

НОДИР ЕР ЭЛЕМЕНТЛАРИ БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК ХОССАЛАРИ

Отахонова Шаходатхон Нурали кизи

Янгийул маданият мактаби 2-тоифали физика уқитувчиси

<https://doi.org/10.5281/zenodo.5576377>

ARTICLE INFO

Received: 05th October 2021

Accepted: 10th October 2021

Online: 15th October 2021

KEY WORDS

нодир ер элементлари,
акцентор сатҳ,
перцепитат,
имплантация, тез
диффузияланувчи
киришмалар.

ABSTRACT

Кремнийни нодир ер элементлари билан легирлаш бўйича сўнги йиллардаги илмий ишларнинг кўрсатишича, кремнийда термик ишлов ва радиацион нурланиш таъсири натижасида ҳосил бўладиган термик ва радиациявий нуқсонлар шунингдек, термик ишлов жараёнида кремнийга кириб кетиши ва унинг электрофизик хоссаларини ўзгартириб юбориши мумкин бўлган Ni, Na, Fe каби тез диффузияланувчи киришмалар намунанинг ва унинг асосида ясаладиган асбобларнинг электрофизик параметрларини ўзгартириб юбориши маълум.

Кириш. Яримўтказгичларнинг ривожланиб келаётган қаттиқ жисмлар электроникасида бир томондан яримўтказгич кристаллини чуқур тозалаб, иккинчи томондан, легирлаб уларни аралашма атомларини концентрациясини бошқариш мумкин. Нуқтавий нуқсонлар нурланишни турли аспект тузилишли ва вакант тузилишли нуқсонлар илмий ва техник муаммолари анча вақтлардан бери фақат ҳисобланиб келинади. Термодинамик нуқтаи назардан, кристалл панжарасидаги нуқсонларни бўлиши муқаррар. Негаки, тўғри кристалл ҳолати бир қанча даражаларда асбобни тузилиш сифатида ҳосил бўлади. Буни биринчи навбатда

Маълумки, хоссалари

нуқсон пайдо бўлиш жараёнида ҳамда электрон жараёнлар билан биргаликда кўрсатиш зарур.

Яримўтказгичларда радиациявий нуқсонлар ҳосил бўлишини махсус пасивлаш, хусусан кремнийда кристаллга нейтрал киришмани киритиш орқали амалга оширилади. Ушбу киришма эса ҳосил бўладиган электр фаол комплекслар таркибига кирмайдиган бўлиши, Френкель жуфтани ташкил этувчилари учун жамлагич ёки аннигиляция маркази сифатида хизмат қилиши керак. Сўнги йилларда шундай киришмалар сифатида нодир ер элементлари қўлланилмоқда. Si<Gd> нинг электр



хоссаларига радиациявий нурланишга кучсиз сезувчанлик аниқланган ва ушбу натижани бирламчи радиациявий нуқсонлар учун самарали жамлагич сифатида хизмат қилувчи гадолий атомларининг тўпланмаларининг радиациявий нуқтавий нуқсонлар билан ўзаро таъсирлашувининг натижаси сифатида изоҳланган. Шунингдек, $Si < Gd >$ намуналарининг рекомбинациявий параметрларининг радиация таъсирига барқарорлиги кўрсатилган.

Мавзуга доир адабиётларнинг тахлили. Нодир ер элементлари вакиллари гадолий ва самарий акцептор киришмалар сифатида биринчи марта [1-3] ишларда ўрганилган. Кремнийга ўстириш жараёнида киритилган иттирий саёз сатҳ ҳосил қилиши аниқланган. Кремнийни гадолий билан легирлаш эса, акцептор табиатли марказларнинг пайдо бўлишига сабаб бўлган. 0,03 дан 1,8 масса фоизларида киритилган голмий элементи намунанинг ўтказувчанлик турини ўзгаришига олиб келиши, аммо у кремнийдаги коваклар концентрациясини ўзгартирмаслиги Холл эффекти ва электр ўтказувчанлик методлари ёрдамида аниқланган. Ушбу ҳолда голмий билан боғлиқ янги акцептор чуқур сатҳ $E_v + 0,35 \text{ eV}$ пайдо бўлиши кузатилган.

Кремнийни неодим ва тербий билан ионлар имплантацияси ёрдамида легирланганда тақиқланган зонада $E_c - 0,29 \text{ eV}$ ва $E_c - 0,33 \text{ eV}$ донор чуқур сатҳларнинг пайдо бўлиши кузатилган. Шунингдек, нодир ер элементлари кремнийда электр

нейтраллиги кузатилиб, нодир ер элементларининг миқдори $\tau_{\text{нэТ}}$ га таъсир қилмаган.

Баличенко А.А. ва бошқаларнинг [4] ишида кремнийга ионлар имплантацияси ёрдамида киритилган Gd, Yb ва Smнинг табиатини тадқиқлашган ва диффузиянинг фаолланиш энергияси учун 4 eV; 4,4 eV ва 3,9 eV қийматларни мос равишда Yb, Sm ва Gd учун аниқланган. Юқоридаги барча элементлар кремнийда акцептор табиат намоён қилганлиги, уларнинг электр фаолланиш даражаси намуналарга киритилган Gd, Yb ва Smнинг умумий концентрациясининг 1÷2% ни ташкил этиши аниқланган.

Ион имплантациясининг дозаси ортиши билан электр фаол қисм сезиларсиз ортган. Электрон микроскопик тадқиқотлар лантаноидларнинг асосий қисми преципитатлар кўринишида кремнийда жойлашиши кузатилган.

Саболев Н.А. ва бошқаларнинг [5-6] ишларида эрбий ва кислородни кремнийга 1-2 MeV энергияли ионлар имплантацияси ёрдамида олинган туннел светодиодлар ва р-п структура ёритилган бўлиб, ушбу структуралар р-п ўтишининг тешилиш режимида ишлатилган. Ушбу тешилиш режимида эрбийнинг электр люминесценциясининг интенсивлиги эрбийнинг концентрациясига боғлиқ бўлади.

Кремнийни эрбий билан ион имплантацияси ёрдамида легирланганда 1,54 μm тўлқин узунликли электр эффектив



фотолюминесценция олиш имконияти пайдо бўлиши [7-8] аниқланган. Ушбу фотолюминесценция Eg^+ ионларининг парчаланган сатҳлараро кристалл майдонидаги электронларнинг нурланишли ўтишлари натижасидир.

Мастеров В.Ф. ва бошқаларнинг [7-8] ишларида 1-2 MeV энергияли $1 \times 10^{13} \div 3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ дозали голмий, диспрозий, эрбий ва иттербий ионлари билан имплантацияланган ва 600÷900 °C температураларда 0,5÷1 соат вақтлар давомида қиздириб ишлов берилган кремнийнинг фотолюминесценцияси тадқиқланган. Электрик ва оптик фаол марказларнинг концентрациясини орттириш учун кислород ионларини қўшимча имплантация қилинган. Кремнийга киритилган нодир ер элементлари ва кислороднинг концентрациялари орттирилганда фотолюминесценциянинг интенсивлиги ортиши кўрсатилган.

Энергияси 1 MeV энергияли ва дозаси 10^{13} см^{-2} бўлган голмий, диспрозий ионларининг кремнийга имплантацияси ва 600÷900°C температураларда термик ишлов бериш натижасида донор марказлар ҳосил бўлади. Ушбу марказларнинг концентрацияси бошланғич кремнийдаги кислороднинг концентрацияси ёки қўшимча кислород имплантацияси қилинганда ортади.

Термик ишлов температураси ва Si:Du ва Si<Ho>да кислороднинг концентрациясига фаолланиш коэффициенти ва донор марказларнинг концентрациявий тақсимотларининг боғлиқ табиати аниқланган. Таркибида

лантаноидлар ва киришмалари бўлган камида иккита донор марказлар ҳосил бўлиши мумкин эканлиги кузатилди.

Эрбий ва кислород ионлари имплантацияланган кремний монокристаллари қатламларига термик ишлов беришда донор марказлар ҳосил бўлиши математик моделлаштирилган. Ҳисоблашларнинг кўрсатишича, донор марказларнинг тагликнинг чуқурлиги бўйича концентрациявий тақсимотига тагликдаги кислороднинг ва имплантацияланган кислороднинг таъсири, шунингдек 600÷900°C диапазондаги термик ишловда эрбийнинг донор фаолланиш коэффициентининг ўзаро қониқарли боғланиши кўрсатилган.

Назирова Д.Э. ва бошқаларнинг [9] ишларида биринчи марта 70 keV энергияли ва дозаси 10^{16} см^{-2} , ионлар токи 10 мкА/см² иттербий ионларининг кремнийга (KEF-15) имплантациясини ва ионлар киритилгандан сўнг, ҳосил бўлган нуқсонларнинг тақсимоти тадқиқланган. Кремнийга имплантацияланган иттербий ионларининг тақсимоти радиациявий бузилишлар тақсимоти билан мос келган. $2R_p(\sim 200\text{Å})$ чуқурликда концентрациявий тақсимотнинг Гаусс қонунидан четлашиши кузатилган. Ушбу чуқурликларда нуқсонлар тақсимоти ҳам монотон ўзгаради.

Тадқиқот методологияси. Кремний намуналари дастлаб никел киришмаси билан бир текис легирланади, сўнгра намунанинг катта сиртларидан бирига гадолийнинг



металл катлами пуркалади ва такрорий термик қиздириш бажарилади.

Намуналарни легирлаш жарайни диффузиявий йўл билан $T = 1200^\circ\text{C}$, $t = 2$ соат давомида амалга оширилади. Тадқиқотлар учун ўлчамлари $20 \times 10 \times 1$ мм³ бўлган КЭФ-15 намуналари қўлланилади. Никел ва гадолий киришмаларини пуркашдан аввал намуналар кетма-кет равишда бўлмайдиган киришмаларни кремний сиртида йўқотиш учун, толуол, ацетон, шохона ароқ, $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$ аралашмасида ва дистилланган сувда ювилади. Худди шундай шароитларда назорат намуналари ҳам термик қиздирилади.

Кремнийга никелнинг диффузиясидан сўнг намуналар HF , $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$ ва дистилланган сувда ювилди, сўнгра кимёвий едириш ёрдамида 150 мкм қалинликкача олиб борилди. Кейин намунанинг сиртларидан бирига гадолий пуркалди ва 1200°C , $t = 2$ соат давомида диффузия жараёни амалга оширилди. Диффузиядан сўнг намуналар сиртдан оксидланган қатламни ва диффузияланмай ортиб қолган диффузианти йўқотиш учун яна HF , $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$ “шохона ароқ” $\text{HCl} + 3 \text{HNO}_3$ ва дистилланган сувда ювилади.

Нодир ер элементлари билан легирланган кремнийда фотоўтказувчанликнинг аномал табиати кўрсатилган, яъни $10^{13} \div 10^{16}$ см⁻² концентрацияларда киришмавий фотоўтказувчанлик кузатилмаган. Концентрация $> 10^{16}$ см⁻³ бўлганда, фотоўтказувчанлик сакровчан пайдо бўлган. Кундузги ёритилиш йўқлигида, $N_{\text{La}} < 10^{17}$ см⁻³ (фосфор концентрацияси

$N_p \sim 1,7 \times 10^{13}$ см⁻³) диапазонда намуна солиштирма қаршилигининг ортиши кузатилган. Солиштирма қаршилигининг ортиши ва киришмавий фотоўтказувчанликнинг гадолий кичик концентрациясида пайдо бўлиши кремнийда фосфорнинг ортишида кузатилади. Бир қатор ишларда олинган натижалар кремнийни ўстириш жараёнида киритилган Gd, Yb ва Sm нинг электрик нофаол (электрик нейтрал) деган фикрни тасдиқлайди. Киришмавий таркиби бир хил бўлган намуналарда лантаноидларнинг концентрацияси ортганда заряд ташувчиларнинг Холл харакатчанлигининг камайиши кремний ҳажмида нодир ер элементларининг преципитатлари мавжудлиги билан тушунтирилади.

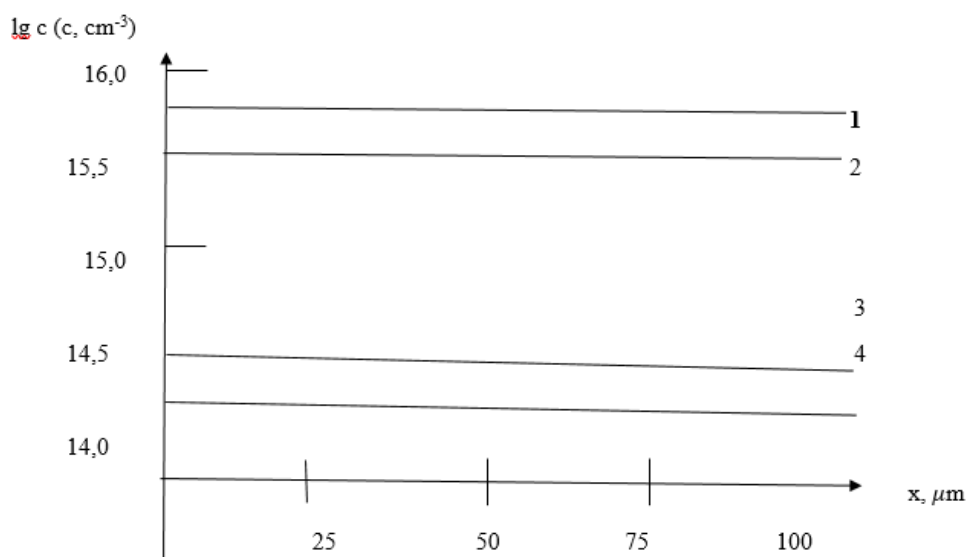
Адабиётларнинг маълумотларидан ҳамма нодир ер элементларининг кимёвий хоссалари бўйича бир-бирига яқинлиги ва бундай ўхшашлик лантаноидларнинг кремнийдаги хоссаларида ҳам умумий ҳолда кузатилади. Нодир ер элементлари кремнийда тақсимланиши коэффицентининг кичик қийматларига эгадир. Бу эса нодир ер элементлари кремний эритмаси жуда юқори бўлган ҳолда эрувчанликнинг кичик қийматларга эга бўлишига олиб келади, натижада кремний куйманинг узунлиги бўйлаб нотекис тақсимланишига, шунингдек иккинчи фазадаги бирикмалар преципитатлар ёки киришмавий бирикмаларнинг пайдо бўлишига олиб келади. Юқорида шарҳланган адабиётларнинг кўпчилигида, нодир ер элементлари



переципитатларининг ўлчамлари нодир ер элементларининг кремнийда пайдо бўладиган концентрациялари ортиб бориши билан бирга бир неча 10 мкм ташкил этади. Бунинг натижасида, переципитатлар кремнийда локал бикр кучланишларнинг ва дислокацияларнинг пайдо бўлишига олиб келади. Гадолийнинг концентрацияси ортиши билан йиғинди магнитик қабулчанлик босқичма-босқич диамагнитикликдан парамагнитиклик ҳолатга (300 K) ўтиши аниқланган. Ушбу ҳол гадолий атомларининг парамагнетизми билан боғлиқ бўлиб, гадолий магнитик қабулчанлигининг сакраши $N_{Gd} \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ва $T=290 \text{ K}$ температурада гадолийнинг ферромагнитик айнаши кузатилади. Лантаноидларга ҳос хусусиятлари орқали ушбу концентрацияларда гадолий атомларининг асосий қисми кристаллда переципитатлар кўринишида жойлашиши мумкин. Гадолийнинг концентрацияси ошганда, магнитик қабулчанликнинг магнит майдон кучланганлиги ортиши билан

камайишини тушунтиришча, бундай боғланиш гадолий атомларининг тўпламлари атрофида бузилган соҳалар билан боғлиқ бўлиши мумкин.

Таҳлил ва натижалар: сиғимнинг изотермик методи буйича олинган натижалар термик ишлов жараёнида гадолий бошқариб бўлмайдиган тез диффузияланувчи (Au, Cu, Fe, Na, Ni, Mn ва б.) киришмалар учун геттер (тозаловчи) сифатида хизмат қилиши кузатилди. Масалан $E_c=0,17 \text{ eV}$ (кислород билан кремнийнинг комплекси 1- расм) $E_c=0,4 \text{ eV}$ (тез диффузияланувчи бошқариб бўлмайдиган киришмаларга хос нуқсон). Чуқур сатҳларнинг концентрациялари гадолий билан легирланган кремнийда, назорат намуналарига нисбатан (гадолий киритилмаган кремний) мос термик ишловлар температураларида анча кичик эканлиги аниқланди. Гадолий кремнийда ҳосил булган термик марказлар ($E_c=0,17 \text{ eV}$, $E_c=0,4 \text{ eV}$) концентрациясини $2 \div 3$ марта камайтириши кузатилди.





1- Расм. Никелнинг кремнийдаги Ni с(x) концентрациявий тақсимоти (~150 мкм қалинлик олингандан сунг):

1-никелнинг кремнийдаги с(x) тақсимоти. T= 1200°C, t=2 соат;

2- Si <Ni> назорат намуналарида никелнинг кремнийдаги с(x) концентрациявий тақсимоти (Gd қатламисиз) ~150 мкм қатлам олингандан сунг; T= 1200°C, t=2 соат давомида қайта қиздириш;

3- Si <⁶³Ni> намуналарда T= 1200°C, t=2 соат гадолийний қатлами билан қайта қиздиришдан (никел диффузиясидан ~150 мкм, қатлам олингандан сунг);

4- Si <⁶³Ni+ Gd > намуналарда Ni с (x) тақсимоти. Биргаликда диффузия. T= 1200°C, t=2 соат.

Хулоса ва таклифлар. Гадолийний, самарий ва эрбий билан легирланган кремнийнинг асосий электрофизик параметрларининг радиациянинг таъсирига барқарорлигининг ортиши ҳам кўрсатилган.

1. Биргаликда ёки кетма-кет кремнийга диффузияси жараёнида тез диффузияланувчи никелнинг гадолийний ёрдамида геттерланиши – уларнинг самарали ўзаро таъсирлашуви аниқланди.
2. Гадолийнийнинг кремнийда мавжудлиги термик нуқсонларнинг камайишига олиб келади.
3. Гадолийний киришмалари тез диффузияланувчи бошқариб бўлмайдиган киришмалар билан боғлиқ $E_c-0,17$ eV, $E_c-0,4$ eV чуқур сатҳлар ҳосил қилувчи термик нуқсонлар концентрациясини самарали камайтириши кузатилди. Тадқиқланган Si <Ni+ Gd > намуналарда $\tau_{\text{нэт}}$ қийматлари ҳажмда назорат намуналарига нисбатан 3-5 марта камайиши кузатилди.

References:

1. Mandelkorn J., Schwartz L., Broder J., Kautz H. and Ulman R. Effects of impurities on radiation damage of silicon solar cells// Journal of Applied Physics. – New York, 1964. –V. 35.-PP.2258-2260.
2. Mandelkorn J. Gd or Sm doped silicon semiconductor composition // Patent USA. K1.252-62.3. № 3.409.554. – New York.
3. Салманов А.Р. Исследование поведения примесей редкоземельных элементов и циркония в кремнии и их влияние на его термическую стабильность. Автореф. дис. ... канд. физ. – мат. наук. – Москва, 1978.- 17с.
4. Балыченко А.А., Крылов Б.Г., Макаров В.В., Филиппов Е.И., Шокин А.Н. Особенности поведения ионно-имплантированных РЗЭ в кремнии//В сб. тезисов докладов VI международной конференции по физико химическим основам легирования полупроводниковых материалов. – М., 1988.-С. 91.



5. Емельянов А.М., Соболев Н.А., Тришенков М.А., Хакушев П.Е. Туннельные светодиоды на основе Si:(Er, O) с малыми временами нарастания электролюминесценции ионов Er^{3+} в режиме пробоя // Физика и техника полупроводников. – Санкт-Петербург, 2000. – Т.34. - В.8. - С.965-969.
6. Соболев Н.А., Емельянов А.М., Николаев Ю.А. Влияние дозы имплантации ионов эрбия на характеристики (111) Si:(Er, O) – светодиодных структур, работающих в режиме пробоя перехода // Физика и техника полупроводников. - Санкт-Петербург, 2000. – Т.34. - В. 9. - С.1069-1072.
7. Мастеров В.Ф., Насредин Ф.С., Серегин П.П., Теруков Е.И., Мездрогина М.М. Примесные атомы эрбия в кремнии //Физика и техника полупроводников. - Санкт-Петербург, 1998. – Т.32.-№ 6.- С.708-711.
8. Александров О.В., Захарьин А.О., Соболев Н.А., Николаев Ю.А. Электрофизические свойства слоев кремния, имплантированных ионами эрбия и кислорода в широком диапазоне доз и термообработанных в различных температурных режимах // Физика и техника полупроводников. - Санкт-Петербург, 2002. – Т.36.-В. 3.- С. 379-382.
9. Назыров Д.Э., Гончаров С.А., Суворов А.В. Ионное легирование кремния иттербием // Письма в ЖТФ. - Санкт-Петербург, 2000. – Т.26. – В. 8.- С. 24-27.