

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/Т.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

КЕНЖАЕВ ЗОИР ТОХИР ЎҒЛИ

**КРЕМНИЙЛИ ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИ ПАРАМЕТРЛАРИГА НИКЕЛ
КИРИШМА АТОМЛАРИ ТАЪСИРИНИНГ ЎЗИГА ХОСЛИГИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертация автореферати мундарижаси**

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

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

Кенжаев Зоир Тохир ўғли

Кремнийли қуёш элементлари параметрларига никел киришма
атомлари таъсирининг ўзига хослиги. 3

Кенжаев Зоир Тохир ўғли

Особенности влияния примесных атомов никеля на параметры
кремниевых солнечных элементов. 21

Kenzhaev Zoir Toxir ogli

Features of the influence of impurity nickel atoms on the parameters of
silicon solar cells. 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works. 43

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/Т.01.12 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

КЕНЖАЕВ ЗОИР ТОХИР ЎҒЛИ

**КРЕМНИЙЛИ ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИ ПАРАМЕТРЛАРИГА НИКЕЛ
КИРИШМА АТОМЛАРИ ТАЪСИРИНИНГ ЎЗИГА ХОСЛИГИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.4.PhD/FM415 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Бердақ номидаги Қорақалпоқ давлат университети ва Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (ispm.uz) ва «ZiyoNeb» Ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Исмаилов Қанатбай Абдреймович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Тургунов Нозимжон Абдуманнопович
физика-математика фанлари доктори, доцент

Имамов Эркин Зуннунович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Ётақчи ташкилот:

Ион – плазма ва лазер технологиялари институти

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «09» 02 соат 10 дақиқадаги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (99871) 248-79-94, факс: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, ЎЗМУ қошидаги ЯФМ ИТИ мажлислар зали).

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин. (36 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.).

Диссертация автореферати 2022 йил «22» 02 кунни тарқатилди.
(2022 йил «22» 02 дақиқадаги 36 рақамли реестр баённомаси).



Ш.Б. Утамурадова
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

Ж.Ж. Хамдамов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, PhD

Х.К. Арипов,
Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш қошидаги
илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги даврда жаҳон миқёсида яримўтказгичли қуёш энергетикасини ривожлантиришга катта аҳамият қаратилмоқда. Бу борада АҚШ, Германия, Хитой давлатлари 2030 йил охиригача қуёш энергияси ишлаб чиқаришни ривожлантириш ва таннархини яна 50 % га камайтиришни режа қилган. Дунё миқёсида юқори самарадорликка эга, А^{III}В^V яримўтказгич бирикмалар асосидаги, кўпқаскадли қуёш элементлари (ҚЭ) ишлаб чиқилмоқда. Бироқ, бу ҚЭлари юқори ФИКга эга бўлсада, уларни ишлаб чиқариш технологияси бир мунча мураккаб ва қимматбаҳо хом ашё ва ускуналарни талаб қилади. Шунинг учун юқори самарадорликни сақлаб, арзон нархлардаги оптималлаштирилган технология асосида янги турдаги ҚЭ ларини ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этади.

Ҳозирги кунда жаҳонда замонавий электроника ва фотоэнергетика соҳасининг асосий материали кремний ҳисобланади. Кремнийли ҚЭининг самарадорлигини ошириш учун фотогенерацияланган заряд ташувчиларни йиғиш коэффицентини ва яшаш вақтини ошириш, оптик ва электрик йўқотишларни камайтириш зарур. Кремнийли ҚЭлар соҳасидаги ишларнинг асосий қисми контакт технологиялари, пассивлаштирувчи ва акселанишга қарши қатламларни эмиттерда ҳосил қилиш ва асосий бўлмаган заряд ташувчилар (АБЗТ) яшаш вақтини ошириш учун кремнийга электронейтрал киришмалар легирлаш орқали олиб борилмоқда. Назорат қилинмайдиган киришма атомларни никел атомлари кластерлари билан геттерлаш орқали АБЗТ яшаш вақтини оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Сўнгги йилларда Ўзбекистонда қуёш энергиясидан амалда фойдаланишга кўпроқ эътибор қаратилмоқда. Ўзбекистон Республикасини (2017-2021 йилларда) ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси доирасида умумий электр энергияси ишлаб чиқаришдаги қайта тикланувчи манбалар улушини кўпайтириш ва 2030 йилгача 25 %гача ошириш кўзда тутилган¹. Никел киришма атомларининг кластерларини шакллантириш ва уларнинг электрофизик хоссаларини ўрганиш бўйича С.З. Зайнабиддинов ва М.К. Баҳодирхоновнинг илмий мактабларида сўнгги йилларда бир қатор диссертация ишлари ҳимоя қилинган. Кластерлар шаклланиш механизмлари ва уларни ҳосил қилишнинг технологик методлари ишлаб чиқилган. Шундай қилиб, никел атомлари кластерларининг кремнийли ҚЭ параметрларига таъсирини ўрганиш ва кластерларга эга самарадорлиги юқори ҚЭни яратиш катта илмий ва амалий аҳамият касб этади.

Диссертация ишида олиб борилган тадқиқотлар 2019 йил 21 майдаги ЎРҚ-539-сонли “Қайта тикланаувчи энергия манбаларидан фойдаланиш тўғрисида” Ўзбекистон Республикаси Қонунида белгиланган ва Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПҚ-4947-сонли “2017-2021-йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантириш бўйича Ҳаракат стратегияси”, 2013 йил 1 мартдаги ПҚ-4512-сонли “Муқобил энергия

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 22 августдаги «Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг тезкор чора-тадбирлари тўғрисида» ПҚ-4422-сонли қарори.

манбаларини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида” ва Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2020 йил 10 июлдаги “Иқтисодийнинг энергия самарадорлигини ошириш ва мавжуд ресурсларни жалб этиш орқали иқтисодий тармоқларининг ёқилғи-энергетика маҳсулотларига қарамлигини камайтиришга доир қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида” ПҚ-4779-сонли ва 2021 йил 9 апрелдаги “Ўзбекистон Республикасида қайта тикланувчи ва водород энергетикасини ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида” ги ПҚ-5063-сонли қарорларида кўзда тутилган вазифаларни бажаришга муайян жаражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергия, энергия ресурсларини тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик; замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганганлик даражаси. Сўнгги йилларда бутун дунёда кўплаб олимлар ва илмий жамоалар кремнийли ҚЭлари ФИКни ошириш устида илмий ишлар олиб бормоқдалар. Немис олимлари А. Richter ва унинг ҳамкорлари (Fraunhofer ISE/Soitec) кремнийли ҚЭнинг самарадорлигини ошириш бўйича фаол иш олиб бормоқда ва 26 % ФИК олишди. К. Yoshikawa, М. Yoshita, М.А. Green ва бошқалар 2017 йилда ФИКни 26.7 % бўлган самарадорлиги юқори кремнийли ҚЭни олишди. Шунингдек, E. L. Augusto, T. Buonassisi, M. J. Kerr, D. Macdonald, S. Rein, A.A. Istratov, M.D. Pickett, E.R. Weber, J. Schmidt, B. Aissa, M. Minbashi ва бошқалар рекомбинация хусусиятларини яхшилаш, АБЗТ яшаш вақтини ошириш ва нуқсонларнинг ҚЭ самарадорлигига таъсирини ўрганиш бўйича тадқиқотлар олиб боришган. Қлари сирт рекомбинациясини камайтириш ва сирт юзани пассивациялаш соҳасида N. Jenny, M. L. Polignano, A. Augusto, W.D. Eades, M. De Laurentis ва бошқалар илғор тарзда илмий изланишлар олиб боришмоқда.

H. Kitagawa, Sh. Tanaka, H. Nakashima, M. Yoshida, A. A. Istratov, P. Zhang, R. J. McDonald, A. R. Smith, E. R. Weber, M. Seibt, F. Spit, J. Lindroos, D. J. Backlund ва бошқалар илмий ишларида никел атомлари диффузия механизмларини, уларнинг кристалл панжарадаги ҳолатини ва кремнийнинг электрофизик параметрларига таъсири тадқиқ қилинган. Шунингдек, S. Yatsukhnenko, R.M. Swanson., K.R. Catchpole, H. Kitagawa, S. Tanaka, T.Y. Tan ва бошқалар ишларида киришма атомлари кластерларини, шу жумладан никел кластерларини олиш технологияси ва кластер шаклланишининг физик механизмлари ўрганилган. Ўз илмий ишларида E. R. Weber, M. Heuer, T. Buonassisi, A. A. Istratov, M. D. Pickett, A. Luque, M.V. Trushinлар геттерлаш жараёнларини, шу жумладан кремнийдаги назорат қилинмайдиган атомларни никел билан геттерлаш жараёнини ўргандилар.

МДХ республикаларида И.Е Панайотти, Е.И. Теруков, В.А. Миличко, А.В. Саченко, Б.И. Фукс ва бошқалар кремнийли ҚЭ лари ФИК ни ошириш бўйича тадқиқот олиб бормоқда. Шунингдек, М.Г. Мильвидский, В.В. Чалдышев, П.Н. Брунков, И.В. Бажин, О.В. Александров,

А.А.Криворучко, Ю.Я Гафнер ва бошқалар ишларида киришма атомлари кластерларини, шу жумладан никел кластерларини олиш технологияси ва кластер шаклланишининг физик механизмлари ўрганилган. Ўз илмий ишларида В. А. Харченко, З.Ю Готра, И.Б. Чистохин, К.Б. Фрицлер, Р.Рараконстантиноу, Томпсон, А.С. Асташенков, Д.И. Бринкевич, Е.П.Неустроев, С.А. Смагулова, В.И. Орлов, О. В. Александров ва бошқалар геттерлаш жараёнини, шу жумладан, кремнийдаги никел билан геттерлаш жараёнини ўргандилар.

Ўзбекистонда академиклар М.К. Баҳодирхонов, С. Зайнобидинов, Р.А.Мўминов, А.Т. Мамадалимов ва уларнинг шогирдлари кремнийда киришма атомларининг кластерларини шакиллантириш орқали кремний асосли қурилмаларнинг ютилиш спектрини кенгайтириш имкониятларини асослаб бердилар. Академик М.К. Баҳодирхоновнинг илмий мактабида кремний панжарасида турли киришма атомлари кластерларининг ҳосил бўлиши ўрганилган ва уларнинг функционал имкониятлари кўрсатилди.

Кластер ҳосил бўлишининг кремнийли ҚЭлари ФИКга таъсирини ўрганиш зарурати туғилди. Шундай қилиб, киришма атомлари кластерларининг кремнийли ҚЭ параметрларига таъсирини ўрганиш катта амалий қизиқиш уйғотади. Шу жумладан, никел атомларининг кластерлари, уларнинг тузилишининг хусусиятларидан келиб чиқиб, катта истиқболга эга.

Оптималь диффузия ва бошқа технологик жараёнлар учун шароитлар, шунингдек, никел кластерлари бўлган юқори самарали кремнийли ҚЭ ларининг оптималь котструкцияси ҳали аниқланмаган. Никел атомлари кластерларининг кремнийли ҚЭлари параметрларига таъсирининг адекват моделлар мавжуд эмас, шунингдек физик асослари ва механизмлари аниқланмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши ТДТУнинг “Рақамли электроника ва микроэлектроника” кафедрасида ва ҚДУни “Яримўтказгичлар физикаси” кафедрасида, ОТ-Ф2-50-сон «Кремний панжарасида $A^{III}B^V$ ва $A^{II}B^{VI}$ яримўтказгич бирикмаларининг элементар ячейкалари шаклланишининг илмий асосларини ишлаб чиқиш - фотоэнергетика ва фотоника учун истиқболли материаллар олишдаги янги ёндашув» (2017-2020 йй.) давлат гранти доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади никел билан легирлашни кремнийли ҚЭлари параметрларига таъсирининг ўзига хос хусусиятларини ўрганиш ва никел киришма атомларининг кремнийли ҚЭлари самарадорлигига таъсирининг физик моделини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

самарадорлиги юқори кремнийли ҚЭларини олиш учун, кремнийни никел киришма атомлари билан легирлашининг оптималь диффузия ва бошқа технологик шароитларини аниқлаш;

сиртга яқин бойитилган соҳада жойлашган никел киришма атомларининг ҚЭ параметрларига таъсирини кўрсатиш;

никел киришма атомларининг кремнийли ҚЭлари базасидаги асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтига таъсирини ўрганиш;

никел киришма атомларининг саноатда ишлаб чиқарилган кремнийли ҚЭлари самарадорлигига таъсирини ўрганиш;

никел киришма атомларининг кремнийли ҚЭ самарадорлигига таъсирини, ҳар хил типдаги донор ва акцептор киришмалар ҳосил қилган $p-n$ ўтишлари билан баҳолаш;

никел киришма атомларининг кремнийли ҚЭлари параметрларига таъсирининг физик моделини ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти сифатида никел атомлари билан ҳар хил шароитларда легирланган ($T_{diff}=700\div 1300$ °С и $T_{ann}=600\div 1100$ °С) кремний асосли қуёш элементлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети никел атомлари билан легирланган кремнийли ҚЭларининг электрик, фотоэлектрик ва оптик хусусиятлари.

Тадқиқотнинг усуллари. Ишни бажаришда микронзондли таҳлил, иккиламчи ионлар массали спектрометр, сканерловчи электрон микроскоп, ИҚ – микроскоп, ИҚ – спектрометр, спектрофотометр, рентген фазали таҳлил каби замонавий усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

кремнийли ҚЭ самарадорлигини 25 ÷ 30% га оширишга имкон берадиган, никел билан легирлашнинг оптимал диффузия режимлари – $T_{diff}=800\div 850$ °С, қўшимча термик ишлов бериш шартлари – $T_{ann}=750\div 800$ °С ва кремнийли ҚЭнинг тузилиши экспериментал аниқланган;

никел билан бойитилган сирт юзасига яқин соҳа (қалинлиги 2÷3 μm) юқори геттерлаш хоссасига эга бўлиб, ҚЭлари базасидаги асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини 2 мартагача ошириш имконини бериши ва ҚЭ самарадорлигини оширишда муҳим рол ўйнаши аниқланган;

илк бор никел билан легирлаш ҚЭлари самарадорлигини ошириши дастлабки кремнийнинг ўтказувчанлик типига (p – ёки n – тип) ва $p-n$ ўтишни яратиш учун киритилган киришмалар турига (В ёки Р) боғлиқ эмаслиги аниқланган;

қуёш нурланиш спектрининг кўринадиган соҳасида ($\lambda \sim 0.5\div 1$ μm) никел билан легирланган кремнийли ҚЭлари қисқа туташув токининг спектрал сезгирлигини 25 ÷ 40% гача ошириши аниқланган;

никел киришма атомлари кластери тузилишининг физик модели ишлаб чиқилган ва шу асосида кластердаги никел атомлар орасидаги масофа $-R_{Ni-Ni}\approx 3.84$ Å ва никел кластерининг тез терқаладиган киришмалар билан боғланиш энергияси $-AE_k\approx 1.39$ eV ҳисобланган.

кластерларнинг кремнийли ҚЭ параметрларига таъсирини тушунтириш учун никел кластерлари томонидан «зарарли» киришма атомларининг геттерлаш жараёнининг физик модели ишлаб чиқилган ва шу асосида геттерлаш коэффициенти $G\approx 0.5\div 0.8$ ва заряд ташувчиларни йиғиш коэффицентининг максимал ошириши – 50÷100% ҳисобланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

никелни ҚЭ нинг олд юзасига (эмиттерга) диффузия қилиш орқа томон юзасига диффузия қилишга қараганда самаралироқ эканлиги аниқланган;

$p-n$ ўтиши ҳосил қилинишидан олдин никел билан легирлаш ҚЭлари учун янада самаралироқ ва технологик жиҳатдан қулайлиги кўрсатилган. Кремнийли ҚЭ самарадорлигини $25 \div 30\%$ га оширишга имкон берадиган, никел билан легирлашнинг оптимал ҳарорати – $T_{diff}=800\div 850$ °С, кўшимча термик ишлов бериш шартлари – $T_{ann}=750\div 800$ °С исботларган;

никел билан легирланган монокристалл кремнийли ҚЭларини ишлаб чиқаришнинг маршрут харитаси яратилган. Маршрут харитасидан фойдаланган ҳолда тажриба ҚЭлари ишлаб чиқарилган. ҚЭлари ишлаб чиқаришни саноат технологиясига жорий этиш учун никелни кремнийга олдиндан кимёвий ўстирилган қатламдан легирлаш усули тавсия этилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлиги замонавий ўлчаш воситалари ва тадқиқот усулларини қўлланилганлиги, экспериментал ва ҳисобланган маълумотларни бошқа муаллифларнинг натижалари билан мувофиқлиги, шунингдек, олинган натижаларни замонавий физик моделлар асосида тавсифланганлиги билан асосланган. Олинган натижалар халқаро ва республика миқёсидаги илмий анжуманларда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти никелнинг, шу жумладан никел билан бойитилган соҳанинг, кремнийли ҚЭ лари параметрларига таъсирининг физик асослари ва механизмларини аниқлаш, шунингдек, никел атомлари кластери тузилиши ва никел кластерлари томонидан геттерлаш жараёнининг физик моделларини яратилиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти никел атомлари кластерлари ҳосил қилишнинг оптимал диффузия технологияси арзон ва юқори самарадорликка эга никел атомлари билан легирланган кремнийли ҚЭ ларини ишлаб чиқаришда қўлланилишидан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Никел билан легирлашнинг кремнийли ҚЭ лари параметрларига таъсирининг ўзига хос хусусиятларини ўрганиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

никел киришма атомларини кремнийга олдиндан кимёвий ётқизилган (ўстирилган) қатламдан диффузия қилишнинг янги усулидан «ФОТОН» акционерлик жамиятида жаҳон аналоглари даражасидаги $20\div 100$ nm ўлчамли кластерларга эга тажриба намуналарини олишда қўлланилган («Ўзэлтехсаноат» акционерлик жамиятининг 2021 йил 09 сентябрдаги 04-3/1729-сон маълумотномаси). Ушбу илмий натижаларни эффективлиги $18\div 20$ % гача бўлган ФВП ва ФВМ (фотоволтаик панеллар ва модуллар) ишлаб чиқариш учун қўллаш тавсия этилган;

геттерлаш усули ва никел легирлашнинг оптималлаштирилган технологияси Centre of foundation studies for agricultural science да (Путра Малайзия Университетининг 06.10.2021 йилдаги маълумотномаси) асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтини 2 мартагача ошириш, эмиттер сирт қаршилигини $10\div 15$ % га камайтириш ва самарадорлиги юқори ($20\div 22$ %) куёш батареяларини ишлаб чиқариш учун қўлланилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишини илмий натижалари 13 та халқаро, 8 та республика миқёсида ўтказилган илмий-амалий конференцияларда маъруза ва муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 32 та илмий ишлар, шулардан 9 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан тавсия этилган илмий журналларда, шу жумладан, 6 таси республика ва 3 таси хорижий Scopus маълумотлар базаси индексланган журналларда чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 37 та расм, 17 та жадвални ўз ичига олган ҳолда, 120 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси очиқ берилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари, объекти, предмети ва методлари келтирилган, ишнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, ишнинг апробацияси, нашр этилган илмий ишлар, шунингдек диссертациянинг ҳажми ва тузилиши ҳақида қисқача маълумотлар келтирилган.

«Кремнийли кўш элементларининг ҳозирги ҳолати, муаммолари ва истиқболлари» деб номланган биринчи бобда, самарадорлиги юқори кремнийли ҚЭ ларини олишнинг ҳозирги ҳолати ва сўнгги илмий ютуқлари, ҚЭ лари ФИК ни чекловчи омиллар ва кремнийли ҚЭ лари ФИК ни ошириш усуллари таҳлил қилинган. Мавжуд назарий ва амалий маълумотлар таҳлили асосида диссертация ишини бажаришдаги мақсади ва вазифалари аниқланган.

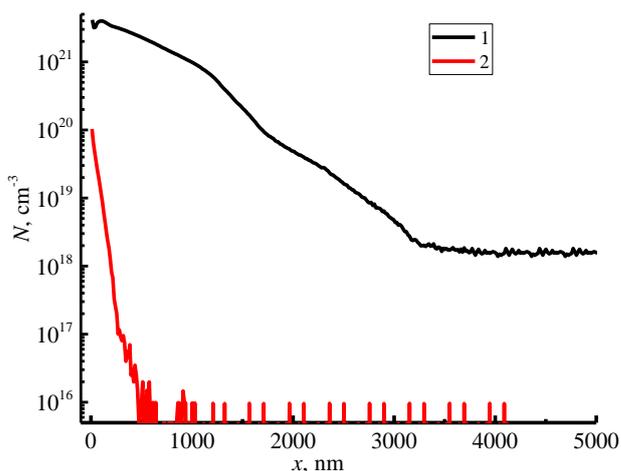
«Кремний панжарасидаги никел атомларининг ҳолати» деб номланган иккинчи бобда кремнийда никел атомлари кластерлари ҳосил қилишнинг диффузия технологияси ўрганилган.

1. Никел киришма атомлари (НКА) нафақат етарли даражада юқори ҳажмий эрувчанликка ($n \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), балки сиртга яқин соҳада ($d = 2 \div 3 \text{ } \mu\text{m}$) жуда юқори эрувчанликка эга эканлиги аниқланган, бу эрда никелнинг концентрацияси $n_s \sim 10^{20} \div 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ га етиши мумкин (1-расм).

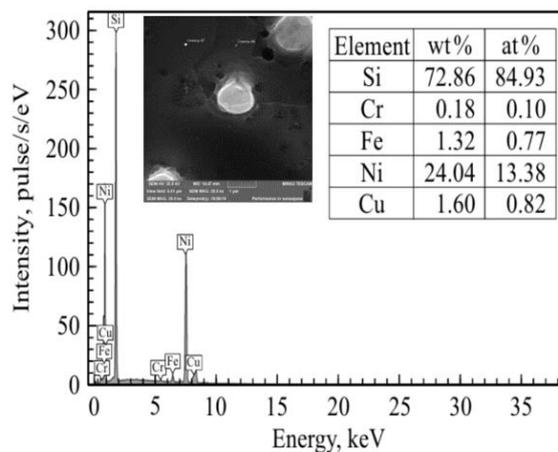
2. Диффузия ва қўшимча термик ишлов бериш (ҚТИБ) натижасида никел киришма атомлари кластерлари (НКАК) ҳосил бўлиши аниқланган. ИҚ микроскоп, СЕМ ва SIMS натижаларига кўра, никел кластерларининг сирт зичлиги $\sim 10^6 \div 10^7 \text{ cm}^{-2}$, ўртача диаметри $\sim 20 \div 100 \text{ nm}$, кластердаги атомлар сони $\sim 10^5 \div 10^7$ атрофида, кластерлар концентрацияси эса $\sim 10^{11} \div 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ га тенг.

3. Диффузия ва ҚТИБ дан кейин никел атомлари кластерларининг таркиби аниқланган. ҚТИБ дан кейин кластер таркибидаги никел ($\sim 40 \div 60 \%$), кислород ($\sim 15 \div 25 \%$) ва бошқа бошқарилмайдиган киришмалар ($\sim 30 \div 50 \%$) концентрацияси ортиши кўрсатилган.

4. Кремний панжарасидаги никел кластерлари, рекомбинация марказлари (РМ) бўладиган, тез тарқаладиган киришмаларни (ТТК) геттерлаши аниқланган (2-расм).



1-расм. Никел атомларининг кремнийнинг олд (1) ва орқа (2) соҳасида тарқалиши. Никелнинг диффузияси кремний юзасига пуркалган металл плёнкасида амалга оширилган.

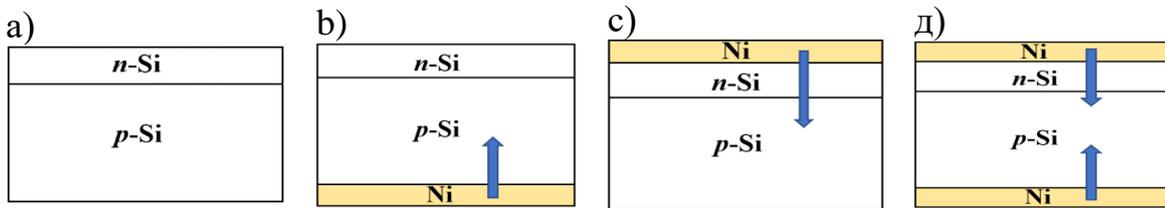


2-расм. Никел кластерларининг кўриниши ва таркиби (СЭМ да элементар таҳлил орқали олинган).

«Никел атомлари билан легирлашнинг кремнийли қуёш элементлари самарадорлигига таъсири» деб номланган учинчи бобида кремнийга легирланган никел атомларининг, шу жумладан никел билан бойитилган соҳанинг (НББС) ҚЭ лари параметрларига таъсири ўрганилган ва кремнийли ҚЭ ларини саноатда ишлаб чиқаришда фойдаланиш учун легирлашнинг оптимал технологик шароитлари аниқланган.

1. Чуқур $p-n$ ўтишли ҚЭ лари параметрларига никел диффузиясининг таъсири, шунингдек, ҚТИБ нинг таъсири ўрганилди. Текширилаётган кремнийли ҚЭ лари «ФОТОН» акционерлик жамиятида завод технологиясига мувофиқ ишлаб чиқарилган. Дастлабки $p-n$ тузилма p -типли кремний пластиналарига (КДБ-0.5) фосфорни диффузия қилиш орқали олинган. Кейин 4 та гуруҳ ҚЭ лари олинган (3-расм): I гуруҳ – назорат намуналари, II гуруҳ – намуналари, вакуумда структураларнинг орқа томонига (p -тип) қалинлиги 1 μm бўлган юбка тоза никел қатлами пуркалган. III гуруҳ – никел қатлами ҚЭ нинг n -тип қатлами юзасига пуркалган. IV гуруҳ–ҚЭ нинг олд ва орқа юзасига никел қатлами пуркалган. Никелнинг диффузия жараёни очик ҳавода $T_{diff}=1200\text{ }^\circ\text{C}$, $t=30\text{ min}$ давомида амалга оширилган. Диффуздан кейин ҚЭ $p-n$ ўтиш чуқурлиги $x_{p-n}=30 \pm 2\text{ }\mu\text{m}$ га етади.

Олинган ҚЭ лари V_{oc} , J_{sc} , P_{peak} параметрларини ўлчаш натижасида, никел атомлари билан легирлаш чуқур $p-n$ ўтишли ҚЭ лари самарадорлигини ошириши аниқланди. Бунда, энг сезиларли ўсиш III ва IV гуруҳ намуналарида кузатилган (1-жадвал).



3-расм. ҚЭ лари тузилиши: а) I-гурух б) II-гурух в) III-гурух д) IV-гурух.

1-жадвал

Никел диффузиясидан кейин барча гуруҳ намуналари параметрларининг ўртача қийматлари, шунингдек, I гуруҳга нисбатан II, III ва IV гуруҳлар параметрларининг ўзгариши

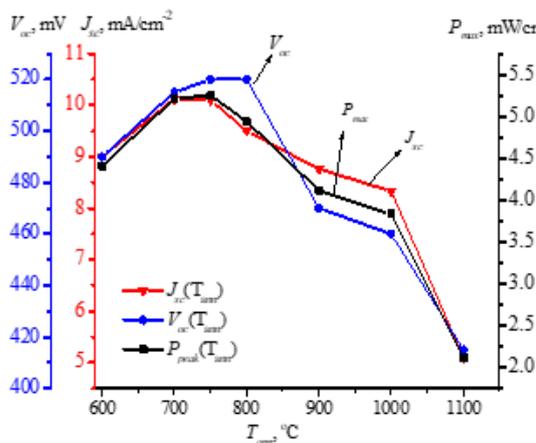
Параметр	I – гуруҳ	II – гуруҳ	III – гуруҳ	IV- гуруҳ
J_{sc} , (mA/cm ²)	2.7	3.86	5.1	5.5
V_{oc} , (mV)	380	450	455	460
P_{peak} , (mW/cm ²)	1.026	1.737	2.320	2.530
$\Delta P_{peak} / P_{peak}$	-	69.3 %	126	146.6%

2. ҚЭ ларига $T_{ann} = 600 \div 1100$ °C да ҚТИБ ва $T_{ann} = 750 \div 800$ °C ҳарорат оралиғида III – гуруҳ ҚЭ параметрларида энг юқори ортиш аниқланган (4-расм). $T_{ann} = 750 \div 800$ °C температурада ҚТИБ дан кейин II, III, IV гуруҳ намуналарининг параметрлари ошганлигини 2-жадвалдан кўриш мумкин.

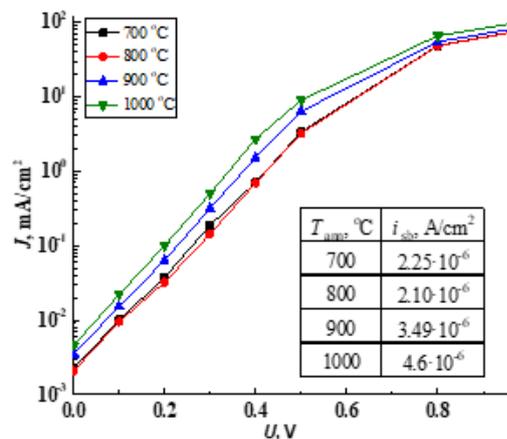
2-жадвал

Қайта термик ишловдан ($T_{ann} = 750 \div 800$ °C) кейин ҚЭ лар параметрлари ўртача қиймати

Параметр	II – гуруҳ	III – гуруҳ	IV- гуруҳ
J_{sc} , mA/cm ²	6.92	9.8	10.5
V_{oc} , mV	510	118	520
P_{peak} , mW/cm ²	3.529	5.076	5.418



4-расм. ҚЭ лари параметрларининг ҚТИБ ҳароратига боғлиқ ўзгариши.



5-расм. Турли ҳароратларда ҚТИБ III гуруҳ ҚЭ лари қоронғу ВАТ.

Олинган натижалар асосида, $T_{ann} = 750 \div 800$ °C температурада ҚТИБ туфайли никел кластерларининг шаклланиши, чуқур $p-n$ ўтишли ҚЭ лари параметрларига сезиларли даражада таъсир қилиши аниқланди.

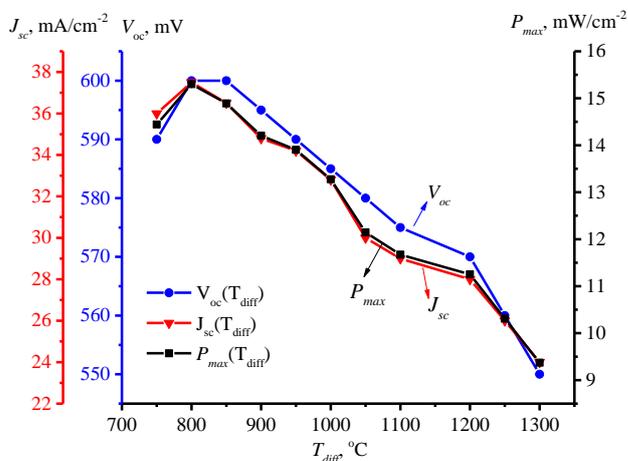
III гуруҳи намуналари V_{oc} , J_{sc} , P_{peak} параметрларининг қиймати II гуруҳ намуналарига нисбатан анча юқори, масалан диффузиядан кейин P_{peak} -33.6 % га, ҚТИБ дан кейин эса 43.84% гача ортади. Бу сирт юзасига яқин, НББ соҳанинг, ҚЭ самарадорлигини оширишда муҳим рол ўйнашини аниқлатади.

Термик ишлов бериш ҳароратининг $T_{ann} < 900$ °C дан пасайиши билан, сирт юзаси қаршилиги сезиларли камайиши аниқланган, шунинг ҳисобига ҚЭ нинг асосий параметрлари паст ҳароратларда (T_{ann}) сезиларли даражада ошади.

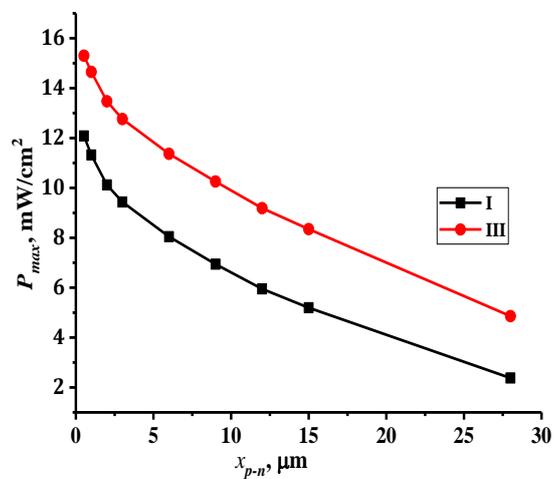
5-расмни таҳлил қилиб шунни айтиш мумкинки, 700 °C ва 800 °C тавланиш ҳароратида тўйиниш токи (I_s) етарли даражада кичик (яъни, АБЗТ яшаш вақти каттароқ), яъни $T_{ann} = 700 \div 800$ °C ҳарорат оралиғида никел кластерлари ҚЭ параметрларига сезиларли даражада таъсир қилади. Тавланиш ҳарорати энг камида $T_{ann} \geq 900$ °C бўлганда $p-n$ ўтиш I_s нинг ортиши содир бўлади. Бу тавланиш ҳароратида ТТК ларни қайта фаоллашишини аниқлатади.

III гуруҳ ҚЭ ВАТ ининг тўлдириш коэффитсиенти (ζ) I гуруҳга нисбатан тахминан 30% гача (0.45 дан 0.59 гача) ошиши аниқланди. Ушбу ўсиш никел таъсири натижасида ҚЭ эмиттери сирт юзаси қаршилигининг камайиши билан изоҳланади. Никел билан легирланган ҚЭ лари, эмиттери, сирт юзаси қаршилиги ($\rho_s = 1.44$ Ом/□), назорат намунасига нисбатан 25% га ($\rho_s = 1.8$ Ом/□) камайиши аниқланди, бу ҚЭ нинг ζ ошиши билан мос тушади.

3. ҚЭ га никел диффузиясининг оптимал ҳарорати. Дунда фосфор диффузияси $T_{diff} = 1000$ °C да $t = 30$ min давомида амалга оширилди ($x_{p-n} = 0.5 \div 0.7$ μm) ва ҚЭ нинг эмиттер томонига вакуумда қалинлиги ~ 1 μm бўлган тоза никел қатлами пурқалди. Никел атомларининг диффузияси $T_{diff} = 700 \div 1300$ °C ҳароратда ва ҚТИБ $T_{ann} = 750 \div 800$ °C оралиғида $t = 30 \div 40$ min давомида амалга оширилди. Никелли контакт олингандан сўнг, ҚЭ нинг ВАТ ўлчанди (6-расм).



6-расм. ҚЭ параметрларининг никел атомлари диффузия ҳароратига боғлиқлиги.



7-расм. I ва III гуруҳ ҚЭ лари P_{max} қийматининг x_{p-n} га боғлиқ ўзгариши.

6-расмдан кўринадики, никелнинг диффузия ҳарорати пасайиши билан J_{sc} ва V_{oc} нинг деярли монотоник ошиб боради. Никел атомлари билан

легирланган ҚЭ лари параметрлари, назорат ҚЭ ларига нисбатан (максимал қуввати $P_{max} = \xi \cdot J_{sc} \cdot V_{oc} = 12.08 \text{ mW/cm}^2$) $T_{diff} \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ диффузия ҳароратида орта бошлайди ва $T_{diff} = 800 \div 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ҳароратда максимал қийматга етади.

4. Никел атомларининг, $p-n$ ўтишли чуқурлиги (x_{p-n}) турли хил бўлган (28 дан $0.5-0.75 \text{ }\mu\text{m}$ гача) кремнийли ҚЭ параметрларига таъсири ўрганилган.

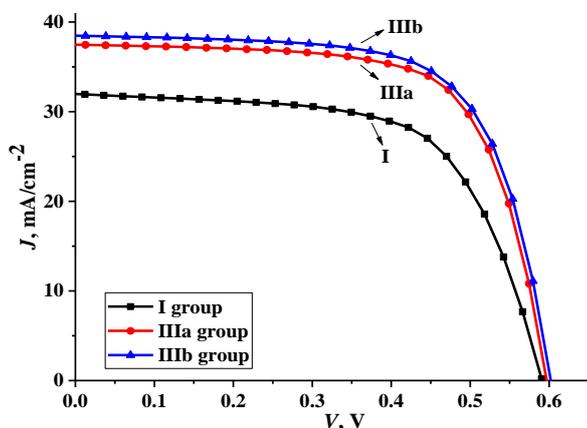
Никел атомлари билан легирлашнинг ҚЭ лари параметрларига ижобий таъсири $p-n$ ўтиш чуқурлигига кучсиз боғлиқ эканлиги аниқланган (7-расм).

ҚЭ $p-n$ ўтиш чуқурлигининг камайиши билан никел атомларини легирлашнинг таъсири бироз заифлашади, аммо сезиларли даражада сақланиб қолади. Масалан, $x_{p-n} = 0.5-0.75 \text{ }\mu\text{m}$ бўлган никел билан легирланган ҚЭ да J_{sc} қиймати назорат ҚЭ ига нисбатан 17,2%, $\xi - 6.25\%$ ва $P_{max} - 26.62\%$ га ошади.

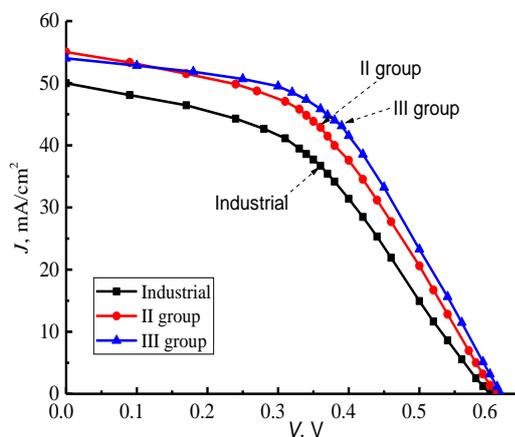
5. Бундан ташқари, никел атомлари ижобий таъсири, никелнинг диффузияси $p-n$ ўтиш ҳосил қилинишидан олдин (Шб – гуруҳ) ёки кейин (Ша – гуруҳ) амалга оширилишига кучсиз боғлиқлиги аниқланган. Никел билан $p-n$ ўтиш ҳосил қилинишидан олдин легирлаш, амалда ҚЭ ишлаб чиқариш технологиясини қийинлаштирмайди, балки самардорлигини оширади (8-расм). Демак, $p-n$ ўтиш ҳосил қилинишидан олдин никел атомлари билан легирлаш усули янада самарали ва содда технология ҳисобланади.

Шундай қилиб, никел диффузиясининг оптимал ҳарорати $T_{diff} = 800 \div 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ва ҚТИБ ҳарорати $T_{ann} = 750 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$ бўлиб, бу P_{max} қийматини $25 \div 30\%$ га ошириш имконини беради.

6. Олинган экспериментал натижалар асосида никел билан легирланган кремнийли ҚЭ ларини тайёрлаш технологик жараёнининг маршрут харитаси ишлаб чиқилган ва лаборатория ҚЭ лари тайёрланган. Таклиф этилаётган технология стандарт технологик жараёнга яхши мос келади ва арзонроқ харажат эвазига янада самарали ҚЭ ларини яратиш имконини беради.



8-расм. ҚЭ ларининг $T_{ann} = 750 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ҳароратда ҚТИБ дан кейинги ВАТ.



9-расм. II ва III гуруҳ, ҳамда назорат саноат ҚЭ ларининг ВАТ.

«ҚЭ нинг сирт юзасига яқин никел билан бойитилган соҳанинг геттерлаш хоссалари» деб номланган тўртинчи бобда кремнийли ҚЭ ларига, сирт юзасига яқин НББС нинг таъсирини ўрганиш натижалари келтирилган.

1. Никелнинг саноатда ишлаб чиқарилган («Suniva» компанияси томонидан ишлаб чиқарилган, p -типли базали ва $x_{p-n} \sim 0.5 \text{ }\mu\text{m}$) монокристалл

кремнийли ҚЭ ларига таъсири ўрганилган. Саноатда ишлаб чиқарилган ҚЭ нинг орқа ва олдинги омик контактлари, акс эттиришга қарши қопламани бузмасдан, олиб ташланган. ҚЭ нинг орқа *p* -типли томонига (II-гуруҳ) ва *n* –типли эмиттер қатлами (III-гуруҳ) юзасига вакуумда никел пуркалган. Кейин $T_{diff}=700\div 1200$ °С ҳарорат оралиғида никел атомларининг диффузия қилинган ва $T_{ann}=750\div 800$ °С ҳароратда қўшимча термик ишлов берилган.

Тажриба натижасида, саноатда ишлаб чиқарилган кремнийли ҚЭ ларини никел билан легирлаш, уларнинг самарадорлигини ошириши аниқланган. Бунда, оптимал шароитларда ($T_{diff}= 800\div 850$ °С) легирланган ҚЭ максимал қуввати бошланғич саноат ҚЭ га нисбатан 26÷27% га ошган (9-расм).

Демак, саноатда ишлаб чиқарилган ҚЭ нинг электрофизик параметрларини ошириш учун таклиф қилинаётган, сезиларли ўзгаришларсиз ва арзон нархлардаги технологияни, ҚЭ лари ишлаб чиқаришнинг стандарт технологик жараёни билан бирлаштиришга имкон беради.

2. Никел билан легирлашнинг ҚЭ нинг асосий бўлмаган заряд ташувилар (АБЗТ) яшаш вақтига таъсири ўрганилган. Никел диффузиясидан кейин III гуруҳ ҚЭ лари АБЗТ яшаш вақтининг (τ) ўртача қиймати 1.6÷1.7 марта ошди, ҚТИБ дан кейин эса τ нинг қиймати яна 30÷35 % га ошиши кузатилди, яъни τ нинг қиймати назорат ҚЭ га нисбатан 1.9÷2 марта ортади (3-жадвал).

3-жадвал

Никел диффузияси ва ҚТИБ дан сўнг барча гуруҳлар ҚЭ лари τ , шунингдек, II ва III гуруҳлар τ нинг I гуруҳга нисбатан ўзгариши

Гуруҳ	$T_{diff}= 1200$ °С, $t = 30$ min	τ , μ с	$\Delta\tau/\tau_I$, марта	$T_{ann}= 800$ °С, $t = 1$ соат.	τ , μ с	$\Delta\tau/\tau_I$, марта
I	ТИБ	5÷6	-	ҚТИБ	5÷7	-
II	Никел диффузияси	7÷8	1.35÷1.4	ҚТИБ	9	1.5÷1.55
III		9	1.60÷1.7	ҚТИБ	12	1.9÷2

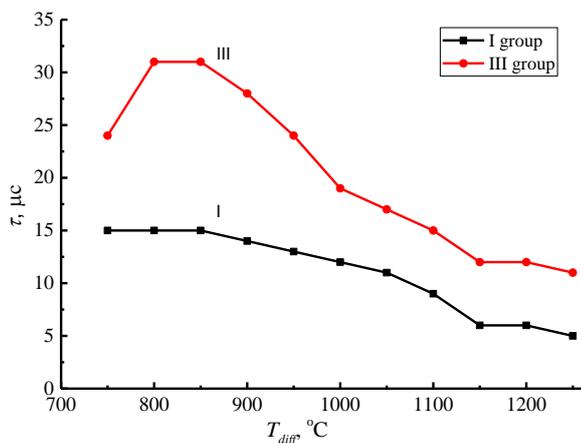
Ушбу маълумотлар асосида қуйидагиларни хулоса қилиш мумкин: никел билан легирлаш ҚЭ лари АБЗТ яшаш вақтини оширади, НББС нинг ҳосил бўлиши (ҚЭ эмиттерида) ҚЭ τ ни қўшимча равишда оширади ва қайта термик ишлов бериш АБЗТ яшаш вақти қийматининг яънада ошишига олиб келади.

ҚЭ лари АБЗТ яшаш вақтининг ошиши кремний панжарасида никел кластерларининг шаклланиши ва уларнинг геттерлаш хусусиятининг мавжудлиги билан тушунтирилади.

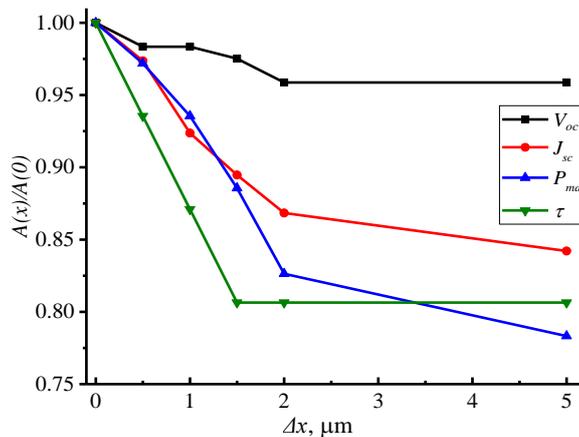
Никел атомлари диффузия ҳароратининг пасайиши билан, ҚЭ лари АБЗТ яшаш вақтининг ошиб бориши ва $T_{diff}= 800\div 850$ °С да максимал қийматга ($\tau = 30\div 32$ μ с) эришиши, кейин камайишни бошлаши аниқланган (10-расм).

Тажриба натижалари шуни кўрсатдики, никел атомлари, уни диффузия қилиш усулидан қатъий назар (яъни, *p*–*n* ўтиш ҳосил қилинишидан олдин ёки кейин никел билан легирлаш), ҚЭ лари АБЗТ яшаш вақтини доимо оширади.

Демак, барча олинган натижалар асосида, никел билан легирлаш, АБЗТ яшаш вақтини ошириши ҳисобига, ҚЭ лари самарадорлигини оширади деб хулоса қилиш мумкин.



10-расм. I ва III гуруҳ ҚЭ лари АБЗТ яшаш вақтининг диффузия ҳароратига боғлиқ ўзгариши.



11-расм. ҚЭ лар J_{sc} , V_{oc} , P_{max} ва τ қийматининг, НББС олиб ташланмага ҚЭ га нисбатан, НББС олиб ташланган қалинлигига боғлиқ нисбий ўзгариши

3. «Юзадаги» ва «ҳажимдаги» кластерларнинг нисбий ҳиссасини аниқлаш учун, никел диффузиясидан сўнг, силлиқлаш орқали намуналар юза қатламидан $\Delta x=5 \mu\text{m}$ гача олиб ташланди (бу намуналардаги НББС қалинлиги $d \approx 2 \div 2.5 \mu\text{m}$ га тенг). $p-n$ ўтиш ҳосил қилинда ва ҚТИБ ўтказилди, сўнг омик контакт олинди. Кейин, ҚЭ ларнинг ВАТ и ва яшаш вақти τ ўлчанди.

Сирт юзасига яқин НББС ни олиб ташлаш натижасида, ҚЭ P_{max} ни $22 \div 25\%$ га ва τ ни $18 \div 20\%$ га ёмонлашиши аниқланди (11-расм).

Шуни таъкидлаш керакки, $\Delta x=5 \mu\text{m}$ (яъни, НББСсиз) олиб ташланганидан кейин, ҚЭ τ қиймати (24-26 μs) назорат ҚЭ (14-16 μs) дан $1.6 \div 1.65$ марта каттароқдир. $\Delta x = 0$ мкм (яъни НББС билан) да ҚЭ τ (30 \div 32 μs) назорат ҚЭ τ дан 2 баробаргача катта. Демак, НББС τ ни $35 \div 40\%$ га қўшича оширади.

Демак, никел кластерлари асосан ҚЭ сиртига яқин соҳаларда жойлашади ва рекомбинация марказларини геттерлашда анча самарали ҳисобланади. Шу сабабли, ҚЭ нинг самарадорлигини ошириш асосан сиртга яқин никел билан бойитилган соҳанинг таъсири билан боғлиқлигини таъкидлаш мумкин.

4. Никел атомларининг $p-n$ тузилма Бор киришма атомларининг диффузияси билан ҳосил қилинган кремнийли ҚЭ ларига таъсири ўрганилган (бунда, n -типли КЭФ-0.3 кремний пластиналаридан фойдаланилган). Оптимал шароитларда никел атомлари билан легирланган ҚЭ лари P_{max} нинг ўртача қиймати назорат ҚЭ ларига нисбатан 28.51 % га ошиши аниқланган.

Демак, кремний пластиналарини никел атомлари билан қўшимча легирлаш, уларнинг ўтказувчанлик типидан ва $p-n$ тузилмани ҳосил қилувчи киришманинг туридан қатъий назар, кремнийли ҚЭ лари самарадорлигини ошириш учун жуда қулай ва технологик содда ечим эканлиги кўрсатилди.

Шунга асосан, никел билан легирлаш кремнийдаги рекомбинация марказларини геттерлашнинг самарали усули эканлигини таъкидлаш мумкин.

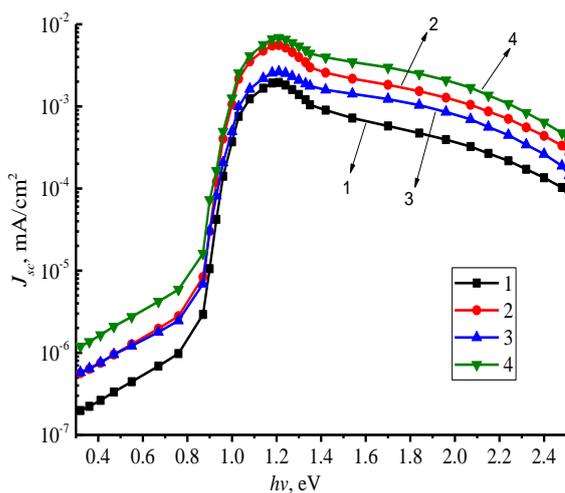
Ушбу усул, бошқа мавжуд геттерлаш усулларида фарқли ўлароқ, қуйидаги афзалликларга эга: никел кластерлари орқали рекомбинацион киришмаларни геттерлаш усули – самарали, технологик содда ва арзон усулдир; никел билан легирлаш кремнийли ҚЭ лари самарадорлигини $25 \div 30\%$ га ошириш имконини беради; никел билан легирлаш кремнийнинг электрик

параметрларини деярли ўзгартирмайди, бу эса уни кремний асосидаги электрон қурилмаларда АБЗТ лар яшаш қактини ошириш учун фойдаланиш имконини беради.

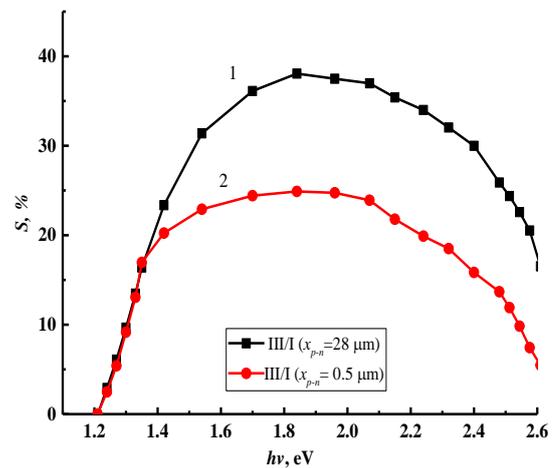
5. ҚЭ лари $J_{sc}(h\nu)$ нинг спектрал боғлиқлиги текширилган ва никел атомлари билан легирлаш J_{sc} ни ошириши аниқланган (12-расм).

Никел билан легирланган кремнийли ҚЭ ларининг қисқа туташиш тоқининг спектрал сезгирлиги (S) қуёш нурланиш спектрининг кўринадиган қисмида ($h\nu > E_g$) 25 ÷ 40% гача ортиши аниқланган (13-расм).

Хулоса қилиш мумкинки, сирт юзасига яқин соҳада ва ҳажмда жойлашган никел кластерлари геттерлаш ва пассивлаш хусусиятларига эга, бу АБЗТ нинг рекомбинациясини камайтиради ва шунга мос равишда ҚЭ йиғиш коэффициентининг ошишига олиб келади.



12-расм. ҚЭ $J_{sc}(h\nu)$ нинг спектрал боғлиқлиги. 1- I гуруҳ ($x_{p-n}=28 \mu\text{m}$), 2- I гуруҳ ($x_{p-n}=0.5 \mu\text{m}$), 3- III гуруҳ ($x_{p-n}=28 \mu\text{m}$), 4- III гуруҳ ($x_{p-n}=0.5 \mu\text{m}$).



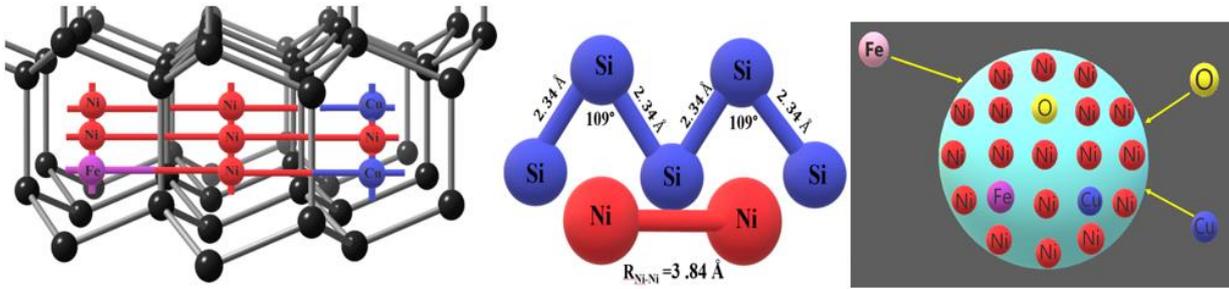
13-расм. III гуруҳ ҚЭ $J_{sc}/J_{sc, max}(h\nu)$ қийматининг I гуруҳга нисбатининг спектрал боғлиқлиги - 1. ҚЭ ($x_{p-n}=28 \mu\text{m}$), 2. ҚЭ ($x_{p-n}=0.5 \mu\text{m}$).

«Никел кластерларининг кремнийли ҚЭ лари самарадорлигига таъсирининг физик асослари ва механизмлари» деб номланган бешинчи бобда никелнинг кремнийли ҚЭ параметрларига таъсирининг физик асослари ва механизмлари очиб берилган, физик моделлар ишлаб чиқилган.

1. Никел атомлари кластери тузилишининг физик модели. Диффузия ва совутиш жараёнида электронейтрал никел атомлари кластер ядроларини ҳосил қилади ва қайта термик ишлов бериш кластерларнинг шаклланиш ва ўсиш жараёнларини фаоллаштиради. Кластерлардаги электронейтрал никел атомлари энг яқин эквивалент тугунлараро ҳолатларда бўлиб, кремний панжараси ичида қисман ёки тўлиқ тўлдирилган кубик никел панжарасини ҳосил қилади. Никел атомлари орасидаги боғланиш асосан металл боғланиш табиатига эга бўлади.

Кластердаги никел панжарасининг даврийлига R_{Ni-Ni} (кремний панжараси ичидаги тугунлараро ҳолатлар), кремний панжарасининг геометрияси асосида ҳисобланган ва $R_{Ni-Ni} = 3.84 \text{ \AA}$ га тенг (14-расм). Бир қатор усуллар билан

олинган маълумотлардан фойдаланган ҳолда, никел кластеридаги Ni-Ni боғланиш энергиясининг ўртача қиймати $\Delta E_k \approx 1.39 \text{ eV}$ га тенг деб баҳоланган.



14-расм. Никел кластерининг структуравий физик модели ва никел атомлари кластерлари геттерлаш жараёнининг физик модели.

Боғланиш энергияси (ΔE_k) қийматидан фойдаланиб, кластерлар ҳосил бўлгандан сўнг, кластерлардаги никел атомларининг концентрацияси кремний панжарасидаги никелнинг қолдиқ концентрациясидан 6÷8 даражага юқори эканлиги аниқланган.

2. Никел атомлари кластерлари геттерлаш жараёнининг физик модели. Электронейтрал никел кластерлари геттерлаш хусусиятига эга ва назорат қилинмайдиган киришма атомларини (яни ТТК) ушлаши туфайли рекомбинация марказлари (РМ) концентрациясини пасайтиради, шунга мувофиқ кремнийдаги АБЗТ ларнинг яшаш вақти ошади.

Никел кластерларининг геттерлаш хусусияти, улардаги таъсир этувчи, металл боғланиш кучлари ҳисобига бўлади. Агар назорат қилинмайдиган киришма атомлари интерметалик бирикмалар ҳосил қилса, кластерларнинг геттерлаш хусусиятларини янада ошади. Кластерларда барча ТТК лар металл боғланишга эга бўлади. Бинобарин, кластерлардаги ТТК атомларининг боғланиш энергияси ҳам $\Delta E_r \approx 1.39 \text{ eV}$ ни ташкил қилади.

Кластерларнинг кислородни геттерлаши Кулон ўзаро таъсирининг мавжудлиги туфайли содир бўлади ва никел кластерларида кислороднинг боғланиш энергияси $-\Delta E_{Ni-O} \approx 1.25 \text{ eV}$ га тенг деб баҳоланган.

3. «Диффузия-кинетик» ва «диффузия-геттер-кинетик» моделлар ёрдамида кластерланиш ва геттерлаш жараёнлари тушунтирилган:

1. Диффузия жараёнида, кремний ҳажмида, никел атомлари иштирокида комплекс ҳосил бўлиш жараёни содир бўлади. Бунда қуйидаги комплекслар ҳосил бўлади: тугунлараро никел - тугунлараро кремний (Ni-Si), никел-кислород (Ni-O), никел-ТТК (Ni-Cu, Ni-Fe ва б.), никел-никел. Шунингдек, юзага пуркалган никел қатлами ҳам ТТК ларни геттерлаш хусусиятига эга.

2. Совутиш жараёнида, атомлар комплекслари бир-бири билан ўзаро таъсирлашиб, кристалл панжаранинг нуқсонли ҳудудлари яқинида (биринчи навбатда бўлиниш чегаралари яқинида) кластерларни ҳосил қилади. Ҳарорат градиенти, сиртнинг эркин энергиясининг ўзгариши ва тескари диффузия оқими туфайли, кремнийнинг олд ва орқа томони сирт юзасида, геттерлаш хусусиятига эга бўлган никел атомлари билан бойитилган соҳа ҳосил бўлади.

3. Қўшимча термик ишлов бериш (ҚТИБ) – панжарадаги нуқсонларни (шу жумладан тугунлараро никел атомларини) тўплаш ва назорат қилинмайдиган киришмаларини геттерлаш жараёнини фаоллаштиради, ҳамда никел кластерларининг ўлчами бутун ҳажм бўйлаб ортади. Шундай қилиб, рекомбинация марказлари ҚЭ нинг бутун ҳажмида камаяди.

Никел диффузияси ва ҚТИБ дан кейин кластерларнинг таркибидаги никел атомлари (40÷60%), кислород (15÷25%) ва тез тарқаладиган киришмаларнинг (30÷50%) концентрацияси ортиши экспериментда аниқланган. Бу эса, таклиф қилинган физик модел тўғрилигини тасдиқлайди.

4. Тез тарқаладиган киришмаларнинг (ТТК) дастлабки концентрацияси ($C_{r0} \approx 10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$) ва ҚТИБ ҳароратига ($T_{\text{анн}} = 600 \div 900 \text{ }^\circ\text{C}$) боғлиқ ҳолда никел кластерларининг геттерлаш самарадорлигининг (G) қиймати баҳоланган:

$$G = \frac{\Delta C_r}{C_{r0}} = \frac{C_{r0} - C_r}{C_{r0}} = 0.5 \div 0.8 \quad (1)$$

бу эрда C_{r0} - кремний панжарасидаги ТТК (Cu, Fe ва б.) нинг бошланғич концентрацияси, C_r - кремний панжарасидаги (кластерлардан ташқарида) ТТК нинг қолдиқ концентрацияси.

Юқоридагилар асосида ҚЭ да АБЗТ яшаш вақтининг ошиши ҳисобланган:

$$\frac{\tau_{Ni}}{\tau_0} = \frac{C_r}{C_{r0}} = \frac{1}{1} - G \approx 2 \div 5 \quad (2)$$

Демак, кластерларнинг шаклланиши, ТТК концентрациясини дастлабкига нисбатан 50÷80 % гача камайтиради, бу эса ҚЭ лари АБЗТ яшаш вақтининг икки-беш баравар оширади.

Никел билан легирлаганда ҚЭ ларида τ нинг 2 мартагача ошганлиги экспериментда аниқланган. Бу назарий ҳисоблашлар ва физик моделларнинг тўғрилигини тасдиқлайди.

5. Тадқиқот натижаларидан фойдаланиб, диффузия ва ҚТИБ жараёнларининг ҚЭ ҳажмидаги ва сирт юзасига яқин соҳадаги никел атомлари ҳолатига, шунга мос ҚЭ и ФИК га таъсир механизмларининг физик модели яратилган.

Никел кластерлари тизимнинг минимал эркин энергияга эга бўлган ҳолатга интилиши, яъни, тизимнинг мувозанат ҳолатини босқичма-босқич тиклаши туфайли шаклланади. Бу жараёнда, шунингдек, назоратсиз рекомбинация киришмалари иштирок этади, яъни геттерлаш содир бўлади.

Назоратсиз рекомбинацион аралашмаларнинг максимал геттерланиши ҚТИБ нинг оптимал ҳароратида кузатилади.

Сирт юзасига яқин соҳада никел атомларининг концентрацияси юқори (2-3 даражагача), шунинг учун бу ҳудудларнинг геттерлаш хусусияти юқорироқ.

Бундан ташқари, сирт соҳасидаги никел атомлари фосфор атомлари билан реакцияга киришиб, «ўлик» соҳанинг қалинлигини камайтиради.

Бу механизмларнинг барчаси ҚЭ и ФИК ни оширишга хизмат қилади.

6. Никел билан легирланган кремнийли ҚЭ лари самарадорлигининг ортиши қуйидаги формула ёрдамида ҳисобланган:

$$\frac{\eta_{Ni}}{\eta_0} = \frac{\rho_s}{\rho_{s(Ni)}} \cdot \sqrt{\frac{\tau_{Ni}}{\tau_0}} \cdot \log_{\tau_0}(\tau_{Ni}) = 1.41 \div 2.2 \quad (3)$$

Бунда фақат РМ (яъни, ТТК) концентрациясининг ўзгариши ҳисобга олинган ва бошқа омилларнинг (оптик, контакт ва б.) таъсири эътиборга олинмаган. Шунинг учун, самарадорликнинг бу ошиши, фақат ҚЭ йиғиш коэффиценти (Q) ортиши билан боғлиқ бўлади.

Демак, никел кластерлари билан геттерлаш ҚЭ и Q ни 1.5÷2 мартагача ва самарадорлигини 1.2÷1.5 мартагача ошириш мумкин эканлиги аниқланди.

Оптимал технологик шароитларда никел билан легирлаш ҚЭ самарадорлигини 26÷29 % га ошириши экспериментда аниқланган. Бу назарий ҳисоблашлар ва физик моделларнинг тўғрилигини тасдиқлайди.

Хулоса ўрнида, Диссертация ишимни бажаришда кўрсатган ҳар таърафлама ёрдами учун устозимиз академик М.К.Баҳадирхановга, илмий раҳбарим профессор Қ.А.Исмаиловга ва ТДТУ «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедрасининг барча жамоасига раҳмат айтаман.

ХУЛОСА

1. Кремнийли ҚЭ самарадорлигини 25÷30% га оширишга имкон берадиган, никел билан легирлашнинг оптимал диффузия режимлари – $T_{diff}=800\div850$ °С, қўшимча термик ишлов бериш шартлари – $T_{ann}=750\div800$ °С ва кремнийли ҚЭ нинг тузилиши экспериментал аниқланди.

2. Никел билан бойитилган сирт юзасига яқин соҳа (қалинлиги 2÷3 μm), юқори геттерлаш хоссасига эга бўлиб, ҚЭ лари базасидаги асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини 2 мартагача ошириш имконини бериши ва ҚЭ самарадорлигини оширишда муҳим рол ўйнаши аниқланди;

3. Илк бор никел билан легирлаш ҚЭ лари самарадорлигини ошириши дастлабки кремнийнинг ўтказувчанлик типига (p – ёки n – тип) ва p – n ўтишни яратиш учун киритилган киришмалар турига (V ёки P) боғлиқ эмаслиги аниқланди.

4. Қуёш нурланиш спектрининг кўринадиган соҳасида ($\lambda \sim 0.5\div1$ μm) никел билан легирланган кремнийли ҚЭ лари қисқа туташув токининг спектрал сезгирлигини 25 ÷ 40% гача ошиши аниқланди.

5. Никел киришма атомлари кластери тузилишининг физик модели ишлаб чиқилди ва шу асосида кластердаги атомлари орасидаги масофа – $R_{Ni-Ni} \approx 3.84$ Å ва никел кластерининг тез терқаладиган киришмалар билан боғланиш энергияси – $\Delta E_k \approx 1.39$ eV ҳисобланди.

6. Кластерларнинг кремнийли ҚЭ параметрларига таъсирини тушунтириш учун никел кластерлари томонидан «зарарли» киришма атомларининг геттерлаш жараёнининг физик модели ишлаб чиқилди ва шу асосида геттерлаш коэффиценти $G \approx 0.5\div0.8$ ва заряд ташувчиларни йиғиш коэффицентининг максимал ошиши – 50÷100% ҳисобланди.

7. Никел билан легирланган самарадорлиги юқори бўлган кремнийли ҚЭ ларини ишлаб чиқаришнинг технологик маршрут харитаси ишлаб чиқилди. Маршрут харитадан фойдаланган ҳолда тажриба ҚЭ лари тайёрланди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/Т.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРО-
НИКИ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

**КАРАКАЛПАКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

КЕНЖАЕВ ЗОИР ТОХИР УГЛИ

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ НИКЕЛЯ НА
ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2022

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящая время развитию полупроводниковой солнечной энергетики придается большое значение во всем мире. По плану правительств США, Германии, Китая необходимо сократить себестоимость солнечной электрогенерации еще на 50% к концу 2030 года. На мировом уровне разрабатываются высокоэффективные многокаскадные СЭ на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$. Однако, эти СЭ, хотя и имеют большой КПД, но технология их изготовления достаточно сложная и требует наличия дорогостоящего сырья и оборудования. Поэтому важное значение имеет разработка новых СЭ, оптимизированных по критерию дешевизны технологии при сохранении высокого КПД.

В мире на сегодняшний день кремний является одним из основных материалов современной электроники и фотоэнергетики. Для повышения эффективности кремниевых СЭ требуется увеличить коэффициент собирания и время жизни фотогенерируемых носителей заряда, а также уменьшить оптические и электрические потери энергии. Основная масса работ в области кремниевых СЭ проводится в области исследований технологий контактных, пассивирующих и антиотражающих слоев, формирования эмиттера, так и легирования материала базы нетрадиционными электрически нейтральными примесями с целью увеличения времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ). Особое внимание уделено увеличению времени жизни ННЗ путем геттерирования неконтролируемых примесных атомов с кластерами никеля.

В последние годы в Узбекистане все больше внимание уделяется практическому использованию солнечной энергии. В рамках Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан (в 2017-2021 г.г.) планируется увеличить долю возобновляемых источников энергии в общей генерации электроэнергии и довести ее до 25% к 2030 году². По формированию кластеров примесных атомов никеля и исследования их электрофизических свойств, в последнее время защищён ряд диссертационных работ научных школ С.З. Зайнабиддинова и М.К. Бахадирханова. Установлено физический механизм формирования кластеров и разработаны технологические методы получения материалов с кластерами. Таким образом, исследование влияния кластеров примесных атомов никеля на параметры кремниевых СЭ и создание высокоэффективных СЭ с кластерами имеет большое научное и практическое значение.

Данное диссертационное исследование соответствует задачам, обозначенным в законе Республики Узбекистан № ЗРУ-539 «Об использовании возобновляемых источников энергии» от 21 мая 2019 г., предусмотренных в Указе Президента РУз № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию РУз на 2017–2021 гг.» от 7 февраля 2017 года, №

² Постановление Президента Республики Узбекистан от 22 августа 2019 года № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии».

УП-4512 «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии» от 1 марта 2013 г., и в постановлениях Президента РУз № ПП-4779 «О дополнительных мерах по сокращению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции путем повышения энергоэффективности экономики и задействования имеющихся ресурсов» от 10 июля 2020 года, № ПП-5063 «О мерах по развитию возобновляемой и водородной энергетики в республике Узбекистан» от 9 апреля 2021 года.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данная диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: ППИ-3 - «Энергетика, энергоресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения» и имеет значимость для развития фотоэнергетики.

Степень изученности проблемы. В последние годы в мире работами по повышению КПД кремниевых СЭ занимаются множество авторов и коллективов. Германские ученые А. Richter и его сотрудники (Fraunhofer ISE/Soitec) активно работают над повышением эффективности кремниевых СЭ и получили КПД до 26%. В 2017 г. К. Yoshikawa, М. Yoshita, М.А. Green, и другие получили высокоэффективные кремниевые СЭ с КПД до 26.7%. Также, улучшением рекомбинационных свойств, увеличением времени жизни ННЗ и изучением влияния дефектов на КПД СЭ занимались Е. L. Augusto, Т. Buonassisi, D. Macdonald, S. Rein, А.А. Istratov, M.D. Pickett, E.R. Weber, J. Schmidt, В. Aissa, М. Minbashi. В направлении уменьшения поверхностной рекомбинации и пассивации поверхности СЭ эффективно работают N. Jenny, M.L. Polignano, А. Augusto, W.D. Eades, М. De Laurentis и др.

В работах Н. Kitagawa, Sh. Tanaka, Н. Nakashima, М. Yoshida, А. А. Istratov, Р. Zhang, R. J. McDonald, А. R. Smith, E. R. Weber, М. Seibt, F. Spit, J. Lindroos, D. J. Backlund и др. исследовались механизмы диффузии никеля, их состояние в кристаллической решетке и влияние на электрические параметры кремния. Также, в статьях авторов S. Yatsukhnenko, R. M. Swanson., К. R. Catchpole, Н. Kitagawa, S. Tanaka, Т. Y. Tan и др. исследовались технологии получения кластеров примесных атомов, в том числе никеля и физические механизмы образования кластеров. В своих работах E.R. Weber, М. Heuer, Т. Buonassisi, А.А. Istratov, M.D. Pickett, А. Luque, M.V. Trushin и др. исследовали процесс геттерирования, в том числе геттерирование никелем в кремнии.

В республиках СНГ над увеличением КПД кремниевых СЭ работают И.Е. Панайотти, Е.И. Теруков, В.А. Миличко, А.В. Саченко, Б.И. Фукс и др. Также, в статьях авторов М.Г. Мильвидский, В.В. Чалдышев, П.Н. Брунков, И.В. Бажин, О. В. Александров, А. А. Криворучко, Ю.Я Гафнер и др. исследовались технологии получения кластеров примесных атомов, в том числе никеля и физические механизмы образования кластеров. В своих работах E. R. Weber, М. Heuer, Т. Buonassisi, А. А. Istratov, М. D. Pickett, А. Luque, M.V. Trushin, в СНГ В. А. Харченко, З.Ю Готра, И.Б. Чистохин, К.Б. Фрицлер, Р. Papakonstantinou, Томпсон, А.С. Асташенков, Д.И. Бринкевич, Е.П. Неустроев,

С.А. Смагулова, В.И. Орлов, О. В. Александров и др. исследовали процесс геттерирования, в том числе геттерирование никелем в кремнии.

В Узбекистане академиками М. К. Бахадирхановым, С. Зайнобидиновым, Р. А. Муминовым, А.Т. Мамадалимовым с сотрудниками обоснована возможность расширения спектра поглощения кремниевых приборов за счет введения в кремний кластеров примесных атомов. В научной школе академика М.К. Бахадирханова, было изучено формирование кластеров различных элементов в решетке кремния и показаны их функциональные возможности.

Появилась необходимость исследовать влияние кластерообразования на КПД кремниевых СЭ. Таким образом, исследование влияния кластеров примесных атомов на параметры кремниевых СЭ представляет большой практический интерес. При этом кластеры атомов никеля в силу особенностей структуры имеют большие перспективы.

Пока не установлены условия оптимальных диффузионных и других технологических процессов, также оптимальная конструкция высокоэффективных кремниевых СЭ с кластерами никеля. Отсутствуют адекватные модели и неясны физические основы и механизмы влияния кластеров атомов никеля на параметры кремниевых СЭ.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнялась на кафедре ТГТУ «Цифровая электроника и микроэлектроника» и на кафедре КГУ «Физика полупроводников» согласно программе государственного гранта: ОТ-Ф2-50 «Разработка научных основ формирования элементарных ячеек $A^{IV}B^{VI}$ и $A^{III}B^{V}$ в решетке кремния – новый подход в получении перспективных материалов для фотоэнергетики и фотоники», в 2017-2020 г.

Целью исследования является изучение особенностей влияния легирования никелем на параметры кремниевых СЭ и разработка физической модели влияния примесных атомов никеля на эффективность кремниевых СЭ.

Задачи исследования:

определить оптимальные диффузионные и другие технологические условия легирования кремния примесными атомами никеля для получения эффективных кремниевых СЭ;

показать влияние примесных атомов никеля, находящихся в приповерхностном обогащенном слое, на эффективность кремниевых СЭ;

изучать влияние примесных атомов никеля на время жизни неосновных носителей заряда в базе кремниевых СЭ;

исследовать влияние примесных атомов никеля на эффективность промышленно изготовленных кремниевых СЭ;

оценить влияние примесных атомов никеля на СЭ с $p-n$ переходами, образованными разными видами донорных и акцепторных примесей;

разработать физическую модель влияния никеля на параметры кремниевых СЭ.

Объектом исследования являются кремниевый СЭ, легированный атомами никеля в различных условиях - $T_{diff}=700\div 1300$ °С и $T_{ann}=600\div 1100$ °С.

Предметом исследования являются электрические, фотоэлектрические и оптические свойства кремниевых СЭ, легированных атомами никеля.

Методы исследований. При выполнении поставленных задач были использованы современные методы микронзондового анализа, масс-спектрометрия вторичных ионов, сканирующий электронный микроскоп, ИК-микроскоп, ИК-спектрометр, спектрофотометр, рентгенофазный анализ.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

экспериментально определены оптимальные режимы диффузии при легировании никелем – $T_{diff}=800\div850$ °С, условия дополнительного термического отжига – $T_{ann}=750\div800$ °С и структура кремниевого СЭ, позволяющая повысить эффективность кремниевых СЭ на 25÷30 %;

установлено, что в повышении эффективности кремниевого СЭ существенную роль играет именно обогащенная никелем лицевая приповерхностная область СЭ (толщиной 2÷3 μm), имеющая сильные геттерирующие свойства, что позволяет увеличить время жизни неосновных носителей заряда в базе СЭ до 2 раз;

впервые установлено, что увеличение эффективности СЭ при легировании никелем не зависит от типа проводимости (p – или n – тип) исходного кремния и от вида примесей (В или Р), вводимых для создания p – n перехода;

определено увеличение спектральной чувствительности тока короткого замыкания кремниевого СЭ, легированного никелем, до 25÷40 % в видимой области спектра ($\lambda \sim 0.5\div1$ μm) солнечного излучения;

разработана физическая модель структуры кластера примесных атомов никеля и на ее основе оценено расстояние между атомами никеля в кластере – $R_{Ni-Ni} = 3.84$ Å и энергия связи кластера никеля с быстродиффундирующими примесями – $\Delta E_k \approx 1.39$ eV.

разработана физическая модель процесса геттерирования кластерами никеля вредных примесей, объясняющая влияние кластеров на параметры кремниевых СЭ, оценен коэффициент геттерирования $G \approx 0.5\div0.8$ и вычислено максимальное увеличение коэффициента сбора носителей – 50÷100%.

Практические результаты исследования:

установлено, что диффузия никеля в лицевую поверхность СЭ более эффективна, чем в тыльную сторону;

установлено, что легирование никелем до формирования p – n -перехода СЭ является более эффективным и технологичным. Определены: оптимальная температура диффузии никеля $T_{diff} = 800\div850$ °С и оптимальные условия дополнительного термоотжига $T_{ann} = 750\div800$ °С, позволяющие повысить максимальную мощность СЭ на 25÷30%;

разработана маршрутная карта для изготовления монокристаллических кремниевых СЭ, легированных никелем. С использованием маршрутной карты произведены опытные СЭ. Метод предварительного легирования кремния никелем из химически осажденного слоя рекомендован к внедрению в промышленную технологию производства СЭ.

Достоверность полученных результатов исследований обосновывается применением современных измерительных средств и методов исследования, соответствием экспериментальных и расчетных данных с результатами других авторов, а также трактовкой полученных результатов на основе современных физических моделей. Полученные результаты обсуждались на международных и республиканских научных конференциях.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в выявлении физических основ, механизмов влияния никеля, включая обогащенный слой, на параметры кремниевых СЭ, а также разработке физических моделей структуры кластера атомов никеля и процесса геттерирования кластерами атомов никеля.

Практическая значимость результатов исследования заключается в применении оптимальной диффузионной технологии формирования кластеров атомов никеля для разработки недорогих и высокоэффективных кремниевых СЭ, легированного атомами никеля.

Внедрение результатов исследования.

На основе полученных научных результатов изучения особенностей влияния легирования никелем на параметры кремниевых СЭ внедрены:

новый способ диффузионного легирования кремния примесными атомами никеля из химически осажденного слоя, был внедрен и использован в АО «FOTON» (справка за № 04-3/1729 от 20.09.2021 года дана акционерной компанией «Ўзэлтехсаноат») для изготовления опытных образцов с кластерами никеля размером $20 \div 100$ nm, полученные результаты на уровне мировых аналогов. Данную работу целесообразно применить для изготовления ФЭП и ФЭМ (фотоэлектрических панелей и модулей) с КПД $18 \div 20$ %;

метод геттерирования и оптимизированная технология легирования никелем, был использован в Centre of foundation studies for agricultural science (справка от 06.10.2021 года дана Universiti Putra Malaysia) для изготовления солнечных элементов с увеличенным временем жизни неосновных носителей заряда до 2 раз и уменьшенным поверхностным сопротивлением эмиттера на $10 \div 15$ % и повышенной эффективностью (на $\sim 20 \div 22$ %).

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 13 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 32 научные работа, в том числе 9 статей в научных изданиях, рекомендованных для публикации научных результатов докторских диссертаций при Высшей Аттестационной Комиссии Республики Узбекистан, 6 из них в республиканских и 3 зарубежных журналах, индексируемых в базе Scopus.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 120 страницах, включая 37 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики, раскрыта степень изученности проблемы, поставлены цели и задачи, приведены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна и практическая значимость исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием «Современное состояние, проблемы и перспективы кремниевых солнечных элементов» проанализировано современное состояние и последние научные достижения в разработке эффективных кремниевых СЭ, факторы, ограничивающие эффективность СЭ и способы повышения эффективности кремниевых СЭ. На основании анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием «Поведение атомов никеля в решетке кремния» исследовались особенности диффузионной технологии получения кремния с кластерами атомов никеля.

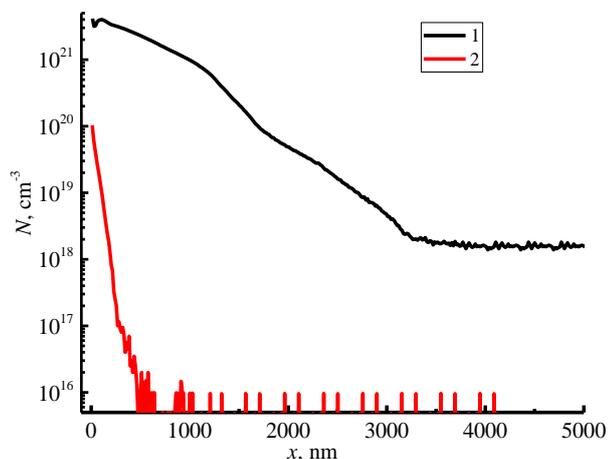


Рис. 1. Распределение атомов никеля в лицевом (1) и тыльном (2) слое кремния после диффузии из металлической пленки никеля, напыленного на одну поверхность пластины.

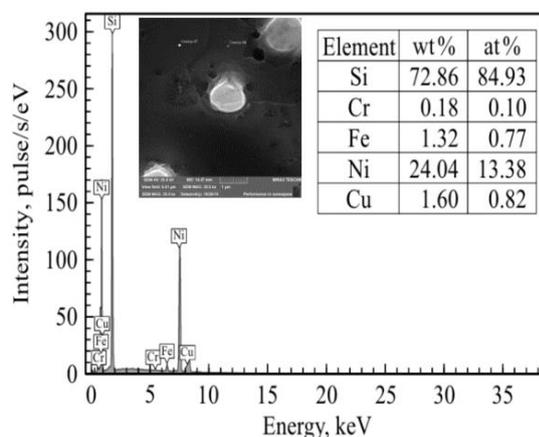


Рис. 2. Изображение и состав кластеров никеля (полученный с помощью элементного анализа на СЭМ).

1. Установлено, что примесные атомы никеля (ПАН) имеют не только достаточно высокую объемную растворимость ($n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$), но и очень высокую растворимость в приповерхностной области ($d = 2 \div 3 \text{ мкм}$), где его концентрация может достигать $n_s \sim 10^{20} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1.).

2. Установлено, в условиях диффузии и отжига образуются кластеры примесных атомов никеля (КПАН). На основе результатов ИК-микроскоп, СЭМ и SIMS поверхностная плотность кластеров никеля составляет $\sim 10^6 \div 10^7 \text{ см}^{-2}$, средний диаметр кластера около $20 \div 100 \text{ нм}$, число атомов в кластере около $10^5 \div 10^7$ и концентрация кластеров $\sim 10^{11} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

3. Определен состав кластеров никеля после диффузии и дополнительного отжига. Показано, что после дополнительного термического отжига (ДТО), в составе кластера увеличивается концентрация никеля (~40÷60 %), кислорода (~15÷25 %) и других неконтролируемых примесей (~30÷50 %).

4. Установлено (см. рис. 2.), что кластеры никеля в кремнии геттерируют быстро диффундирующие примеси (БДП), которые действуют как рекомбинационные центры (РЦ).

В третьей главе диссертации под названием «Влияние легирования атомами никеля на эффективность кремниевых солнечных элементов» приведены результаты исследования влияния легирования атомов никеля в кремнии, в том числе, обогащенного никелем слоя (ОНС), на параметры СЭ и определены оптимальные технологические условия легирования, пригодные для использования в промышленном производстве кремниевых СЭ.

1. Исследовано влияние никеля на параметры СЭ с глубоким $p-n$ переходом, также влияние дополнительного отжига. Для изготовления опытных СЭ использовался кремний КДБ-0.5. Исследуемые кремниевые СЭ изготавливались на АО «FOTON» по заводской технологии - диффузия фосфора проводилась при $T_{diff} = 1280$ °С в течение $t = 5$ часов. Затем получены 4 группы СЭ (рис. 3): I группа – контроль. II группа – в вакууме напылялся слой (1 μm) никеля на тыльной (p -стороне) структур. III группа – пленка никеля наносилась на поверхности диффузионного n -слоя. IV группа – никель наносился на обеих поверхностях СЭ.

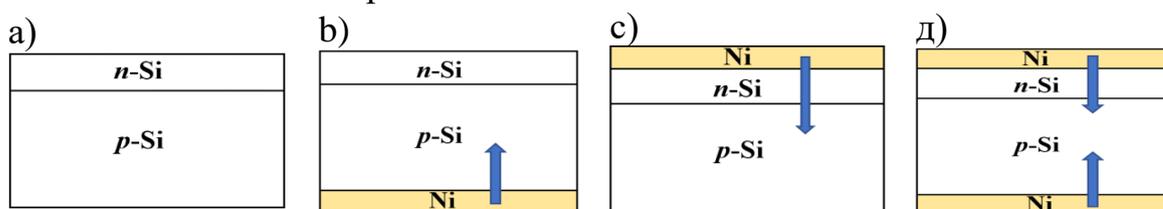


Рис. 3. Разновидности структур: а) тип I, б) тип II, в) тип III, д) тип IV.

Таблица 1

Средние значения параметров для образцов различных групп после диффузии никеля, а также изменение параметров II, III и IV групп относительно параметров I группы.

Параметр	I – группа	II – группа	III – группа	IV-группа
J_{sc} , (mA/cm ²)	2.7	3.86	5.1	5.5
V_{oc} , (mV)	380	450	455	460
P_{peak} , (mW/cm ²)	1.026	1.737	2.320	2.530
$\Delta P_{peak} / P_{peak}$	-	69.3 %	126	146.6%

2. Установлено, что наиболее существенно изменяются параметры III группы образцов при ДТО в интервале температур $T_{ann} = 750 \div 800$ °С (рис. 4). Параметры образцов II, III, IV группы значительно увеличиваются при ДТО в диапазоне температур $T_{ann} = 750 \div 800$ °С (таблица 2).

Таблица 2

Средние значения параметров СЭ после ДТО при $T_{ann} = 750 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$

Параметр	II – группа	III – группа	IV – группа
J_{sc} , mA/cm ²	6.92	9.8	10.5
V_{oc} , mV	510	118	520
P_{peak} , mW/cm ²	3.529	5.076	5.418

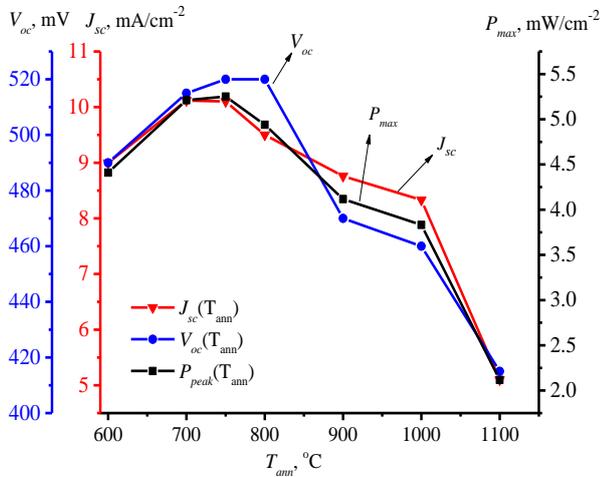


Рис. 4. Изменение параметров СЭ в зависимости от температуры ДТО.

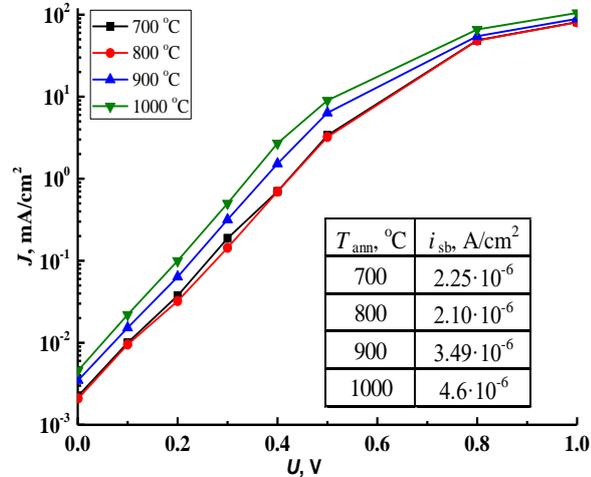


Рис. 5. Темновая ВАХ III группы после отжига при разных температурах.

Это показывает, что образование кластеров никеля за счет ДТО при $T_{ann} = 750 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$ существенно увеличивает параметры СЭ с глубоким $p-n$ переходом.

В III группе образцов значение параметров V_{oc} , J_{sc} , P_{peak} значительно больше, чем в образцах II группы - после диффузии P_{peak} растет на 33.6 %, после ДТО до 43.84 %. Это подтверждает существенную роль обогащенной никелем приповерхностной области СЭ.

Установлено, что с уменьшением температуры отжига $T_{ann} < 900 \text{ }^\circ\text{C}$ сильно уменьшается поверхностное сопротивление, поэтому существенно увеличиваются основные параметры СЭ.

Анализируя рис. 5 можно сказать, что в температурах отжига 700 $^\circ\text{C}$ и 800 $^\circ\text{C}$ значение ток насыщения I_s значительно меньше (т.е. время жизни ННЗ больше), это означает что, в интервале температуры $T_{ann} = 700 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$ кластеры никеля существенно влияют на параметры СЭ. При температуре отжига не менее $T_{ann} \geq 900 \text{ }^\circ\text{C}$, происходит увеличение I_s $p-n$ перехода. Это говорит о процессах реактивации БДП при этих температурах термического отжига.

Результаты эксперимента показали, что коэффициент заполнения ВАХ СЭ III группы вырос относительно I группы примерно на 30% (с 0.45 до 0.59). Такой рост объясняется уменьшением сопротивления поверхностных слоев эмиттера СЭ за счет влияния никеля. Прямое измерение поверхностного сопротивления эмиттера СЭ, легированного никелем ($\rho_s = 1.44 \text{ Ом}/\square$), показывает его уменьшение на 25 % по сравнению с контролем ($\rho_s = 1.8 \text{ Ом}/\square$), что соответствует СЭ ζ .

3. Оптимальная температура диффузии никеля в СЭ. Диффузия фосфора проводилась при $T_{diff} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $t = 30 \text{ min}$ ($x_{p-n} = 0.5 \div 0.7 \text{ }\mu\text{m}$). На лицевую сторону СЭ в вакууме напылялся слой никеля. Затем проводилась диффузия атомов никеля при температурах $T_{diff} = 700 \div 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ с шагом $50 \text{ }^\circ\text{C}$ и ДТО в интервале $T_{ann.} = 750 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $t = 30 \div 40 \text{ min}$. После создания никелевого контакта измеряли ВАХ СЭ (рис. 6).

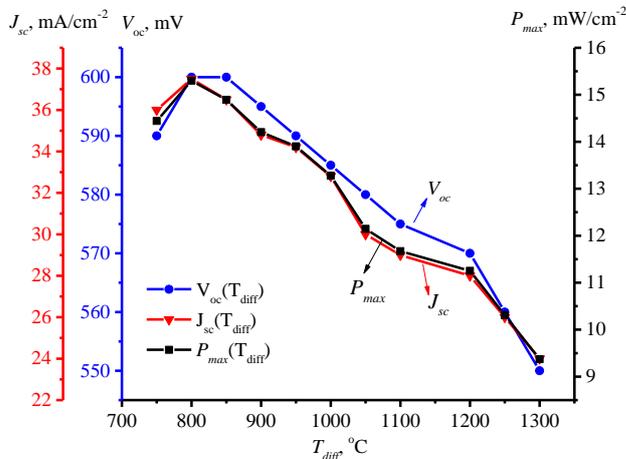


Рис. 6. Зависимости параметров СЭ от температуры диффузии атомов никеля.

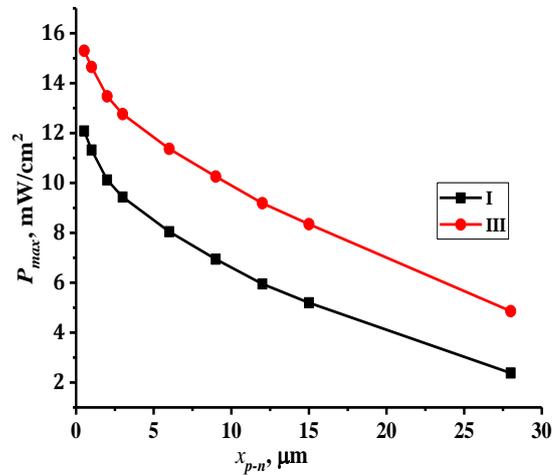


Рис. 7. Изменение величины P_{max} СЭ I и III группы в зависимости от x_{p-n} .

Как видно из рис. 6, с понижением температуры диффузии никеля происходит практически монотонное улучшение параметров J_{sc} и V_{oc} . При сравнении с контролем (максимальная мощность контрольного СЭ – $P_{max} = \zeta \cdot J_{sc} \cdot V_{oc} = 12.08 \text{ mW}/\text{cm}^2$), параметры СЭ, легированных атомами никеля, начинают улучшаться при температуре диффузии никеля $T_{diff} \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, и при температуре $T_{diff} = 800 \div 850 \text{ }^\circ\text{C}$ достигают максимума.

4. Проверено влияние атомов никеля на параметры кремниевого СЭ с различными глубинами $p-n$ перехода (x_{p-n}) – от 28 до $0.5 \div 0.75 \text{ }\mu\text{m}$ (рис. 7).

Установлено, что легирование атомами никеля дает существенный положительный эффект, который слабо зависит от глубины $p-n$ перехода.

С уменьшением глубины залегания $p-n$ перехода эффект легирования атомов никеля несколько ослабляется, но остается достаточно заметным. Например, в СЭ с $x_{p-n} = 0.5 \div 0.75 \text{ }\mu\text{m}$, легированном никелем, значение J_{sc} увеличивается на 17.2 %, ζ – на 6.25 %, а P_{max} – на 26.62 % относительно контрольных СЭ.

5. Также установлено, что положительный эффект влияния атомов никеля слабо зависит от метода введения никеля (до (Шб группа) и после (Ша группа) создания $p-n$ перехода). Легирование никелем до формирования $p-n$ перехода практически не усложняет технологию изготовления СЭ, но повышает КПД (рис. 8). Легирование атомами никеля до формирования $p-n$ перехода является более эффективной и простой технологией.

Таким образом, оптимальная температура диффузии никеля $T_{diff} = 800 \div 850 \text{ }^\circ\text{C}$ и ДТО $T_{ann.} = 750 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$, что позволяет увеличить P_{max} на 25 \div 30%.

6. На основе полученных экспериментальных результатов разработана маршрутная карта технологического процесса изготовления кремниевого СЭ, легированного никелем и изготовлены лабораторные СЭ. Предложенная технология хорошо совместима с стандартным технологическим процессом и позволяет создавать более эффективные СЭ с малым затратами.

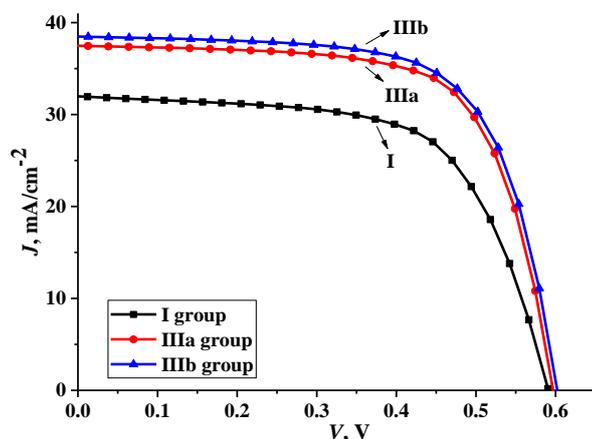


Рис. 8. ВАХ СЭ после ДТО при $T = 750 \div 800$ °С.

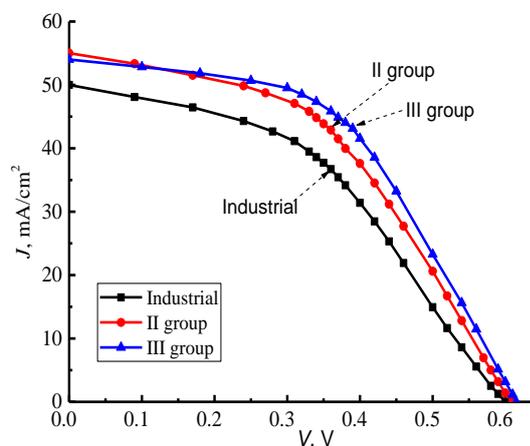


Рис. 9. ВАХ контрольного промышленного СЭ и СЭ II и III группы

В четвертой главе диссертации под названием «Геттерирующие свойства приповерхностного обогащенного никелем слоя СЭ» приведены результаты исследования влияния приповерхностного ОНС в кремниевых СЭ.

1. Исследовано влияние никеля на промышленные монокристаллические СЭ на основе кремния (производства фирмы «Suniva», с базой p -типа и $x_{p-n} \sim 0,5 \mu\text{m}$). Тильный и лицевой омические контакты промышленно изготовленного СЭ удалялись без разрушения просветляющего покрытия. На тыльную (p -типа) сторону (II группа) и на поверхность диффузионного n -слоя (III группа) СЭ в вакууме напылялся никель. Диффузия атомов никеля проводилась в интервале температур $T_{diff} = 700 \div 1200$ °С, ДТО проводился при $T_{ann} = 750 \div 800$ °С.

Установлено, что легирование никеля повышает эффективность промышленных кремниевых СЭ. При оптимальных условиях (при $T_{diff} = 800 \div 850$ °С) значение максимальной мощности P_{max} возрастает на $26 \div 27$ % (рис. 9) по отношению к параметрам исходного промышленного СЭ.

Таким образом, предложенная технология корректировки электрофизических параметров промышленно изготовленного СЭ позволяет совмещать ее без существенных изменений и с небольшими затратами со стандартным технологическим процессом изготовления СЭ.

2. Исследовано влияние легирования атомами никеля на время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) СЭ. Видно из таблицы 3, что в группе III среднее значение время жизни ННЗ увеличивается в $1.6 \div 1.7$ раза после диффузии никеля. После ДТО происходит дополнительное увеличение τ на $30 \div 35$ %, т. е. τ увеличивается в $1.9 \div 2$ раза относительно контрольного СЭ.

Таблица 3.

Время жизни НЗ всех групп СЭ после диффузии никеля и термоотжига, а также его изменение для II и III групп, относительно параметров I группы.

Группа	$T_{diff} = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ min}$	τ , μs	$\Delta\tau/\tau_I$, раз	$T_{ann} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 1\text{ час.}$	τ , μs	$\Delta\tau/\tau_I$, раз
I	Отжиг	5÷6	-	Отжиг	5÷7	-
II	Диффузия никеля	7÷8	1.35÷1.4	Отжиг	9	1.5÷1.55
III		9	1.60÷1.7	Отжиг	12	1.9÷2

Эти данные позволяет утверждать, что легирование никелем приводит к увеличению времени жизни НЗ СЭ, формирование обогащенного никелем слоя в лицевом слое (эмиттере СЭ) дополнительно улучшает τ СЭ и ДТО приводит к дополнительному росту времени жизни НЗ СЭ.

Рост времени жизни НЗ СЭ связан с формированием кластеров никеля в решетке кремния и наличием у них геттерирующих свойств.

Установлено, что с уменьшением температуры диффузии атомов никеля время жизни НЗ увеличивается, достигая максимального значения ($\tau=30\div32\text{ }\mu\text{s}$) при $T_{diff} = 800\div850\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем начинает уменьшаться (рис. 10).

Эксперимент показал, что атомы никеля всегда увеличивают время жизни НЗ СЭ не зависимо от метода его введения (т.е. легирования никелем до или после создания $p-n$ перехода).

Таким образом, все полученные данные позволяет считать, что легирование никеля увеличивает время жизни НЗ СЭ, увеличивая КПД.

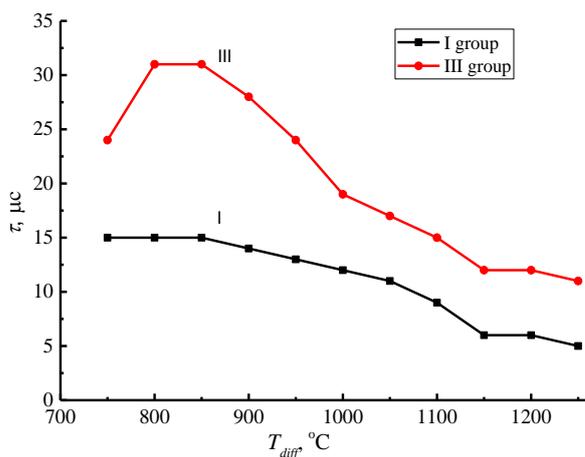


Рис. 10. Изменение времени жизни НЗ в СЭ I и III групп в зависимости от температуры диффузии никеля

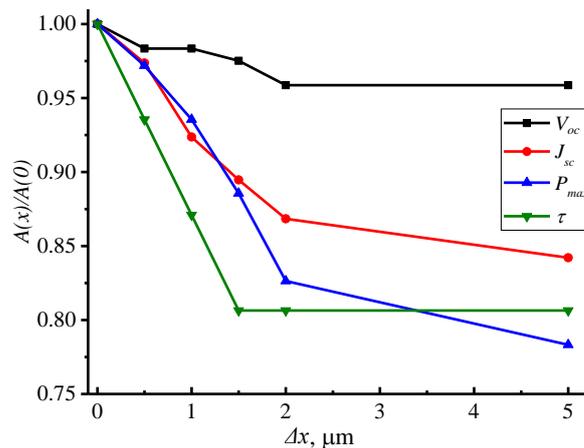


Рис. 11. Относительное изменение J_{sc} , V_{oc} , P_{max} СЭ и τ в зависимости от толщины удаленного лицевого ППОНС относительно СЭ без удаления лицевого ППОНС.

3. Для выявления относительного вклада «поверхностных» и «объемных» кластеров после диффузии с поверхности образцов полировкой удаляли поверхностный слой Δx до глубины 5 μm (толщина ППОНС в этих

образцах $d \approx 2 \div 2.5 \mu\text{m}$). После создания p - n перехода и ДТО, создавались омические контакты. Далее, были измерены ВАХ СЭ и время жизни τ .

Установлено, что удаление приповерхностного обогащенного никелем слоя (ППОНС) ухудшает P_{max} СЭ на $22 \div 25 \%$ и τ на $18 \div 20 \%$ (рис. 11).

Следует отметить, что после удаления $\Delta x = 5 \mu\text{m}$ (т.е. без ППОНС) значение τ СЭ ($24 \div 26 \mu\text{s}$) в 1.6–1.65 раза больше, чем у контрольного СЭ ($14 \div 16 \mu\text{s}$). При $\Delta x = 0 \mu\text{m}$ (т.е. с ППОНС) τ СЭ ($30 \div 32 \mu\text{s}$) в 2 раза больше контрольного СЭ, т.е. наличие ППОНС увеличивает τ на $35 \div 40\%$.

Можно предположить, что кластеры никеля находятся в основном в приповерхностных слоях СЭ и достаточно эффективно геттерируют РЦ. Поэтому можно утверждать, что улучшение КПД СЭ преимущественно связано с влиянием поверхностного слоя.

4. Исследовано влияние атомов никеля на кремниевые СЭ, в которых p - n переход создавался примесями бора (использовались кремниевые пластины n -типа КЭФ-0.3). В СЭ, легированных атомами никеля, в оптимальных условиях, среднее значение P_{max} по отношению к контролю увеличивается на 28.51% .

Таким образом, показано, что легирование никелем кремниевых пластин, не зависимо от их типа проводимости и виды примеси, формирующей p - n переход, является очень доступным и технологичным решением для повышения эффективности кремниевых СЭ.

Можно утверждать, что введение никеля, является эффективным методом геттерирования рекомбинационных центров в кремнии.

Данный метод в отличие от других существующих методов геттерирования имеет следующие преимущества:

- метод геттерирования рекомбинационных примесей кластерами никеля является эффективным, технологичным и дешевым методом;
- введение никеля позволяет повысить КПД кремниевого СЭ на $25 \div 30\%$;
- при легировании атомами никеля практически не происходит изменений электрических параметров материала, что позволяет его использовать для увеличения время жизни ННЗ в электронных приборах на основе кремния.

5. Установлено, что легирование никелем позволяет улучшить спектральную чувствительность ток короткого замыкания СЭ (рис. 12).

В видимой области ($h\nu > E_g$) спектра солнечного излучения обнаружено увеличение до $25 \div 40\%$ спектральной чувствительности (S) кремниевого СЭ, легированных никелем (рис. 13).

Кластеры никеля, находящихся в приповерхностной области и в объеме, обладают сильными геттерирующими и пассивирующими свойствами, что уменьшает рекомбинацию ННЗ и, соответственно, приводит к увеличению коэффициента сбора СЭ.

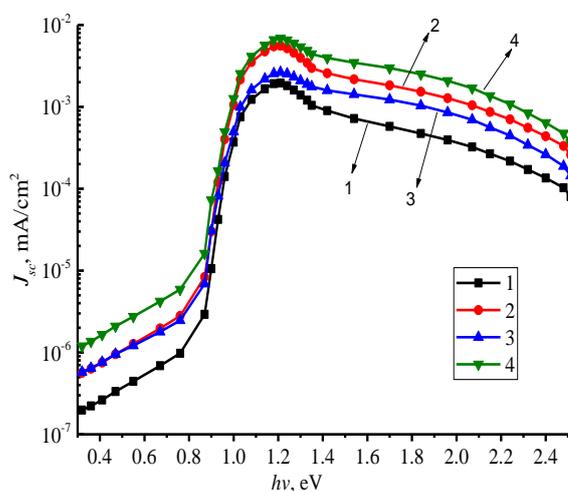


Рис. 12. Спектральная зависимость $J_{sc}(hv)$ СЭ. 1- I группа ($x_{p-n}=28 \mu\text{m}$), 2- I группа ($x_{p-n}=0.5 \mu\text{m}$), 3- III группа ($x_{p-n}=28 \mu\text{m}$), 4- III группа ($x_{p-n}=0.5 \mu\text{m}$).

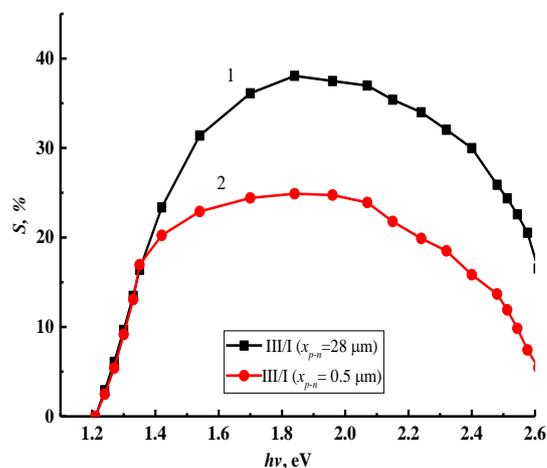


Рис. 13. Спектральная зависимость отношения величин $J_{sc}/J_{sc,max}(hv)$ СЭ III к I группе - 1. СЭ ($x_{p-n}=28 \mu\text{m}$), 2. СЭ ($x_{p-n}=0.5 \mu\text{m}$).

В пятой главе диссертации под названием «Физические основы и механизмы влияния кластеров никеля на эффективность кремниевых СЭ» выявлены физические основы и механизмы, а также разработана физическая модель влияния никеля на параметры кремниевых СЭ.

1. Физическая модель структуры кластера атомов никеля. Во время диффузии и охлаждения электронейтральные атомы никеля образуют зародыши кластеров, а дополнительный термический отжиг активизирует процессы образования и роста размеров кластеров. Электронейтральные атомы никеля в кластерах, находятся в ближайших эквивалентных междоузельных положениях, и образуют, кубическую никелевую подрешетку, частично или полностью заполненную. Связь между атомами никеля имеет преимущественно металлическую природу.

Оценен период подрешетки никеля (которая находится в междоузельных состояниях внутри решетки кремния) в кластерах R_{Ni-Ni} , исходя из геометрии решетки кремния - $R_{Ni-Ni}=3.84 \text{ \AA}$ (рис. 14). Среднее значение энергии связи Ni-Ni в кластере никеля используя данные, полученные разными методами равно $\Delta E_k \approx 1.39 \text{ eV}$.

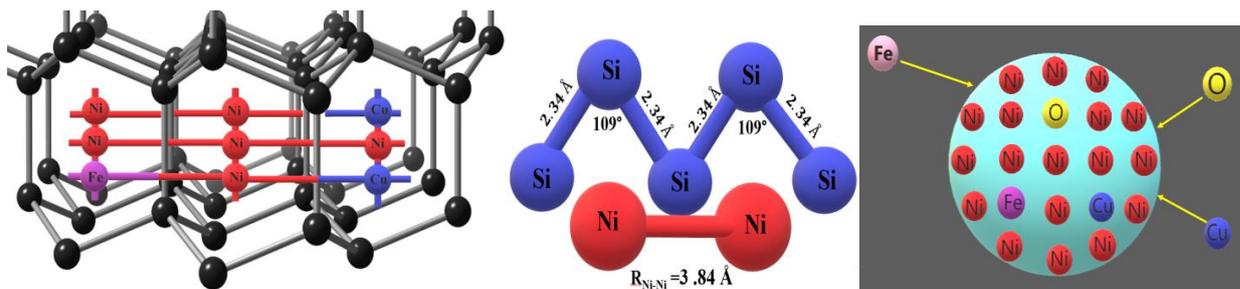


Рис. 14. Структурная физическая модель кластера никеля и модель процесса геттерирования кластерами атомов никеля.

Используя энергию связи Ni-Ni показано, что после образования кластеров концентрация атомов никеля в кластерах на $6 \div 8$ порядков выше остаточной концентрации никеля в решетке кремния.

2. Физическая модель процесса геттерирования кластерами атомов никеля. Электронейтральный кластер никеля имеет геттерирующие свойства и снижает концентрацию рекомбинационных центров (РЦ) за счет захвата неконтролируемых примесных атомов (БДП) и увеличивает время жизни ННЗ в кремнии.

Геттерирующие свойства кластеров никеля определяются силами металлической связи, действующими в них. Геттерирующие свойства кластеров могут усиливаться, если неконтролируемые примесные атомы образуют интерметаллические соединения. В кластерах все БДП будут связаны металлическими связями. Следовательно, энергия связи атомов БДП в кластерах также составляет $\Delta E_r \approx 1.39 \text{ eV}$.

Геттерирование кислорода происходит за счет наличия кулоновского взаимодействия. Рассчитанная энергия связи кислорода в кластерах никеля имеет порядок $\Delta E_{Ni-O} \approx 1.25 \text{ eV}$.

3. С использованием «диффузионно-кинетических» и «диффузионно-геттерированно-кинетических» моделей объясняются процессы кластеризации и геттерирования:

1. Во время диффузии в объеме кремния идет процесс комплексообразования с участием атомов никеля. Образуются комплексы: междоузельный никель - междоузельный кремний (Ni-Si), никель-кислород (Ni-O), никель-неконтролируемые примеси (Ni-Cu, Ni-Fe и т.д.), никель-никель. Также, нанесенный слой металлического никеля геттерирует неконтролируемые примеси из объема.

2. Во время охлаждения, атомные комплексы взаимодействуя друг с другом, образуют кластеры, которые накапливаются вблизи дефектных областей кристаллической решетки (в первую очередь вблизи границ раздела). За счет температурного градиента, изменения свободной энергии поверхности и обратного диффузионного потока на поверхности и тыльной стороне кремния образуется обогащенный слой, имеющий геттерирующие свойства.

3. При отжиге активируется процесс кластеризации закалочных дефектов (в том числе междоузельных атомов никеля) и по всему объему растет размер кластеров никеля, геттерирующих (растворяющих в себе) неконтролируемые рекомбинационные примеси. Тем самым рекомбинационные центры исчезают из объема базы СЭ.

Экспериментально показано, что после диффузии никеля и ДТО состав кластеров изменяется, т. е. концентрации атомов никеля ($40 \div 60 \%$) кислорода ($\sim 15 \div 25 \%$) и быстро диффундирующих примесей ($\sim 30 \div 50 \%$) увеличивается.

4. В зависимости от исходной концентрации БДП ($C_{r0} \approx 10^{11} \div 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) и условий ДТО ($T_{\text{ann}} = 600 \div 900 \text{ }^\circ\text{C}$), значение эффективности геттерирования кластерами никеля G оценивается как:

$$G = \frac{\Delta C_r}{C_{r0}} = \frac{C_{r0} - C_r}{C_{r0}} = 0.5 \div 0.8 \quad (1)$$

где C_{r0} – исходная концентрация БДП (Cu, Fe и др.) в решетке кремния, C_r – остаточная концентрация БДП в решетке кремния (вне кластеров).

Рассчитано увеличение время жизни ННЗ в СЭ:

$$\frac{\tau_{Ni}}{\tau_0} = \frac{C_r}{C_{r0}} = \frac{1}{1 - G} \approx 2 \div 5 \quad (2)$$

Таким образом, формирование кластеров уменьшает концентрацию неконтролируемых рекомбинационных примесей на 50÷80% от исходной, что увеличивает время жизни ННЗ в СЭ до двух - пяти раз.

Экспериментально показано, что ВЖННЗ в СЭ с никелем увеличивалось до 2 раз. Это подтверждает проведенный расчет и правильность модели.

5. Основываясь на результатах исследований, построена физическая модель механизмов влияния процессов диффузии никеля и ДТО на состояние атомов никеля в приповерхностной области и базе СЭ и, соответственно, на КПД.

Формирование кластеров никеля происходит за счет стремления системы к состоянию с минимальной свободной энергией, т.е. за счет постепенного восстановления равновесного состояния системы. В этом же процессе участвуют и неконтролируемые рекомбинационные примеси – то есть происходит геттерирование.

При оптимальной температуре ДТО наблюдается максимум геттерирования неконтролируемых рекомбинационных примесей.

В приповерхностной области выше (до 2÷3 порядков) концентрация атомов никеля, поэтому геттерирующие свойства этих областей выше.

Кроме того, атомы никеля в поверхностном слое реагируют с избытком фосфора, уменьшая толщину «мертвого» слоя.

Таким образом, все эти механизмы могут повышать КПД СЭ.

6. Рассчитано повышение эффективности кремниевых СЭ, легированных никелем:

$$\frac{\eta_{Ni}}{\eta_0} = \frac{\rho_s}{\rho_{s(Ni)}} \cdot \sqrt{\frac{\tau_{Ni}}{\tau_0}} \cdot \log_{\tau_0}(\tau_{Ni}) = 1.41 \div 2.2 \quad (3)$$

В расчете рассматривалось только изменение концентрации РЦ и не включалось в расчет влияние остальных факторов (оптических, контактных и др.). Следовательно, увеличение эффективности относится только к коэффициенту собрания СЭ (Q).

Таким образом, геттерированием кластерами никеля можно увеличить Q СЭ до 1.5÷2 раз и КПД СЭ может увеличиться в 1.2÷1.5 раз.

Экспериментально показано, что при оптимальных технологических условиях увеличение КПД достигает 26÷29 %. Это подтверждает проведенный расчет и правильность модели.

Таким образом из этого можно сделать вывод, что если использовать стандартное просветляющее покрытие и омические контакты, имеющие оптимальную форму, то параметр КПД СЭ на основе предлагаемой технологии может быть улучшен на 20÷50 %.

В заключение хочу выразить благодарность моему научному консультанту академику М.К.Бахадирханову, научному руководителю профессору К.А.Исмайлову и всему коллективу кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» ТГТУ за помощь и поддержку, оказанные при выполнении моей диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально определены оптимальные режимы диффузии при легировании никелем – $T_{diff}=800\div 850$ °С, условия дополнительного термического отжига – $T_{ann}=750\div 800$ °С и структура кремниевого СЭ, позволяющая повысить эффективность кремниевых СЭ на 25÷30 %;

2. Установлено, что в повышении эффективности кремниевого СЭ существенную роль играет именно обогащенная никелем лицевая приповерхностная область СЭ (толщиной 2÷3 μm), имеющая сильные геттерирующие свойства, что позволяет увеличить время жизни неосновных носителей заряда в базе СЭ до 2 раз;

3. Впервые установлено, что увеличение эффективности СЭ при легировании никелем не зависит от типа проводимости (p – или n – тип) исходного кремния и от вида примесей (В или Р), вводимых для создания p – n перехода;

4. Определено увеличение спектральной чувствительности тока короткого замыкания кремниевого СЭ, легированного никелем, до 25÷40 % в видимой области спектра ($\lambda \sim 0.5\div 1$ μm) солнечного излучения;

5. Разработана физическая модель структуры кластера примесных атомов никеля и на ее основе оценено расстояние между атомами никеля в кластере – $R_{Ni-Ni} = 3.84$ Å и энергия связи кластера никеля с быстродиффундирующими примесями – $\Delta E_k \approx 1.39$ eV.

6. Разработана физическая модель процесса геттерирования кластерами никеля вредных примесей, объясняющие влияние кластеров на параметры кремниевых СЭ, оценен коэффициент геттерирования $G \approx 0.5\div 0.8$ и вычислено максимальное увеличение коэффициента собирания носителей – 50÷100%.

7. Разработана маршрутная карта изготовления высокоэффективных кремниевых СЭ, легированием никелем. С использованием маршрутной карты произведены опытные СЭ.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING ACADEMIC OF THE DEGREES
No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND
MICROELECTRONICS UNDER THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

**KARAKALPAK STATE UNIVERSITY
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

KENZHAEV ZOIR TOKHIR UGLI

**FEATURES OF THE INFLUENCE OF IMPURITY NICKEL ATOMS ON
THE PARAMETERS OF SILICON SOLAR CELLS**

01.04.10-Physics of semiconductors

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

Tashkent-2022

The theme of the doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under B2021.4.PhD/FM415.

Dissertation has been prepared at Karakalpak State University and Tashkent State Technical University.

The abstract of the dissertation is posted in three (uzbek, russian, english (resume)) languages on the website (tdtu.uz) and the "Ziyonet" Information and educational portal at (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Ismaylov Qanatbai Abdreymovich**
Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor.

Official opponents: **Turgunov Nozimjon Abdumannopovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor

Imamov Erkin Zunnovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "09" 03 2022, at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, Conference Hall of the SRIPSM under the NUU).

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No. 36). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on 02 2022.
(Registry record No. 36 dated " 2022)



Sh.B. Utamuradova
Chairman of the Scientific Council
on Award of scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Professor

J.J. Khamdamov
Scientific secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees, Doctor of
philosophy (PhD)

Kh.K. Aripov
Chairman of the Scientific Seminar of the
Scientific Council on Award of Scientific
Degrees, Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is to study the features of the influence of nickel alloying on the parameters of silicon SCs and to develop a physical model of the effect of impurity nickel atoms on the efficiency of silicon solar cells.

The object of the research work was silicon SC doped with nickel atoms under various conditions - $T_{diff}=700\div 1300$ °C and $T_{ann}=600\div 1100$ °C.

The subject of research work is the electrical, photoelectric and optical properties of silicon solar cells doped with nickel atoms.

Scientific novelty of the research work is as follows:

Optimal diffusion modes for alloying with nickel are experimentally determined – $T_{diff}=800\div 850$ °C, conditions of additional thermal annealing – $T_{ann}=750\div 800$ °C and the structure of silicon solar cells, which makes it possible to increase the efficiency of silicon solar cells by 25 ÷ 30%.

It is shown that it is the nickel-enriched near-surface region of the SC (2–3 μm thick), which has strong gettering properties, that plays a significant role in increasing the efficiency of a silicon SC, which makes it possible to increase the lifetime of minority charge carriers in the base of the SC up to 2 times;

For the first time that an increase in the efficiency of solar cells upon alloying with nickel does not depend on the type (*p* – or *n* – type) of conductivity of the initial silicon and on the type (B or P) of impurities introduced to create a *p* – *n* junction.

It was found that an increase in the spectral sensitivity of the short-circuit current of a nickel-doped solar cell up to 25 ÷ 40% in the visible region ($\lambda \sim 0.5\div 1$ μm) of the solar radiation spectrum.

A physical model of the structure of a cluster of nickel impurity atoms was developed and, on its basis, the distance between nickel atoms in the cluster was estimated – $R_{Ni-Ni} = 3.84$ Å and the binding energy of a nickel cluster with rapidly diffusing impurities – $\Delta E_k \approx 1.39$ eV.

A physical model of the gettering process of harmful impurities by nickel clusters was developed to explain the influence of clusters on the parameters of silicon solar cells, the gettering coefficient was estimated $G \approx 0.5\div 0.8$ and the maximum increase in the carrier collection coefficient was calculated – 50÷100%.

Implementation of research results.

Based on the obtained scientific results of studying the features of the influence of nickel alloying on the parameters of silicon solar cells, the following are introduced:

a new method of diffusion alloying of silicon with nickel impurity atoms from a chemically deposited layer was introduced and used in Joint-Stock Company «FOTON» (Reference No. 04-3/1729 of the JSC “UZELTEHSANOAT” of 20th September of 2020) for the manufacture of prototypes with nickel clusters with a size of 20÷100 nm, the results obtained are at the level of world analogues. This work is advisable to apply for the manufacture of PVP and PVM (photovoltaic panels and modules) with an efficiency of 18÷20%;

gettering method and optimized nickel alloying technology were used at the Center of foundation studies for agricultural science (reference dated 06.10.2021

given by Universiti Putra Malaysia) for the manufacture of solar cells with an increased lifetime of minority charge carriers up to 2 times and a reduced emitter surface resistance by 10÷15% and increased efficiency (by ~20÷22%).

Approbation of the results of the study. The main scientific results of the dissertation work were reported and discussed at 13 international and 8 Republican scientific and practical conferences.

Publication of the research results. On the topic of the dissertation, 32 scientific works were published, including 9 articles in scientific journals recommended for publication of scientific results of doctoral dissertations at the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, 6 of them in republican and 3 foreign journals indexed in the Scopus database.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references and applications. The of the dissertation consists of 120 pages, including 37 figures and 17 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1A. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Kenzhaev Z.T., Koveshnikov S.V., Studying the Effect of Doping with Nickel on Silicon-Based Solar Cells with a Deep $p-n$ -Junction // Technical Physics Letters, 2019. – Vol. 45, No.10. – pp. 959–962. (№3 Scopus Q3, IF = 1.7)

2A. Iiev H. M., Kenjaev Z. T., Isakov B. A., Narkulov N., Effect of temperature annealing on the efficiency of nickel-doped silicon solar cells // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – Ташкент, 2019. – Vol. 1: Iss. 6, Article 7. – pp. 1–8. (01.00.00. № 16)

3A. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Kenzhaev Z.T., Melebaev D., Zikrillayev Kh. F., Ikhtiyarova G. A. Silicon Photovoltaic Cells with Deep $p-n$ Junction. // Applied Solar Energy, 2020. – Vol. 56, No. 1. – pp. 13–17. (№3 Scopus Q3, IF = 2.0)

4A. Ismaylov K.A., Kenzhaev Z.T., Isamov S. B., Koveshnikov S.V., The effect of nickel alloying on the infrared sensitivity of silicon solar cells // Karakalpak Scientific Journal. – Нукус, 2020. – Vol. 3: Iss. 1, Article 6. – pp. 1–9. (01.00.00. № 11)

5A. Bakhadyrkhanov M. K., Kenzhaev Z.T., Optimal Conditions for Nickel Doping to Improve the Efficiency of Silicon Photoelectric Cells // Technical Physics, 2021. – Vol. 66, No.6. – pp. 949–954. (№3 Scopus Q3, IF = 1.3)

6A. Бахадырханов М.К., Кенжаев З.Т., Исмайлов К.А., Ковешников С.В., Повышение эффективности коммерческого кремниевого солнечного элемента легированием никелем // Гелиотехника, 2020. – Том. 56, № 4. – С. 322–330. (01.00.00. № 1)

7A. Bakhadyrkhanov M. K., Ismaylov K.A., Kenzhaev Z.T., Tachilin S.A., A new way to increase efficiency silicon photocells // Scientific-technical journal. – Фергана, 2020. – Vol. 3, №5. – pp. 82–84. (05.00.00. № 20)

8A. Исмайлов К.А., Кенжаев З.Т., Факторы влияющие на эффективность использования фотопреобразователей // Вестник ККО Академии наук РУз. – Нукус, 2017. – №3. – С. 11–14. (05.00.00. № 19)

9A. Исмайлов К.А. Отениязов Е., Шарипбаев М.Б., З.Т. Кенжаев, Физические свойства солнечных элементов на основе кремния // Вестник ККО Академии наук РУз. – Нукус, 2014. – №2. – С. 8–13. (05.00.00. № 19)

II бўлим (II часть; part II)

10A. Исмайлов К.А., Кенжаев З.Т., Жалелов М.А., Қуёш элементи эффективлиги таъсир этувчи омиллар таҳлили // Ilim hám jámiyet (Наука и общество). – Нукус, 2018. – №2. – С. 5–8.

11А. Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Исамов С.Б., Кенжаев З.Т., Зикриллаев Х.Ф., Проблемы повышения эффективности кремниевых солнечных элементов // Сборник трудов международной Конференции «Энерго- и ресурсосбережение: новые исследования, технологии и инновационные подходы». – Карши, 24-25 сентября 2021. – С. 332–334.

12А. Ismaylov K.A., Kenzhaev Z.T., Optimal temperature for Nickel Doping to Improve the Efficiency of Silicon Photoelectric Cells // The 2021 International Workshop “Functional materials for energy applications” (FUNMAT). – Urgench, 15-17 September, 2021. – pp. 38.

13А. Ismailov K. A., Kenzhaev Z. T., The effect of nickel doping on the parameters of silicon solar cells obtained with various impurities (P, B) // VII International scientific - practical conference structural relaxation in solids. – Ukraine, Vinnytsia, 25 - 27 May, 2021. – pp. 98–100.

14А. Кенжаев З.Т., Влияние никеля на спектральную чувствительность кремниевых солнечных элементов // Международной научной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред». – Фергана, 25 май, 2021. – С. 252–255.

15А. Кенжаев З.Т., Повышение эффективности кремниевого солнечного элемента легированием никелем // Международная научно-техническая конференция по «Тенденции развития альтернативной и возобновляемой энергетики: проблемы и решения». – Ташкент, 17-18 май 2021. – С. 297–299.

16А. Кенжаев З.Т., Исмаилов В.К., Влияние никеля на кремниевые фотоэлементы, в которых $p-n$ -переход создавался примесями P, B. // Международной научной конференции «Роль передовых инновационных технологий и образования в решении задач автоматизации и энергетики, направленная на повышение энергоэффективности производств и социальной сферы». – Наманган, 24-25 июнь 2021. – С. 147–148.

17А. Илиев Х. М., Кенжаев З. Т., Ковешников С. В., Исмаилов К. А., Наркулов Н., Олламберганов Ш. З., Повышение эффективности промышленного кремниевого солнечного элемента легированием никелем // Международная научно-техническая конференция по «Тенденции развития альтернативной и возобновляемой энергетики: проблемы и решения». – Ташкент, 17-18 май 2021. – С. 320–324.

18А. Кенжаев З.Т., Геттерирующие свойства кластеров атомов никеля, находящихся в приповерхностной области кремния // Физика фанининг техника соҳасидаги тутган ўрни» РИАК материаллари, 2021 йил 28 май, Нукус. С. 107–109.

19А. Исмаилов К.А., Кенжаев З.Т., Ковешников С.В., Влияние никеля на время жизни неосновных носителей заряда в базе солнечного элемента // Физика фанининг техника соҳасидаги тутган ўрни» РИАК материаллари. – Нукус, 28-май 2021. – С. 90–92.

20А. Кенжаев З.Т., Эффективность фотоэлементов с различной глубиной залегания $p-n$ -перехода легированных никелем // V Международной конференции по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в

полупроводниковых микро- и наноструктурах». – Фергана 13-14 ноября 2020. – С. 193–194.

21А. Бахадырханов М.К., Исмаилов К.А., Кенжаев З.Т., Тачилин С.А., Новый способ повышения эффективности кремниевых фотоэлементов // V Международной конференции по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах». – Фергана, 13-14 ноября 2020. – С. 122–124.

22А. Кенжаев З.Т., Оптимальные условия легирования никелем для создания более эффективных фотоэлементов // Международная онлайн конференция «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике». – Ташкент, 9-октябрь 2020. – С. 25–27.

23А. Бахадырханов М.К., Исамов С.Б., Кенжаев З.Т., Новые материалы для фотоэнергетики и оптоэлектроники на основе кремния с бинарными нанокластерами примесных атомов с управляемые параметрами // Международная научная конференция «Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы». – Ташкент, 28-май 2020. – С. 204–209.

24А. Кенжаев З.Т., Тачилин С.А., Ковешников С.В., Влияние легирования никелем на инфракрасную чувствительность кремниевых фотоэлементов // Международная онлайн конференция «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике». – Ташкент, 9-октябрь 2020. – С. 7–10.

25А. Исмаилов К.А., Кенжаев З.Т., Эффективные фотоэлементы на основе кремния с бинарными кластерами // РНПК «Интеграция образования, науки и производства». – Карши, 22-23 сентябрь 2020. – С. 217–219.

26А. Исмаилов К. А., Кенжаев З.Т., Косберегенов Е. Ж., Ковешников С. В., Влияние температурного отжига на эффективность кремниевых фотоэлементов // «Замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация интеграцияси» Республика илмий-услугиби анжумани. – Андижон, 24-25 декабрь 2020. – 108–110 б.

27А. Бахадырханов М.К., Кенжаев З.Т., Исамов С.Б., Ковешников С.В., Исследование кремниевых фотоэлементов с глубоким $p-n$ -переходом, легированных никелем // «Современные проблемы физики полупроводников» Республиканской конференции. – Нукус, 20 ноября 2019. – С. 48-51.

28А. Бахадырханов М.К., Кенжаев З.Т., Ковешников С.В., Илиев Х.М., Кабулов Б.С., Кремниевые фотоэлементы с глубокими $p-n$ -переходами // «Республиканская конференция по физической электронике и фотонике». – Ташкент, 23 октября 2019. – С. 69-70.

29А. Исмаилов К.А., Кенжаев З.Т., Исамов С.Б., Ковешников С.В., Оллаберганов Ш.З., Влияние температурного отжига на эффективность кремниевых фотоэлементов с глубокими $p-n$ -переходами // «Современные проблемы физики полупроводников» Республиканской конференции (с участием ученых стран СНГ). – Нукус, 20 ноября 2019. – С. 38-41.

30А. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Х.Ф., Тачилин С.А., Исмаилов Б.К., Кенжаев З.Т., Шаисламов У.С., Исследование структуры, состава и

распределения кластеров атомов никеля в решётке кремния. // Международный конгресс тюркского мира «Естественным наукам и медицине». – Ош, Кыргызстан, 21-23 апрель 2019. – С. 181-182.

31А. Ismaylov K.A., Tagaev M.B., Kenjayev Z.T., Seytimbetova G., The development of solar energy in Uzbekistan // «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро-и наноструктурах». Сборник тезисов докладов международная конференция. –Фергана, 25-26 мая 2018. –С.148-150.

32А. Исмайлов К.А., Кенжаев З.Т., Перспективы развития солнечной энергетики в условиях Республики Каракалпакстан, «Седьмая Международная конференция по физической электронике IPES-7» // Сборник тезисов докладов международная конференция. – Ташкент 18-19 мая 2018. – С. 78.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида тахрирдан ўтказилиди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди (14.02.2022 йил).

Бичим 60x841/16. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табағи: 3. Адади 60. Буюртма №29

Гувоҳнома reester № 10-4434

Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти
босмаҳонасида чоп этилган.

Босмаҳона манзили: 100057, Тошкент ш., Янгиолмазор кўчаси 20-уй

