagi diffuziya jarayonida diffuzantning bug‘ holatidagi bosimini boshqarib, kremniy sirtida eroziya kuzatilmaydigan diffuzion texnologiya ishlab chiqildi, bu kerakli elektrofizik parametrlarga ega kompensatsiyalangan kremniy namunalarini olish imkonini berdi.

3. Kompensatsiyalangan kremniyda avtotebranishning vujudga kelish shartlari (elektrmaydon kuchlanganligi, harorat, yoritilganlik) ni boshqarib, uch xil tabiatdagi turg‘un va takrorlanuvchi parametrlilik avtotebranishlar bitta namunada kuzatildi hamda avtotebranishlarning vujudga kelishini termodinamik shartlari va harorat bo‘yicha chegara sohasi selen kirishma atomlari bilan legirlangan namunalar uchun $T=80\div 300$ K, marganes kirishma atomlari bilan legirlangan namunalar uchun $T=80\div 350$ K oralig‘ida bo‘lishi aniqlandi.

4. Selen kirishma atomlari diffuziya usuli bilan legirlangan kremniy namunalarida $T=80\div 300$ K harorat oralig‘ida tok avtotebranishining chastotasi $f=5\cdot 10^{-3}\div 10^5$ Gs oralig‘ida, amplitudasi $J=10^{-4}\div 2\cdot 10^{-1}$ A oralig‘ida, marganes kirishma atomlari diffuziya qilingan kremniy namunalarda $T=80\div 350$ K harorat oralig‘ida avtotebranishning chastotasi $f=10^{-3}\div 5\cdot 10^5$ Gs va amplitudasi $J=3\cdot 10^{-5}\div 2,5\cdot 10^{-1}$ A oralig‘ida bo‘lishi hamda magnit maydoni 25 kEr gacha o‘zgarishida avtotebranishning chastotasi $f=10^2\div 3,5\cdot 10^3$ Gs oralig‘ida, amplitudasi $J=10^{-4}\div 6\cdot 10^{-5}$ A oralig‘ida bo‘lishi aniqlandi.

5. Selen yoki marganes kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyda kuzatilgan tok avtotebranishlarining fizik mexanizmini tushuntirishda, bir jinsli bo‘lmagan yarimo‘tkazgichning modeli taklif etildi va bu model asosida olingan tajriba natijalarining fizik mohiyatlari tushuntirildi.

6. Kompensatsiyalangan kremniyda kuzatilgan tok avtotebranishlarining amplituda va chastotasini chiziqli o‘zgarishi asosida fizik kattaliklarni o‘lchaydigan amplituda-chastotali chiqishga ega datchiklarni hamda elektromagnit to‘lqinli qattiq jism generatorlarini yaratish imkoniyatlari ko‘rsatib berildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕК -
ТРОНИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА УЗБЕКИСТАНА**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

ШОАБДУРАХИМОВА МАНЗУРА МИРЗАХИД КИЗИ

**АВТОКОЛЕБАНИЯ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ
ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ СЕЛЕНА И МАРГАНЦА**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве Высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2024.1.PhD/FM771

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziyounet» (www.ziyounet.uz).

Научный руководитель: Зикриллаев Нурулто Фатхуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Азаматов Закир Тахирович
доктор физико-математических наук, профессор

Имамов Эркин Зуннунович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Андижанский государственный университет

Защита диссертации состоится 19.09 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней DSc.30.08.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-76-94; Факс: (998 71) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном Центре института (зарегистрирована за № 69) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Тошкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.

Автореферат диссертации разослан «06.09.2025» (реестр протокола рассылки № 69 от 06.09.2025).



Ш.Б. Утамурадов:
председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Ж.Ж. Хамдамов:
ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, доктор философских наук (PhD), с.н.с.

Н.А. Тургунов:
Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность диссертационной работы. В мире ведутся широкомасштабные научные исследования по получению новых полупроводниковых материалов с определенными и воспроизводимыми электрофизическими параметрами, которые позволяют создать термостабильные и радиационно-стойкие приборы и устройства. Ученые и специалисты в научных центрах и высших учебных заведениях в развитых странах ведут исследования для разработки новых полупроводниковых материалов и структур, отличающихся от известных своими фундаментальными физическими свойствами. Перспективным материалом полупроводниковой электроники является монокристаллический кремний, легированный примесными атомами, которые создают глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне материала. В этих материалах был обнаружен ряд новых, ранее неизвестных интересных физических эффектов и явлений, которые можно успешно применить в различных отраслях экономики. Одними из таких физических явлений являются самовозбуждающиеся и незатухающие автоколебания тока, которые представляют большой научный и практический интерес у специалистов. До настоящего времени учеными целиком не раскрыты природа и физические механизмы этого явления. Обнаруженные стабильные и регулярные автоколебания тока в кремнии существенно расширяют возможности применения их в микроэлектронике, при создании принципиально нового поколения многофункциональных универсальных датчиков с амплитудно-частотным выходом и твердотельных генераторов электромагнитных сигналов.

Из анализа литературных данных в области автоколебаний тока в полупроводниках установлено, что до настоящего времени не установлены закономерности возбуждения автоколебаний тока в зависимости от электрофизических параметров исходного полупроводникового материала. В научных центрах ведущих стран мира ведутся научные исследования зависимости условий возбуждения и параметров автоколебаний тока от удельного сопротивления материала, от концентрации электроактивных примесных атомов, от типа проводимости и типа легирующего элемента, а также от формирования образованных нанокластеров примесных атомов и нахождения их в кристаллической решетке исходного кремния. Мировые научные общества рассматривают и считают актуальным вопросом изучение влияния внешних воздействий на условия возбуждения, на параметры автоколебаний тока и объяснение физических механизмов наблюдаемых явлений.

В Республике Узбекистан достигнуты определенные научные результаты в области исследования физики полупроводниковых материалов и объяснены физические механизмы обнаруженных явлений, а также применения разработанных приборов и устройств на их основе в различных областях электроники. В Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-

5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» отмечены задачи «...обеспечение неразрывной связи научных исследований в области физики с производством, расширение масштаба научных работ, направленных на решение проблем в отраслях экономики; повышение результативности и практического значения научных исследований и инновационной деятельности»¹. В данном направлении большое научное значение имеет разработка новых полупроводниковых приборов с новыми функциональными возможностями с малым энергопотреблением, которые позволяют сэкономить затраты энергии и уменьшить себестоимость.

Данное диссертационное исследование в определенной степени направлено на выполнение задач, обозначенных в Указах Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы»², № УП-6097 от 29 октября 2020 года «Об утверждении концепции развития науки до 2030 года»³, в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-5011 от 3 февраля 2021 года «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности отечественной продукции»⁴, в Постановление Президента Республики Узбекистан №ПП-57 от 16 февраля 2023 года «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году»⁵, а также других нормативно-правовых документах, принятых в данной области.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии Республики Узбекистан III-3 «Энергетика, энерго – и ресурсосбережение, транспорт, машина – и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Исследование автоколебательных процессов, обнаруженных в полупроводниковых материалах и структурах, больше привлекает внимание ученых и специалистов в связи с ростом интереса к неравновесным процессам, которые широко применяются для получения электромагнитных колебаний, передачи информации на расстоянии.

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики».

² Указ Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы».

³ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-6097 от 29 октября 2020 года «Об утверждении концепции развития науки до 2030 года».

⁴ Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-5011 от 3 февраля 2021 года «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности отечественной продукции».

⁵ Постановление Президента Республики Узбекистан №ПП-57 от 16 февраля 2023 года «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году».

В научных школах зарубежных ученых таких как А.Ш.Абдинова (Бакинский государственный университет, г. Баку, Республика Азербайджан), Ю.Секи (Япония), Н.Холоняк (Национальная инженерная академия наук США, г. Вашингтон, США), З.Чен (Синьцзянский технический институт физики и химии, Китайская академия наук, г. Урумчи, Китай), и других были исследованы автоколебания тока в различных полупроводниковых материалах и предложен физический механизм колебания и показана возможность использования на практике этого явления для создания твердотельных генераторов.

В научных школах российских ученых С.Г. Калашникова (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, г. Москва), Ю.И. Балкарея и Л.Л. Голика (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, г. Фрязино), Е.Б. Астровой (Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург), В.В. Колобаева (Московский энергетический институт, г. Москва) и в других научных школах были исследованы колебания тока обнаруженные в различных полупроводниковых материалах и структурах. С.Г.Калашниковым предложена трёхуровневая модель для объяснения физического механизма низкочастотного колебания тока на основе обнаруженного колебания в полупроводниковых соединениях CdS и CdSe. Этими авторами при исследовании колебания тока в полупроводниках показано, что для возбуждения автоколебания необходимо образование глубокого энергетического уровня примесных атомов, внедренных различными методами (легирование при выращивании полупроводникового материала, диффузионное легирование или ионная имплантация). Из анализа научных работ этих авторов также установлено, что наблюдаемые колебания тока в различных материалах имеют разные природы и поэтому механизмы приложенных колебаний отличается друг от друга.

В Республике Узбекистан в научных школах созданных академиками Академии наук Республики Узбекистан Р.А. Муминовым, М.К. Бахадирхановым, А.М. Мамадалимовым, С.З. Зайнабидиновым, а также профессорами К.П. Абдурахмановым, Ш.Б. Утамуродовой, Э. Арзикуловым, К. Исмаиловым и других ученых проводились научные исследования по усовершенствованию технологии легирования примесными атомами полупроводникового кремния, изучению их электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств, а также разработке современных приборов на их основе. В научных школах академика М.К.Бахадырханова, профессоров Э.Арзикулова и Т.Камилова исследовались автоколебания тока в компенсированном кремнии, полученном методом диффузии или ионной имплантации. В этих научных школах показано, что в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами марганца, цинка, серы и селена наблюдаются различные автоколебания тока при определенных условиях возбуждения, т.е. были исследованы три вида неустойчивостей тока с разными природами.

Из литературного анализа установлено, что до настоящего времени не были получены автоколебания тока с воспроизводимыми параметрами в зависимости от электрофизических параметров исходного кремния. Для объяснения физического механизма автоколебаний тока, предложенного разными авторами не учтена роль глубоких энергетических уровней примесных атомов и расположение этих примесных атомов в кристаллической решетке кремния.

Связь темы диссертации с тематическими планами научно-исследовательской работы высшего учебного заведения. Диссертационная работа выполнена на основе научно-исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета на кафедре «Цифровая электроника и микроэлектроника» при выполнении фундаментального научно-исследовательского проекта № Ф–ОТ–55 по теме «Разработка научной основы получения объемно-структурированного кремния на основе формирования нанокластеров примесных атомов как нового класса наноматериалов с новыми функциональными возможностями» (2017-2020 гг.) финансируемого министерством Высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан.

Цель диссертационной работы. Комплексное исследование автоколебательных процессов в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена или марганца.

Задачи исследования:

разработать технологию получения образцов компенсированного кремния диффузионно-легированного примесными атомами селена или марганца с заданными электрофизическими параметрами, с удельным сопротивлением $\rho = 10^3 \div 10^5$ Ом·см р- и n-типа проводимости;

изучить элементный состав и структуру образованных нанокластеров примесных атомов селена или марганца в решетке монокристаллического кремния;

изучить зависимость параметров (амплитуда и частота) и условий возбуждения автоколебаний тока по напряженности приложенного электрического тока от температуры, интенсивности интегрального света, длины волны монохроматического излучения и магнитного поля;

разработать модели для объяснения физического механизма автоколебаний тока, исследованного в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена или марганца;

показать возможности практического применения автоколебания тока, обнаруженного в компенсированном кремнии легированного примесными атомами селена или марганца в твердотельной электронике.

Объектом исследования является монокристаллический кремний р-типа с удельным сопротивлением $\rho \sim 1 \div 100$ Ом·см (марки КДБ-1;10;100), с концентрацией остаточного кислорода $N_O = 5 \div 7 \cdot 10^{17}$ см⁻³, легированный примесными атомами селена или марганца.

Предметом исследования является изучение параметров и условий возбуждения автоколебательных процессов компенсированного кремния, легированного атомами селена или марганца в зависимости от электроактивных концентраций примесных атомов, от величины электрического и магнитного полей, от освещенности интегрального света и монохроматического излучения, от природы образования нанокластеров примесных атомов в кремнии.

Методы исследования. В диссертационной работе были использованы следующие методы: сканирующий электронный микроскоп марки SEM Jeol JSM-IT200LA, Фурье-спектрометр марки ФСМ-1202, Вакуумная установка марки УВР-3М, эффект Холла, метод Ван-дер-Пау на установке марки Escoria HMS-3000 и другие современные методы и измерительные приборы, позволяющие определить состав, электрофизические и фотоэлектрические параметры и определить амплитуду и частоту автоколебания тока в кремнии.

Научная новизна диссертационной работы:

разработана двухэтапная воспроизводимая технология формирования нанокластеров примесных атомов селена или марганца в кристаллической решетке монокристаллического кремния, которая позволила определить оптимальные интервалы температуры диффузии для примесных атомов селена $T=1100\div 1250^\circ\text{C}$ и времени диффузии $t=5\div 10$ час, а для образцов кремния легированного примесными атомами марганца в интервале $T=950\div 1200^\circ\text{C}$ и времени диффузии $t=0,5\div 1$ час;

установлено, что в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена или марганца, управляя условиями возбуждения (напряженность электрического поля, температура и освещенность) можно наблюдать автоколебания тока с тремя различными природами возбуждения в одном образце и определены термодинамические условия существования и граничные области этих автоколебаний со стабильными и воспроизводимыми параметрами в широком интервале температур, для образцов $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Se}\rangle$ $T=80\div 300$ К, а для образцов $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$ $T=80\div 350$ К;

впервые выявлено влияние температуры $T=80\div 300$ К на параметры автоколебаний тока, наблюдаемых в компенсированном кремнии легированном примесными атомами селена в интервале частоты $f=5\cdot 10^{-3}\div 10^5$ Гц и амплитуды $J=10^{-4}\div 2\cdot 10^{-1}$ А, а для образцов кремния легированного примесными атомами марганца при температуре $T=80\div 350$ К частота автоколебаний в интервале $f=10^{-3}\div 5\cdot 10^5$ Гц и амплитуды $J=3\cdot 10^{-5}\div 2,5\cdot 10^{-1}$ А, а также выявлено изменение частоты автоколебаний тока в интервале $f=10^2\div 3,5\cdot 10^3$ Гц и амплитуды $J=10^{-4}\div 6\cdot 10^{-5}$ А при воздействии магнитного поля до 25 кЭр;

для объяснения физических механизмов автоколебаний тока в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена или марганца предложена модель неоднородного полупроводника, в которой были объяснены физические особенности полученных экспериментальных результатов исследований;

из анализа экспериментальных результатов выявлено, что при линейном изменении параметров (амплитуда, частота) автоколебаний тока в компенсированном кремнии в интервале температур $T=80\div 350$ К показаны возможности создания датчиков физических величин с амплитудно-частотным выходом и твердотельных генераторов электромагнитных колебаний.

Практические результаты исследования:

разработана двухэтапная воспроизводимая диффузионная технология получения образцов компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца с заданными электрофизическими параметрами с учетом концентрации примесных атомов бора в исходном кремнии;

определены термодинамические условия и технологические режимы получения компенсированного кремния с максимальной электроактивной концентрацией примесных атомов селена или марганца без эрозии поверхности с учетом давления паров диффузантов во время диффузии;

показана возможность создания датчиков физических величин с амплитудно-частотным выходом и твердотельных генераторов электромагнитных сигналов на основе компенсированного кремния.

Достоверность результатов исследований обеспечивается применением современных высокоточных измерительных приборов и оборудований (SEM Jeol JSM-IT200LA, ФСМ-1202, Escoria HMS-3000), а также методов экспериментальных исследований независимых друг от друга, которые позволили получить научные данные о состоянии примесных атомов селена или марганца в компенсированном кремнии. Соответствие экспериментальных результатов исследований, условий возбуждения и параметров автоколебаний тока с теоретическими расчетами, а также предложенных физических механизмов автоколебаний тока, представленных в диссертационной работе и хорошее согласие предложенной модели неоднородного полупроводника с фундаментальными представлениями физики полупроводников.

Научная и практическая значимость результатов исследований.

Научная значимость полученных результатов заключается в использовании физической модели неоднородного полупроводникового материала для объяснения механизма автоколебания тока в образцах компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца. Полученные результаты исследования дают дополнительные информации о неравновесных процессах, наблюдаемых в полупроводниковых материалах и структурах, что расширяет научное представление о физике этого явления и служат для развития нового направления в физике полупроводников.

С практической значимостью результатов исследования показаны возможности создания датчиков физических величин и твердотельных генераторов электромагнитных сигналов на основе компенсированного кремния, который позволяет без дополнительных электросхематехнических переработок получить переменный сигнал с большой амплитудой, которая

дает возможность решение проблемы при передаче информации на дальние расстояния.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов исследований автоколебательных процессов в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена или марганца:

разработанная безэрозная диффузионная технология получения кремния легированного примесными атомами селена или марганца с учетом давление паров диффузанта применено на АО «ФОТОН» (справка за номером № 04-3/430 от 1 апреля 2024 года Ассоциация «Узэлтехсаноат» Республики Узбекистан и справка за номером № 68 от 27 марта 2024 года АО «ФОТОН»). Использование научных результатов позволило получить приборы (диоды, и транзисторы) с заданными стабильными рабочими параметрами;

научные результаты полученные на основе исследования автоколебаний тока в образцах кремния диффузионно-легированного примесными атомами селена или марганца были использованы при выполнении фундаментального проекта ОТ-Ф2-77 “Совершенствование методов прогнозирования надежности полупроводниковых приборов на основе моделирования с учетом внутренних дефектов структуры” (2017-2020) в Каракалпакском государственном университете имени Бердаха (справка Министерства Высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером № 4/14-4/4-13473 от 13 августа 2024 года). Научные результаты позволили создать датчики с амплитудно-частотным выходом, а также твердотельные генераторы работающие в широком диапазоне частоты $f=10^{-3}\div 10^5$ Гц.

Апробация результатов исследования. Основные научные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на 10 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. Всего по основным результатам работ по теме диссертации были опубликованы 23 научных трудов из них 7 статей в научных журналах рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при министерстве Высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, а также получено 2 удостоверения для программного обеспечения расчетов диффузии примесных атомов марганца в кремнии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 107 страницах, включая 25 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертационной работы, определена связь научного исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и техники, определено состояние решения данной научной проблемы, обоснованы цель,

задачи, объекты и методы исследования, показана научная новизна и практическая ценность диссертации, а также возможности применения полученных научных результатов на практике. В конце диссертации приведены информации об апробации результатов исследований на международных и республиканских научно-практических конференциях и сведения о публикациях, а также информации об объеме и содержании диссертационной работы.

Первая глава **«Особенности кремния с нанокластерами примесных атомов и автоколебания тока в полупроводниках и полупроводниковых структурах»** посвящена литературному обзору, в котором приведен анализ существующих научных работ, опубликованных по направлению диссертации. В конце главы определены цель и задачи диссертационной работы.

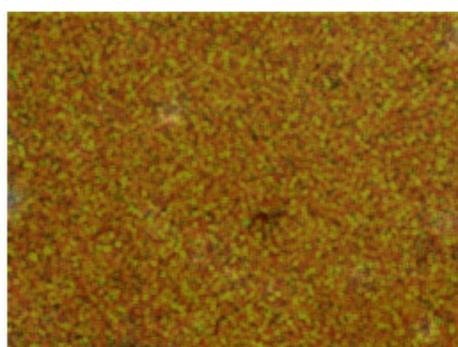
Вторая глава под названием **«Технология получения кремния с нанокластерами примесных атомов селена и марганца, современные методы исследования элементного состава, электрофизических и фотоэлектрических параметров полученных образцов, методы исследования автоколебаний тока в кремнии»** посвящена технологии диффузионного легирования примесных атомов селена или марганца для получения образцов компенсированного кремния с заданными электрофизическими параметрами. Описана разработанная двухэтапная диффузионная технология позволяющая получить компенсированный кремний, легированный примесными атомами селена или марганца без эрозии поверхности кремния. Определены термодинамические условия и технологические режимы получения компенсированного кремния, позволяющие управлять электроактивными концентрациями примесных атомов селена или марганца.

Подробно описаны методики и возможности современных установок, которые были использованы при выполнении диссертационной работы. В конце главы приведен научный анализ разработанной диффузионной технологии получения компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца. Полученные результаты были сравнены существующими научными данными, которые имели хорошее соответствие, что подтверждает о достоверности полученных научных результатов.

В третьей главе под названием **«Элементный состав, электрофизические свойства компенсированного кремния с нанокластерами примесных атомов селена и марганца, особенности обнаруженных автоколебаний тока в них»** приведены результаты исследований, в которых показано, что электрофизические параметры полученных образцов компенсированного кремния сильно отличаются от электрофизических параметров исходного кремния.

Элементный состав компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца проводился на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) марки Joel JSM-IT200LA. Для определения

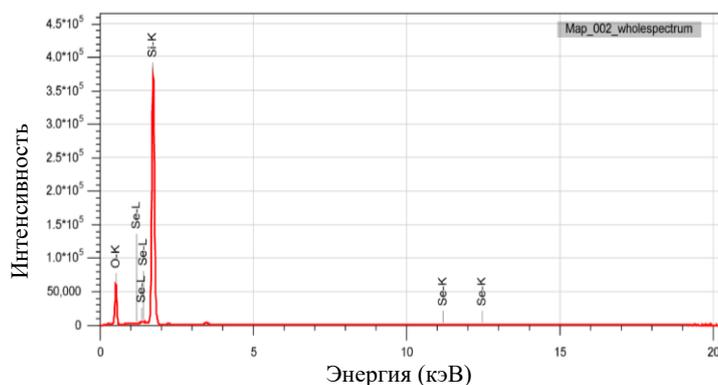
элементного состава кремния, легированного примесными атомами селена параллельно в тех же термодинамических условиях диффузии проводился термоотжиг кремния без примесных атомов. На рис. 1 показаны микрофотографии поверхности и элементный состав контрольного кремния и образцов компенсированного кремния примесными атомами селена. Установка СЭМ позволила одновременно закрепить четыре образца кремния на специальный держатель, что дал возможность получить сравнительный анализ элементного состава образцов компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена с исходными образцами кремния. Результаты исследований показали, что в исходных образцах кремния, которые подвергались термоотжигу при интервале температуры диффузии $T=1100\div 1250^{\circ}\text{C}$ на поверхности образуется оксидный слой кремния (см. на рис. 1. а). Интенсивность пика, которая связана с образованием оксидного слоя намного меньше, чем пик чистого кремния. Эти полученные результаты исследования подтверждаются экспериментальными данными полученных другими авторами.



■ O-K ■ Si-K ■ Se-L

а

Элемент	Линия	Масса %	Атом %
O	K	31.65±0.05	44.97±0.08
Si	K	67.81±0.06	54.88±0.04
Se	L	0.54±0.01	0.16±0.00
Всего		100.00	100.00



б

Рис.1. а-микрофотография поверхности и б-элементный состав кремния, легированного примесными атомами селена, полученный на сканирующем электронном микроскопе марки Jeol JSM-IT200LA

В образцах компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена наблюдаются дополнительные пики (см. на рис. 1.б), которые показывают наличие отдельных примесных атомов селена и нанокластеров состоящих из нескольких атомов селена в кремнии. Определен элементный состав компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена, в котором концентрация примесных атомов селена достигается по массе ~ 0,54 %, при этом концентрация кремния по массе составила ~ 67,81 %, концентрация атомов кислорода составила ~ 31,65 %. Аналогичные результаты исследования были получены в образцах компенсированного кремния легированного примесными атомами марганца.

Исследования фотопроводимости полученных образцов показали, что с воздействием монохроматического излучения в интервале энергии падающих фотонов $h\nu=0,2\div 0,7$ эВ наблюдается ИК-гашение фотопроводимости при наличии фонового интегрального света. Показано, что с ростом концентрации электроактивных примесных атомов селена интервал гашения сокращается, т.е. фототок уменьшается более резко, а также сужается интервал энергии падающих фотонов, в котором наблюдаются ИК-гашения фототока. Аналогичные результаты были получены при исследовании фотоэлектрических свойств компенсированных образцов кремния легированного примесными атомами марганца.

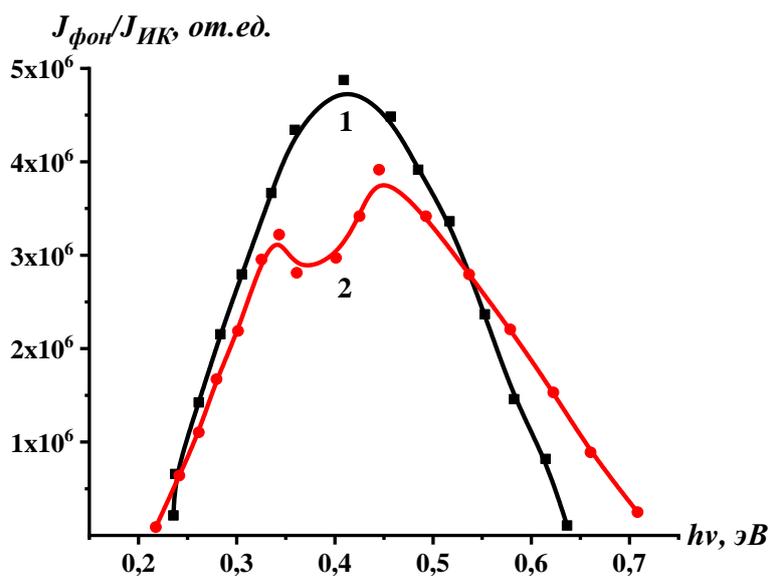


Рис. 2. Спектральная зависимость ИК-гашения в образцах компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца. 1-образец Si<Mn>, 2-образец Si<Se>, при $T=80$ К, $I_{\phi}=10^{-6}$ Вт/см²·с, $E=40$ В/см

Для определения зависимости глубины и интервала ИК-гашения, в зависимости от типа легирующей примеси нами были сопоставлены кратность и спектральный интервал ИК-гашения фототока в компенсированных образцах кремния, легированного примесными атомами селена или марганца. Как видно из рис. 2, самое глубокое ИК-гашение наблюдается в образцах компенсированного кремния легированного примесными атомами марганца. Однако значение кратности ИК-гашения фототока в компенсированных образцах кремния примесными атомами селена также намного больше по сравнению с ИК гашением фототока наблюдаемых в других полупроводниковых материалах.

Результаты исследований температурного гашения фотопроводимости (ТГФП) в компенсированных образцах кремния, легированных примесными атомами Se и Mn показали, что начало и глубина гашения сильно зависит от интенсивности фонового освещения, степени компенсации и от концентрации электроактивных примесных атомов. Таким образом подбирая величину

фототока, фоновой освещенности и степени компенсации в компенсированном кремнии, можно будет наблюдать ИК и ТГФП в достаточно широком интервале длины волны монохроматического излучения и температур. Установлено, что в компенсированном кремнии для наблюдения ИК и ТГФП ответственными являются дважды ионизированные энергетические уровни, которые образуют примесные атомы Se и Mn с энергией ионизации:

$\text{Si}\langle\text{Se}\rangle E_c - 0,51 \text{ эВ}$, донорный

$\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle E_c - 0,5 \text{ эВ}$, донорный.

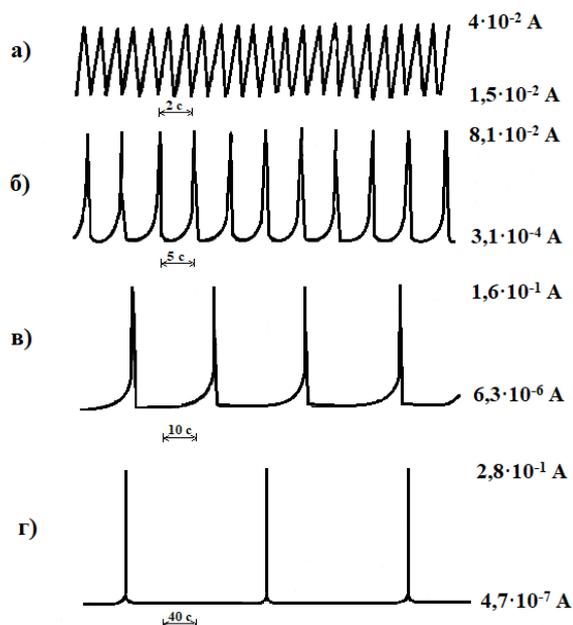


Рис. 3. Различные формы автоколебаний тока в компенсированном кремнии а- квазигармонический, б-пиковый, в- рефректорный, г-ждуший

Результаты исследований показали, что в образцах кремния легированного примесными атомами селена или марганца в которых наблюдается инфракрасное (ИК) и температурное гашение фотопроводимости (ТГПФ) при определенных условиях (напряженности электрического поля и освещения) возбуждаются низкочастотные автоколебания тока с различными формами (см. на рис. 3 и рис. 4).

Всесторонние и комплексные исследования автоколебательных процессов в компенсированном кремнии показали, что если управлять термодинамическими условиями существования (напряженность электрического поля, освещение, температура и др.), то можно получить несколько видов автоколебаний тока с различными природами возбуждения в одном и том же материале. Независимо от элемента диффузионно-легированных примесных атомов для наблюдения автоколебаний тока необходимо образование глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне кремния.

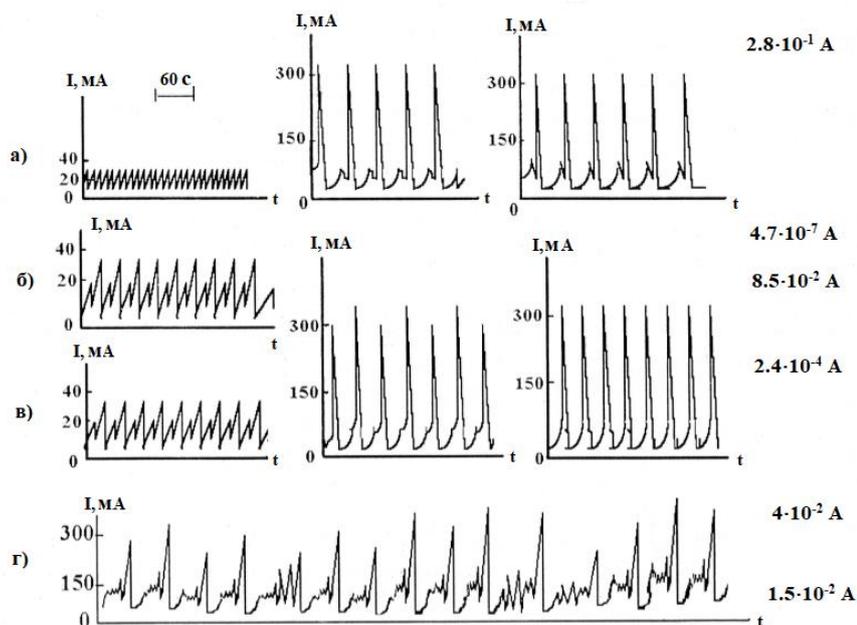


Рис. 4. Формы автоколебаний тока в зависимости от интенсивности освещения а - $5 \cdot 10^{-2}$ лк, б - 10^{-1} лк, в - 10 лк, г - 50 лк при $T=80$ К

Для объяснения механизма низкочастотных автоколебаний тока в компенсированном кремнии примесными атомами селена или марганца нами была использована физическая модель неоднородного полупроводника, предложенная А.Я.Шиком и М.К. Шейникманом. Согласно этой модели в неоднородном полупроводнике возникают флуктуации рельефа зоны проводимости и валентной зоны. Появление таких неоднородностей объясняется тем, что в условиях сильного легирования, когда концентрации примесей достигают до $N \approx 10^{18} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$ из-за неоднородного распределения примесных атомов появляются внутренние потенциальные поля, которые приводят к флуктуации зоны проводимости и валентной зоны полупроводника. Такая модель также предложена для объяснения физических процессов происходящих в сверхрешетках. Зонная диаграмма легированной сверхрешетки и физический механизм подробно объяснены в учебнике «Нанотехнология в электронике» авторами В.Н. Лозовским, Г.С.Константиновой, С.В. Лозовским.

В нашем случае концентрация примесных атомов (селена или марганца) на два порядка меньше, чем в условиях сильного легирования, однако эти примеси в кремнии могут находиться в двукратно ионизированном состоянии и образуют нанокластеры, состоящие из нескольких атомов, заряд которых всегда больше, чем ± 2 . Радиус Дабайевского экранирования образованных нанокластеров перекрывается друг с другом и приводит к появлению флуктуационного потенциального рельефа в компенсированном кремнии. Предлагается модель для объяснения физического механизма низкочастотного автоколебания тока, наблюдаемого в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена или марганца, на основе флуктуации рельефа зоны проводимости и валентной зоны.

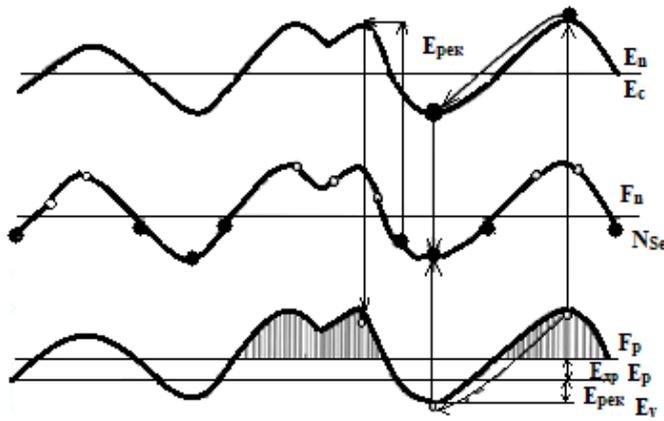


Рис. 5. Неоднородный флуктуационный потенциальный рельеф кремния, легированный примесными атомами селена

Для объяснения механизма автоколебаний тока, в качестве примера, были взяты образцы компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена. Согласно предложенной модели при постоянном уровне освещения происходит захват неравновесных электронов на образованных положительно заряженных энергетических центрах нанокластеров примесных атомов селена, в то время неравновесные дырки локализуются в потенциальных ямах валентной зоны. Электропроводимость при этом определяется величиной дрейфового барьера и концентрацией дырок, находившихся (см. на рис. 5) на уровне протекания.

На основе предложенной модели можно математически описать условия возбуждения и существования низкочастотного автоколебания тока в компенсированном кремнии. Система уравнений, описывающая зависимости концентрации носителей тока на уровнях (уровня протекания и глубокого уровня селена) от времени и температуры, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{jE}{\rho c} - b(T - T_0) \\ \frac{dP}{dt} &= L - C_{nr}rp - C_{pm}Sp \\ \frac{dn}{dt} &= L + BS - C_{np}(N_2 - r)n - C_{nm}(N_m - S)n \\ \frac{dr}{dt} &= C_{nr}(R - r)n - C_{pr}rp \\ S &= p - n - r; j = e\mu E e^{-\frac{E_{\partial p}}{RT}} \end{aligned} \quad (1)$$

где E - напряженность электрического поля, S_n - коэффициент теплопередачи; h - боковая поверхность образца; ρ - плотность материала, C - удельная теплоемкость; A - постоянный параметр; S_n - площадь поперечного сечения; L - фактор заброса электронов из валентной зоны в зону проводимости; S, r - концентрация электронов на уровнях селена и рекомбинации; C_{nr}, C_{pr} - коэффициенты захвата электронов и дырок на уровнях рекомбинации; N_{Se}, N_r - концентрация ионизированных атомов селена и концентрация рекомбинационного центра; B - гасящий фактор.

При составлении уравнений теплопроводности было учтено, что

выделение тепла в основном происходит за счет Джоулева нагрева, когда проводимость образцов при низких температурах за счет фотоэффекта будет достаточно высокая, а потеря тепла происходит в основном, через поверхности кремния.

Решение системы уравнений в общем виде затруднительно. Поэтому можно использовать предположения относительно свойства исследованного объекта. Наиболее медленным в этом процессе является процесс теплопередачи в образцах, поэтому можно допустить, что изменение концентрации носителей тока в зонах и энергетических уровнях зависит от изменения температуры образцов. Полученные результаты из теоретических расчетов имели хорошее согласие с экспериментальными результатами.

В четвертой главе диссертации под названием «Влияние внешних воздействий на параметры автоколебаний тока в компенсированном кремнии легированном примесными атомами селена и марганца, возможности использования автоколебаний тока на практике» приводятся результаты исследований влияния длины волны и интенсивности монохроматического излучения, а также температуры на параметры автоколебаний тока (амплитуда, частота) в образцах компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца.

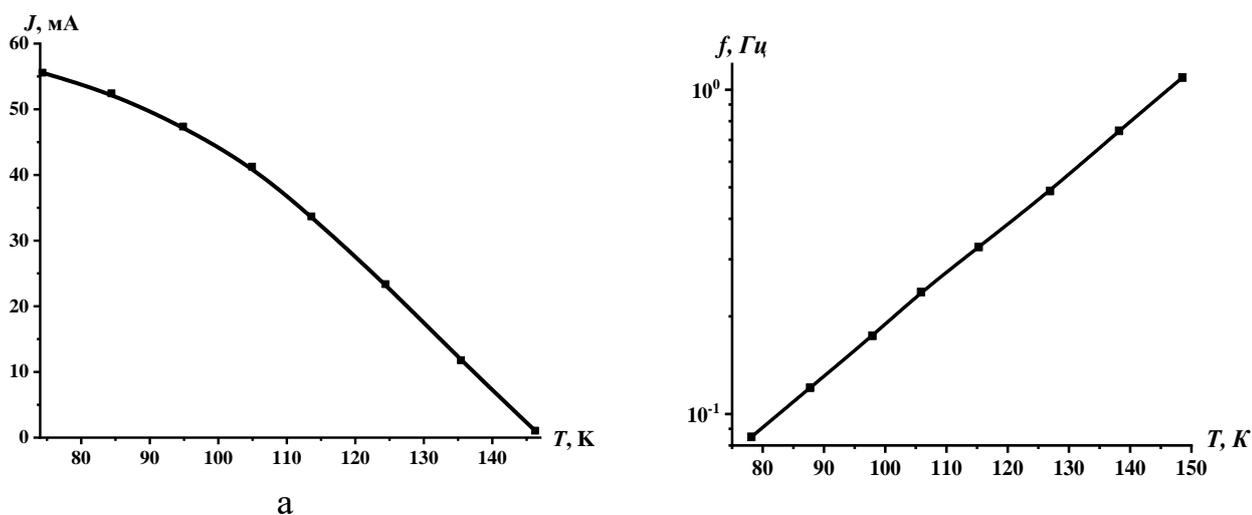


Рис. 6. а-температурные зависимости амплитуды и б-частоты автоколебаний тока в образцах Si<Se> с $\rho=9,3 \cdot 10^4$ Ом·см при $h\nu=1,18$ эВ, $J=1,3 \cdot 10^{-6}$ Вт/см²·с, $E=150$ В/см

Результаты исследований автоколебаний тока в образцах компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца, показали, что параметры сильно меняются от температуры подложки и наблюдаются в интервале температур $T=80 \div 200$ К (см. на рис. 6). Установлено, что в этом интервале температур частота автоколебаний тока меняется по закону:

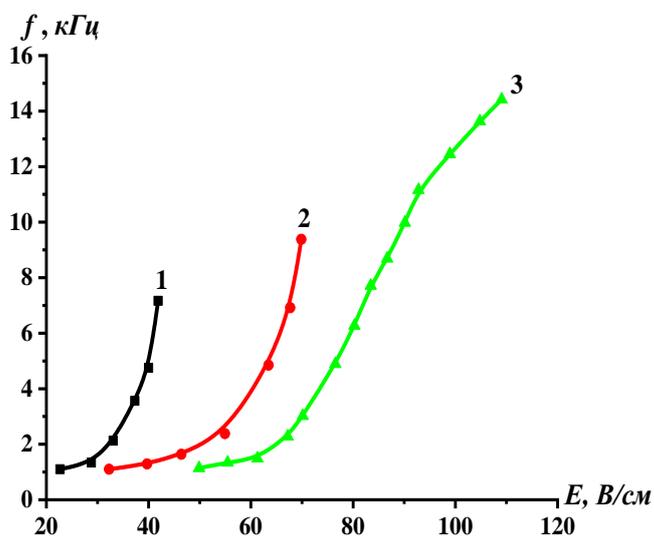
$$f = f_T \exp\left(\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2)$$

где $E_T=0,38$ эВ и $f_T=24,5$ Гц.

Из анализа результатов исследований установлено, что с ростом температуры амплитуда автоколебаний убывает и при $T \approx 200$ К происходит срыв автоколебаний тока, т.е. происходит температурное гашение автоколебаний. Результатами исследований установлено, что с увеличением интенсивности монохроматического излучения или интегрального света и величины приложенного электрического поля температурный срыв автоколебаний тока смещается в сторону более высоких значений температуры.

Исследования влияния электрического поля на параметры автоколебаний тока в компенсированном кремнии проводились в специально созданном криостате, в котором позволило охладить до температуры $T=80$ К и управлять температурой в интервале $T=80 \div 350$ К с точностью ± 1 К. На рис. 7 представлены зависимости изменения частоты автоколебаний тока от приложенной напряженности электрического поля для образцов компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена с различным удельным сопротивлением при $T = 300$ К.

Как видно из рис. 7 изменение частоты рекомбинационных волн (РВ) от приложенной напряженности электрического поля $f(E)$ состоит из явно выраженных двух участков не зависимо от удельного сопротивления компенсированных образцов кремния, легированного примесными атомами селена.



**Рис. 7. Зависимость частоты автоколебаний тока от приложенной напряженности электрического поля в компенсированных образцах кремния p-Si<Se> с различным удельным сопротивлением
1- $\rho=3,5 \cdot 10^2$ Ом·см;
2 - $\rho=1,8 \cdot 10^3$ Ом·см;
3 - $\rho=4 \cdot 10^4$ Ом·см,
при $T=300$ К**

На первом участке частота рекомбинационных волн слабо меняется от величины приложенной напряженности электрического поля, а при значениях приложенного напряжения $E > E_{кр}$ начинается второй участок, где частота автоколебаний существенно увеличивается с ростом величины напряженности электрического поля. Следует отметить, что с ростом удельного сопротивления образцов Si<Se> величина порогового поля ($E_{п}$),

при которой возбуждаются автоколебания, смещается в сторону больших значений напряженности электрического поля, при этом также наблюдается существенный рост частоты. Эти результаты исследований показывают, что для образцов Si<Se> с заданным удельным сопротивлением, существует определенная величина напряженности электрического поля, при которой возбуждаются автоколебания тока. Установлено, что с ростом удельного сопротивления образцов Si<Se> расширяется область существования автоколебаний тока (РВ) по электрическому полю, а также существенно увеличивается частота автоколебаний. Установлено, что частота автоколебаний тока меняется в широком интервале частоты $f=500 \div 2 \cdot 10^4$ Гц в зависимости от удельного сопротивления образцов компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена с удельным сопротивлением от $\rho=3,5 \cdot 10^2$ Ом·см до $\rho=10^5$ Ом·см при температуре $T=300$ К. Результаты исследований показывают, что управляя удельным сопротивлением компенсированных образцов кремния примесными атомами селена можно изменить частоту автоколебаний тока (РВ) в достаточно широком диапазоне.

Освещения интегральным светом образцов компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена приводит к генерации дополнительных неравновесных носителей тока электронов и дырок. Свободные электроны захватываются в положительно заряженных кластерах, которые состоят из двухкратно положительно заряженных ионов селена. Дырки участвуют в образовании флуктуаций, которая приводит к росту амплитуды и уменьшению времени между двумя флуктуациями, доходящими до контакта, т.е. увеличивается частота РВ.

Из анализа полученных результатов исследования установлено, что в отличие от физического механизма образования РВ в полупроводниках, где необходимо образование глубоких энергетических уровней в образцах компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца образуются многократно положительно заряженные нанокластеры, состоящие из ионов селена Se^{++} или марганца Mn^{++} . В этом случае образованные нанокластеры приводят к выполнению требования условий возбуждения РВ, в которых сечения захвата носителей тока (электронов и дырок) должны отличаться друг от друга во много раз. В нашем случае это условие выполняется $S_n \gg S_p$ в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена. Аналогично можно объяснить механизм образования рекомбинационных волн для образцов компенсированного кремния легированного примесными атомами марганца.

Из анализа полученных результатов исследования установлено, что низкочастотные автоколебания тока в образцах Si<Se> наблюдаются в широком интервале температур $T=80 \div 200$ К и при меньших энергиях фотонов, чем ширина запрещенной зоны кремния. Исследование спектральной зависимости параметров автоколебаний тока позволило выявить ряд особенностей температурно-электрической неустойчивости тока (ТЭН) в

образцах компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца.

Регулярные автоколебания тока большой амплитуды (до $J=200$ мА) наблюдались в образцах $p\text{-Si}\langle\text{Se}\rangle$ с удельным сопротивлением $\rho_0 > 10^3$ Ом·см. Автоколебания тока возбуждались начиная с энергии падающих фотонов $h\nu \geq 0,7$ эВ.

В интервале энергии падающих фотонов $h\nu=1,1 \div 1,2$ эВ амплитуда автоколебаний слабо изменяется от энергии падающих фотонов, при этом частота автоколебаний тока резко увеличивается (см. на рис. 8) по закону:

$$f = f_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_0}\right) \quad (3)$$

где $E_0 = 0,27$ эВ и $f_0 = 4,2 \cdot 10^{-4}$ Гц.

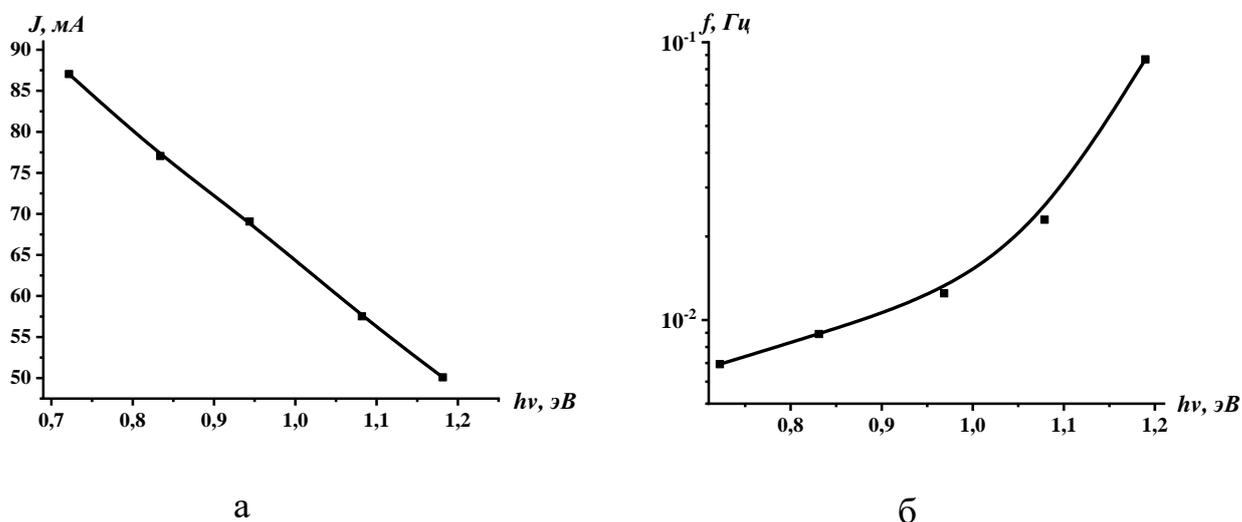


Рис. 8. а- спектральные зависимости амплитуды и б- частоты автоколебаний тока в компенсированных образцах $p\text{-Si}\langle\text{Se}\rangle$, с $\rho=9,3 \cdot 10^4$ Ом·см, при $E=150$ В/см, $T=80$ К, $I_{h\nu}=1,3 \cdot 10^{-6}$ Вт/см²·с

Следует отметить, что при этом форма автоколебаний тока практически не меняется. Из результатов исследований установлено, что в отличие от автоколебаний тока, обнаруженного в других полупроводниковых материалах, автоколебания тока в образцах компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца обладают относительно большой амплитудой и возникают при достаточно низкой интенсивности монохроматического излучения (см. на рис. 9).

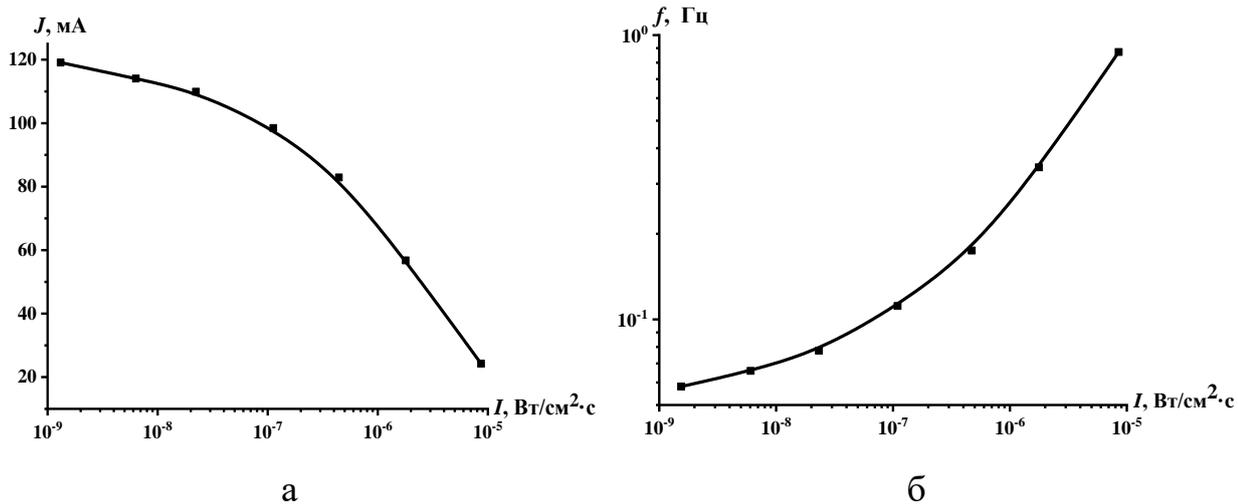


Рис. 9. а-зависимости амплитуды и б- частоты автоколебаний тока в компенсированных образцах Si<Se> от интенсивности монохроматического света при $h\nu = 1,18$ эВ, $T = 80$ К, $E = 150$ В/см, $\rho = 9,3 \cdot 10^4$ Ом·см

Исследования влияния магнитного поля на условия возбуждения (порогового поля) и на параметры (амплитуда, частота) автоколебаний тока (РВ) в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена р-типа проводимости показали, что величина магнитного поля приводит к существенному изменению параметров автоколебаний тока.

Как видно из рис. 10 с ростом величины магнитного поля независимо от его направления, относительно направления тока величина порогового поля $E_{п}$ при которой возбуждаются автоколебания возрастает, а пороговая частота $f_{п}$ сначала увеличивается до определенного критического значения, и в дальнейшем с ростом величины магнитного поля уменьшается.

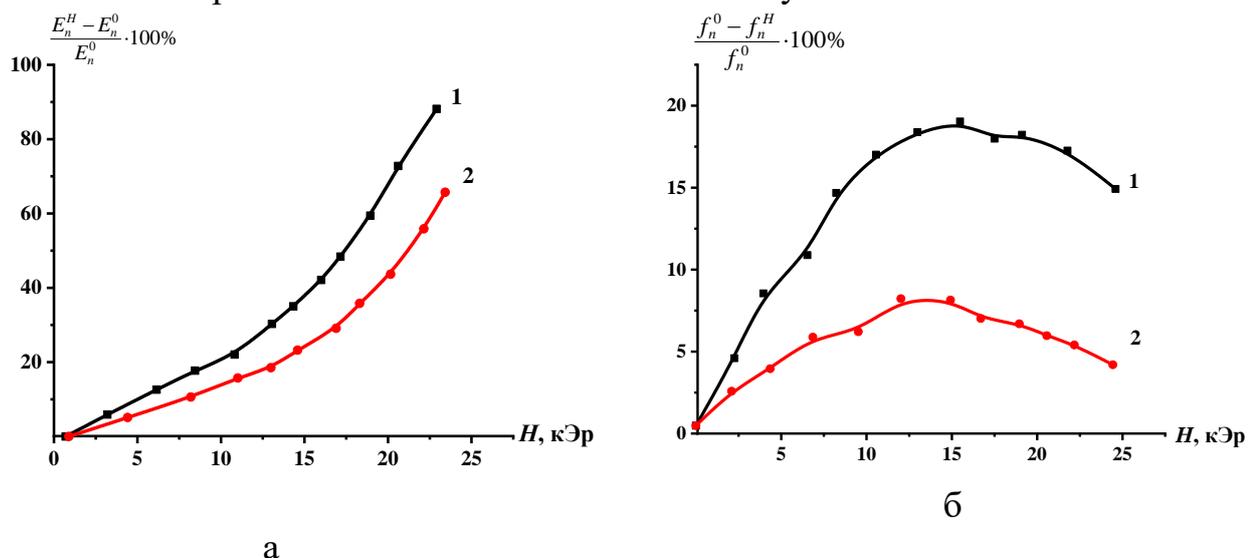


Рис. 10. а-зависимость порогового поля и б-частоты РВ от величины магнитного поля при $T = 300$ К, 1-поперечное, 2-продольное направление магнитного поля относительно направления тока, $E_{п0} = 55$ В/см; $f_{п0} = 3,25$ кГц для образцов р-Si<Se> с $\rho = 5 \cdot 10^3$ Ом·см

Анализы результатов исследования показали, что параметры автоколебаний тока существенно зависят от приложенного магнитного поля и управляя величиной магнитного поля можно получить автоколебания тока с заданными параметрами (амплитуды и частоты).

Таблица-1.

Коэффициенты чувствительности датчиков физических величин на основе компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена или марганца

Область применения	Коэффициент чувствительности			
	по пороговому полю	по пороговой частоте	по амплитуде колебаний	по частоте колебаний
Термодатчик	$-(2\div 5) \text{ В/см}\cdot\text{К}$	$(2\div 4) \cdot 10^2 \text{ Гц/К}$	$(2\div 5) \cdot 10^{-6} \text{ А/К}$	$(2\div 4) \cdot 10^2 \text{ Гц/К}$
Фотодатчик	$-(4\div 6) \text{ В/см}\cdot\text{лк}$	$(3\div 5) \cdot 10^2 \text{ Гц/лк}$	$(3\div 5) \cdot 10^{-6} \text{ А/лк}$	$-(3\div 5) \text{ Гц/лк}$
Тензодатчик	$-(3\div 5) \cdot 10^{-8} \text{ В/см}\cdot\text{Па}$	$(2\div 5) \cdot 10^{-8} \text{ Гц/Па}$	$(2\div 5) \cdot 10^{-10} \text{ А/Па}$	$-(1\div 3) \cdot 10^{-5} \text{ Гц/Па}$
Магнитодатчик	$-(2\div 5) \cdot 10^{-3} \text{ В/см}\cdot\text{Эр}$	$-(5\div 6) \cdot 10^{-3} \text{ Гц/Эр}$	$-(5\div 7) \cdot 10^{-11} \text{ А/Эр}$	$(3\div 5) \cdot 10^{-2} \text{ Гц/Эр}$

На основе экспериментальных исследований и из анализа полученных результатов предложены возможности создания различных физических датчиков с амплитудно-частотным выходом и твердотельных генераторов на основе автоколебаний тока обнаруженного в компенсированном кремнии легированном примесными атомами селена и марганца (см. на таблицу-1).

На основе полученных результатов исследований в функциональной электронике можно создать датчики физических величин и твердотельные генераторы со стабильными выходными параметрами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований при выполнении диссертационной работы получены следующие научные результаты:

1. На основе полученных экспериментальных результатов разработана воспроизводимая двухэтапная диффузионная технология формирования нанокластеров примесных атомов селена или марганца в кристаллической решетке монокристаллического исходного кремния, которая позволила определить оптимальные интервалы температуры диффузии для примесных атомов селена $T=1100\div 1250^\circ\text{C}$ и времени диффузии $t=5\div 10$ час, а также для образцов кремния легированного примесными атомами марганца в интервале $T=950\div 1200^\circ\text{C}$ и времени диффузии $t=0,5\div 1$ час.

2. На основе разработанной воспроизводимой безэрозной технологии диффузионного легирования кремния примесными атомами селена с управлением давления паров диффузанта во время диффузии, которые дали возможность получить образцы компенсированного кремния с заданными электрофизическими параметрами.

3. Управляя условиями возбуждения (напряженность электрического поля, температура и освещенность) выявлены возможности получения автоколебаний тока с тремя различными природами возбуждения в одном образце и определены термодинамические условия температурной граничной области существования этих автоколебаний со стабильными и воспроизводимыми параметрами в широком интервале температур, для образцов кремния легированного примесными атомами селена $T=80\div 300$ К, а для образцов кремния легированного примесными атомами марганца $T=80\div 350$ К.

4. Выявлено влияние температуры $T=80\div 300$ К на параметры автоколебаний тока, наблюдаемых в компенсированном кремнии легированном примесными атомами селена в интервале частоты $f=5\cdot 10^{-3}\div 10^5$ Гц и амплитуды $J=10^{-4}\div 2\cdot 10^{-1}$ А, а для образцов кремния легированного примесными атомами марганца при температуре $T=80\div 350$ К частота автоколебаний в интервале $f=10^{-3}\div 5\cdot 10^5$ Гц и амплитуды $J=3\cdot 10^{-5}\div 2,5\cdot 10^{-1}$ А, а также выявлено изменение частоты автоколебаний тока в интервале $f=10^2\div 3,5\cdot 10^3$ Гц и амплитуды $J=10^{-4}\div 6\cdot 10^{-5}$ А при воздействии магнитного поля до 25 кЭр.

5. Для объяснения физического механизма автоколебаний тока в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена или марганца, предложена модель неоднородного полупроводника, в которой были объяснены физические особенности полученных экспериментальных результатов исследований.

6. На основе линейного изменения амплитуды, частоты автоколебаний тока в компенсированном кремнии показаны возможности создания датчиков физических величин с амплитудно-частотным выходом и твердотельных генераторов электромагнитных колебаний.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.21.2019.FM/T.01.12 ON
SCIENTIFIC DEGREES AWARD AT SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF THE PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND
MICROELECTRONICS OF NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SHOABDURAKHIMOVA MANZURA MIRZOKHID KIZI

**AUTO-OSCILLATIONS IN SILICON DOPED WITH IMPURITY ATOMS
OF SELENIUM AND MANGANESE**

01.04.10 – Physics of semiconductors

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent - 2025

The topic of the dissertation Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under B2024.1/PhD/FM771.

Dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council (ispm.uz) and on Information and educational portal «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: **Zikrillaev Nurullo Fatxullaevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Official opponents: **Azamatov Zakirjan Takhirovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Imamov Erkin Zunnunovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Leading organization: **Andijan State University**

The dissertation will be defended on 19 09 2025, at 10⁰⁰ hours at the meeting of the Scientific Council No. DSc.30.08.2019.FM/I. 01.12 at the Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan. Address: 100057, Toshkent city, Uzbekistan. Yangi Olmazor str., 20. Tel. (99871) 248-79-91; fax: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

The dissertation can be found at the Information Resource Center of the Institute (registered under No. 69). Address: Yangi Olmazor str., 20, 100057, Toshkent city, Uzbekistan. Tel. (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on 06 2025.
(Registry record No. 69 dated «06» 2025)



Sh. B. Utamuradova,
Chairwoman of the Scientific Council for the Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

J. J. Khamdamov
Scientific Secretary of the Scientific Council for the Award of Scientific Degrees, Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

N. A. Turgunov
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the Awarding of Scientific Degree, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work. A comprehensive study of the auto-oscillatory processes of compensated silicon doped with impurity atoms of selenium and manganese.

The object of the research is p-type mono-crystalline silicon with resistivity $\rho \sim 1 \div 100 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$ (grades KDB-1;10;100), with residual oxygen concentration $N_o = 5 \div 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

The subjects of the research is study of parameters and conditions of excitation of auto-oscillatory processes of compensated silicon doped with selenium and manganese atoms depending on electroactive concentrations of impurity atoms, on the magnitude of electric and magnetic fields, on the illumination of integral light and monochromatic radiation, on the nature of formation of nanoclusters of impurity atoms in silicon.

Scientific novelty of the dissertation work is as follows:

a reproducible technology for the formation of nanoclusters of impurity atoms of selenium or manganese in the crystal lattice of monocrystalline initial silicon was developed, which allowed to determine optimal intervals of diffusion temperature for impurity selenium atoms $T = 1100 \div 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ and diffusion time $t = 5 \div 10$ hours (due to small diffusion coefficient), and for samples of silicon doped with impurity manganese atoms in the interval $T = 950 \div 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ and diffusion time $t = 0,5 \div 1$ hours;

it was found for the first time that in compensated silicon doped with impurity atoms of selenium or manganese, controlling the conditions of excitation (electric field strength, temperature and illumination) it is possible to observe current auto-oscillations with three different nature of excitation in one sample and thermodynamic conditions of excitation and boundary regions of these auto-oscillations with stable and reproducible parameters in a wide range of temperatures were determined, for samples $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Se}\rangle$ $T = 80 \div 300 \text{ K}$, and for samples $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$ $T = 80 \div 350 \text{ K}$;

for the first time revealed the influence of temperature $T = 80 \div 300 \text{ K}$ on the parameters of current auto oscillations observed in compensated silicon doped with impurity selenium atoms in the range of frequency $f = 5 \cdot 10^{-3} \div 10^5 \text{ Hz}$ and amplitude $J = 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-1} \text{ A}$, and for the samples of silicon doped with impurity manganese atoms at temperature $T = 80 \div 350 \text{ K}$ the frequency of auto oscillations in the range $f = 10^{-3} \div 5 \cdot 10^5 \text{ Hz}$ and amplitude $J = 3 \cdot 10^{-5} \div 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ A}$, and also the change of frequency of current auto oscillations in the range $f = 10^2 \div 3,5 \cdot 10^3 \text{ Hz}$ and amplitude $J = 10^{-4} \div 6 \cdot 10^{-5} \text{ A}$ at influence of magnetic field up to 25 kOe is revealed;

to explain the physical mechanisms of current auto-oscillations in compensated silicon doped with impurity atoms of selenium or manganese, the model of inhomogeneous semiconductor was proposed, in which the physical features of the obtained experimental results were explained;

from the analysis of the results of the study of linear variation of parameters (amplitude, frequency) of current auto oscillations in compensated silicon in the temperature range $T = 80 \div 350 \text{ K}$ the possibilities of creating sensors of physical

quantities with amplitude-frequency output and solid-state generators of electromagnetic oscillations are shown.

Implementation of the research results Implementation of the research results. Based on obtained results of research of auto-colektive processes in compensated silicon doped with impurity atoms of selenium or manganese:

developed erosion-free diffusion technology for production of silicon doped with impurity atoms of selenium or manganese taking into account the vapor pressure of diffusant was applied at JSC “FOTON” (reference numbered 04-3/430 dated April 1, 2024, Association “Uzeltekhsanoat” of the Republic of Uzbekistan and reference numbered 68 dated March 27, 2024, JSC “FOTON”). The use of scientific results allowed to obtain devices (diodes, and transistors) with specified stable operating parameters;

scientific results obtained based on the study current of auto-oscillations in samples of silicon diffusion-alloyed with impurity atoms of selenium or manganese were used in the implementation of the fundamental project OT-F2-77 “Improvement of methods for predicting the reliability of semiconductor devices on the basis of modeling, taking into account internal defects in the structure” (2017-2020) in Karakalpak State University named after Berdakh (reference of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan No. 4/14-4/4-13473 dated August 13, 2024). Scientific results allowed to create sensors with amplitude-frequency output, as well as solid-state oscillators operating in a wide frequency range $f=10^{-3}\div 10^5$ Hz.

Approbation of the research results. The main results of dissertation work were presented and discussed at 10 international and 4 republican scientific conferences.

Publications of research results. Published 23 scientific papers from them on the subject of the dissertation published 7 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan and 3 of them on the basis of Scopus for the publication of the main results of the dissertation work, as well as received 2 certificates for software calculations of diffusion of impurity atoms of manganese in silicon

The structure and scope of the work. The thesis consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, and a list of references. The text of the thesis is presented 107 pages including 25 figures and 6 tables.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; part I)

1. Н.Ф.Зикриллаев, М.М.Шоабдурахимова, Н.Норкулов, А.А.Сатторов, С.Абдурахмонов. Низкочастотные автоколебания тока в кремнии, легированного атомами селена // Журнал Доклады Академии наук Республики Узбекистан (ДАН). 2023. № 5. с. 38-44 [01.00.00. №7].
2. N.F.Zikrillaev, K.S.Ayupov, M.M.Shoabdurakhimova, F.E.Urakova, Y.A. Abduganiev, A.A. Sattorov, L.S. Karieva. Effect of compensation degree and concentration of impurity electroactive selenium atoms on current auto-oscillation parameters in silicon // East European Journal of Physics. 2023. No. 4. pp. 251-257 [Scopus. No 3. SJR:0,27].
3. N.F. Zikrillaev, K.S. Ayupov, M.M. Shoabdurakhimova, F.E. Urakova, O.S. Nematov Self-oscillatory processes in silicon, problems and prospects for research, and their application in electronics // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2024. Vol. 60. No. 1. pp. 75–88 [01.00.00. №14. IF=0,24].
4. Н.Ф.Зикриллаев, К.С.Аюпов, У.Х.Курбонова, Х.Ф.Зикриллаев, М.М.Шоабдурахимова, С.А. Абдурахмонов. Электрофизические свойства кремния с нанокластерами примесных атомов марганца // Журнала Доклады Академии наук Республики Узбекистан (ДАН). 2023. №6. с. 37-44 [01.00.00. №7].
5. N.F.Zikrillaev, K.S.Ayupov, M.M. Shoabdurakhimova, K.A.Ismaylov, N.Norkulov, N.U.Abdullaeva, M.S.Mirkomilova, D.M.Shukurova. The mechanism of current auto-oscillations in compensated silicon doped with impurity atoms // Science and Education in Karakalpakstan. 2024. № 1/2 (39). pp. 13-19 [01.00.00. № 11].
6. N.F.Zikrillaev, U.Kh.Kurbanova, M.M.Shoabdurkhimova, N.Narkulov, F.Sh.Shakarov. Effect of the magnetic field, electric field, and light intensity on the parameters of recombination waves in silicon // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2024. Vol. 60. No. 5. pp. 691-697. [01.00.00. №14. IF=0,24].

II bo'lim (II часть; part II)

7. Н.Ф. Зикриллаев, К.С. Аюпов, М.М. Шоабдурахимова, С.Б. Исамов, К.И. Вахобов. Управления электроактивными концентрациями примесных атомов в кремнии // Приборы. 2022. № 8 (266). с. 45-48 [05.00.00. № 63. IF=0,5].
8. М.М. Шоабдурахимова. Особенности автоколебаний тока в компенсированном кремнии примесными атомами селена // “Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo‘tkazgich materiallar” III-xalqaro ilmiy anjuman, Toshkent, 24-25 noyabr 2022. с. 158-160.
9. Н.Ф. Зикриллаев, М.М. Шоабдурахимова. Особенности автоколебаний тока в компенсированном кремний // “Yarimo‘tkazgichlar, nanomateriallar va fotoenergetikaning dolzarb muammolari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani. Urganch. 9-10-dekabr 2022. с. 21-24.
10. Н.Ф. Зикриллаев, М.М. Шоабдурахимова. Низкочастотные колебания тока в кремнии легированного примесными атомами селена // “Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы” II-международная конференция. Ташкент. 27-28 декабрь 2022. с. 38-40.
11. Н.Ф. Зикриллаев, К.С.Аюпов, М.М. Шоабдурахимова, Ф.Э. Уракова. Влияние степени компенсации и концентрации примесных электроактивных атомов селена на параметры автоколебаний тока в кремнии легированного примесными атомами

- селена // “Роль одаренной молодежи в развитии физики” РОМРФ-ХVI-республиканская конференция. Ташкент. 28-29 апрель 2023. с. 261-264.
12. К.С.Аюпов, Х.Ф. Зикриллаев, М.М. Шоабдурахимова. Некоторые особенности фотоэлектрических свойств кремния легированного селеном // “Научные основы использования информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации” II международная научная конференция, Ташкент, 19-20 май 2023. с. 770-774.
 13. N.F. Zikrillaev, K.S. Ayupov, M.M. Shoabdurakhimova, F.E. Urakova, Y.A. Abduganiev. Influence of temperature and concentration of electroactive selenium atoms on the parameters of auto-oscillation currents in silicon // “Nanophotonics, metamaterials and photovoltaics” III international conference. Samarkand. 23-27th May 2023. pp. 94-96.
 14. N.F. Zikrillaev, M.M. Shoabdurakhimova, D. Bobonov, O.S. Ne'matov. Effect of magnetic field on excitation conditions and current auto-oscillation parameters in silicon doped with selenium atoms // Samarkand International Symposium on Magnetism. 2-6 July 2023. pp. 317.
 15. Н.Ф.Зикриллаев, Н. Наркулов, М.М. Шоабдурахимова, Б.У. Алиев, М.С. Миркомилова. Рекомбинационные волны в кремнии легированного примесными атомами селена // Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы, Республиканская конференция. с. 71-72.
 16. Н.Ф.Зикриллаев, М.М. Шоабдурахимова. Автоколебательная среда на основе компенсированного кремния создания на его основе твердотельных генераторов и датчиков физических величин // VI международная конференция по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктур. Фергана. Узбекистан. 28-30 сентября 2023. с. 55-62.
 17. Н.Ф.Зикриллаев, М.М. Шоабдурахимова, О.С. Неъматов, С.А. Абдурахмонов, Б.У. Алиев Низкочастотная автоколебания тока при комбинированном освещении // Физика ва электроника долзарб муаммолари мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. 3-4 ноябрь 2023. с. 93-95.
 18. Н.Ф.Зикриллаев, М.М. Шоабдурахимова. Технология получения кремния, легированного примесными атомами селена без эрозии поверхности // 35 лет Центру стратегических инноваций и информатизации. “Innovation-2023”. с. 106-108.
 19. Н.Ф. Зикриллаев, М.М.Шоабдурахимова, Ф.Э. Уракова, Н.Наркулов, Б. Ибрагимова, Д.М. Шукурова. Условия формирования нанокластеров примесных атомов селена в компенсированном кремнии. Fizika fundamental va amaliy tadqiqotlar. Xalqaro konferensiya. Toshkent. 24-25-may 2024. с. 138-139.
 20. Н.Ф.Зикриллаев, К.Аюпов, М.Шоабдурахимова, А.Сатторов, Н.Абдуллаева, Б.Ибрагимова. Автоколебательная среда на основе компенсированного кремния. PPSUTLSC-2024. May 6-8 2024. с. 1222-1225.
 21. Н.Ф.Зикриллаев, М.М.Шоабдурахимова, Ф.Э.Уракова, Н.Абдуллаева. Фотоприемники ИК излучения на основе кремния, легированного атомами селена. XXVIII Международная научно-практическая конференция. «ИННОВАЦИЯ-2024» 25-26 октября 2024. с. 99-101.
 22. N.F. Zikrillayev, K.S. Ayupov, M.M. Shoabduraximova. Injeksion kontaktli p+-Si<B, Mn>-p+ strukturaga marganets kirishma atomlarini gaz holatidan diffuziya jarayonidagi taqsimotini hisoblash dasturi. EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risida guvohnoma O'zRes. Adliya Vazirligi huzuridagi IMA. № DGU 16201. 14-aprel 2022.
 23. N.F. Zikrillayev, K.S. Ayupov, M.M. Shoabduraximova, Q.Q.Qurbonaliyev. Sirtiga bor atomlari o'tkazilgan kremniyga marganets kirishma atomlari diffuziyasining taqsimotini hisoblash dasturi. EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risida guvohnoma O'zRes. Adliya Vazirligi huzuridagi IMA. № DGU 17076. 13-may 2022.

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” ilmiy-metodik jurnal tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi (02.09.2025).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturasini.

Shartli bosma tabog‘i: 2,75. Adadi 80. Buyurtma № 63.

Guvohnoma reestr № 10-4434

Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy

