

**TERMIK ISHLOVNING NODIR YER ELEMENTLARI BILAN LEGIRLANGAN
KREMNIY ELEKTROFIZIK XOSSALARIGA TA'SIRI****Yusupov Oralbay Naurizbaevich** – *assistent o'qituvchi*yuon2072@gmail.com*Ajiniyoz nomidagi Nukus davlat pedagogika instituti***ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ,
ЛЕГИРОВАННОГО РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ****Юсупов Оралбай Наурызбаевич** – *ассистент преподаватель**Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза***INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES
OF SILICON STRUCTURES WITH RARE-EARTH ELEMENTS****Yusupov Oralbay Naurizbaevich** – *assistant teacher**Nukus State Pedagogical Institute named after Ajiniyaz*

Tayanch so'zlar: yarimo'tkazgich, kremniy, n-Si, termik ta'sirlar effekti, elektrofizik xossalari, kremniyni o'stirish jarayonida Sm, Gd va Yb bilan legirlash, kremniyga termik ishlov berish.

Rezyume. Maqolada samariy, gadoliniiy va itterbiy kabi nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy monokristallarida yuqori haroratli termik ishlov berish natijasida sodir bo'ladigan elektrofizik jarayonlar, chuqur sathlarning shakllanishi va texnologik kirishmalar (kislorod va uglerod) bilan o'zaro ta'sir mexanizmlari o'rganilgan. Choxralskiy usulida o'stirilgan hamda diffuziya yo'li bilan legirlangan namunalarni neytron-aktivatsion tahlil, IQ-spektroskopiya, sig'imning izotermik relaksatsiyasi va to'rt zondli usullari yordamida o'rganildi.

Ключевые слова: полупроводник, кремний, n-Si, эффекты термических воздействий, электрофизические свойства, легирование кремния Sm, Gd и Yb при выращивании, термическая обработка кремния.

Резюме. В статье говорится об изучении электрофизических процессов, формирования глубоких уровней и механизмов взаимодействия с технологическими примесями (кислородом и углеродом), происходящих в результате высокотемпературной термической обработки монокристаллов кремния, легированных редкоземельными элементами, такими как самарий, гадолиний и иттербий. Образцы, выращенные методом Чохральского и легированные диффузией, изучались с помощью нейтронно-активационного анализа, ИК-спектроскопии, изотермической релаксации ёмкости и четырехзондовых методов.

Key words: semiconductor, silicon, n-type silicon, the influence of thermal effects, electrophysical properties, structures with Sm, Gd, and Yb during growth, silicon during heat treatments.

Summary. The article to study the mechanisms of electrophysical processes, deep level formation, and interaction with technological impurities (oxygen and carbon) occurring during high-temperature heat treatment in silicon monocrystals doped with rare earth elements such as samarium, gadolinium, and ytterbium. Samples grown by the Chohralski method and doped by diffusion were studied using neutron activation analysis, IR spectroscopy, isothermal capacitance relaxation, and four-probe methods.

Kirish. Nodir yer elementlari yarimo'tkazgich fizikasi va mikroelektronika sohasida tobora muhim o'rin egallayotgan materiallar sifatida dunyoning yetakchi ilmiy tadqiqot institutlari hamda ilmiy markazlari tamonidan katta qiziqish bildirilmoqda. NYE bilan legirlangan kremniy, ayniqsa, Si asosidagi optoelektronikada – yorug'lik chiqaruvchi diodlar (LED), foton detektorlar va integrallashgan fotonik qurilmalar ishlab chiqarishda istiqbolli material sifatida keng e'tiborga sazovor bo'lmoqda [1-3].

Adabiyotlar tahlili va metodologiya. Ushbu ishda samariy, gadoliniiy va itterbiy kabi nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy monokristallarida yuqori haroratli termik ishlov berish natijasida sodir bo'ladigan elektrofizik jarayonlar, chuqur sathlarning shakllanishi va texnologik kirishmalar (kislorod va uglerod) bilan o'zaro ta'sir mexanizmlarini o'rganish maqsad qilingan. Choxralskiy usulida o'stirilgan hamda diffuziya yo'li bilan legirlangan namunalarni neytron-aktivatsion tahlil, IQ-spektroskopiya, sig'imning izotermik relaksatsiyasi va to'rt zondli usullari yordamida o'rganildi.

Ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, eritmadan o'stirish jarayonida kremniyga kiritilgan nodir yer elementlari atomlari, odatda kristall panjarada elektr

jihatdan faol bo'lmagan holatda bo'ladi [2-3]. Nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy yorug'lik manbalari sifatida kremniy optoelektronikasi uchun istiqbolli material sifatida tadqiqotchilarning katta e'tiborini tortmoqda. Ma'lumki, kremniydagi NYE kirishmalari strukturalarning optik xossalari namoyon bo'lishi, NYE optik va elektr faol markazlar spektriga, ularning umumiy konsentratsiyasiga hamda nazorat qilib bo'lmaydigan texnologik kirishmalar va material hajmidagi termik nuqsonlar bilan o'zaro ta'siriga bog'liqdir [4-6]. Ilgari o'tkazilgan tadqiqotlarda ta'kidlanishicha, ushbu kirishma atomlarini faollashtirish va ularning kremniy xossalari ta'sirini ta'minlash uchun qo'shimcha tashqi ta'sirlar masalan, termik ishlov berish yoki nurlantirish zarur hisoblanadi [6-8].

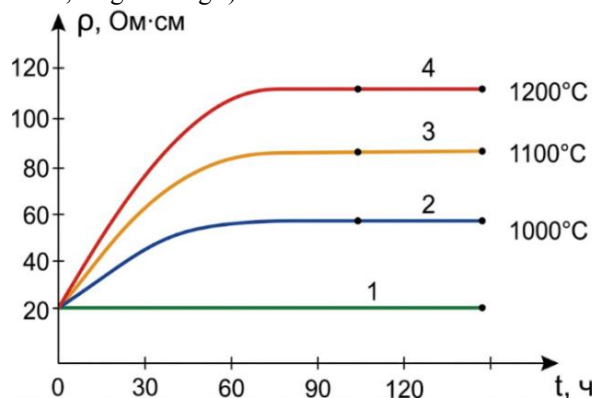
Natijalar va muhokama. Neytron faollashtirilgan tahlil yordamida nodir yer elementlarining kremniyda borligi va miqdori aniqlandi, Si hajmida haqiqatdan ham nodir yer elementlari atomlari ancha katta konsentratsiyalarda 10^{15} dan 10^{19} sm^{-3} gacha mavjudligi aniqlandi. Sig'imli o'lchashlar o'stirish jarayonida kiritilgan Sm, Gd va Yb, boshqa NYE kabi Si hajmida elektr faol bo'lmisligi ko'rsatildi. n-Si taqiqlangan zonasining quyi yarmida joylashgan chuqur sathlarni (ChS) o'rganish uchun optik

qayta zaryadlash usuli qo'llanildi. Solishtirma qarshiligi $\rho=10\div100$ Om·sm bo'lgan, Choxralskiy usulida <111> yo'nalishda o'stirish jarayonida Sm, Gd va Yb bilan legirlangan n-Si monokristallari namunalari tadqiq qilindi. Namunalar shaybadan o'lchami $12\times6\times1$ mm bo'lgan parallelepipedlar shaklida kesib olindi. Nazorat namunalari sifatida xuddi shunday solishtirma qarshilikka ega bo'lgan, ammo NYE kirishmalarisiz kremniy namunalari ayni sharoitlarda o'stirildi.

Kremniy tarkibidagi nodir yer elementlari konsentratsiyasi 10^{16} sm⁻³ dan oshganda, ikkinchi fazaning shakllanishi kuzatiladi [9]. Elektr o'lchovlarining natijalari shuni ko'rsatadiki, Sm, Gd va Yb kremniyda dastlabki holatida elektr jihatdan nafaol bo'ladi. Namunalar 900–1200°C harorat oralig'ida havo muhitida va vakuumli ampulalarda 0,5÷30 soat davomida termik ishlov berilib, so'ngra toblanganda yoki sekin sovitilganda, Si<NYE> namunalarida kislorodning pretsipitatsiyasi nazorat namunalariga qaraganda kamroq bo'ladi. Sig'imning izotermik relaksatsiyasi natijalariga ko'ra, termik ishlov berish jarayonida Sm, Gd va Yb kremniyda nazorat qilib bo'lmaydigan kirishmalar va strukturaviy nuqsonlar uchun getter vazifasini o'taydi.

Nodir yer elementi kirishmasi kiritilgan va nazorat kremniy namunalarini to'rt zondli usulda solishtirma qarshiliklarini o'lchash ishlari olib borildi. Nodir yer elementi mavjud namunalariga turli rejimlar, ya'ni termik ishlov berish harorati va sovutish rejimlarida ishlov berilgan kremniyda ρ solishtirma qarshilikni o'lchashlar termik ishlov berish vaqti oshishi bilan solishtirma qarshilik oshishini ko'rsatdi. 1-rasmda n-Si<Gd> namunalarida solishtirma qarshilikning 1000°C (2 egri chizig'i), 1100 °C (3 egri chizig'i), 1200°C (4 egri chizig'i) termik ishlov berish vaqtining solishtirma qarshilikka bog'liqlik grafigi keltirilgan. Nodir yer elementi kirishmali namunalarda kremniy solishtirma qarshiligining oshishi turli xil yuqori haroratli termik ishlov berishlarda kompensatsiyalovchi markazlarning kiritilishiga dalolat beradi. Shunday qilib, kremniydagi nodir yer elementi atomlarining yuqori haroratli termik ishlov berishda faollashishi natijasida hosil bo'layotgan chuqur energetik sathlar akseptor tabiatga egaligi haqida xulosa chiqarish mumkin.

Nazorat namunalarini yuqori haroratli termik ishlov berish natijasida solishtirma qarshilikning nodir yer elementi kiritilgan namunalar kabi o'zgarishi kuzatilmadi (1 rasm, 1 egri chizig'i).



1 rasm. n-Si<Gd> namunalar solishtirma qarshiliklarining YHIB davomiyligiga bog'liqligi T_{YHIB} : 2) 1000°C 3) 1100°C va 4) 1200°C, 1-nazorat Si

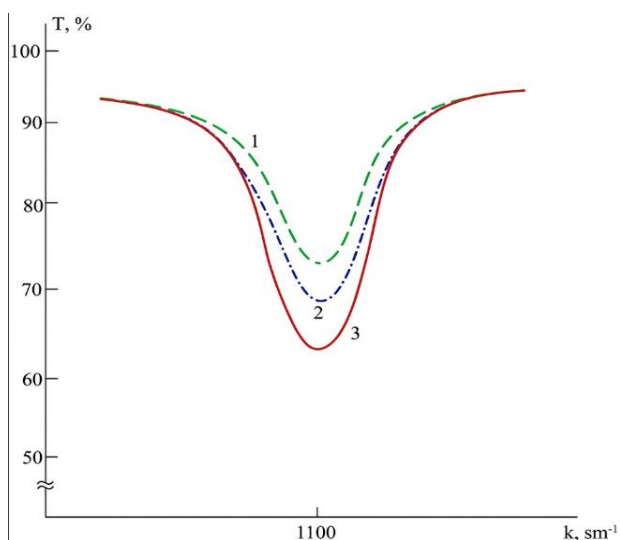
Gd bilan kremniyni legirlash jarayoni 1200°C da 50 soat oralig'ida diffuziya qilish orqali amalga oshirildi. IQ yutilish spektrlari tadqiq qilish uchun boshlang'ich namuna sifatida Choxral usulida o'stirilgan n va p-tip o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan kremniy namunasi ishlatildi. Bunda kislorod va uglerodning optik faol konsentratsiyalari mos ravishda quyidagi qiymatlarga $N_o^{opt} = 6 \cdot 10^{17} \div 1.2 \cdot 10^{18}$ sm⁻³ va $N_c^{opt} = 2 \cdot 10^{16}$ sm⁻³ ega. Boshlang'ich namunalarning solishtirma qarshiliklar $10\div100$ Om·sm oralig'ida bo'lib, qo'yilgan masalaning shartiga ko'ra sayqallangan namunalarning qalinligi 1÷1,5 mm ni tashkil etadi.

Optik faol kislorod (N_o^{opt}) va uglerodning (N_c^{opt}) konsentratsiyalarni aniqlash uchun, IQ yutilish spektrlarni 1100 sm⁻¹ (kislorod polosasi) va 610 sm⁻¹ (uglerod polosasi) 300 K da o'lchandi. Nazorat namuna sifatida xuddi shunday qalinlikdagi kislorodsiz namunalar olinib, ulardagi kislorod va uglerodning optik faol konsentratsiyalari mos ravishda $N_o^{opt} \leq 10^{16}$ sm⁻³, $N_c^{opt} = 5 \cdot 10^{15}$ sm⁻³ teng bo'lgan namunalar ishlatildi.

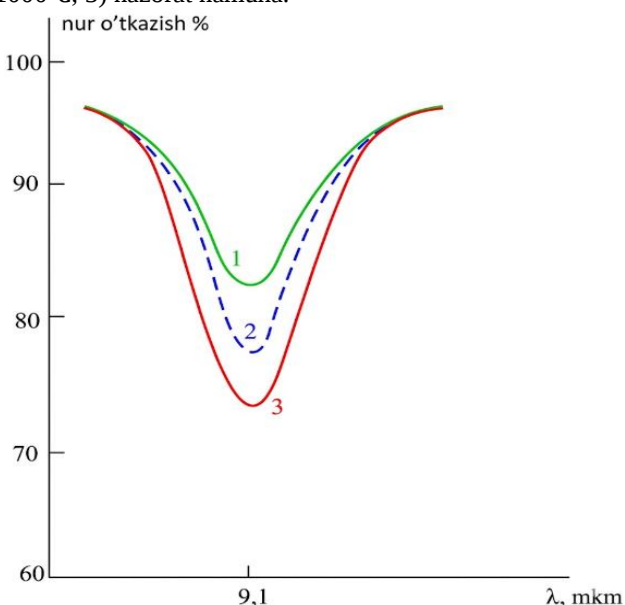
Boshlang'ich namunalarda N_o^{opt} va N_c^{opt} konsentratsiyalari o'lchab olingandan so'ng, o'ta toza metall Gd yuqori vakuumda kremniy siriga purkalib, yuqori haroratli diffuziya jarayoni amalga oshirildi. Diffuziyadan so'ng, xuddi shu namunalarning N_o^{opt} va N_c^{opt} lari IQ yutilish spektri orqali o'lchandi. Ekperimental olingan natijalarning tahlili shuni ko'rsatadiki, kremniyga gadoliniy kiritilgan n va p tip namunalarda optik faol kislorodning konsentratsiyasi, kontrol namunalarga nisbatan (xuddi shu sharoitda, Gd diffuziya qilingan haroratda) 10 ÷ 20 % kamayishi aniqlandi. Bundan tashqari, $\lambda = 16,4$ mkm to'lqin uzunligida, optik faol uglerodning IQ yutilish spektri o'rganildi. Olingan natijalarga ko'ra, legirlangan va kontrol namunalarida optik faol uglerod konsentratsiyasining kamayishi kuzatilmadi. Yuqori haroratli ishlov berish orqali Gd bilan legirlangan kremniydagi chuqur sathlarning energetik spektri o'rganilganda, chuqur sathlarning hosil bo'lish effektivligi dastlabki kremniydagi texnologik kirishmalar kislorod va uglerodning miqdoriga bog'liq ekan.

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, Gd mavjud bo'lgan dastlabki kremniyda, kislorod miqdori qanchalik ko'p bo'lsa, yuqori haroratli ishlovdan so'ng, chuqur sathlarning konsentratsiyasi shunchalik ko'p bo'lar ekan. Bu effekt orqali haqiqatdan nodir yer elementlar bilan texnologik kirishmalar o'zaro ta'sirlashar ekan degan fikrga olib kelindi. Mazkur farazni tekshirish uchun, biz o'stirish paytida Gd kiritilgan dastlabki kremniy namunalari va ularga turli xil yuqori haroratli ishlov berilgandagi IQ yutilish spektrlarni o'rgandik.

Olingan natijalarga ko'ra, Gd bilan legirlangan kremniyga yuqori haroratli ishlov berilgandan optik faol kislorodning konsentratsiyasi Gd atomlarining miqdori va yuqori haroratli ishlov temperaturasiga qarab 10-20 % oshar ekan (2–rasm). Temperatura qanchalik yuqori bo'lsa, mazkur effekt shunchalik kuchli namoyon bo'lar ekan.



2-rasm. O'stirish jarayonida legirlangan n-Si<Gd> namunalarning IQ nurlar yutish spektrlari 1) 1200°C 2) 1000°C, 3) nazorat namuna.



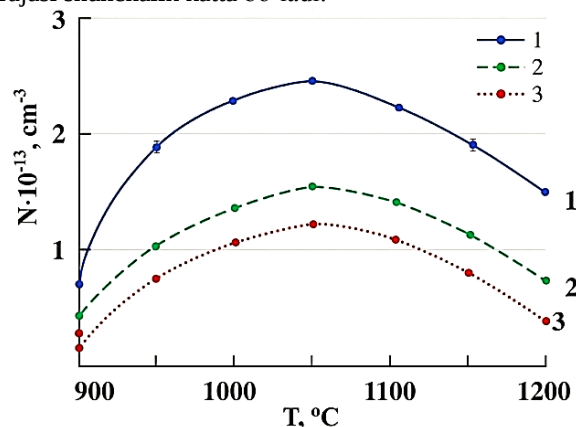
3-rasm. Diffuziya jarayonida n-Si<Gd> kiritilgan namunalarning IQ yutilish spektrlari. 1) 1200°C, 2) 1000°C, 3) nazorat namuna.

Si<N_{YE}> namunalarda energiyalari $E_c - 0.17 \text{ eV}$, $E_c - 0.20 \text{ eV}$, $E_c - 0.32 \text{ eV}$, $E_c - 0.41 \text{ eV}$, $E_v + 0.4 \text{ eV}$ bo'lgan chuqur sathlar (ChS) konsentratsiyasi termik ishlov berishning tegishli bosqichlaridan o'tgan nazorat namunalaridagiga qaraganda ancha kamdir. 1373–1473 K harorat oralig'ida 2 soat davomida termik ishlov berilib, so'ngra moyda yoki sekin sovutilganda barcha Si<N_{YE}> namunalarda kompensatsiya kuzatiladi. Shu sababli, 77–300 K harorat oralig'ida sig'imning izotermik relaksatsiyasi usuli yordamida namunalarda birorta ham markazning qayta zaryadlangani aniqlanmadi ($N_d > 5 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-3}$), ya'ni, konsentratsiyasi $N_{N_{YE}} \geq 5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan Si<N_{YE}> asosida tayyorlangan Shottki to'siqlarining sig'imi $C_b \sim 80 \text{ K}$ haroratgacha berilgan kuchlanish kattaligiga bog'liq emas. Konsentratsiyasi $N_{N_{YE}} \geq 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan namunalar uchun esa bu holat 100 K haroratgacha sodir bo'lmaydi, ya'ni $C_b \approx C_h$, bu yerda C_h – namunaning geometrik sig'imi. Bunda tez sovutilgan namunalarda kompensatsiya darajasi yuqori bo'lgan.

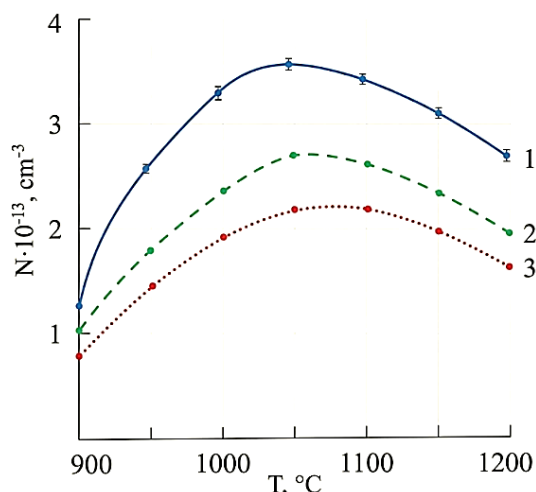
1173 K va undan yuqori haroratda termik ishlov berish tadqiq etilayotgan NYE kirishmalari bilan legirlangan Si namunalarda ionlashgan markazlar konsentratsiyasining $3 \cdot 10^{14}$ dan $2,6 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ gacha kamayishiga olib keladi. Biroq, Si ning taqiqlangan zonasida NYE bilan bog'liq chuqur sathlar hosil bo'lishi aniqlanmadi, garchi ularning bilvosita ta'siri kuzatilgan aksariyat chuqur sathlar konsentratsiyasiga ham bog'langanligi ma'lum bo'ldi. Binobarin, Sm, Gd va Yb Si ning taqiqlangan zonasi quyi qismida mayda akseptor sathlarni hosil qiladi deb taxmin qilish mumkin va bu ularning akseptor tabiatga ega ekanligini tasdiqlaydi. Nazorat namunalarda 1173–1473 K harorat oralig'ida termik ishlov berilgandan so'ng, parametrlari adabiyot ma'lumotlariga [10] mos keladigan va energiyalari $E_c - (0.17 - 0.22) \text{ eV}$, $E_c - 0.4 \text{ eV}$, $E_c - 0.54 \text{ eV}$, $E_v + 0.2 \text{ eV}$, $E_v + 0.4 \text{ eV}$ bo'lgan chuqur sathlar aniqlandi. Bu termik markazlarning barchasining konsentratsiyasi $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ dan oshmadi.

Havosi so'rib olingan n-Si<N_{YE}> ampulalaridagi namunalarni termik ishlov berilgan namunalarga nisbatan, havo muhitida toblangan namunalardan farqli o'laroq, n-Si nazorat namunalarda kuzatilgan barcha CHSlar aniqlanadi. Bunda ularning konsentratsiyasi, odatda, $\sim (2-3) \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ dan oshmaydi, elektronlarni tutib olish kesimi $\sigma_n \sim 10^{-14} \text{ sm}^{-2}$ bo'lgan $E_v + 0.4 \text{ eV}$ CHSga ega markaz bundan mustasno. Uning konsentratsiyasi nazorat namunalarda $(3-4) \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ ga yetsa, NYE bilan legirlangan kremniyda taxminan $1 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil etadi. Ma'lumki, bu donor CHS temir kirishmasi bilan bog'lanadi [10].

Shunday qilib, Sm, Gd va Yb kirishmalari, tez diffuziyalanuvchi nazorat qilinmaydigan Au va Fe bilan bog'liq bo'lgan chuqur energetik sathlarning hosil bo'lishini, shuningdek, boshqa termik markazlarning energiyalari $E_c - 0.17 \text{ eV}$ (4-rasm) va $E_c - 0.4 \text{ eV}$ (b-rasm) bo'lgan hamda konsentratsiyalari termik ishlov berish haroratiga va Si tarkibidagi NYE ning mavjudligiga bog'liq bo'lgan markazlarning paydo bo'lishini kamaytiradi [8,11–14]. Kremniyda Sm, Gd va Yb mavjudligi ushbu termik markazlarning konsentratsiyasini 2–4 baravar kamaytiradi va yuqori haroratli termik nuqsonlarni kamaytiradi. Si tarkibida NYE kirishmalarining konsentratsiyasi qanchalik yuqori bo'lsa, namunalarning kompensatsiya darajasi va termik nuqsonlarni kamayish darajasi shunchalik katta bo'ladi.



4-rasm. n – Si va n – Si < N_{YE} > na'munalarida $E_c - 0.17 \text{ eV}$ sathli termik markaz konsentratsiyasining termik ishlov temperaturasi bog'lanishi 1 – n – Si, 2 – n – Si < Sm >, 3 – n – Si < Gd >. $N_{N_{YE}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$



5-rasm. $n - Si$ va $n - Si < NYE >$ namunalari da $E_c - 0.4 eV$ sathli termik markaz konsentratsiyasining termik ishlov temperaturasi ga bog'lanishi 1 – $n - Si$, 2 – $n - Si < Sm >$, 3 – $n - Si < Gd >$. $N_{NYE} = 5 \cdot 10^{18} sm^{-3}$

Xulosa. O'stirish jarayonida Sm, Gd va Yb kirishmalari bilan legirlangan Si dagi asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqti (τ_{nzt}) ni o'lchash natijalari shuni ko'rsatadiki, bu kirishmalarning mavjudligi namunalarning termik ishlov berishga chidamliligini oshiradi va shu bilan birga τ_{nzt} qiymatlari nazorat namunalari ga nisbatan 2–4 barobar ortadi. Termik nuqsonlarning kamayishi Si hajmining nazorat qilib bo'lmaydigan tez diffuziyalanuvchi kirishmalardan tozalanishi, ularning Sm, Gd va Yb kirishmalari yordamida geterlanishi yoki akseptor tabiatli NYE+nuqson komplekslarining hosil bo'lishi, shuningdek, Si dagi NYE ning kislorod bilan faol o'zaro ta'siri bilan izohlanishi mumkin. Si<NYE> namunalari da IQ-yutilishni tadqiq qilish natijasida Si da NYE ning kislorod bilan o'zaro ta'siri NYE konsentratsiyasi $N_{NYE} \geq 5 \cdot 10^{17} sm^{-3}$ dan boshlanishi aniqlandi. Bu esa, Si hajmi da nazorat qilib bo'lmaydigan va texnologik kirishmalar uchun stok vazifasini bajaruvchi NYE ning ikkinchi faza shakllanishi hamda ularning silitsidlari mavjudligidan dalolat beradi.

Adabiyotlar

1. Милнс Л. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. – Москва: «Мир», 1977.
2. Бургуэн Ж. Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Теория. – Москва: «Мир», 1984.
3. Соболев Н.А. Кремний, легированный эрбием - новый полупроводниковый материал для оптоэлектроники. – Москва: // Российский химический журнал, 2001, 5-6(XLV). – С. 95-101.
4. Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. Особенности поведения в полях ядерной реакции кремния, легированного редкоземельными элементами. В. кн. Радиационные эффекты в твердых телах. – Киев: «Наукова думка», 1977. – С. 88-102.
5. Карпов Ю.А., Петров В.В., Просолович В.С. Фотопроводимость и электрические свойства Si<Er>, облученного γ -квантами ^{60}Co . – Санкт-Петербург: // Физика и техника полупроводников, 1982, 9(16). – С.1676-1678.
6. Назыров Д.Э., Регель А.Р., Куликов Г.С. Кремний, легированный редкоземельными элементами: Препринт ЛФТИ им. А.Ф.Иоффе АН СССР №1122. – Л.: 1987.
7. Фистуль В.И. Атомы легирующих примесей в полупроводниках. – Москва: «Физматлит», 2004.
8. Libertino S. The effects of oxygen and defects on the deep-level properties of Er in crystalline Si. // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 78. №6. – P. 3867-3873.
9. Wong E., Liu H., Man Sh.Q. et al. Erbium doping in silicon by thermal in diffusion. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998, Vol. 37, № 6B. – P. 3669-3672.
10. Назыров Д.Э. Геттерирование золота самарием и гадолинием в кремнии. // Электронная обработка материалов, 2007, № 3(245). – С. 77–82.
11. Назыров Д.Э., Базарбаев М.И., Иминов А.А. Диффузия иттрия в кремнии. // Физика и техника полупроводников. 2006, Т. 40, Вып. 7. – С. 788-789.
12. Назыров Д.Э. Диффузия иттербия в кремнии. // Физика и техника полупроводников. 2003, Т. 37, Вып. 9. – С. 1056-1057.
13. Назыров Д.Э., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. Диффузия эрбия и тулия в кремнии. // Физика и техника полупроводников, 1991, Т. 25, Вып. 9. – С. 788-789.
14. Зайнабидинов С., Назыров Д.Э. Диффузия, растворимость и электрические свойства скандия и празеодима в кремнии. // Изв. вузов. Физика, 2007, № 1. – С. 75-77.