ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ 27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ЖУРАЕВ ХИММАТАЛИ НОМОЗОВИЧ

Si ВА C ВАКАНСИЯЛАРИ ОҚИМИДА БОР ВА АЛЮМИНИЙНИЙ КРЕМНИЙ КАРБИДИГА ПАСТ ҲАРОРАТЛИ ДИФФУЗИЯСИ

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент 2017

УДК:621.3.082.782

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси 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

Жураев Химматали Номозович
Si ва C вакансиялари оқимида бор ва алюминийнинг кремний карбидига паст ҳароратли диффузияси. 3

Жураев Химматали Номозович
Низкотемпературная диффузия бора и алюминия в карбид кремния в потоке Si- и C- вакансий.. 21

Juraev Khimmatali Nomozovich
Low-temperature diffusion of boron and aluminum in silicon carbide in a flow of Si- and C- vacancies. 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works …….. 42

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ 27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

ЖУРАЕВ ХИММАТАЛИ НОМОЗОВИЧ

Si ВА C ВАКАНСИЯЛАРИ ОҚИМИДА БОР ВА АЛЮМИНИЙНИЙ КРЕМНИЙ КАРБИДИГА ПАСТ ҲАРОРАТЛИ ДИФФУЗИЯСИ

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент 2017

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.1.PhD/FM34 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати икки тилда (ўзбек, рус) веб-саҳифанинг fti-kengash.uz ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим портали www.ziyonet.uz манзилларига жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	**Атабаев Ильхам Гафурович** Физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Камалов Амангелди Базарбаевич** Физика-математика фанлари доктори
	Парчинский Павел Борисович физика-математика фанлари номзоди, доцент
Етакчи ташкилот:	**Тошкент давлат техника университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 27.06.2017. FM./T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2017 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 2б-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91; e-mail: lutp@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали.)

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (___ рақам билан рўйхатга олинган.) Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 2б-уй. Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2017 йил «____»_____да тарқатилди.
(2017 йил «____» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси.)

С.Л. Лутпуллаев
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

А.В. Каримов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., профессор

С.А. Бахрамов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда ҳозирги кунда яримўтказгичлар физикасининг жадал ривожланаётган соҳаларидан бири юқори қувватли токлар электроникаси учун қисмлар, ядровий нурланиш детекторлари, ҳамда махсус қўлланиладиган ультрабинафша светодиодлар тайёрлаш учун кремний карбидига саёз киришмаларнининг диффузия технологиясини такомиллаштиришга катта аҳамият берилмоқда. Бу борада паст ҳароратли легирлаш механизмларини ишлаб чиқиш, диффузия жараёнларга кристалл параметрларининг таьсирларни баҳолаш ва ушбу усуллар билан олинган диод тузилмаларининг сифатини ошириш муҳим вазифалардан бири бўлиб келмоқда.

Мустақиллик йилларида мамлакатимизда яримўтказгичлар физикаси соҳасини ривожлантириш, хусусан, кремний карбиди асосида яримўтказгичли асбоблар яратиш ҳамда уларнинг физик хусусиятларини ўрганишга алоҳида этибор қаратилди. Бу йўналишда кремний карбидига киришмаларнинг паст ҳароратли диффузияси усули ва паст хароратли диффузия усули ёрдамида диод структураларини яратиш ва тадқиқ қилиш йўналишида яхши натижаларга эришилди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига асосан, мамлакатимизда илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш ҳамда олинидиган илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этиш, шу жумладан кремний карбиди асосида яримўтказгичли асбоблар ишлаб чиқиш ва унинг сифатини ошириш йўлларини тадқиқ қилиш муҳим аҳамиятга эга.

Хозирги кунда кремний тагликдаги эпитаксиал SiC/Si тузилмалар дунёнинг кўп илмий марказларда олинмоқда. Кремний тагликнинг эриш харорати 1420ºC бўлганлиги учун ушбу эпитаксиал тузилмалар учун юқори ҳароратли диффузия усулини қўллаб бўлмайди. Шу сабабли паст ҳароратли диффузия қилиш технологияси келажакда кенг соҳада қўлланилиши мумкин. Диффузия ҳароратини кескин пасайтириш учун жараён номувозанат шароитида (кристалл юзасидан ичига йўналтирилган вакансиялар оқимида) ўтказилади. Саёз киришмалар диффузияси янги механизмлар бўйича ўтади. Шундай қилиб, диссертацияда олинган экспериментал натижалар ҳам амалий ҳам назарий жиҳатидан катта қизиқиш уйғотади.

Ушбу диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар сратегияси тўғрисида» ги Фармонини, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772 -сон «2017-2021 йилларда электроника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши»нинг устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Адабиётлардан маълумки, кремний карбидида паст ҳароратли диффузия усули легирлашда анча перспективликни намоён қилади. У саёз киришмаларнинг юқори концентрациясини таъминлайди, паст ҳароратдан фойдаланилганлиги сабабли SiC кристалл юзасини бузилишига олиб келмайди.

Рус олими Баграев Н.Т. кремний карбидида сегрегацион жараёнлардан фойдаланиб легирлаш ҳароратини 900°С гача тушишга эришган.[1] Ўзбек олимлари И.Г.Атабаевнинг, Т.М.Салиевнинг, Америка олими Chin-Che Tin ишларида юзадаги оксидланиш жараёни диффузия ҳароратининг 1150-1300°С гача тушишига олиб келиши кўрсатилган.[2]

Бироқ, паст ҳароратли диффузиянинг натижалари кристалл юзасининг ҳолатига, диффузиядан олдин бериладиган ишлов характерига жуда ҳам боғлиқ бўлади ва кўпинча диффузия натижаларнинг такрорланиш даражаси паст бўлади. Илгари паст ҳароратли диффузия таркибида ўсиш дефектлари концентрацияси юқори бўлган SiC кристалл пластинкаларида тадқиқ қилинган. Жараённинг такрорланиш даражаси бор йўғи 20-30% бўлган.

Киришмалар диффузияси дефектлар оқимида содир бўлганда, p-n ўтиш кўп миқдордаги электроактив нуқтавий нуқсонлар киритилади, демак диод таёрлангандан кейин ушбу нуқсонлардан тозалаш керак бўлади. Паст ҳароратли диффузия кристалл юзасининг ҳолатига боғлиқ бўлганлиги сабабли, нуқсонларсиз силлиқ сирт олиш кремний карбидига химиявий ишлов бериш усулини ишлаб чиқиш ҳам муҳим аҳамиятга эга. Ҳозирги кунгача кремний карбидида паст ҳароратли диффузия жараёнига ўсиш нуқсонларининг таьсири кам тадқиқ этилган, кристалларга кимёвий ишлов бериш ва силлиқланган сиртлар олиш усули ишлаб чиқилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Физика-техника институти илмий тадқиқот изланишлари ДИДТ-А-13-034 рақамли «Кремний карбидида борнинг паст ҳароратли диффузиясидан радиациага ва иссиқликка чидамли яримўтказгич асбоблар ишлаб чиқиш» (2006-2008 йй.), А15-Ф-103 рақамли «Кремний карбиди асосида паст ҳароратли диффузия усули билан диодлар ишланмасини тайёрлаш» (2009-2011 йй.), ФА-Ф2-Ф030+Ф096 рақамли «Нуқтавий нуқсонлар ва кластерлар ҳосил бўлиши, ҳамда уларнинг $Si_{1-x}Ge_x$, хажмий кристаллари ва SiC плёнкаларининг электрофизик, оптик ва радиацияга чидамлилик

[1]Bagraev N.T., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Sukhanov V.L., Zabrodskaya N.V., Def. Diff. Forum, 143-147, 1147 (1997).

[2] C.C. Tin, S. Mendis, K. Chew, I. Atabaev, T. Saliev, E. Bakhranov, B. Atabaev, V. Adedeji, and Rusli, Oxide film assisted dopant diffusion in silicon carbide, Thin Solid Films, v.518, p.118-120, 2010.

хоссаларига таьсирини тадқиқ қилиш» (2007-2011 йй.), Ф3-ФА-0-56434 рақамли «Ярим ўтказгич асбоблар ва қуёш элементлари учун юпқа плёнка тузилмалар ва нанокиришмали структуралар шаклланишининг физикавий қонуниятлари» (2012-2016 йй.) мавзусидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотлар мақсади паст ҳароратли диффузия жараёнининг такрорланиш даражаси ва олинаётган кремний карбиди p-n-ўтишларнинг хоссаларига ўсиш нуқсонлари ва юза ҳолатининг таьсирларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

кремний карбидида бор ва алюминийнинг паст ҳароратли диффузиясини (киришманинг тақсимланиш профилини тадқиқ қилиш, дефектларнинг диффузия жараёнига таъсири ва бошқалар), PVT усул билан ўстирилган ва нисбатан ўсиш дефектлари концентрацияси кам бўлган SiC кристалларида тадқиқ қилиш;

кремний карбидини емириш усулини ишлаб чиқиш ва ундан фойдаланиб сирт дефектлари етарлича паст концентрацияда бўлган сирт ҳосил қилиш;

p-n ўтишлар тайёрлаш, температуравий куйдиришларнинг ва меза структура шакллантиришларнинг вольт-ампер характеристикага (ВАХга) таъсирини тадқиқ қилиш, SiC асосида диодлар тайёрлаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида кремний карбидининг ҳар хил политиплари 4H, 6H и 3C n-SiC монокристалл пластинкалари ва улар асосидаги p-n ўтишлардан иборат.

Тадқиқотнинг предмети сифатида саёз киришмаларнинг вакансиялар оқимидаги диффузия жараёни, ўсиш нуқсонларнинг паст ҳароратли диффузия усули билан олинган p-n ўтиш хоссаларига таьсиридан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Ишда синалган вольт-ампер, вольт-сиғим характеристикасини ўлчаш методларидан, изохрон куйдириш методи, солиштирма қаршиликнинг тақсимланишини аниқлаш учун бир зондли усули ва бошқа методлар билан фойдаланилган, морфологик тадқиқотларда интерференцион микроскопдан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

кремний карбиди монокристалларида бор ва алюминий (илк бор) паст хароратли диффузияси билан p-n ўтишлар олинган ва электрофизик хоссалари аниқланган;

илк бор кремний карбиди сиртини КОН нинг сувли эритмасида ультрабинафша нури ёрдамида емириш усули ишлаб чиқилган;

бир зондли ток ёйилиш методи ёрдамида паст хароратли диффузиядан сўнг бор ва алюминий киришмаларининг кремний карбидидаги тақсимоти аниқланган;

илк бор паст хароратли диффузия усули билан 300°С гача ҳароратда ишлай оладиган, токининг қайта уланиш вақти ва тескари тикланиш вақтининг давомийлиги жуда кичик (10 нс дан кичик) бўлган кремний карбиди диоди ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Si ва C вакансиялари оқимида бор ва алюминийнинг кремний карбидига паст ҳароратли диффузияси тадқиқотининг доирасида ишлаб чиқилган технологик режимлари ва ультрабинафша нур ёрдамида усули кремний карбиди асосидаги p-n ва p-i-n диод тузилмаларни тайёрлашда фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ўлчаш аниқлиги юқори бўлган асбоблардан фойдаланилиб, синалган ўлчаш методлари қўлланилганлиги билан таминланади. Тажриба натижаларини таҳлил қилиш учун апробациядан ўтган дастурлар фойдаланилган, хусусан Origin 6.0 дастурида маьлумотларни статистик қайта ишлаш жараёнида корреляция коэффициентлари, χ^2-квадрат корреляция катталиги ва бошқа катталиклар ҳисобланади. Олинган натижалар мавжуд физик назариялар ва ёндашувларга мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кремний карбидида саёз киришмалар бор ва алюминийнинг паст ҳароратли диффузияси, олинган p-n ўтишларга ўсиш нуқсонлари, термик куйдириш ва пассивлашнинг таьсирини тушунтириб бериш имконини беради. Янги диффузия механизми таклиф қилинди. Паст ҳароратли диффузиясининг характеристикалари тўғрисида олинган экспериментал натижалар яримўтказгич бирикмаларида диффузия жараёнига тегишли янги моделлар яратиш учун қўлланиши мумкин.

Паст ҳароратли диффузия технологияси ва ультрабинафша нурлар ёрдамида емириш усули эса юқори қувватли диодлар, юқори кучланишли транзисторлар ва бошқа электрон қурилмалар ишлаб чиқариш технологиясида фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши. Кремний ва углерод вакансиялари оқимида бор ва алюминийнинг кремний карбидига паст ҳароратли диффузиясини тадқиқ қилиш натижалари асосида ишлаб чиқилган:

кремний карбидини калий гидроксидининг сувли эритмасида ультрабинафша нурлар таьсири остида емириш бўйича «Кремний карбидига ишлов бериш усули» (Ўзбекистон Республикаси Интелектуал мулк агентлигининг ихтиро патенти, № IAP 05087, 05.08.2015 й.). Ушбу усул кремний карбидининг силлиқ емирилган сиртларини олиш ва мезатузилмаларни тайёрлаш имконини берган;

кремний карбидига киришма бор ва алюминийни паст ҳароратли диффузия қилиш усули билан янги кўчкили учма диоди ишлаб чиқилган (IX Республика Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳалар ярмаркаси катологи «Кўчкили-учма p-i-n SiC диоди» 2016 й.). Ушбу диод юқори тезкорлигига, ҳамда 300°C ҳароратгача ишлай олиши билан аньанавий диодлардан афзалликка эришиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг асосий натижалари 10 та ҳалқаро ва 8 та республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 26 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 8 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 120 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурия-ти асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари белгилаб берилган, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқот-нинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр қилинган ишлар ва диссертация тузилиши ҳақида маълумотлар келтирилган.

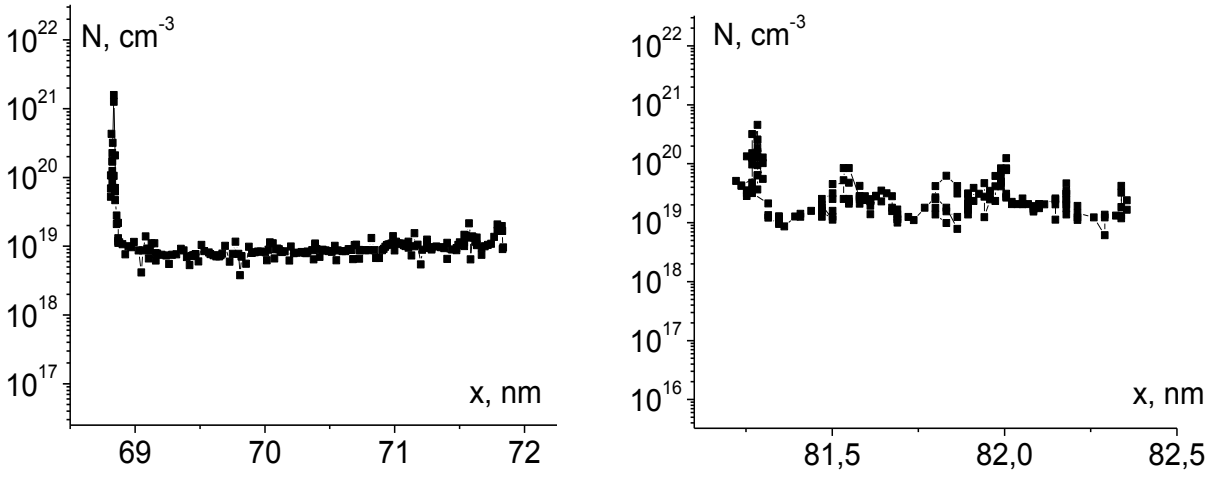
Диссертациянинг **«Адабиётларни умумлаштирувчи қисқача маълумот»** деб номланган биринчи бобида SiC асосидаги диодларнинг аҳамиятлилиги ва уларни тайёрлашнинг турли асосий методлари ҳамда кремний карбидида киришмаларнинг термик диффузияси методлари келтириб ўтилган. Кремний карбидида саёз киришмаларнинг диффузия жараёнига нуқтавий дефектларнинг таъсирига оид маълумотлар келтирилган, чизиқли дефектлар ва микротрубкаларнинг диодлар хусусиятларига таъсири баён қилинган. Тадқиқотнинг вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг **«Кремний карбидида дефектли қатламнинг паст ҳароратли диффузияга таъсири»** деб номланган иккинчи бобида таркибида ўсиш дефектлари турли бўлган кремний карбиди SiC кристалларида паст ҳароратли диффузия тадқиқ қилинган. Бизнинг тадқиқотларда борнинг диф-фузияси юзадан ҳажмга вакансияларнинг оқими билан боғлиқлиги кўрсатилган; бунда кристалл юзасида жуда кўп миқдор концентрацияда номувазанатли углерод ва кремний вакансиялари ҳосил бўлади. Бу соҳада диффузияланувчи атомларнинг диффузияси, асосан, кўпроқ ҳаракатчан бирлашмалар (B_c-V_c) ва (B_{Si}-V_{Si}) орқали содир бўлади.

Кремний карбидида мавжуд вакансиялари оқимида номувозанатий диффузиясидан сўнг бор ва алюминий киришмаларининг тақсимоти эксперимental тадқиқ қилинди. Борнинг SiC намуналаридаги тақсимланиши токнинг ёйилиб оқиш усули билан аниқланган. Ушбу усулда SiC намунаси юзаси олмос паста ёрдамида 1÷3 градус қия бурчакда силлиқ юза ҳосил қилинади. Шундан сўнг борнинг концентрация профили $N_B(x)$ни аниқлаш учун SiC намунаси юзаси бўйлаб солиштирма қаршилик ўлчанади.

Кремний карбиди намуналарида киришмаларнинг эксперимental тақсимотини тушунтириб берадиган диффузия модели таклиф қилинган. Ушбу моделда диффузия содир бўлган соҳада киришмаларнинг тақсимланиши вакансияларнинг тақсимланиши билан аниқланиши айтиб ўтилган.

Дефектли қатламнинг диффузия жараёнига ва p-n- ўтишлар хоссала-рига таъсири тадқиқ этилган. Таркибида нисбатан ўсиш дефектлари кам намуналарда емиришдан кейин тескари ўтиш кучланиши 5 дан 30÷40 В гача ошиши кўрсатилди. Аммо тескари ўтиш кучланиши учун асосий чегараловчи омил бу дисслокация ва микроқувурчалар эканлиги аниқланди. Диффузия жараёнининг такрорланиши ва сифатини ошириш учун юзадаги нуқсонли қатламни олиб ташлаш усулини ишлаб чиқиш зарурлиги маълум бўлди.



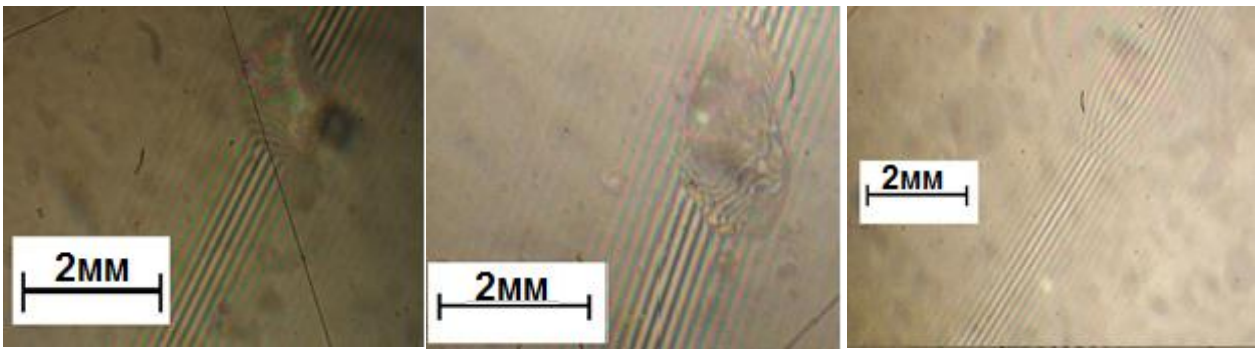
а) 3C-SiC<B> намунада киришма борнинг тақсимоти

б) 3C-SiC<B> намунада киришма борнинг квазидаврий тақсимоти

1-расм. Кремний карбидининг юпқа юза қатламида киришма борнинг тақсимоти

Юзадаги юпқа легирланган қатламда киришманинг эрувчанлиги ва тақсимоти Шоттки барьерларининг вольт-фарад характеристикалари бўйича тадқиқ қилинди. Легирланган кристалларда киришма борнинг эрувчанлиги $10^{19} \div 10^{21}$ $см^{-3}$ гача етиши маълум бўлди. 3C-SiC намуналарда киришма борнинг квазидаврий тақсимоти мавжудлиги кузатилди (1-расм). Бу диффузияланувчи киришмалар ва нуқтавий дефектларнинг юқори концентрацияда ўзаро таъсирлашуви ва диффузияда синергетик жараёнлар вужудга келиши билан боғлиқ бўлиши мумкин.

Калий гидрооксиди (КОН)нинг сувли эритмасида ультрабинафша нурлари ёрдамида кремний карбидини емириш усули ишлаб чиқилди. Емириш тезлиги 1 мкм/соатгача етиши кўрсатилди. 2-расмда 4H-SiC кристалл юзаси ишлов беришгача ва ишлов берилгандан кейинги ҳолатлари келтирилган.



4H-SiC юзаси емиришгача

диффузиягача

диффузиядан кейин, мезаструктура ҳосил қилиш 5-6 соат емиришдан кейин

2-расм. Интерференцион микроскопда суратга олинган 4H-SiC кристал юзаси 3D дефекти

Иккинчи бобнинг охирида ўлчаш ва уларни қайта ишлаш усуллари тавсифланган ҳамда тадқиқ этилган, намуналарнинг катталиклари келтирилган.

Диссертациянинг «**Нисбатан ўсиш дефектлари кам намуналарда бор ва алюминийнинг паст ҳароратли диффузиясини тадқиқ этиш**» деб номланган учинчи бобида таркибида нисбатан ўсиш дефектлари кам бўлган кристалларда паст ҳароратли диффузияда борнинг тақсимот профиллари тадқиқ қилинган. 3C-SiC кристаллда борнинг диффузияси углерод ва кремний вакансиялари оқимида 1100ºC дан 1250ºC гача температураларда ўтказилди. Диффузия учун бор атомлари манбаи сифатида SiC юзасидаги юпқа боросиликат плёнка қатламидан фойдаланилди. Диффузия намуна юзасидан кристалл ҳажмига вакансиялар оқимини ҳосил қилиш учун ҳавода ўтказилди.

3-расмда кўрсатилган экспериментал маълумотлар асосида бор диффузияси учун баҳоланган катталиклари келтирилган: 1150÷1250ºC температура оралиғида диффузия коэффициенти $D_B \sim 4\cdot10^{-11}$–$6\cdot10^{-10}$ см^2/сек, борнинг энергия активация диффузия қиймати $\varepsilon_a \approx$ 0.8–1.3 эВ. Активлаш энергиясининг бундай кичик қиймати одатда яримўтказгичларда узеллараро диффузиясига хосдир. Бу характеристикалар кристаллнинг ўсиш дефектлари га унчалик боғлиқ бўлмаслиги маълум бўлди.

Илк бор алюминийнинг кремний карбидига паст ҳароратли диффузияси билан тайёрланган p-n ўтишларнинг ВАХси ҳам тадқиқ қилин-ган. Диффузия учун бор атомлари манбаи сифатида 650°C да синтез қилиб ҳосил қилинган боросиликат қатламдан фойдаланилган[1]. Тадқиқотда эса диффузия учун алюминий атомлари манбаи сифатида намуна сиртида алюминий оксиди қатлами ҳосил қилинди. Тахмин қилинганидек, бу қатлам юқори температураларда кристалл сиртида кремний оксиди қатлами билан ўзаро таъсирлашади ва диффузия учун алюминий атомлари манбаини ҳосил қилади. Бу алюминий оксиди қатлами икки хил усул билан ҳосил қилинган: 1) намуна сиртига вакуумда термик чанглатиб, 650°C да алюминий оксиди плёнка ҳосил қилинган; 2) кремний карбиди намунаси юзига суртилган алюминий хлоридидан 600÷700°C да синтез қилинди.

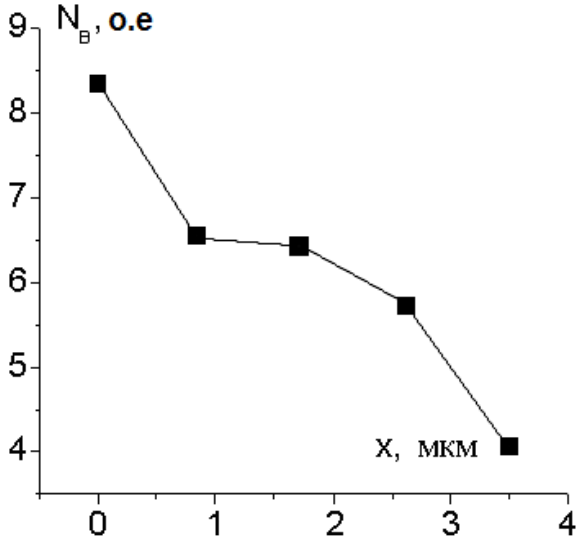
4-расмда келтирилган солиштирма ўтказувчанликнинг диффузия чуқурлиги бўйича қилинган тадқиқотлар намунада турли қалинликларда оксид қатламлари мавжудлигини кўрсатади.

Маълумки, диффузия жараёнида кирган дефектларни бартараф қилиш учун термик куйдириш қўлланилади. Бироқ куйдириш амалга ошадиган температура оралиғини баҳолаш зарур. Диффузия температураси 1150÷1250ºC бўлганлиги учун тадқиқотларда 500, 700, 900ºC температура оралиғи танланди. Электролюминесценция маълумотларига кўра 500ºC дан бошлаб дефектлар концентрацияси камая бошлайди.

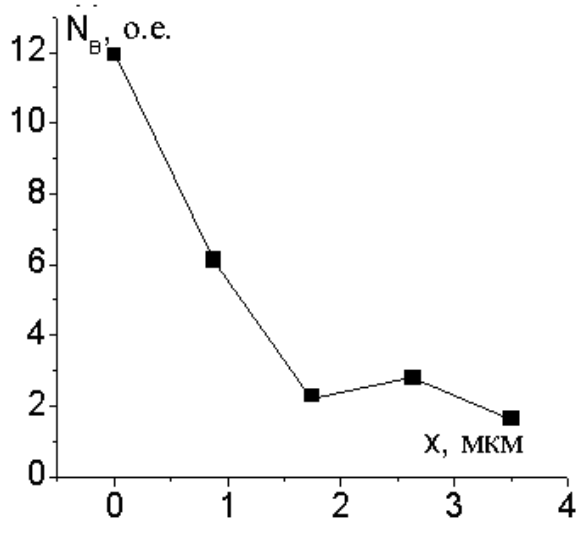
Вакансиялар оқимида паст ҳароратли диффузияда намунага дефектлар кирганлиги сабабли прибор тузилмаларининг характеристикалари, одатий

[1]Атабаев И.Г., Салиев Т.М., Бахранов Э.Н. Способ низкотемпературной диффузии бора в карбид кремния. Патент РУз IDP 05199, 01.04.2002.

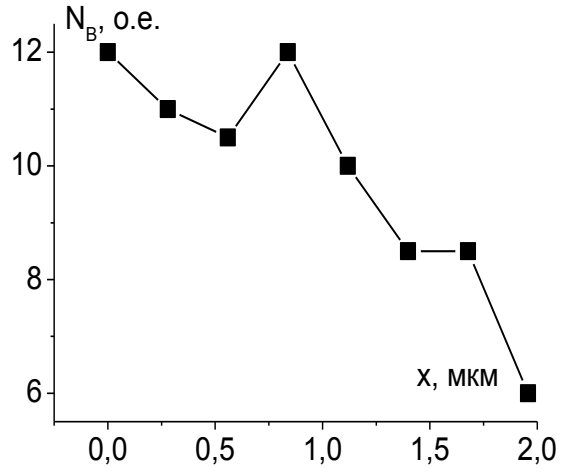
технология билан тайёрланган тузилмаларга нисбатан ёмонроқ бўлади. Бундан келиб чиқиб айтиш мумкинки, бу технологияни қўллаш имкониятлари сезиларли даражада дефектларни куйдириш имконияти билан боғлиқдир. Шунга боғлиқ ҳолда намуналар 500, 700, 900ºС температураларда 15 минут давомида вакуумда куйдирилди. Кейин легирланган қатламнинг устида Ni-SiC-Ni барьер Шоттки қилинди ва уларнинг характеристикалари ўлчанди.



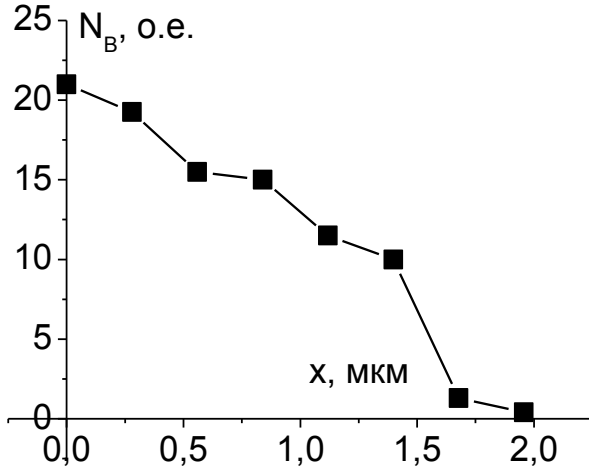
а) 3C-SiC намунасида борнинг 1150°C диффузиядан кейинги N_B тақсимоти



б) 6H-SiC намунасида борнинг1200°C диффузиядан кейинги N_B тақсимоти



в) 4H-SiC намунасида борнинг 1200°C диффузиядан кейинги N_B тақсимоти

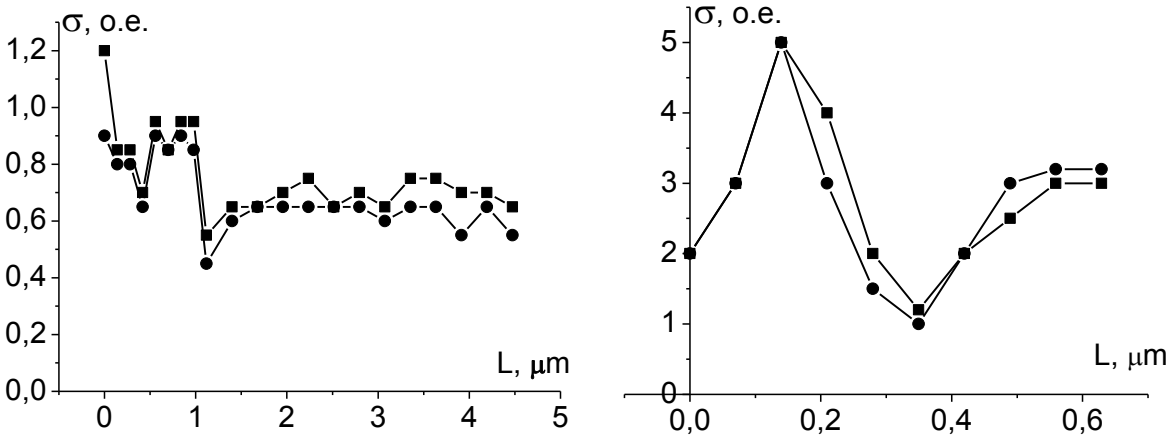


г) 4H-SiC намунасида борнинг 1250°C диффузиядан кейинги N_B тақсимоти

3-расм. SiC кристалларида киришма борнинг тақсимоти

Ўлчашлардан маьлум бўлдики, 500 ва 700ºС да куйдирилганда тузилманинг хоссалари сезиларли даражада яхшиланди. Барча Шоттки барьерлари ВАХси ночизиқли бўлиши учун 500ºС температура ҳам етарли бўлди. Бунингдек паст куйиш температураси дефектларни куйдириш етарлича юқори температураларда содир бўлган кремний карбиди материалида биринчи марта кузатилди. Чамаси бу дефектлар ва дефектлар

комплексининг 1150÷1250ºС температураларда шаклланганлиги билан боғликдир. 700ºС да куйдириш эса Шоттки барьерлари хоссаларининг янада яхшиланишига олиб келди.



4-расм. 1-усул билан алюминий легирланган SiC намуналарида солиштирма ўтказувчанликнинг чуқурлик бўйича тақсимоти

Навбатдаги 900ºС да кристалларни куйдириш (дефектлар шаклланиш температурасига яқин)дан барьерлар хоссасининг сезиларли яхшиланишига олиб келиши кутилган эди. Аммо 900ºС да куйдириш киришма борнинг нотекис тақсимланишига ва хоссаларининг ёмонлашувига олиб келди. Шунингдек, кўрсатилган температура кремний карбидидаги одатий диффузия жараёнлари учун етарли эмас, хоссаларининг ўзгариши, эҳтимол, термик диффузия натижасида кристалл сиртида борнинг қайта тақсимланишига боғликдир. Бу ҳақида куйдиришдан кейинги борнинг нотекис тақсимланиши – термик диффузия профилнинг текисланишига олиб келиши ҳам маьлумот беради. Умуман олганда, 900ºС да эса киришма борнинг сегрегацияси билан боғлиқ жараёнлар бошланади. Маълумки, сегрегация ҳодисаси киришмаларнинг қайта тақсимланишига, уларнинг тўда-тўда бўлиб тўпланишига, баъзида бошқа иккинчи фаза ҳосил бўлишига ҳам олиб келади.

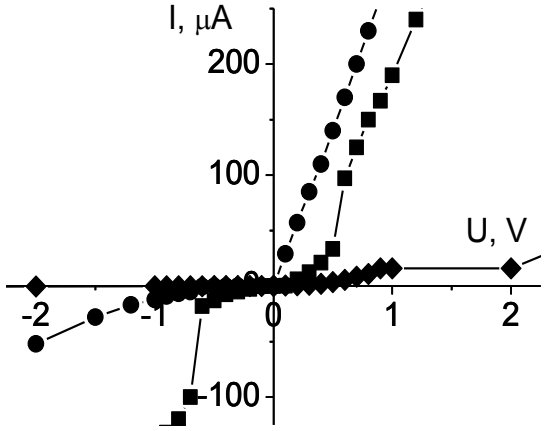
Диссертациянинг **«Паст ҳароратли диффузия усули билан олинган p-n-ўтишлар асосидаги диод тузилмаларини тадқиқ қилиш»** деб номланган тўртинчи бобида паст ҳароратли диффузия усули билан олинган p-n - ўтишлар асосидаги диод тузилмалар тадқиқ қилинган.

4.1 параграфда нисбатан ўсиш дефектлари концентрацияси кам бўлган SiC кристалларида паст ҳароратли диффузия усули билан олинган p-n ўтишнинг ВАХга куйдиришнинг таъсири кўриб ўтилган. Қуйида УБ нур таьсирида ва УБ нурсиз емирилган намуналарда олинган p-n ўтишлар ВАХга куйдиришнинг таъсири ҳақида таққосланган маълумотлар келтирилган. Намуналарда p-соҳанинг диаметри 2÷3 мм ни ташкил қилади.

УБ нурсиз емирилган кристалларда амалда 75% ВАХси чизиқли характерга эга (шунингдек, эксперимент SiC/SiC ва SiC/Si тузилмаларда ҳам). Ночизиқли характерга эга тузилмалар ВАХси тескари ўтиш кучланиши

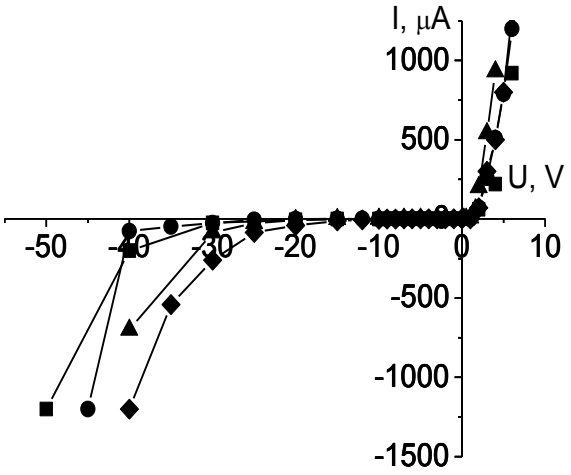
кичик бўлиб, ночизиқлилик коэффициенти 2 вольтда 4–10 га тенг бўлди. 500, 700 ва 900°С ларда куйдиришда ВАХси ёмонлашди ва кўпчиллик намуналарда ВАХ чизиқли характерга эга бўлди (5-расмга қаранг). Бошқа намуналарда, масалан ВАХси чизиқли тузилмаларда эса ночизиқлилик намоён бўлди, аммо ночизиқлилик даражаси жуда кичик 2-4 га тенг бўлди. Аммо, дастлабки сифат ва p-соҳанинг биржинслилиги шунчалик кичикки, куйдириш амалда вазиятни ўзгартирмайди.

Бу гипотезани текшириш учун калий гидрооксидининг 40% ли сувли эритмасида УБ ёруғлик таъсири билан нисбатан дефектларсиз соҳа олиш учун емирилди. Сўнг диффузия қилинди ва ВАХси ўлчанди. Легирланган p-соҳанинг диаметри 2÷3 мм. Тажрибалар кўрсатдики, амалда барча структуралар (80% дан юқори) ВАХси ночизиқли бўлиб, тескари ўтиш кучланиши 50 В гача ошди, ночизиқлилик коэффициенти 2 Вольтда 10^3–10^6 ни ташкил қилди. Кристалларни 500°С, 700°С и 900°С да куйдиришдан сўнг (6-расм) тузилмалар ВАХси хона ҳароратида амалда ўзгармади ва ўтишларнинг хоссалари барқарорлигини кўрсатди.



○– 1300ºС диффузиядан кейин ВАХ;
●– 500ºС да куйдиришдан кейинги ВАХ;
□– 700ºС да куйдиришдан кейинги ВАХ

5-расм. Куйдиришнинг p-n 4H-SiC ўтишлар ВАХ га таъсири



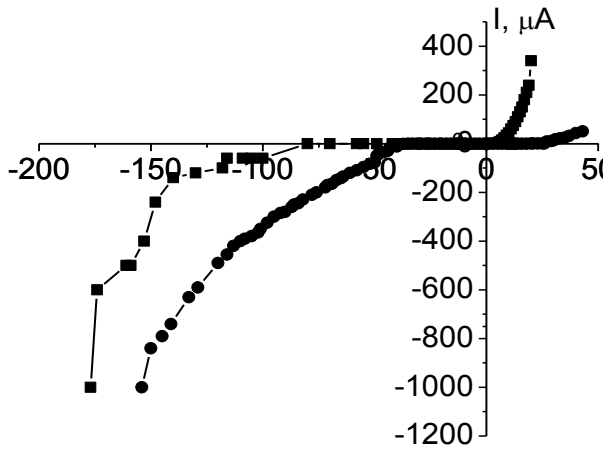
○– 1300ºС диффузиядан кейин ВАХ;
●– 500ºС да куйдиришдан кейинги ВАХ;
□– 700ºС да куйдиришдан кейинги ВАХ;
■– 900ºС да куйдиришдан кейинги ВАХ

6-расм. Куйдиришнинг УБ ишлов берилган намуналарда p-n 4H-SiC ўтишлар ВАХга таъсири

Шундай қилиб, паст ҳароратли диффузия юзадаги бузилган қатламидан тозаланган кристалларда бир мунча сифатли ва термик барқарор бўлган p-n ўтишлар олишга имкон беришини кўрсатди.

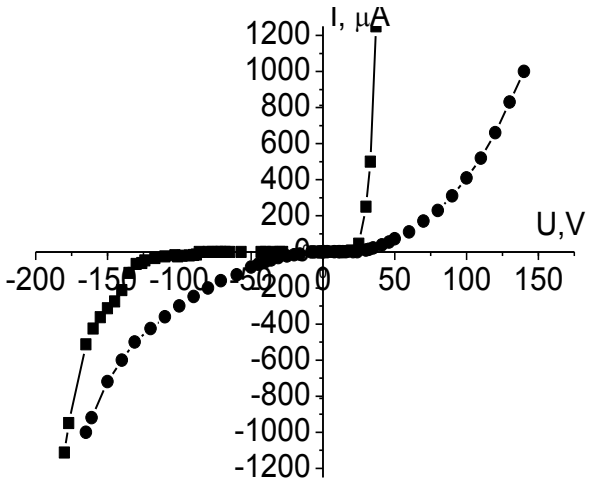
4.2 параграфда алюминий ва борнинг кремний карбидида паст ҳароратли диффузиясидан олинган диодларнинг вольт-ампер характеристикалари келтирилган. Тадқиқотлар алюминийнинг диффузиясида олинган p-n ўтишнинг тўғри ўтиш токи борнинг диффузиясида олинган ўтишнинг токига

нисбатан бир тартибга кичик (7- ва 8- расмга қаранг) бўлганлигини кўрсатди. Бу эса алюминийнинг диффузиясида ҳосил бўлган p-n ўтишда юқори қаршиликли оралиқ қават мавжудлиги ҳақида маълумот бериши мумкин. Таъкидлаш керакки, алюминийнинг диффузияси икки усул билан ўтказилди: 1. Алюминий атомлари манбаи вакуумда термик чанглатилган алюминий қатламини куйдириш йўли билан ҳосил қилинди. 2. Алюминий атомлари манбаи алюминий хлорид қатламини куйдириш йўли билан ҳосил қилинди. Иккинчи ҳолда юқори қаршиликли оралиқ қатламнинг қалинлиги кичик бўлиши кутилади. Иккинчи усул билан олинган намуналарда, тўғри ток нисбатан катта бўлди, аммо тескари ўтиш кучланишининг қиймати юқори бўлди (150–175 В гача). Ваҳоланки, биринчи усул билан олинган намуналарда 50 В гача кучланишда тескари ток бир неча тартибга кичик бўлди (7-расм). Бу ҳам юқори омий қатлам ёки оралиқ оксид қатлам мавжудлиги ҳақида маълумот беради.



• –1-усул билан тайёрланган ўтиш;
°–2- усул билан тайёрланган ўтиш.

7-расм. Паст ҳароратли диффузия билан 1150–1250°С да тайёрланган p-n ўтишлар ВАХси



•–1-усул билан тайёрланган ўтиш;
°–2- усул билан тайёрланган ўтиш.

8-расм. УБ нур ёрдамида емириб шакллантирилган p-n ўтишли меза-тузилмалари ВАХи

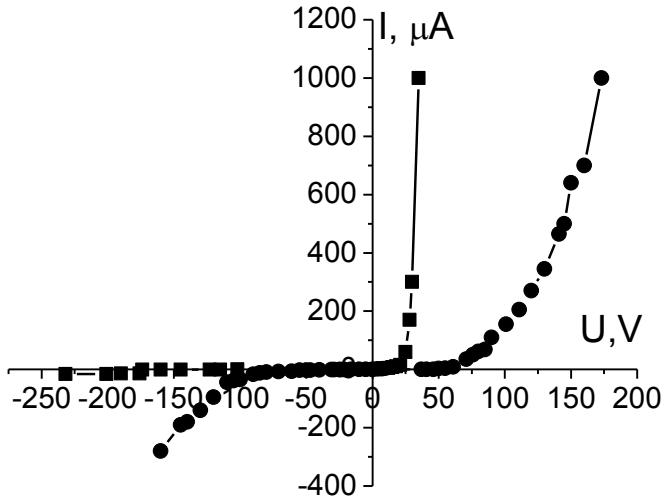
Тескари ўтиш токларини камайтириш ва тескари ўтиш кучланишини ошириш учун синалган усул меза-тузилма ҳосил қилишидир. Ушбу ҳолатда агар тескари ўтиш сирт ҳолатлари ва дефектлари билан ўзаро боғланган бўлса, меза-тузилма шакллантиришдан сўнг ток бир тартибга (чегараларининг чизиқли ўлчамининг камайиши сабабли) ёки бир неча тартибга (юзадаги дефектлар ҳисобига пайдо бўладиган оқиб ўтиш йўлларини бартараф этиш сабабли) камаяди.

8-расмдан кўринадики, меза-тузилма шакллантирилгандан кейин амалда тескари ток ва тескари ўтиш кучланиши ўзгармади. Кичик тескари ўтиш кучланиши 5÷80 В ва катта ўтиш токига эга бўлган структуралар учун меза-

тузилма шаклланиши ўтиш токининг бир тартибга камайишига, тескари ўтиш кучланиши 100÷120 В гача етишига олиб келди. Бу характеристикаларнинг чегаравий қийматлари алюминий оксиди қатламининг таёрланиш йўли ва кристаллни емириш технологиясига боғлиқлиги кузатилмади. Тадқиқотларда намуналарда тескари ўтиш кучланишининг чегаравий қиймати кристаллнинг p-n соҳасидаги дефектлар билан боғлиқлиги аниқланади.

Ушбу фаразни текшириш учун қуйидаги тажрибани ўтказдик. Маьлумки, тескари ўтиш кучланишини ошириш йўлларидан бири тузилманинг юзасида SiO, SiO_2 қатлами ҳосил қилиб, пассивлашдир. Шу мақсадда тузилмани ҳавода паст ҳароратли 500°C да 10 соат давомида куйдирилди. Куйдиришдан сўнг биринчи усул билан тайёрланган диодлар параметрлари амалда ўзгармай қолди. Иккинчи усул билан тайёрланган диоднинг характеристикалари эса яхшиланди (9-расмга қаранг). Аммо тескари ўтиш кучланиши катталиги 300 В дан юқори бўлмади.

Шундай қилиб, оксид қатлами билан пассивлаш ва меза-тузилма шакллантириш орқали намунанинг характеристикаси бир мунча яхшиланди деб айта оламиз. Бироқ, тескари ўтиш кучланишининг сезиларли даражада ошишини (масалан 1000 В гача) кристалл ҳажмидаги p- ва n- соҳадаги дефектлар чегаралайди.



●–1-усул билан тайёрланган ўтиш;
°–2- усул билан тайёрланган ўтиш.

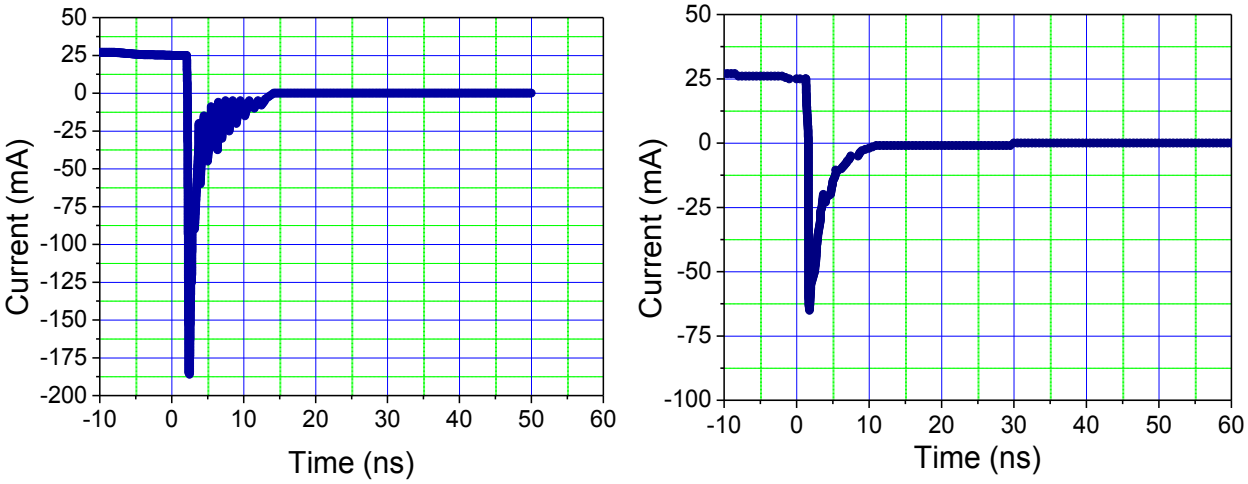
9-расм. 4H-SiC p-n ўтишларнинг 500°Сда 10 соат юзани пассивлашдан кейинги ВАХси

4.3 ва 4.4 параграфларда структураларни тадқиқ қилиш учун импеданс спектроскопия методи-дан фойдаланиб кремний карби-дида бор ва алюминий паст ҳаро-ратли диффузияси асосида олин-ган структураларнинг эквива-лент схемаси чизилган ва структуралар параметрлари баҳоланган. Баҳоланган асосий бўлмаган ток ташувчиларнинг яшаш вақти давомийлиги тажрибада олинган токнинг ўчирилиш вақтидан ҳисобланган маьлумот-ларга мос келади.

4.5. параграфда SiC диодларининг қайта уланиш вақтлари ва температуравий тескари ўтиш кучланишининг температурага боғлиқлиги келтирилган. Кремний карбиди диодларининг афзаллиги юқори температураларда ҳам ишлай олиш қобилияти ва қайта уланиш токининг кичиклиги ёки токининг тескари тикланиш давомийлиги кичиклиги билан белгиланади. Маълумки, бу эффектнинг натижасида юқори частоталарда ток-ларни ўзгартиришда кремний диодларининг ФИК и 70% гача тушиб кетади, карбид кремний диодларида 800 кГц гача самарали

ўзгаришсиз қолади. Шунингдек, температура ошиши билан кремний диодларида токнинг тескари тикланиши давомийлиги ўсиб боради (50 нс дан 120 нс гача) ва шунга мос заряд исрофи ҳам ўсади.

4.5 параграфда диодларнинг қайта уланиш вақти ва тескари ўтиш кучланишининг температурага боғлиқлигига оид ўлчашлар натижалари келтирилган. 10-расмда 4*H*-SiC<B> ва 4*H*-SiC<Al> асосидаги диодларнинг қайта уланиш токнинг осциллограммаси келтирилган. Ўлчашлар махсус импульсли стендида ОКБ ООО Фотон ва «Яримўтказгичли кристалларни ўстириш» лабораториясида ўтказилди. 10-расмдан кўринадики, диодлар жуда кичик қайта уланиш вақтига ва токининг тескари тикланиш давомийлигига эга (10 нс дан кичик). Катталикнинг қиймати адабиётларда келтирилган маълумотлардан 3 баробаргача кичик (20-30 нс).



а) 4H-SiC<B> б) 4H-SiC<Al>

10-расм. Диод токининг қайта уланиш вақти осциллограммаси

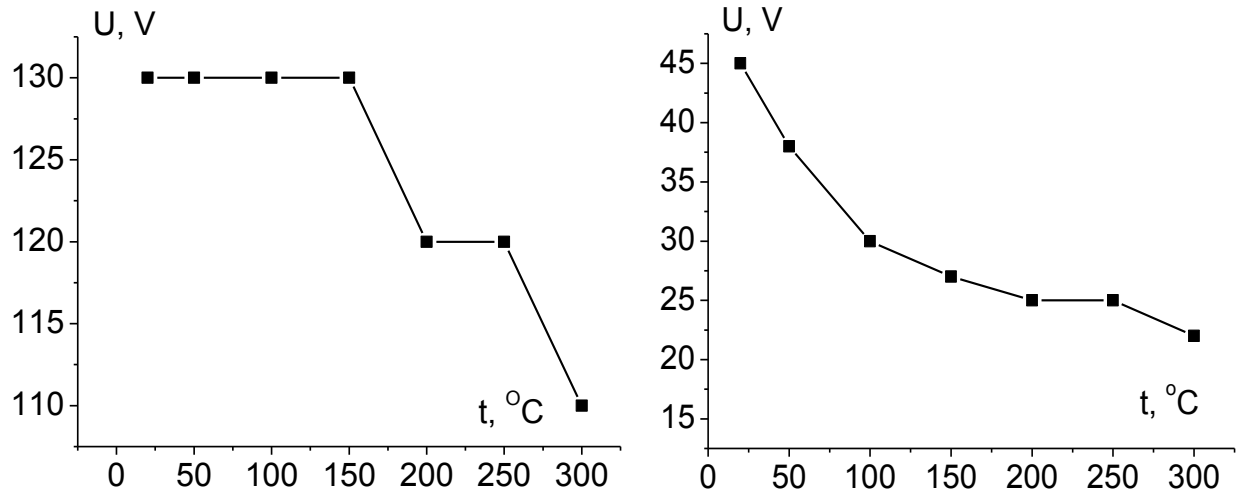
Агар ўтиш жараёни ўтишнинг сиғими (сиғим эффектлар) билан аниқланса[1], бу вақт $t_r \sim \sqrt{RC}$ га пропорционал бўлади, бу ерда R –базанинг қаршилиги ва C–ўтишнинг сиғими, унда релаксация вақти бир наносекунддан кам бўлади. Бироқ адабиётларда номувозанатли ток ташувчиларнинг ўтиш жараёнлари кремний карбидида тузоқ сатҳлари (EK_2 (E_c– 0,16эВ)) билан аниқланиши кўрсатилган.[2] Ушбу сатҳ азот донор киришмаси ҳосил қилиши қайд этилган, кузатилаётган концентрация профили кремний карбиди диодида азотнинг фон киришма сифатида диффузияси билан боғлиқдир.

Ушбу кичик қайта уланиш вақти бизнинг намуналарда бундай марказлар (тақиқланган соҳа ўрталари яқинидаги тузоқ марказлари) нисбатан камлиги сабаб, деб айтиш мумкин. Одатий диффузия ~2000÷2200°C ҳароратда, бизнинг технологияда диффузия ҳарорати эса 1150÷1300°C. Диффузия ҳарорати

[1] П.А. Иванов, И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, О.И. Коньков, А.С. Потапов. Т.П. Самсонова, О.Ю. Серебренникова. Высоковольтные (3,3кВ) JBS-диоды на основе 4H-SiC.ФТП, 2011, вып.5, с.677–681.
[2] Кузнецов Н.И., Edmond J.A. Влияние глубоких уровней на релаксацию тока в 6H SiC диодах. *ФТП,* 1997, вып.31, с.1220–1224.

пастлиги учун тузоқлар концентрацияси (азотга хос) нисбатан кам ва натижада ишлаб чиқилган диод тузилмаларда тез қайта уланиш кузатилади.

Ўлчанган қайта уланиш вақтининг катталиги асосий бўлмаган ток ташувчиларнинг яшаш вақтига (10–20 нс) яқин (диффузия сиғими орқали аниқланган). Баҳолашлар солиштирма қаршилик 90–130 Ом·м да максвелл релаксация вақти 5–7 нс ни ($\tau_\mu = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\sigma}$, $\varepsilon\varepsilon_0$–яримўтказгичнинг диэлектрик сингдирувчанлиги, σ–яримўтказгичнинг ўтказувчанлиги) ташкил қилишини кўрсатади.



а) 4H-SiC<B>

б) 4H-SiC<Al>

11-расм. Тескари ўтиш кучланишининг температурага боғлиқлиги (I_R =100 мА)

Шундай қилиб, баҳоланган RC релаксация вақти, асосий бўлмаган ток ташувчиларнинг яшаш вақти, максвелл релаксация вақти олинган экспериментал маълумотларга мос келади.

11-расмда тескари ўтиш кучланишининг U(I_R =100 мА) ҳароратга боғлиқлиги келтирилган. Расмдан кўринадики, ҳарорат 300°С гача ўсиб боришига қарамай, диодлар тўғрилаш хоссасига эга.

Шундай қилиб, ишлаб чиқилган диод токнинг кичик қайта уланиш вақтига ва тескари тикланиш вақтининг кичик давомийлигига эга (10 нс дан кичик) ва 300°С гача ҳароратда ишлай олади.

ХУЛОСА

Si ва C вакансиялари оқимида бор ва алюминийнинг кремний карбидига паст ҳароратли диффузиясини ўрганиш натижалари асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Кремний карбиди намуналарида киришманинг тақсимланишини тушунтириб берадиган диффузия модели таклиф қилинган, унга кўра киришмаларнинг диффузияси вакансиялар майдонида амалга ошиши тушунтирилган.

2. Ўсиш дефектлари камайиши билан тескари ўтиш кучланишини 5 В дан 40 В гача ошиши, дислокациялар ва микроқувурчалар концентрациясининг ортиши тескари ўтиш кучланишининг камайишига олиб келиши аниқланган.

3. Илк бор кремний карбиди сиртини КОН нинг сувли эритмасида ультрабинафша нури таъсирида емириш усули ишлаб чиқилган ва бунда емириш тезлиги 1 мкм/соатига етган.

4. Экспериментал йўл билан киришма борнинг диффузия коэффициенти 1150÷1250°C температура оралиғида $D_B \sim 4\cdot10^{-11} - 6\cdot10^{-10}$ $см^2$/сек; борнинг диффузия активлаш энергияси, $\varepsilon_a \approx$ 0.8-1.3 eV ташкил этиши ва кристалдаги ўсиш дефектларига боғлиқ бўлмаслиги тажрибада аниқланган.

5. Илк бор алюминийнинг кремний карбидига паст ҳароратли диффузияси кристалл юзасида икки усул билан тайёрланган алюминий оксиди қатламдан ўтказилган: вакуумда намунага термик чанглатилган алюминий қатлами 650°C да қиздириб ҳосил қилинган; кремний карбиди намунасининг юзасига сурилган алюминий хлоридидан 600÷700°C да синтез қилинган.

6. Вакуумда 600-800°C да термик ишлов Шоттки барьерлари характеристикасининг яхшиланишига олиб келиши, 900°C температурада ишлов бериш эса барьерлар хоссаларининг сегрегация жараёнлари сабабли ёмонлашиши кўрсатилган.

7. Юзадаги бузилган қатламидан тозаланган кристалларда паст ҳароратли диффузия усули билан бир мунча сифатли ва термик барқарор бўлган p-n ўтишлар олиш мумкинлиги кўрсатилган.

8. Илк бор паст хароратли диффузия усули билан 300°C гача ҳароратда ишлай оладиган, токининг қайта уланиш вақти ва тескари тикланиш вақтининг давомийлиги жуда кичик (10 нс дан кичик) бўлган кремний карбиди диоди ишлаб чиқилган.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM./T.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ, ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЖУРАЕВ ХИММАТАЛИ НОМОЗОВИЧ

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИФФУЗИЯ БОРА И АЛЮМИНИЯ В КАРБИД КРЕМНИЯ В ПОТОКЕ Si- И C- ВАКАНСИЙ

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент-2017

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.1.PhD/FM34

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз.

Автореферат диссертации на двух языках (узбекский, русский) размещен на веб-странице по адресу fti-kengash.uz и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyonet.uz.

Научный руководитель:	**Атабаев Илхам Гафурович** доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Камалов Амангелди Базарбаевич** доктор физико-математических наук
	Парчинский Павел Борисович кандидат физико-математических наук, доцент
Ведущая организация:	**Ташкентский государственный технический университет**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2017 года в ____ часов на заседании Научного совета 27.06.2017. FM./T.34.01 при Физико-техническом институте. Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 2б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235-30-41; e-mail: lutp@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ___). Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 2б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2017 г.
(протокол рассылки №_____ от «__» _____ 2017 г.)

С.Л. Лутпуллаев
Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

А.В. Каримов
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

С.А. Бахрамов
Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире, в одном из быстро развивающихся областей физики полупроводников по разработке силовой электроники, ядерных детекторов и ультрафиолетовых светодиодов специального применения, усовершенствованию легирования карбида кремния мелкими примесями уделяется большое внимание. В связи с этим разработка механизмов низкотемпературного легирования, оценка влияния параметров кристалла на процессы диффузии, а также повышение качества диодных структур изготовленных низкотемпературной диффузией становится важной задачей.

В годы независимости в нашей Республике уделяется особое внимание развитию области физики полупроводников, в частности, созданию полупроводниковых приборов на основе карбида кремния и изучению их физических свойств. В этом плане в области низкотемпературной диффузии примесей в карбид кремния и создания диодных структур методом низкотемпературной диффузии и их исследования достигнуты весомые результаты. В рамках Стратегии действий дальнейшего Развития Республики Узбекистан, содействие научно-исследовательской и инновационной деятельности и реализация получаемых инновационных научных достижений в нашей стране, в частности разработки полупроводниковых приборов на основе карбида кремния и исследование путей повышения их качества имеет большое значение.

В настоящее время во многих научных центрах мира получены эпитаксиальные SiC/Si структуры. Так температура плавления кремниевой подложки 1420ºС для таких структур невозможно использовать обычную высокотемпературную диффузию. Поэтому технология низкотемпературной диффузии может найти широкое применение в будущем. Для снижения температуры диффузии создаются неравновесные условия (поток вакансий от поверхности в объем), диффузия примесей проходит по другим новым механизмам. Таким образом, полученные в данной работе экспериментальные результаты представляют интерес не только с практической точки зрения, но и для фундаментальных исследований.

Настоящая диссертация в определенной степени соответствует зада-чам, указанных в Указе Президента Республики Узбекистан ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Респу-блики Узбекистан», Постановление Президента Республики Узбекистан ПК-№2772 от 13 февраля 2017 года «О приоритетных направлениях развития электронной промышленности 2017-2021 годах» и ПП-№2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также другим нормативно-правым документам, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Диссертация выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики

Узбекистан III. «Энергетика, энергоресурс сбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Как известно из литературы, метод низкотемпературной диффузии примесей в карбид кремния является довольно перспективным способом легирования. Из-за использования низких температур на поверхности кристалла не происходит распада поверхности SiC. Наибольшее снижение температуры легирования до 900°C достигнуто в работах российского ученого Н.Т. Баграева за счет использования сегрегационных процессов.[1] В работах узбекских ученых И.Г. Атабаева, Т.М. Салиева, американского исследователя Chin-Che Tin показано, что диффузия в условиях поверхностного окисления приводит к снижению температуры диффузии до 1150÷1300°C.[2]

Однако, результаты низкотемпературной диффузии сильно зависят от состояния поверхности кристалла, от характера ранее проведенных обработок и, зачастую, являются невоспроизводимыми. Ранее низкотемпературная диффузия была исследована в пластинчатых кристаллах SiC (Салиев Т.М., Атабаев И.Г.) с высокой концентрацией ростовых дефектов. Воспроизводимость процесса была порядка 20÷30%.

Так как диффузия проходит в потоке дефектов, то p-n переход содер-жит большое количество точечных электроактивных дефектов, которые надо удалить после изготовления диода. Низкотемпературная диффузия также сильно зависит от состояния поверхности, поэтому важное значение имеет разработка способа химической обработки карбида кремния, которое позволяло бы получать гладкую бездефектную поверхность. Таким образом, мало исследовано влияние ростовых дефектов на процесс низкотемпературной диффузии в карбиде кремния, не разработаны способы химической обработки кристаллов для получения гладкой зеркальной поверхности.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Работа выполнена в рамках научных исследований ФТИ АН РУз проектов № ДИДТ-А-13-034 «Разработка низкотемпературной технологии диффузии бора в карбид кремния для изготовления радиационно-стойких и температурно-устойчивых полупроводниковых приборов» 2006-2008 гг., № А15-Ф-103 «Разработка карбид кремниевых диодов, изготовленных методом низкотемпературной диффузии» 2009-2011 гг., № ФА-Ф2-Ф030+Ф096 «Исследование образования точечных дефектов и кластеров, а также их влияния на электрофизические, оптические свойства и радиационную стойкость объемных $Si_{1-x}Ge_x$, кристаллов и пленок SiC» 2007-2011 гг., Ф3-ФА-0-56434 «Физические закономерности формирования

[1]Bagraev N.T., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Sukhanov V.L., Zabrodskaya N.V., *Defect and Diffusion Forum*, 143-147, 1147(1997).

[2] C.C. Tin, S. Mendis, K. Chew, I. Atabaev, T. Saliev, E. Bakhranov, B. Atabaev, V. Adedeji, and Rusli, Oxide film assisted dopant diffusion in silicon carbide, *Thin Solid Films*, v.518, p.118-120, 2010.

тонко-пленочных структур и структур с нановключениями для солнечных элементов и полупроводниковых приборов» 2012-2016 гг.

Целью исследования является определение влияния ростовых дефектов, состояния поверхности на процесс низкотемпературной диффузии для повышения воспроизводимости и качества получаемых карбид-кремниевых p-n переходов.

Задачи исследования:

исследование низкотемпературной диффузии бора и алюминия в карбиде кремния (исследование профиля распределения примесей, влияния дефектов на процесс диффузии и т.д.), в кристаллах SiC выращенных PVT методом с относительно низкой концентрацией ростовых дефектов;

разработка метода травления карбида кремния, позволяющего создавать поверхность с достаточно низкой концентрацией поверхностных дефектов;

изготовление p-n переходов, исследование влияния температурных отжигов и формирования меза-структур на их ВАХ, изготовить SiC диоды.

Объектом исследования являются монокристаллические пластинки карбида кремния различного политипа 4H, 6H и 3C n-SiC, а также p-n переходы на их основе.

Предмет исследования являются процессы диффузии мелких примесей в потоке вакансий в карбиде кремния, влияние ростовых дефектов на свойства p-n переходов, полученных низкотемпературной диффузией.

Методы исследований. В работе использованы апробированные методы измерения вольтамперных, вольтемкостных характеристик, методики изохронного отжига, однозондовый метод измерения распределения удельного сопротивления и другие, морфологические исследования проводились с помощью интерференционного микроскопа.

Научная новизна работы заключается в следующем:

получены p-n переходы на основе монокристаллов карбида кремния методом низкотемпературной диффузии алюминия (впервые) и бора, исследованы их электрофизические характеристики;

впервые разработана технология травления поверхности карбида кремния в водном растворе КОН стимулированная ультрафиолетовым излучением;

определены профили распределения примесей (B и Al) однозондовым методом растекания тока после низкотемпературной диффузии;

впервые методом низкотемпературной диффузии изготовлен диод, способный работать до температуры 300°C с малым временем переключения и длительностью обратного восстановления тока (менее 10 нс).

Практические результаты исследования низкотемпературной диффузии бора и алюминия в карбид кремния в потоке Si- и C- вакансий заключаются в том, что разработанные способы фотостимулированных травлений и низкотемпературной диффузии мелких примесей могут быть использованы для изготовления p-n и p-i-n диодных структур на основе карбида кремния.

Достоверность результатов исследований обеспечивается применением апробированных методик измерения, использованием приборов с высоким классом точности. Для обработки экспериментальных результатов использованы апробированные программы, включая Origin 6.0, которая на основе статистической обработки данных вычисляет коэффициенты корреляции, величину корреляции χ^2-квадрати др. Полученные результаты не противоречат существующим физическим теориям и подходам.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

В результате исследований объяснено влияние ростовых дефектов, термоотжига и пассивации на диффузию мелких примесей в карбиде кремния и свойства p-n переходов. Предложен новый механизм диффузии. Экспериментальные данные по характеристикам диффузии могут быть использованы для создания моделей диффузии в полупроводниковых соединениях.

Технология низкотемпературной диффузии и метод фотостимулированного травления может быть использован при изготовления силовых диодов, высоковольтных транзисторов, УФ датчиков и других электронных приборов.

Внедрение результатов исследования. На основе изучения низкотемпературной диффузии бора и алюминия в карбид кремния в потоке кремниевых и углеродных вакансий разработаны:

способ травления карбида кремния в водном растворе КОН при стимуляции ультрафиолетовым светом. (Получен патент на изобретение «Способ травления карбида кремния», Патент РУз. № IAP 05087, 30.09.2015 г.). Способ предназначен для получения зеркально-гладкой травленной поверхности SiC и изготовления меза-структур;

новый лавинно-пролетный p-i-n SiC диод изготовленный методом низкотемпературной диффузии бора и алюминия (Каталог IX Республиканской ярмарки инновационных идей, технологий и проектов «Лавинно-пролетный p-i-n SiC диод» 2016 г.). Разработанный диод отличается от традиционных диодов быстродействием и способностью при температуре вплоть до 300°C.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 10 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 26 научных труда, из них 8 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 120 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность проведённых исследований, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены степень изученности проблемы, сформулированы её цель и задача, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе «**Обзор литературы**» рассмотрены и анализируются особенности диффузии в SiC, особенности изготовления диодов различными методами. Описаны методы термической диффузии примесей в SiC. Приведены данные по влиянию точечных дефектов на процесс диффузии мелких примесей в карбиде кремния, описано влияние линейных дефектов и микротрубок на свойства диодов. Сформулированы задачи диссертации.

Во второй главе «**Исследование влияния дефектного слоя на низкотемпературную диффузию в карбиде кремния**» исследована низкотемпературная диффузия в карбиде кремния в SiC кристаллах с различным содержанием ростовых дефектов. Высказано предположение, что в наших экспериментах диффузия бора связана с потоком вакансий от поверхности в объем; при этом в приповерхностной области кристалла создается очень большая неравновесная концентрация вакансий углерода и кремния. Перемещение атомов диффузанта в этой области, скорее всего, происходит через подвижные ассоциаты (B_c-V_c) и (B_{si}-V_{si}).

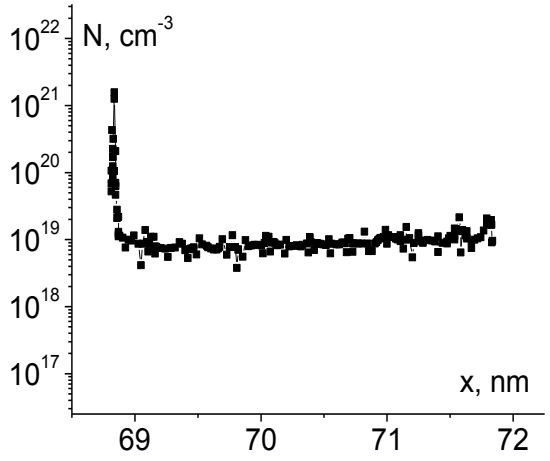
Исследованы экспериментальные распределения бора после неравновесной диффузии примесей в карбиде кремния. Распределение бора в SiC образцах было измерено методом растекания тока. В этом методе образец полируется алмазной пастой под углом 1-3 градуса к поверхности SiC пленки. Затем измеряется распределение удельного сопротивления вдоль поверхности SiC пленки для определения концентрационного профиля бора, $N_B(x)$.

Предложена модель диффузии, качественно объясняющая распределение примеси в образцах карбида кремния. В этой модели предполагается, что распределение примеси определяется распределением вакансий, в поле которых происходит диффузия.

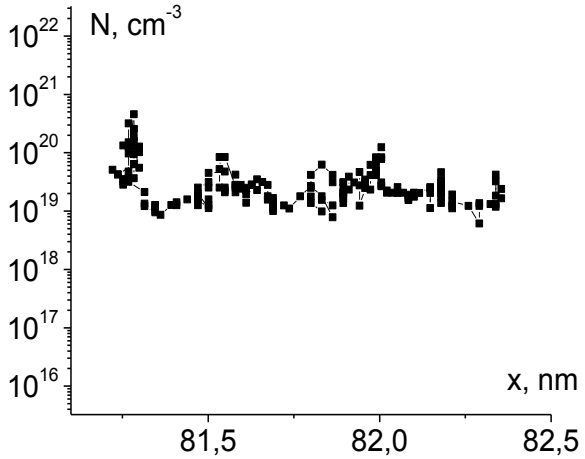
Исследовано влияние дефектного слоя на процесс диффузии и характеристики переходов**.** Показано, что в образцах с относительно низким содержанием ростовых дефектов напряжение пробоя переходов после травления увеличивается с 5 до 30-40 В. Однако основным ограничивающим фактором является наличие дислокаций и микротрубок. Выявлено, что для повышения качества и воспроизводимости процесса диффузии необходима разработка способа удаления поверхностного нарушенного слоя.

Исследована растворимость и распределения примеси в легированных слоях по ВЕХ барьеров Шоттки (Рис 1.). Установлено, что растворимость

примеси бора в легированных кристаллах достигает 10^{19}-10^{21} $см^{-3}$, причем в 3C-SiC образцах обнаружено квазипериодическое распределение примеси бора. Возможно, это связано с взаимодействием диффундирующей примеси и точечных дефектов при их высокой концентрации и возникновением синергетических процессов при диффузии.



а) Распределение бора в образце 3C SiC<B>

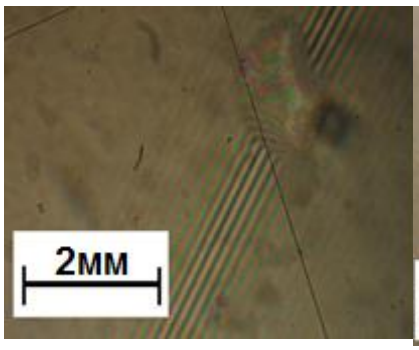


б) Квазипериодическое распределение бора в образце 3C SiC<B>

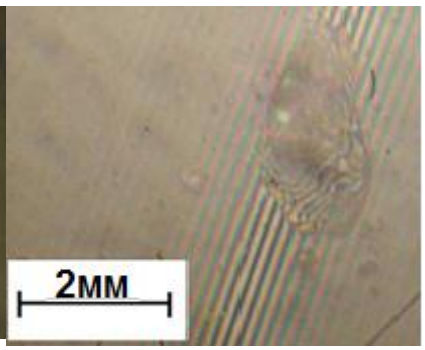
Рис 1. Распределение примеси бора в тонком приповерхностном слое карбида кремния

Разработан метод травления карбида кремния в водном растворе КОН при стимуляции ультрафиолетовым светом.[1] Показано, что в этом случае скорость травления достигает 1 мкм/час. На рис. 2 приведены фотографии поверхности 4H-SiC до и после травления.

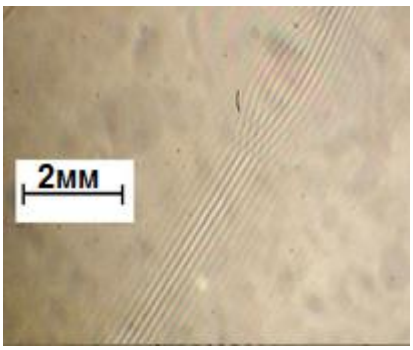
Описана также методика измерений и их обработки, приведены параметры исследованных образцов.



а) поверхность SiC перед травлением



б) после травлении в течение 5-6 часов (перед диффузией)

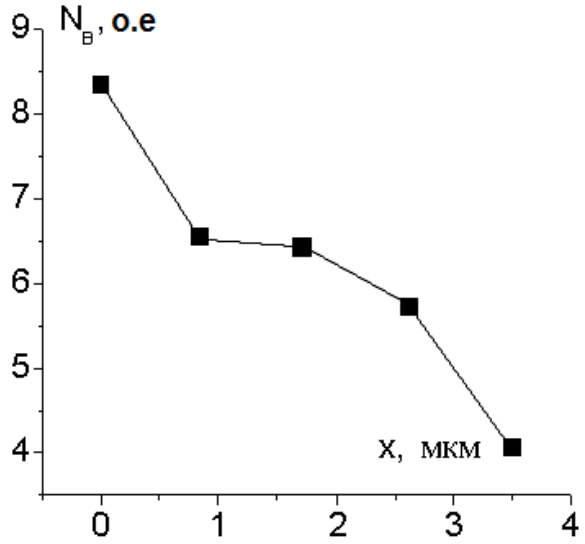


в) после вторичного травления в течение 5 часов для образования меза-структуры

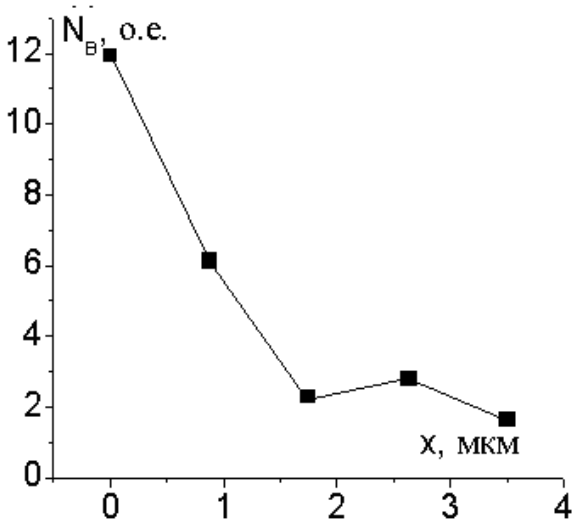
Рис. 2. Фото поверхности 4H-SiC с 3D дефектом, снятым интерференционным микроскопом

[1]Атабаев И.Г., Чин-Че Тин (Chin-Che Tin), Атабаев Б.Г., Лутпуллаев С.Л., Жураев Х.Н. Способ травления карбида кремния, Патент РУз. № IAP 05087, 05.08.2015 г.

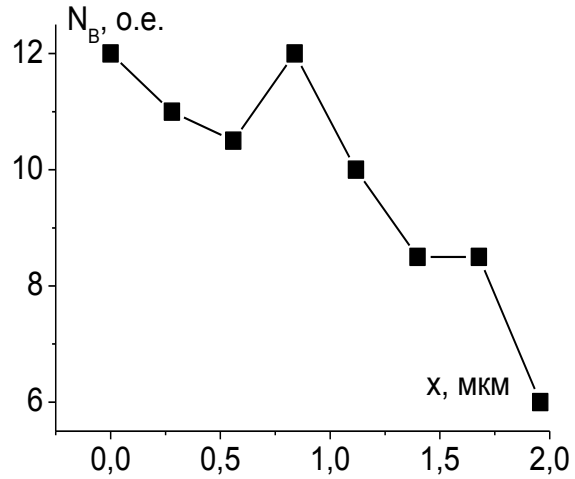
В главе 3 «**Исследование низкотемпературной диффузии бора и алюминия в образцах с относительно низкой концентрацией ростовых дефектов**» исследованы профили распределения B при низкотемпературной диффузии в кристаллах с относительно низкой концентрацией структурных дефектов. Диффузия бора в 3C-SiC в потоке вакансий углерода и кремния проводилась при различных температурах от 1100÷1250ºC. Тонкая боросиликатная пленка на поверхности SiC была использована в качестве источника атомов бора для диффузии. Диффузия проводилась на воздухе для создания потока вакансий от поверхности образца в объем кристалла.



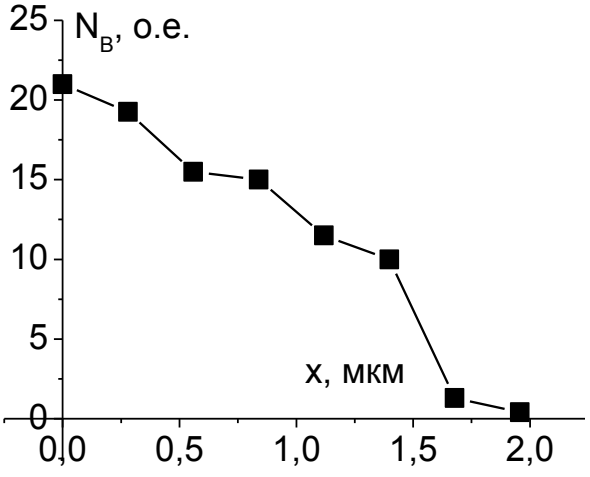
а) Распределение бора N_B после диффузии в неравновесных условиях при 1150°C (3C-SiC)



б) Распределение бора N_B после диффузии в неравновесных условиях при 1200°C (6H-SiC)



в) Распределение N_B в 4H-SiC кристалле после диффузии при 1200°C



г) Распределение N_B в 4H-SiC кристалле после диффузии при 1250°C

Рис. 3. Распределение бора в SiC

На основе экспериментальных данных показанных на рис. 3, были проведены оценки параметров диффузии бора: $D_B \sim 4 \cdot 10^{-11}$–$6 \cdot 10^{-10}$ см^2/сек в температурном интервале 1150÷1250ºC; энергия активации диффузии бора, $\varepsilon_a \approx$ 0.8-1.3 эВ. Такая низкая величина энергии активации, обычно, типична

для междоузельного механизма диффузии в полупроводниках. Установлено, что эти характеристики слабо зависят от ростовых дефектов в кристаллах.

Исследованы также ВАХ p-n переходов, изготовленных путем низкотемпературной диффузии алюминия в карбид кремния. В работе[1] в качестве источника атомов бора для диффузии использовался слой боросиликатного стекла, создаваемого синтезом при 650°С. В нашем случае, в качестве источника атомов алюминия для диффузии на поверхности образцов создавался слой окиси алюминия, который, как нами полагалось, взаимодействовал при высоких температурах со слоем окиси кремния на поверхности кристалла и являлся источником атомов алюминия для диффузии. Этот слой окиси алюминия создавался двумя методами: 1) при 650°С производилось окисление пленки алюминия, термически напыленного на образец в вакууме; 2) синтез при 600-700°С из хлористого алюминия, нанесенного на поверхность кристалла карбида кремния.

Исследования распределения удельного сопротивления по глубине диффузии показали, что по-видимому в образце имеются окисные островки различной толщины (рис. 4).

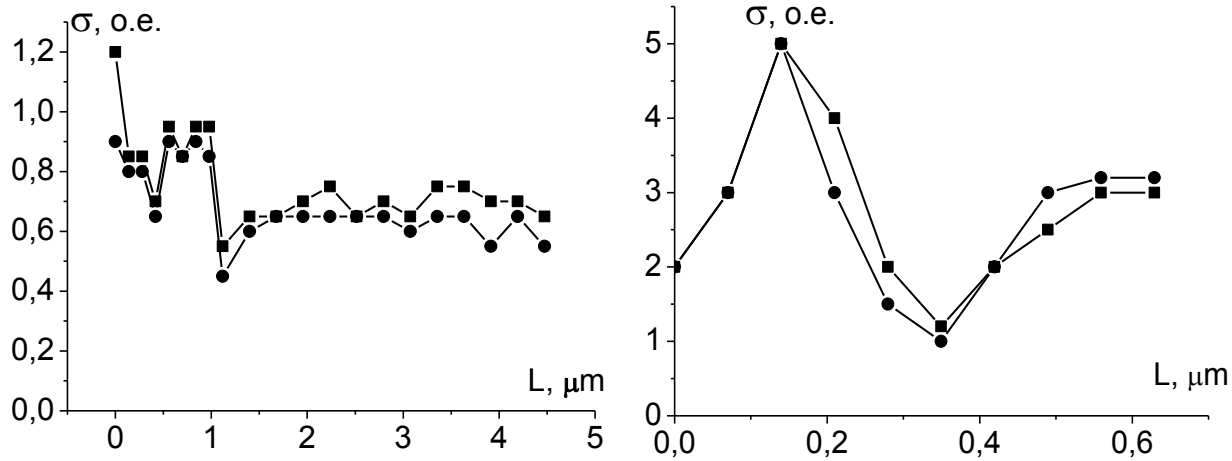


Рис. 4. Профиль распределения удельной проводимости в образцах легированных алюминием методом 1

Очевидно, что для устранения дефектов введенных в процессе диффузии может применяться термический отжиг. Однако необходимо оценить температурный интервал проведения отжига. Так как температура диффузии составляла 1150÷1250ºС нами был выбран температурный диапазон 500, 700, 900ºС. По данным электролюминесценции отжиг уже при 500ºС начинает уменьшать концентрацию дефектов.

Так как при низкотемпературной диффузии в потоке вакансий в образец вводятся дефекты, характеристики приборных структур хуже, чем для структур изготовленных обычной технологией. В связи с этим, возможности применения этой технологии, в значительной степени, связаны с

[1] Atabaev I.G., Saliev T.M., Bakhranov E.N., Saidov D., Juraev Kh., Tin C.C., Adedeji V., Atabaev B.G., Saidkhanova N.G. Nonequilibrium Diffusion of Boron in SiC at low temperatures. *Material Science and Applications*, 2010, No. 2, p. 53-58.

возможностью отжига дефектов. В связи с этим, нами проведен отжиг образцов в вакууме при температурах 500, 700, 900 ºС в течении 15 минут. Затем на поверхности легированных слоев создавались барьеры Шоттки Ni-SiC-Ni и измерялись их характеристики.

Измерения показали, что отжиг при 500 и 700ºС приводит к значительному улучшению свойств. Даже температуры 500ºС достаточно, что бы ВАХ всех барьеров Шоттки становилась нелинейной. Столь низкая температура отжига пожалуй, впервые наблюдается для карбида кремния – материала, отжиг дефектов которого происходит при достаточно высоких температурах. Видимо, это связано с тем, что дефекты и дефектные комплексы были сформированы при температурах 1150–1250ºС. Отжиг при 700ºС приводит к дальнейшему улучшению свойств барьеров Шоттки.

Следовало бы ожидать, что отжиг кристаллов при 900ºС (температуры уже близкой к температуре формирования дефектов) приведет к существенному улучшению свойств барьеров. Однако отжиг при 900ºС привел к ухудшению свойств и неоднородному распределению примеси бора. Так как указанная температура недостаточна для обычных диффузионных процессов в карбиде кремния, изменение свойств вряд ли связано с перераспределением бора у поверхности кристалла в результате термической диффузии. Об этом свидетельствует также то, что после отжига распределение бора становится неоднородным – термическая диффузия привела бы к сглаживанию профиля.

По всей видимости, это будет уточнено в дальнейших исследованиях, при 900ºС начинаются процессы связанные с сегрегацией примеси бора. Как известно, сегрегационные явления приводят к перераспределению примесей, к образованию их скоплений, а иногда даже к включениям второй фазы.

В четвертой главе «**Исследование диодных структур на основе p-n переходов, созданных методом низкотемпературной диффузии**» исследованы диодные структуры на основе p-n переходов, созданных методом низкотемпературной диффузии.

В параграфе 4.1 рассмотрено влияние отжига на ВАХ p-n переходов созданных низкотемпературной диффузией в кристаллах SiC с относительно низкой концентрацией дефектов. Ниже приведены сравнительные данные по влиянию отжига на ВАХ переходов, полученных на образцах с УФ травлением и без УФ травления. Диаметр p-области в образцах составлял около 2÷3 мм.

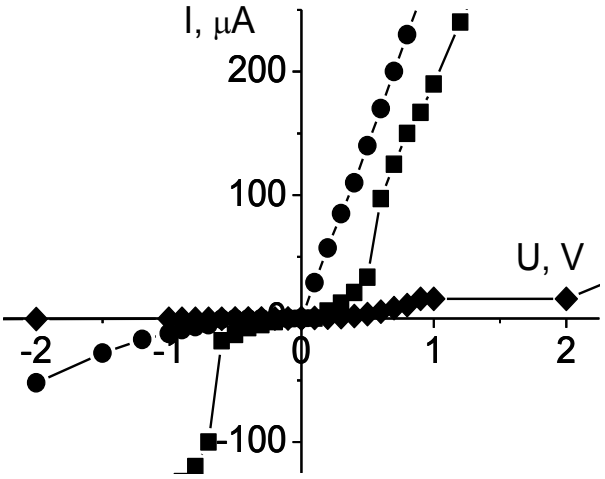
Для кристаллов без УФ травления до 75% образцов имели практически линейную ВАХ (также как и в экспериментах на SiC/SiC и SiC/Si структурах). Образцы с нелинейной ВАХ имели низкое напряжения пробоя, с коэффициент нелинейности 4–10 при 2 Вольтах. Отжиг при 500, 700 и далее при 900°С ухудшал ВАХ и для большинства образцов ВАХ становилась линейным (см. рис. 5).

В других образцах, например, с линейным ВАХ, появлялась нелинейность, но степень нелинейности была очень низкой 2–4. Однако

исходное качество и однородность p-областей настолько низкое, что отжиг практически не меняет ситуацию.

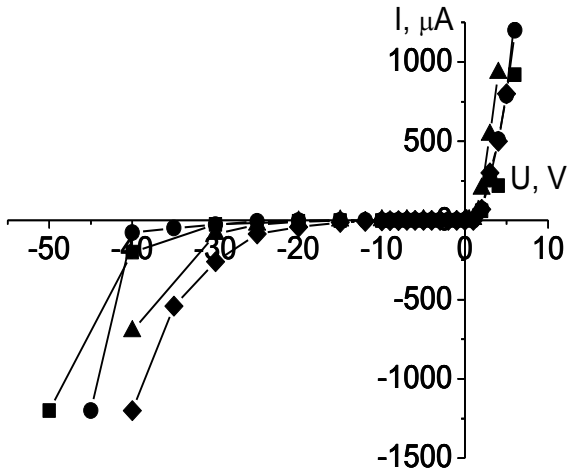
Для проверки этой гипотезы проведено травление с вращением и УФ подсветкой в КОН 40% для получения относительно бездефектных участков. Затем проведена диффузия и измерены ВАХ. Диаметр p-области около 2–3 мм. Как показал эксперимент практически все структуры (свыше 80%) имели нелинейную ВАХ, напряжение пробоя увеличилось до 50 В, коэффициент нелинейности при 2 В составил 10^3–10^6. Отжиг кристаллов при 500, 700°С и 900°С (рис. 6) показал, что ВАХ при комнатной температуре практически не изменился и свойства переходов стабильны.

Таким образом, показано, что низкотемпературная диффузия в кристаллы с удаленным поверхностным нарушенным слоем позволяет



○– ВАХ после диффузии при 1300ºС;
●– ВАХ после отжига при 500ºС;
□– ВАХ после отжига при 700ºС

Рис. 5. Влияние отжига на ВАХ p-n 4H-SiC переходов



○– ВАХ после диффузии при 1300ºС;
●– ВАХ после отжига при 500ºС;
□– ВАХ после отжига при 700ºС;
■– ВАХ после отжига при 900ºС.

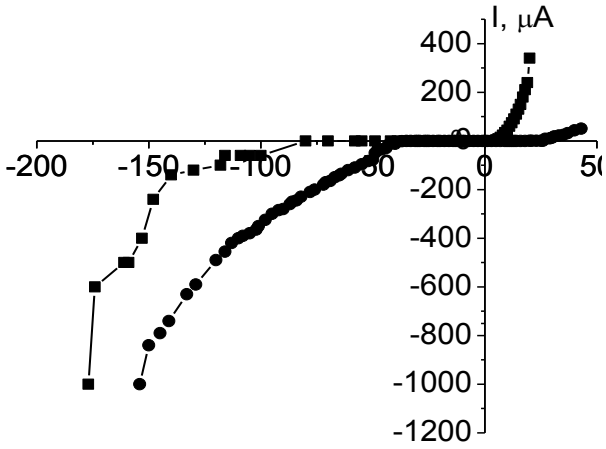
Рис. 6. Влияние отжига на ВАХ 4H-SiC образцов с УФ травлением

получить более качественные и термически стабильные p-n переходы.

В параграфе 4.2. приведены вольт-амперные характеристики диодов, полученных низкотемпературной диффузией алюминия и бора. Наши исследования показали, что p-n переходы, созданные диффузией алюминия, имели прямой ток более чем на порядок меньше чем переходы, созданные диффузией бора (см. рис. 7 и рис. 8). Это может свидетельствовать о наличии высокоомного промежуточного слоя в p-n переходе, созданном диффузией алюминия. Напомним, что диффузия алюминия проводилась двумя способами: 1. Источник атомов алюминия создавался путем отжига слоя алюминия напыленного в вакууме; 2. Источник атомов алюминия создавался путем отжига слоя хлорида алюминия. Во втором случае ожидалось, что толщина высокоомного промежуточного слоя будет меньше. Образцы,

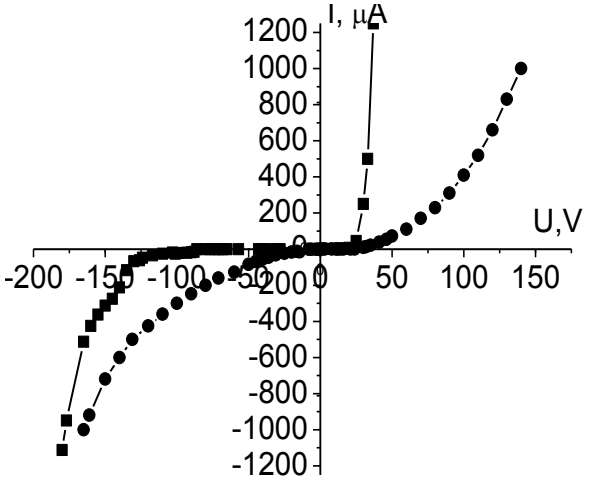
полученные методом 2, имели относительно большие прямые токи, однако величина обратного пробойного напряжения была выше (до 150-175 В). Тогда как в образцах, полученных методом 1, при напряжении до 50 В обратный ток был на несколько порядков меньше (рис. 7). Это также говорит о наличии высокоомного слоя или промежуточного окисного слоя.

Для снижения обратных токов и увеличения обратного пробойного напряжения апробированным методом является формирование меза-структуры. В этом случае, если пробой обусловлен поверхностными явлениями и дефектами, при формировании меза-структуры ток может уменьшиться в разы (из-за уменьшения линейных размеров границы) или даже на несколько порядков (из-за устранения поверхностных каналов утечки за счет дефектов).



●– изготовлен методом 1,
°– изготовлен методом 2

Рис. 7. ВАХ p-n переходов, изготовленных низкотемпературной диффузией при 1150÷1250°С



●– для перехода изготовленного методом 1,
°– изготовленного методом 2

Рис. 8. ВАХ p-n переходов, после формирования меза-структуры путем фото-стимулированного травления

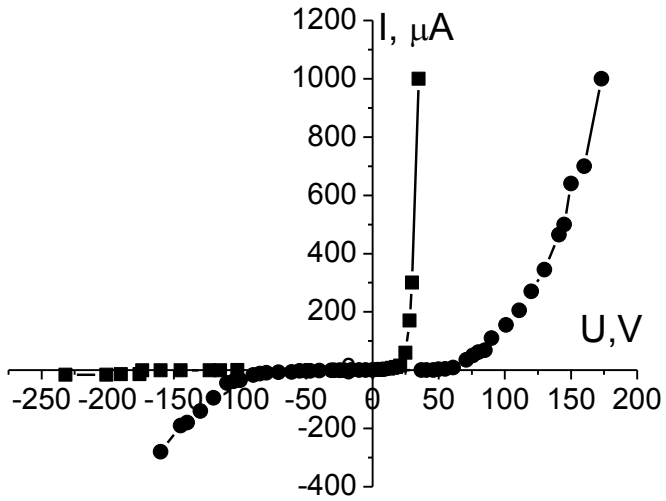
Как видно из рисунка 8, после формирования меза-структуры обратный ток и пробойные напряжения практически не меняются. Для структур, имевших низкое напряжение пробоя 5÷80 В и большие токи утечки, формирование меза-структуры позволяло уменьшить ток на порядок, а обратное пробойное напряжение довести до 100÷120 В. Предельные величины этих характеристик практически не менялись от способа изготовления окисного слоя и технологии травления кристалла перед диффузией.

В наших образцах предельная величина пробойного напряжения определяется дефектами в объеме кристалла на границе p-n областей.

Тем не менее, для проверки данного предположения нами проведены следующие эксперименты. Как известно, одним из способов повышения пробойного напряжения структур является поверхностная пассивация путем

создания слоя SiO, SiO_2. С этой целью нами проведен низкотемпературный отжиг структур при 500°С в течение 10 часов на воздухе. После отжига параметры диодов, изготовленных методом 1 практически не менялись, тогда как диоды, изготовленные методом 2, улучшали характеристики (см. рис. 9). Однако пробойное напряжение не превышало 300В.

Таким образом, можно полагать, что пассивация слоем окисла и формирование меза-структуры позволяют несколько улучшить характеристики структур. Однако значительное повышение пробойного напряжения (например, до 1000 В) может ограничиваться за счет дефектов в объеме кристалла на границе p- и n-областей.



• – для перехода изготовленного методом 1,
° – изготовленного методом 2.

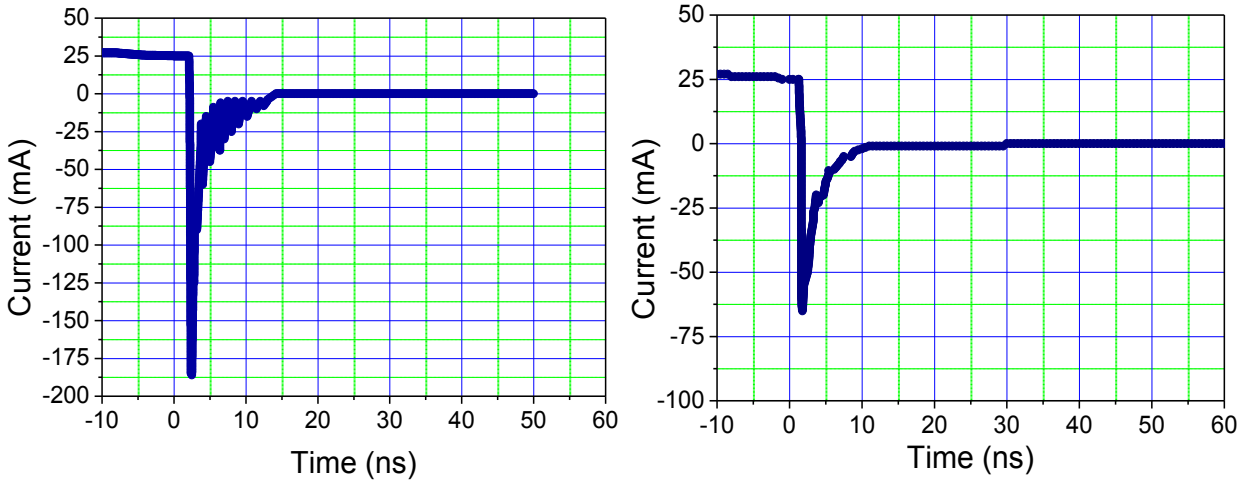
Рис. 9. ВАХ 4H-SiC p-n переходов, после проведение пассивации поверхности отжигом при 500°С в течении 10 часов

В параграфе 4.3. и 4.4, для исследования структур методом импедансной спектроскопии построены эквивалентные схемы структур и проведены оценки параметров структур легированных бором и алюминием. Оценка времени жизни неосновных носителей тока согласуется с экспериментальными данными по времени обратного переключения тока.

В параграфе 4.5 рассмотрены время переключения SiC диодов и температурная зависимость пробойного напряжения от температуры. Преимуществом карбид кремниевых диодов является способность работы при повышенных температурах и малое время переключения (или обратного восстановления тока). Известно, что в результате этого эффекта при преобразовании токов высокой частоты КПД кремниевых диодов падает до 70%, а карбид кремниевые диоды остаются эффективными до 800 кГц. Причем с ростом температуры длительность обратного восстановления тока для кремниевых диодов растет (от 50 нс до 120 нс) и соответственно растут и потери заряда.

Приведены результаты измерения времени переключения диодов и зависимости пробойного напряжения от температуры. На рис. 10 приведена осциллограмма тока при переключении диодов на основе 4H-SiC<B> и 4H-SiC<Al>. Измерения осциллограмм проводилось на специальном импульсном стенде в ОКБ ООО Фотон и лаборатории «Рост полупроводниковых кристаллов». Как видно из рисунка 10 диоды имеют

весьма малое время переключения и длительность обратного восстановления тока (менее 10 нс). Оцененная величина более, чем в три раза ниже литературных данных (20-30 нс). Если полагать, что переходной процесс определяется ёмкостью перехода (ёмкостные процессы),[1] и это время пропорционально $t_r = RC$, где R – последовательное сопротивление и C – ёмкость перехода, время релаксации должно составлять доли наносекунд. Однако ранее показано[2], что переходные процессы с участием неравновесных носителей тока в карбиде кремния определяются уровнем прилипания (EK_2 с энергией (E_c – 0,16) эВ). Этот уровень приписывается донорной примеси азота, а наблюдаемый профиль концентрации в карбид кремниевом диоде связывают с диффузией азота, в качестве фоновой примеси.



а) 4H-SiC<B> б) 4H-SiC<Al>

Рис. 10. Осциллограмма тока при переключении диода

Из-за меньшего времени переключения можно полагать, что в наших образцах концентрация таких центров (с уровнями прилипания вблизи середины запрещенной зоны) относительно мала. Температура диффузии в нашей технологии 1150–1300°C, тогда как при обычной диффузии ~2000–2200°C. Из-за низкой температуры диффузии, концентрация ловушек (связанных с азотом) относительно мала и в результате в наших структурах наблюдается быстрое переключение.

Измеренное время переключения достаточно близко к времени жизни неосновных носителей тока 10-20 нс, определенному по величине диффузионной емкости. На релаксацию переключения также может оказывать влияние максвелловская релаксация. Оценка показывает, что при удельном сопротивлении 90-130 Ом·м максвелловское время релаксации

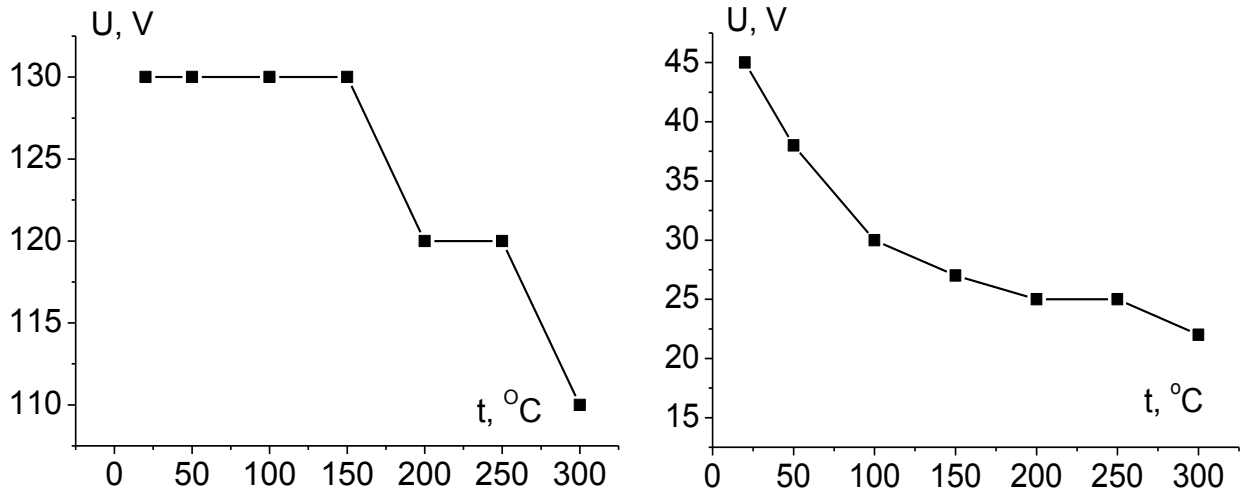
[1] П.А. Иванов, И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, О.И. Коньков, А.С. Потапов. Т.П. Самсонова, О.Ю. Серебренникова. Высоковольтные (3,3кВ) JBS-диоды на основе 4H-SiC.*ФТП*, 2011, вып.5, с.677–681.
[2] Кузнецов Н.И., Edmond J.A. Влияние глубоких уровней на релаксацию тока в 6H-SiC диодах. *ФТП*, 1997, вып.31, с. 1220-1224.

составляет 5-7 нс ($\tau_\mu = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\sigma}$, $\varepsilon\,\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость материала, σ – проводимость полупроводника).

Таким образом, оценки времени RC релаксации, времени жизни неосновных носителей тока, время максвелловской релаксации тока не противоречат полученным экспериментальным данным.

На рис.11 приведены зависимости U(I_R =100 мА) от температуры. Как видно из рисунка, несмотря на рост температуры вплоть до 300°С диоды обладают выпрямляющими свойствами.

Таким образом, разработанные диоды имеют малое время переключения и длительность обратного восстановления тока (менее 10 нс) и способность работать при температурах до 300°С.



а) 4H-SiC<B>

б) 4H-SiC<Al>

Рис. 11. Температурная зависимость обратного пробойного напряжения диодов (ток при 100мА)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований низкотемпературной диффузии бора и алюминия в карбид кремния в потоке Si- и C- вакансий сделаны следующие выводы:

1. Предложена модель диффузии, качественно объясняющая распределение примеси в образцах карбида кремния, согласно которой диффузия примесей осуществляется в поле вакансий.

2. Установлено, что по мере снижения содержания ростовых дефектов напряжения пробоя увеличивается с 5 до 40 В, а увеличение концентрации дислокаций и микротрубок приводит к снижению напряжения пробоя.

3. Впервые разработан метод травления карбида кремния в водном растворе КОН при воздействии ультрафиолетовым светом, при этом скорость травления достигает 1 мкм/час.

4. Экспериментально определено, что коэффициент диффузии для примеси бора $D_B \sim 4\cdot10^{-11}–6\cdot10^{-10}$ $см^2$/сек в температурном интервале 1150÷1250°C; энергия активации диффузии бора, составляет $\varepsilon_a \approx$ 0.8-1.3 eV, практически независимо от ростовых дефектов.

5. Впервые осуществлено легирование карбида кремния алюминием путем низкотемпературной диффузии из поверхностного слоя окиси алюминия, созданного двумя методами: при 650°C из окисленной пленки алюминия, термически напыленного на образец в вакууме; синтезом из хлористого алюминия при 600÷700°C, нанесенного на поверхность кристалла карбида кремния.

6. Показано, что отжиг в вакууме при температуре 600÷800°C приводит к улучшению характеристик барьеров Шоттки, а при температуре отжига 900°C наблюдается ухудшение свойств барьеров из-за процессов сегрегации.

7. Показано, что низкотемпературная диффузия в кристаллы с удаленным поверхностным нарушенным слоем позволяет получить более качественные и термически стабильные p-n переходы.

8. Впервые методом низкотемпературной диффузии изготовлен диод, способный работать до температуры 300°C с малым временем переключения и длительностью обратного восстановления тока (менее 10 нс).

SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES DSC.27.06.2017.FM/T.34.01 PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE, INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES, SAMARKAND STATE UNIVERSITY

PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

JURAEV KHIMMATALI NOMOZOVICH

LOW-TEMPERATURE DIFFUSION OF BORON AND ALUMINUM IN SILICON CARBIDE IN A FLOW OF Si- AND C- VACANCIES

01.04.10-Physics of semiconductors

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

TASHKENT-2017

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.1.PhD/FM34

Dissertation has been prepared at physical-technical institute.

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

Scientific supervisor:	**Atabaev Ilkham Gafurovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Official opponents:	**Kamalov Amangeldi Bazarbaevich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences
	Parchinskiy Pavel Borisovich Doctor of Philosophy for Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor
Leading organization:	**Tashkent State Technical University**

Defense will take place «____» _____2017 at _____ at the meeting of Scientific Council number DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 Physical-technical institute, institute of ion-plasma and laser technologies, Samarkand state university. (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net.).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Physical-technical institute (is registered №____) (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

Abstract of dissertation sent out on «____» _____2017 year
(Mailing report № _____on «____» _____2017 year)

S.L. Lutpullayev
Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

A.V. Karimov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

S.A. Bakhramov
Chairman of scientific Seminar under Scientific
Council on award of scientific degrees,
D.F.-M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of research work is to study the influence of growth defects and surface condition on the low temperature diffusion process to increase reproducibility and the quality of the obtained p-n SiC junctions.

The object of research is single crystal plates of silicon carbide of various polytypes 4H, 6H and 3C n-SiC, as well as p-n junctions based on them.

Scientific novelty of research consists in the following:

silicon carbide single crystals based p-n junctions have been obtained by low temperature diffusion of aluminum and boron; their electro-physical characteristics have been studied;

the technology of silicon carbide surface etching in aqueous KOH solution stimulated by ultraviolet radiation has been developed for the first time. The rate of etching reaches 1 μm/hour. Surface of crystal become smooth;

the impurity (B and Al) distribution profiles have been determined using the single-probe current spreading method; a low-temperature diffusion model for impurities in the carbon and silicon vacancies flux has been proposed;

for the first time, diodes have been fabricated by the low-temperature diffusion method. The developed diodes have a fast switching time and the duration of the reverse recovery of current (less than 10 ns); their breakdown voltage is from 45 to 250-300V; and they are capable of operating at temperatures up to 300°C.

Implementation of the research results. On the base of studies of boron and aluminium low-temperature diffusion in silicon carbide in a flow of Si- and C-vacancies the following methods have been obtained:

Method for etching silicon carbide in an aqueous KOH solution with UV stimulation (Patent of agency for intellectual property of the republic of Uzbekistan “Method of etching silicon carbide”, Patent UZ, No. IAP 05087, 05.08.2015). The method is designed to produce a mirror-smooth etched surface of SiC and to fabricate mesa structures.

New avalanche p-i-n SiC diode has been fabricated by the method of low-temperature diffusion of Boron and Aluminium (Catalog of the IX Republican Fair of Innovative Ideas, Technologies and Projects “Avalanche SiC p-i-n Diode” 2016 y.). The developed diode differs from traditional diodes by its fast switching and ability at temperatures up to 300°C.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, four chapters, conclusions and a list of references. The text of the thesis is printed on 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙҲАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (1 часть; part1)

1. Салиев Т.М., Атабаев И.Г., Атабаев Б.Г., Жураев Х.Н., Чин-Чи Тин, Ададежи В. Исследование баръеров шоттки Ni-SiC<B> с диффузионным подслоем, полученным низкотемпературной диффузией // Узбекский Физический Журнал. Ташкент, 2008, № 2, с. 146-148 (01.00.00, №5).
2. Atabaev I.G., Saliev T.M., Saidov D., Pak V.A., Juraev Kh., Tin C.C., Atabaev B.G., Giryansky V.N. Influence of Defects on Low Temperature Diffusion of Boron in SiC // Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing, USA Vol. 2, No. 9, 2011, p. 1205-1211 (№ 2. JIF, IF:0.547) (05.00.00, № 24)
3. Атабаев И.Г., Пак В.А., Атабаев Б.Г., Жураев Х.Н. Исследование травления карбида кремния в растворе гидроксида калия КОН стимулированного УФ излучением // Узбекский Физический Журнал. Ташкент, 2011, № 2, с. 137-139 (01.00.00, №5).
4. Атабаев И.Г., Салиев Т.М., Пак В., Жураев Х.Н. P-n переходы изготовленные низкотемпературной диффузией Al в SiC // ДАН РУз, Ташкент, 2011, № 6, с. 27-30 (01.00.00, №7).
5. Атабаев И.Г., Салиев Т.М., Пак В., Жураев Х.Н. Исследование p-n переходов на основе SiC, изготовленных низкотемпературной диффузией бора // ДАН РУз, Ташкент, 2013, № 4, с. 14-17 (01.00.00, №7).
6. Атабаев И.Г., Жураев Х.Н., Салиев Т.М., Пак В.А. Исследование p-n переходов, формированных на основе SiC при низкотемпературной диффузией алюминия // Узбекский Физический Журнал. 2013, № 5-6, с. 305-310 (01.00.00, №5).
7. Atabaev I.G., Juraev Kh.N. and Pak V.A. Fast Switching 4H-SiC P-i-n Structures Fabricated by Low Temperature Diffusion of Al // Advances in Condensed Matter Physics, vol. 2017, Article ID 7820676, 8 pages, 2017 (№ 2. JIF, IF:1.044)
8. Атабаев И.Г., Жураев Х.Н., Пак В.А. Изготовление быстродействующих p-i-n структур на базе 4H-SiC методом низкотемпературной диффузии // Узбекский Физический Журнал. 2017, том 19, № 2, с. 92-98 (01.00.00, №5).

II бўлим (2 часть; part 2)

9. Атабаев И.Г., Чин-Че Тин (Chin-Che Tin), Атабаев Б.Г., Лутпуллаев С.Л., Жураев Х.Н. Способ травления карбида кремния, Патент РУз № IAP 05087, 30.09.2015 г.
10. Атабаев И.Г., Салиев Т.М., Пак В., Жураев Х. p-n переходы изготовленные низкотемпературной диффузией Al в SiC // Материалы

международной конференции посвященной 80-летию академика М.С.Саидова. Ташкент, 2010. с. 180-182

11. Атабаев И.Г., Жураев Х.Н., Джумабаев Д.К. Время переключении SiC диодов и ВАХ при высоких температурах // II международная конференция по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах» Фергана, 2011, с. 69-71.

12. Атабаев И.Г., Жураев Х.Н., Пак В.А. Исследование p-n переходов на основе SiC, изготовленных низкотемпературной диффузией бора // Международная конференция «Актуальные проблемы физической электроники» Ташкент, Узбекистан, 28 ноября 2012, с. 154-155.

13. Атабаев И.Г., Жураев Х.Н., Пак В.А., Адамбаев К. Исследования вольт-фарадных характеристик p-n- переходов на основе 4H-SiC и 6H-SiC // Материалы международной конференции, посвященной 70-летию физико-технического института. Ташкент, 2013, с.146-149.

14. Жураев Х.Н. Динамические характеристики карбидокремниевые диодов, полученных методом низкотемпературной диффузии // XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов – 2014», с. 297-298.

15. Атабаев И.Г., Жураев Х.Н., Саидов Д.Ш., Джумабаев Д.К., Закирова С.Б. Исследование переноса тока в p-n-4H-SiC<B> структурах, полученных методом низкотемпературной диффузии // Материалы международной конференции. Современные проблемы физики Конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов. 15-16 мая 2014 года, Алматы, с. 112-113.

16. И.Г. Атабаев, Х.Н. Жураев, В.А. Пак, исследование сопротивление высокоомного слоя p-i-n-SiC диода изготовленных низкотемпературной диффузией бора //Материалы международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Ташкент, 2015. с. 90-93.

17. Х.Н. Жураев, И.Г. Атабаев. Получение p-i-n структур на основе 4H-SiC методом низкотемпературной диффузии // 9-я Международная научная конференция «Современные Достижения Физики и Фундаментальное Физическое Образование», СДФФФО-9. Казахстан, Алматы, 12-14 октября 2016 года, с. 259-260.

18. Atabaev I.G., Juraev Kh.N. 4H-SiC p-i-n Junctions Fabricated by Low Temperature Diffusion of Boron // Symposium proceedings IPS 2016. New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects. 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan, p.166-168.

19. I.G. Atabaev, Kh.N. Juraev, Research of the Activation Energy of Conductivity in P-I-N SiC Structures Fabricated by Doping with Aluminum Using the Low-Temperature Diffusion Method. ICSCRM 2017: 19th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials. Kuala Lumpur, Malaysia. Aug. 24-25, 2017. International Journal of Materials and Metallurgical Engineering Vol:4, No:8, pages: 1902, 2017. http://waset.org/abstracts/74668

20. Салиев Т.М., Атабаев И.Г., Саидов Д.Ш., Жураев Х.Н. Исследование влияния структурных дефектов карбида кремния на процесс

низкотемпературной диффузии бора в потоке вакансий углерода // Республиканская научная конференция молодых учёных. Самарканд, 2008, с. 110-112.

21. Салиев Т.М., Атабаев И.Г., Саидов Д.Ш., Жураев Х.Н., Пак В.А., Хажиев М.У. О диффузии бора в SiC при температурах 1150-1250°С // Республиканской научно-практической конференции «Наука Каракалпакстана: вчера, сегодня, завтра», Нукус, 2009, с. 68-69.

22. Жураев Х.Н., Джумабаев Д.К., Жумабаев М.М. Травление 4H-SiC в растворе КОН // Материалы Республиканской научно-технической конференции. Фергана, 2011, с. 36-37.

23. Атабаев И.Г., Атабаев Б.Г., Жураев Х.Н., Хажиев М.У. Модель неравновесной диффузии примесей в карбиде кремния в присутствии потока вакансий углерода // Республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2011, Нукус, 2011, с. 18-22.

24. Атабаев И.Г., Жураев Х.Н., Пак В.А. Исследование переключающие характеристики p-i-n диодов на основе SiC, изготовленных низкотемпературной диффузией бора // Материалы республиканской конференции, посвященной 100-летию академика С.А.Азимова «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», Ташкент-2014, с. 62-65.

25. Жураев Х.Н. Исследование динамических характеристик p-i-n-SiC диодов, полученных методом низкотемпературной диффузией алюминия // Материалы конференции «Физика фанининг ривожида истеъдодли ёшларнинг ўрни», «ИАК-VIII» 2015 йил 24-25 – апрель, с. 212-217.

26. Атабаев И.Г., Жураев Х.Н. Исследование оптического поглощения 4H-SiC легированного бором и алюминием // Материалы республиканской конференции. Возобновляемые источники энергии: технологии и установки». Институт материаловедения АН РУз, 28-29 июня, 2016, Ташкент, с. 113-115.

27. Жураев Х.Н., Атабаев И.Г. Морфология поверхностных дефектов 4H-SiC карбида кремния выращенных PVT методом // Материалы республиканской научной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах» к 70-летию академика АН РУз А.Т. Мамадолимова, 1-2 февраля 2017, с. 12-13.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида ўзбек, рус ва инглиз (резюме) тилларида таҳрирдан ўтказилди (30.10.2017 йил).

Босишга рухсат этилди: 08.11.2017 йил
Бичими 60x44 $^{1}/_{16}$, «Times New Roman»
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,9. Адади: 100. Буюртма: № 324.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.