

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖА БЕРУВЧИ PhD.28.02.2018.FM.60.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

БУХОРО ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ТУРАЕВ АКМАЛ АТАЕВИЧ

**МАЙДОНИЙ ТРАНЗИСТОР АСОСИДАГИ КЎП ФУНКЦИЯЛИ
ДАТЧИКНИНГ КАНАЛИ КАМБАҒАЛЛАШГАН РЕЖИМДАГИ
СЕЗГИРЛИК ХУСУСИЯТЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

АНДИЖОН – 2018

**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**

Тураев Акмал Атаевич

Майдоний транзистор асосидаги кўп функцияли датчикнинг
каналли камбағаллашган режимдаги сезгирлик хусусиятлари 3

Тураев Акмал Атаевич

Особенности чувствительности многофункционального датчика
на основе полевого транзистора в режиме обеднения канала 27

Turaev Akmal Atayevich

Features of sensitivity of multifunctional sensor based on
field effect transistor in channel depletion mode 51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 55

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖА БЕРУВЧИ PhD.28.02.2018.FM.60.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

БУХОРО ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ТУРАЕВ АКМАЛ АТАЕВИЧ

**МАЙДОНИЙ ТРАНЗИСТОР АСОСИДАГИ КЎП ФУНКЦИЯЛИ
ДАТЧИКНИНГ КАНАЛИ КАМБАҒАЛЛАШГАН РЕЖИМДАГИ
СЕЗГИРЛИК ХУСУСИЯТЛАРИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

АНДИЖОН – 2018

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.2. PhD/FM87 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Бухоро давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасига (www.adu.uz) ҳамда «ZiyoNet» Ахборот таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар

Джураев Даврон Раҳманович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич

физика-математика фанлари доктори, профессор

Шарибоев Носиржон Юсупжонович

физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот:

Қорақалпоқ давлат университети

Диссертация ҳимояси Андижон давлат университети ҳузуридаги PhD.28.02.2018.FM.60.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz, Андижон давлат университети мажлислар зали.)

Диссертация билан Андижон давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (__ рақам билан рўйхатга олинган.) Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: 0(374) 223-88-30.

Диссертация автореферати 2018 йил «__» _____ да тарқатилди.

(2018 йил «__» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси.)

С.З. Зайнабидинов

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш
раиси, ф.-м.ф.д., академик

А.О. Курбанов

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш
илмий котиби, ф.-м.ф.н.

И.Н. Каримов

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш
ҳузуридаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги кунда жаҳон миқёсида жадал ривожланаётган яримўтказгичлар физикаси соҳасидаги истиқболли йўналишлардан бири ҳисобланган янги мақсадда ишлатишга мўлжалланган яримўтказгичли датчикларнинг функционал хусусиятларини кенгайтиришга катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада канали ёпилган режимдаги майдоний транзисторнинг ташқи таъсирларга, жумладан, ёруғлик, ҳарорат ва босимга сезгирлик хусусиятларини аниқлаш муҳим вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда яримўтказгичли датчикларнинг фотоэлектрик ва иссиқлик параметрларини тадқиқ этишга катта эътибор берилмоқда. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни жумладан, куйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан ҳисобланади: майдоний транзисторнинг ёпилиш режимида ҳарорат таъсирида юз берувчи жараёнларни ўрганиш; диод режимида уланган майдоний транзисторда фотовольтаик эффектларнинг намоён бўлиш механизмларини аниқлаш; майдоний транзисторнинг ёпилиш кучланишига босимнинг таъсирини тадқиқ қилиш; канал ёпилиши режимида майдоний транзисторни янги мақсадда ишлатиш имкониятларини аниқлаш; яримўтказгичли қайд қилгичларнинг функционал параметрларини кенгайтириш.

Ҳаракатлар стратегиясига кўра Ўзбекистон Республикасининг кейинги ривожланиши борасида илмий-тадқиқот ютуқларини рағбатлантириш ва жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратиш, шу жиҳатдан яримўтказгичли асбобларда кечаётган физик жараёнларни амалиётга татбиқ этиш натижасида уларни янги мақсадда қўллашни жорий қилиш орқали технологик қурилмаларнинг ишлаш жараёнларини бошқаришни амалга ошириш муҳим аҳамиятга эга. Ундан ташқари илмий ривожланишнинг ҳозирги замон талабларига жавоб берувчи, янги илмий натижалар олишга мўлжалланган фаол тадбиркорликни, инновация ғояларини ва технологияларни ривожлантиришга алоҳида эътибор қаратилган. Бу ўз навбатида электротехника саноати учун технологик жараёнларни бошқаришга мўлжалланган қайд қилгичларнинг янги функцияли турларини яратиш миллий маҳсулотларни мукамаллаштириш бўйича ҳалқаро стандартларга мослигини таъминлаб, уларнинг рақобатбардошлигини оширишга хизмат қилади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг фармонлари ва қарорлари, жумладан, 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон «2017-2021 йилларда электротехника саноатини бошқаришни янада такомиллаштириш, жадал ривожлантириш ва диверсификация қилиш чора-тадбирлари 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 Қарорлари ҳамда илмий

тадқиқотларга тегишли меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга мазкур диссертациядаги илмий натижалар муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг «III. Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш» устувор йўналишига доир бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳароратни мониторинг қилиш учун Манчестер университетининг олимлари (АҚШ) симсиз қайд-қилгичлар ишлаб чиқди. Analog Devices ва National Semiconductor компаниялари ҳар хил турдаги ҳарорат қайдқилгичлар ишлаб чиқармоқда. Россия қишлоқ хўжалиги Агрофизика илмий текшириш институти олимлари намликни ўлчовчи датчиклар ишлаб чиқармоқда.

Ўзбек олимлари М.К.Баҳадирханов ва Б.Э.Эгамбердиевлар бу йўналишдаги илмий-тадқиқот ишларини ривожлантиришга муҳим ҳисса қўша олдилар. Жумладан, улар нанокластерли материаллар асосида ҳарорат датчиклари олишнинг асосларини яратдилар. Лекин яримўтказгичли майдоний транзисторларни янги мақсадда қўллаш муаммолари, хусусан ҳарорат ва ёруғлик таъсири ҳамда уларнинг функционал хусусиятларини ўрганиш масаласи очиқлигича қолмоқда.

Бугунги кунга қадар дунёда технологик жараёнларни бошқариш учун термо ва фоторезисторли структуралар, термопаралар кенг қўлланилувчи асбоб ҳисобланарди, лекин уларнинг тезкорлиги ҳозирги кунда ортиб бораётган талабларга тўла жавоб бермайди. Қўйилган талабларни тўла қондириш учун диод ва транзисторларнинг сезгирлиги ва тезкорлигига эришиш имконини берувчи янги структуралар ишлаб чиқиш ёки уларнинг схемага энергия тежамкор режимларда улаш ҳолатларини аниқлаш масаласи долзарблигича қолмоқда.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасидаги илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Бухоро давлат университети илмий тадқиқотлар режаси асосида ҳамда ЁА-4-001 рақамли «Фототранзистор структуралари асосида қуёш нури оқимини қайд қилувчи датчиклар яратиш» (2016 й.) лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади канали ёпилиш режимида майдоний транзисторнинг ташқи таъсирларга (босим, ёруғлик ва ҳароратга) сезгирлик хусусиятларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

майдоний транзисторнинг канали ёпилиш режимида ёпилиш кучланишининг ҳароратга боғлиқлигини аниқлаш;

диод режимида уланган майдоний транзисторда фотовольтаик эффектларнинг ўзгаришини аниқлаш;

майдоний транзисторнинг ёпилиш кучланишига босимнинг таъсирини тадқиқ қилиш;

майдоний транзисторнинг ҳар хил уланиш режимларида интеграл ёритилганликка боғлиқ ҳолда ёруғликнинг характеристикаларини тадқиқ қилиш;

канал ёпилиши режимида майдоний транзисторнинг янги функционал имкониятларини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти канали камбағаллашган режимдаги *p-n*-ўтишли бошқарилувчи майдоний транзистордан иборат.

Тадқиқотнинг предмети *p-n*-ўтишли майдоний транзисторга ташқи таъсир натижасида содир бўладиган физик жараёнлардан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида *p-n*-ўтишли структураларни ўрганишнинг вольт-ампер, вольт-фарад ва турли ишчи кучланишлардаги спектрал фотосезгирликни ўлчаш усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

ҳарорат ортиши билан канал ёпилиш кучланишининг ортиш механизми аниқланган бўлиб, унга кўра ҳарорат ортиши билан хусусий заряд ташувчилар концентрациясининг ортиши ҳисобига *p-n*-ўтиш контакт потенциалларининг фарқи камайиб, каналнинг ток ўтказувчи қисмининг қалинлиги ва ёпилиш кучланишининг ортишига олиб келиши аниқланган;

канал ёпилиши режимида майдоний транзисторнинг ҳарорат сезгирлик коэффициентининг камайиши ҳарорат билан база қалинлигининг ортиши барча майдоний транзисторлар учун -150°C дан $+150^{\circ}\text{C}$ гача кенг ҳарорат диапазонида бир қонуниятга бўйсунуши тажрибада кўрсатилган;

канал ёпилиш режимида майдоний транзисторнинг фотосезгирлик механизми аниқланган бўлиб, сток-затвори ёпувчи кучланишдан исток-затвор ўтишда кучланиш тушиши пайдо бўлиб, ёруғликнинг интенсивлиги ошиши билан истокда тушаётган кучланиш (исток-затвор қаршилиги) камайиши ва стокда ҳосил бўлувчи фототок ошиб бориши аниқланган;

майдоний транзисторнинг тензосезгирлик механизми, босим таъсирида канал ўтказувчан қисмининг затвор *p-n*-ўтиши ҳажмий заряди қалинлигига нисбатан камайиши ҳисобига канал ёпилиш кучланишининг камайиши тажрибада аниқланган;

таклиф қилинган характеристик параметрли майдоний транзистор асосидаги датчикнинг кам автоматик силжиш режимида оптик сигналларни қабул қилиш модулида ишлатилиши мумкинлиги тажрибада кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

майдоний транзистор каналининг ёпилиш режимида ёпилиш кучланишини ўлчов параметри сифатида қабул қилиб, ҳароратни ўлчаш учун ишлатиш мумкинлиги кўрсатилган;

майдоний транзисторни электр билан таъминловчи кучланиш орқали канал ёпилиш режимида юқори сезгир фотоқабулқилгич сифатида ишлатиш мумкинлиги аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги физик жараёнларни тадқиқ қилишда умумқабул қилинган илмий ва технологик услублар, яримўтказгичли асбобларнинг характеристикаларини ва параметрларини текширишда стандарт ва кенг қўлланиладиган тадқиқот усулларида фойдаланилганлиги

билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти майдоний транзисторларни янги уланиш режимлари орқали кўп функцияни бажаришдаги физик жараёнлар тўғрисида янги тасаввурларни кенгайтириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти майдоний транзисторларни канали ёпилиш режимида кўп функцияли датчик хусусиятидан фойдаланиб кичик микротокларда ишловчи диагностика асбобларини яшаш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. *p-n*-ўтишли майдоний транзисторнинг ёпилиш режимида ташқи таъсирларга сезгирлик хусусиятларини аниқлаш асосида:

майдоний транзистор асосида кўп функцияли датчикка «Майдоний транзистор асосидаги кўп функцияли қайд қилгич» учун Ўзбекистон Республикаси интеллектуал мулк агентлигининг ихтиро патенти олинган (№ IAP 05120, 12.10.2015). Ишлаб чиқилган майдоний транзистор асосидаги кўп функцияли датчик электрон ўлчаш тизимларида ҳарорат, ёруғлик ва деформацияларни қайд этиш имконини берган;

майдоний транзистор асосидаги электрон схемалар ёрдамида ҳароратни бошқариш усуллари Ф2-ФА-0-83921/Ф2-ФА-Ф0383 рақамли «Ўта ўтказгичлар ва магнит материалларидаги кучли коррекцияли ўзаро таъсирлар ва уларнинг критик параметрлари» лойиҳасида майдоний транзистор канали ёпилган режимда ёпилиш кучланиши ўлчов параметри сифатида қабул қилиниб ҳароратни ўлчашда қўлланилган. (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 24 октябрдаги ФТА-02-11/941 - сон маълумотномаси). Илмий натижадан фойдаланиш ўта ўтказгич материалларининг ҳароратини стабил сақлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси.

Тадқиқот натижалари 5 та халқаро ва 7 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 22 та илмий иш чоп этилган, шулардан 9 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий журналларда нашр этилган, 1 та ихтиро учун патент олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўрт боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 118 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯ ИШИНING АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг аҳамияти ва долзарблиги асослаб берилган, тадқиқотларнинг республикадаги фан ва технологиялар ривожланишининг асосий илғор йўналишлари билан боғлиқлиги аниқланган, диссертация мавзуси бўйича халқаро миқёсдаги илмий ишланишлар, муаммонинг ўрганилганлик даражаси ҳақида умумий маълумотлар келтирилган, мақсад ва вазифалар белгиланган, тадқиқот объекти, предмети ва услублари кўрсатиб берилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги баён қилинган, ишнинг апробацияси ва натижаларнинг татбиқ этилиши, шунингдек диссертациянинг ҳажми ва тузилиши ҳақидаги қисқача маълумотлар келтирилган.

«Диод ва транзисторли структуралар характеристикаларига ёруғлик, иссиқлик ва деформациянинг таъсири бўйича изланишлар ҳолатининг таҳлили» деб номланган биринчи бобда резистор, диод ва транзисторли структураларнинг ҳарорат, ёруғлик ва деформацияга сезгирлик механизмлари ўрганилган. Ҳарорат, ёруғлик нури ва деформациянинг таъсирини ўрганиш бўйича экспериментал маълумотлар асосида вазифалар шакллантирилган.

«Кўп функцияли датчикнинг физик-технологик хусусиятлари» номли иккинчи боб сезгир элемент сифатида майдон транзистори танланиши, унинг функционал характеристикалари сезгирлигини оширишнинг физик принциплари, майдоний транзисторлар муҳим параметрларининг ўзига хос хусусиятларини асослашга бағишланган.

Маълумки диод ва биполяр транзисторли структураларни ўзининг белгиланган вазифаси-электр сигналларини кучайтириб беришдан ташқари ҳароратни ўлчаш ёки база соҳаси параметрлари мос танланган ҳолатларида ёруғлик нурини ўлчаш ва бошқа ўлчашларда фойдаланиш мумкин. Улар орасида майдон транзисторлари уланиш режимларининг кўплиги билан ажралиб туриб, бунда уланишнинг одатдан ташқари режимларини кўллаш, одатдаги уланиш режимларида эришиб бўлмайдиган янги хоссаларга эга бўлишга имкон беради.

Кўп функцияли датчикни яратиш учун майдоний транзистор канали ёпилиш режимида ўлчаш параметри сифатида каналнинг ёпилиш кучланиши олинган. Ушбу режимда ташқи таъсир (ҳарорат, ёруғлик, босим) каналнинг ўтказиш қисми қалинлигининг затвор ҳажмий заряди орқали ўзгаришига олиб келиб, бу ўз навбатида, таъсирлашаётган омил (ҳарорат, ёруғлик, босим) билан тенглаштирилаётган ёпилиш кучланишининг мос равишда ўзгаришига олиб келади. Таклиф қилинаётган кўп функцияли датчик айнан шу принципга асосланган.

Ўлчов параметри сифатида юқори омил вольтметр билан фиксацияланадиган ёпилиш кучланиши кўлланилади. Масалан, берилган ёпилиш кучланишида $U_{омс}^1$ нинг бирламчи қийматига мос бўлиб, ҳарорат (ёришилганлик, босим) ўзгарганида каналнинг ёпилиш кучланиши $U_{омс}^2$ қийматга

эга бўлади. Таъсир этаётган омил ёпилиш кучланишининг нисбатлари фарқи майдон транзисторининг сезгирлигини ифодалайди.

Хусусан, сезгирлик коэффиценти қуйидаги ифодалардан аниқланади:
ҳарорат сезгирлиги

$$\alpha_{\text{эну}} = (U_{\text{эну}}^2 - U_{\text{эну}}^1) / (T_2 - T_1), \text{ мВ/град}; \quad (1)$$

фотосезгирлик бўлса

$$S = (U_{\text{эну}}^2 - U_{\text{эну}}^1) / (\Phi_2 - \Phi_1), \text{ мВ/люкс}; \quad (2)$$

ёки босимга сезгирлиги

$$S_p = (U_{\text{эну}}^2 - U_{\text{эну}}^1) / (P_2 - P_1), \text{ мВ/(гр/см}^2\text{)}. \quad (3)$$

Маълум кремнийли p - n -ўтишли ва p -тип каналли КП102 туридаги майдон транзисторлари $I_{\text{СИ}} = 0.18 \div 6$ мА га тенг бўлган тўйиниш тоқларига ва $S = 0.25 \div 0.7$ мА/В қийматли қияликка эга бўлиши тажрибаларда кўрсатиб берилган. Кириш тоқи 20 мкА бўлганда ёпилиш кучланиши 2.8 ÷ 10 В, кириш-чиқишнинг ишчи кучланиши 15 В гача қийматни ташкил этади. Яъни, канал қалинлигининг оптималлашмаганлиги, ёруғлик сигналларини қабул қилиш учун мослаштирилмаганлиги ҳисобига ёпилиш кучланишининг юқори (2.8 В дан юқори) қийматларига эга бўлади. Чиқиш динамик қаршилигининг нисбатан паст қиймати, каналдаги киришмаларнинг мусбат градиенти ҳисобига легирловчи киришмани диффузиялаш билан олинганлиги ва каналнинг ёпилиш кучланиши, эпитаксиал структуралардагига нисбатан 20 ÷ 30% ортиқ бўлиб, параметрлар фарқланиши технологик шароитлар билан боғлиқ.

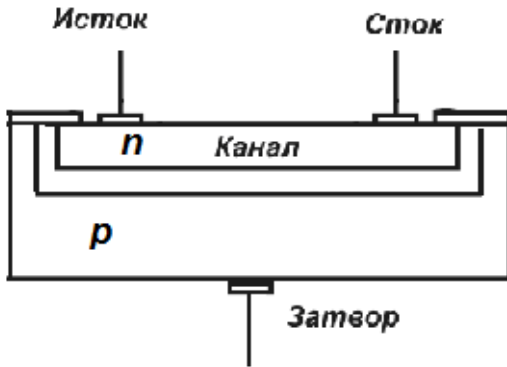
Транзисторли структурага босимга, магнит майдонига, радиация, ёруғлик ва иссиқлик нурланишларига нисбатан юқори сезгирлик бериш учун p - n -ўтишли майдон транзистори таклиф қилинган. Бу майдон транзистори ўз ичига: остки затвор электроди бўлган биринчи турдаги паст қаршиликли тагликни, сиртида кириш ва чиқиш соҳаларининг омик контактлари олинган ва улар орасида канал жойлашган, юқори қаршиликли иккинчи турдаги эпитаксил қатламни ўз ичига олган. Канал қалинлиги p^+ - n -ўтиш сийраклашган ҳажмий заряд қалинлигига яқин қилиб танланади.

Канал қалинлигини берилган канал ток ташувчилари концентрациясига ва затворнинг p^+ - n -ўтиши сийраклашган ҳажмий заряди қалинлиги билан таклиф қилинаётган ўзаро боғлиқлигидан келиб чиққан ҳолда танлаш, каналнинг оптимал қалинлиги қийматини ва унинг иссиқлик, ёруғлик нурланиши билан модуляция қилинадиган ва қалинлиги билан таққосланадиган камбағаллашмаган қисмининг оптимал қийматини беради ва канал ташувчиларининг танланган концентрацияси учун максимал сезгирликни таъминлайди.

Деформацияга ва магнит майдонига нисбатан юқори сезгирликни таъминлаш учун намуна қалинлигининг W узунлиги L га нисбатининг оптимал қиймати $1.25 < W/L < 1.5$ оралиғида, жумладан, канал қалинлиги 1 ÷ 2 мкм, кенлиги 40 мкм, узунлиги эса 100 ÷ 200 мкм бўлиши лозим.

Таклиф этилаётган кўп функцияли қайд қилгич кремний асосида тайёрланган. Бунинг учун p^+ -турдаги ўтказувчанликли 200 мкм қалинликдаги

тагликда ташувчилар концентрацияси $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ бўлган кремнийли тагликда n -тип ўтказувчанликли, ташувчилар концентрацияси $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, қалинлиги $1 \div 1.5 \text{ мкм}$ бўлган эпитаксиал қатлам ўстирилган (1-расм).

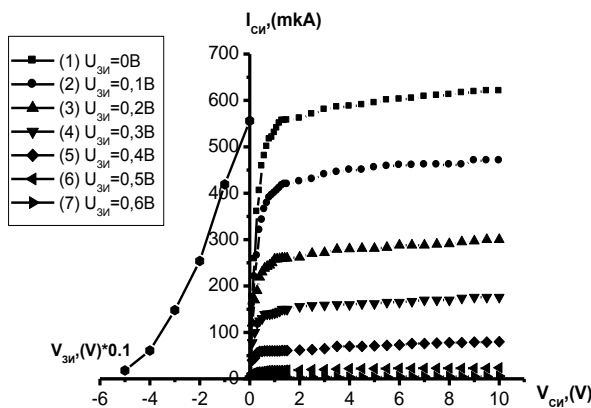


1-расм. Текширилаётган p - n -ўтишли майдоний транзисторнинг геометрияси

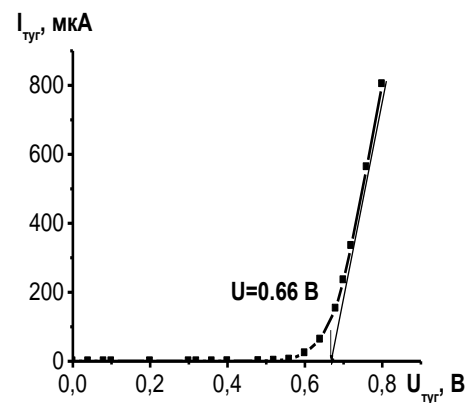
Текширилаётган майдон транзисторининг асосий параметрлари деб қуйидагилар ҳисобланади: канал (сток)нинг динамик қаршилиги, ёпилиш режимидаги сток токи, ёпилиш кучланиши, тешилиш кучланиши. Майдон транзисторининг статистик характеристикаларини тадқиқ этиш умумий исток схемасида амалга оширилди. Ишчи кучланиш сток ва исток орасига, ёпилиш кучланиши эса исток-затвор ўтишига қўйилади. Ёпилиш кучланишининг ортиши орқали чиқиш сток то-

ки тўйиниш режимига эришади. 2-расмда келтирилганидек, ток ва исток орасида кучланишни қўйишда сток токи ошиб, тўйинганлик характерига эга бўлади. Затворда нол силжишда сток токи максимал қийматга эга бўлади ва затворнинг ёпилиш кучланишининг ошиши билан канал ҳажмий заряд билан қопланиб, каналнинг қопланмаган қисмини кичрайтиради. Ёпилиш кучланганлигида сток токи минимал бўлиб қолади.

Майдон транзистори отсечкасининг 0.6 В кучланиши ва сток токининг 580 мкА да (2-расм) ноль силжишида динамик қаршилик 164 кОм ни ташкил қилиб, ёпувчи кучланишни 0.4 В гача оширганда, унинг катталиги 625 кОм гача ортади.



2-расм. Майдон транзисторининг ўтказувчан ва стокли вольтампер характеристикалари



3-расм. Майдон транзистори затвори ўтишининг тўғри тармоғи вольтампер характеристикаси

Сток токининг ёпувчи кучланишга боғлиқлиги ташувчи характеристикасини шакллантиради (2-расм, чап квадрант), бунда унинг оғанлиги кескинлиги акс этади.

$$S = \frac{I_{2cu} - I_{1cu}}{U_{2zu} - U_{1zu}} = \frac{\Delta I_{cu}}{\Delta U_{zu}} \quad (4)$$

Чикувчи динамик қаршилик сток характеристикаси қиялигидан аниқланади:

$$R_{дин}^{cu} = \frac{U_{2cu} - U_{1cu}}{I_{2cu} - I_{1cu}} = \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_{cu}} \quad (5)$$

Затвор-исток ўтиши характеристикаси, яъни, *p-n*-ўтиш яримўтказгич диод характеристикасига ўхшайди (3-расм). Бунда тўғри токнинг затвор кучланишига боғлиқлиги экспоненциал характерга эга. 0.5 В кучланиш соҳасида ток минимал ва сўнг 0.65 В кучланишдан ортганда ток чизикли ошади.

Каналнинг динамик қаршилиги майдон транзисторининг кучайтирувчи хоссаларини ва чекловчи режимда токнинг барқарорлаштирувчи даражасини ифодалаб, кучланишнинг тенглашувчиси ва сток токининг тенглашиши нисбатини ифодалайди:

$$r_{дин} = \left. \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_{cu}} \right|_{U_{zu} = const} \quad (6)$$

Чиқиш қаршилигининг ортиши ҳисобига ёпувчи кучланишнинг ортиши натижасида унинг кучайиш коэффиценти ортиб бориши куйида кўрсатилади. Мос равишда динамик қаршилик қанча юқори бўлса, сигнал даражаси шунча юқори бўлади, чунки кучайтирувчи схеманинг чиқиш қаршилиги нагрузка қаршилиги R_H ва стокнинг динамик қаршилиги R_D билан аниқланади, параллел уланган каби:

$$R_{чик} = \frac{R_D R_H}{R_D + R_H} \quad (7)$$

Кучланиш бўйича кучайтириш коэффиценти куйидагига тенг бўлади:

$$K_H = \frac{S_{МАКС} \cdot R_D \cdot R_H}{R_D + R_H} = \frac{\mu \cdot R_H}{R_D + R_H} \quad (8)$$

бу ерда μ -кучланиш бўйича транзисторнинг хусусий кучайтириш коэффиценти.

$$\mu = S_{МАКС} \cdot R_D \quad (9)$$

Одатда транзисторнинг хусусий кучайтириш коэффиценти статистик вольтампер характеристикалари асосида нагрузка қаршилиги ёки чиқиш қаршилигига статистик қияликнинг кўпайтмаси сифатида ҳисобланади. Ёпилиш кучланиши *p-n*-ўтишининг контактлар потенциали фарқига яқин, яъни 0.5÷1.0 В чегарасида бўлиши керак.

Затворнинг *p-n*-ўтиши диоднинг анъанавий ўтишидан фарқи шундаки, улар кичикроқ дифференциал қаршиликка эга ва кучланишнинг камайиб кетишига база қаршилиги таъсири инобатга олинмайди. Айнан шуларни инобатга олиб қайд қилгичлар сифатида диффузион эмас, балки эпитаксиал структуралар танланган. Затвор *p-n*-ўтишининг ҳажмли заряд қалинлиги со-

ҳасининг ташувчилар концентрациясига боғлиқлигидан юқори сезгирликни таъминловчи канал қалинлигининг оптимал қийматлари аниқланган.

Ёпилиш кучланиши 0.6 В ва сток токи 580 мкА бўлган бир майдон транзистори (2-расм) ёпилиш кучланиши қиймати $U_{enu} = 2U_D$ ни экспериментал ҳисоблашлар асосида (1-жадвал) ноль силжишда потенциаллар контакт фарқи 0.61 В бўлган ҳажмий заряд қалинлиги 0,65 мкм га тенг бўлади.

1-жадвал

Тескари кучланишга нисбатан ҳажмий заряд қаватининг қалинлиги

$U_{тес}, В$	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,3	1,6
$W_{хсз}, мкм$	0,65	0,70	0,74	0,83	0,90	0,97	1,04	1,13	1,22

Унда ёпилиш кучланиши 0.61 В х2 =1.22 В ёки канални ёпувчи тескари қаршилиқ $U_{тес}=0.6 В$ да $W_{хсз} = 0.90 мкм$ қалинликка эга бўлади. Яъни, кучланиш икки карра оширилганда ҳажмий заряд соҳаси $\sqrt{2}$ карра ортади, бу эса каналнинг оптимал қалинлигига мос келади. Берилган майдон транзисторининг канал ёпилиши кучланиши (0.6В) амалда потенциаллар контакт фарқи билан мос келади, бу эса ташқи таъсир сабабли канал қалинлигининг ўзгаришини таъминлайди.

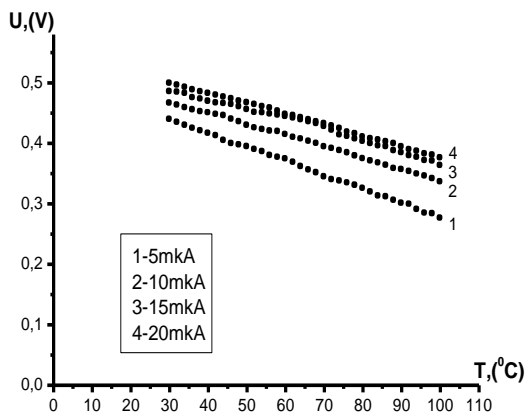
Учинчи боб «**Ҳарорат таъсирида майдон транзисторининг электрофизик параметрлари**» деб номланган ва унда майдон транзисторининг диодли уланиш режимида ҳарорат хоссаларини, ёпилиш кучланишининг ҳароратга боғлиқлиги тадқиқотлари, икки кутбли режимда биполяр транзистор структурасининг ҳароратга сезгирлиги кўрилган.

Майдон транзистори ўтишларнинг ёпилиш режимида ишлашига қармасдан алоҳида олинган ўтишнинг затвор-исток киритиш характеристикаси диод *p-n*-ўтиш характеристикаси билан мос келади. Бунда каналнинг ёпилиш режимида тескари уланган диодга айланади. Шу сабабли майдон транзисторини база ёрдамида ҳажмли зарядни кесувчи диод сифатида қараш мумкин, бу эса ҳозиргача кам ўрганилган бўлиб, асосан, фотоқабулқилгич, ҳарорат қайд қилгичлари янги мақсадларда қўлланилиши мумкин.

Затвор-исток ўтишининг вольтампер характеристикалари тадқиқотлари шуни кўрсатадики, улар тўғри йўналишда кичик тоқлар давомийлиги 0.55 В гача ва сўнг токнинг нисбатан кескин ошиши билан фарқ қилади. Тескари йўналишда токнинг ошиш соҳаси тор диапазон 1.0 В гача бўлиб, сўнг кичик тоқлар 2 нА билан тўйинишга ўтади. Бу тўғри силжиш режимида ишлашга шароит яратади. Тўғри силжиш режимида ҳароратнинг оширилиши вольтампер характеристикаларининг кичик кучланишлар соҳасига силжиши таъминлайди. Майдон транзисторидаги чекловчи ҳосил қилувчи чекланган берилган токда, масалан 10 мкА да, ҳарорат коэффициенти камаювчи кучланиш ва ҳарорат ўзгаришлари нисбати билан ифодаланади:

$$\alpha = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta U}{\Delta T}. \quad (10)$$

Ўлчанган $-90 \div +60$ градус цельсий ҳарорат интервалида кучланишнинг пасайиши 0.85 В дан 0.51 В гача бўлиб, 150 градус ҳарорат фарқида тегишли равишда ҳарорат кучланиш коэффиценти 0.0023 В ни ташкил этади, яъни 2.3 мВ/град, бу эса диод структураларга нисбатан икки ва ундан ортиқ марта каттадир. 4-расмдан кўринадик, 15 мкАдан 20 мкА гача ток интервалида берилган температура коэффиценти қийматлари ўзгармайди.

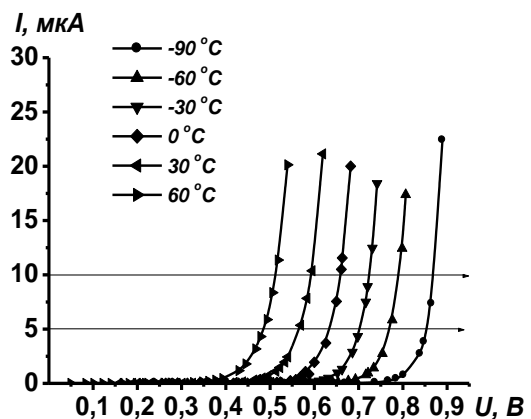


- 1- $I_{\text{тыг}}=5 \text{ мкА}$, $U_{\text{тыг}}=0,439 \text{ В}$, $\tau=2,33 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$
- 2- $I_{\text{тыг}}=10 \text{ мкА}$, $U_{\text{тыг}}=0,467 \text{ В}$, $\tau=1,86 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$
- 3- $I_{\text{тыг}}=15 \text{ мкА}$, $U_{\text{тыг}}=0,485 \text{ В}$, $\tau=1,76 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$;
- 4- $I_{\text{тыг}}=20 \text{ мкА}$, $U_{\text{тыг}}=0,499 \text{ В}$, $\tau=1,76 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$.

4-расм. Турли ишчи тоқларда кучланиш камайишининг ҳароратга боғлиқлиги

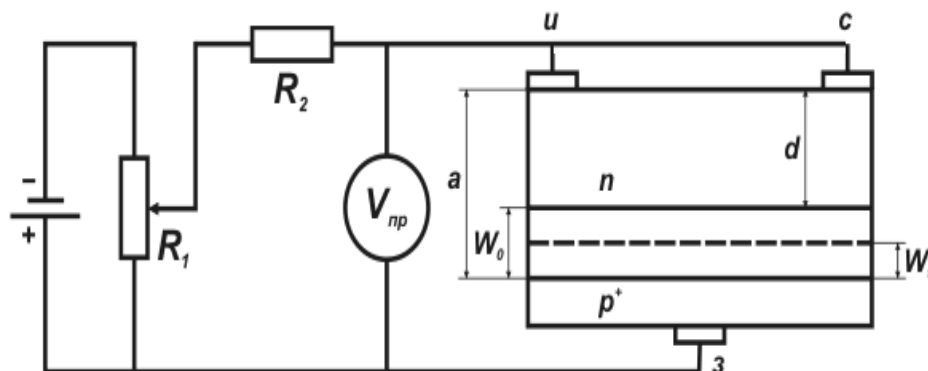
ҳарорат сезгирлиги аниқланади. Олинган тўғри силжиш кучланиши ҳарорат сезгирлиги қийматлари, диод структураларда олинган натижалардан қолишмайди, майдон транзисторининг миниатюр конструкцияси эса уни тор зазорли турли ускуна ва асбобларда қўллашга имкон беради. Яримўтказгич диодлар ва дискрет биполяр транзисторлар асосида энг юқори ҳарорат коэффиценти кўрсаткичлари $2.3 \div 2.6 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$ ни ташкил этади. Аммо майдон транзистори ва уларнинг ҳарорат коэффицентларини бошқариш параметрлари механизмларига бағишлаган тадқиқотлар ҳақида маълумот мавжуд эмас. Шу билан бирга майдон транзисторларини янги мақсадларда ноанъанавий улаш режимларида қўлланилиш имкониятлари оз ўраганилганлигича қолмоқда. Термосезгирлик параметри сифатида затвористок ўтишда тушадиган тўғри силжиш катталигининг ўзгариши қабул қилинган (6-расмдаги схемада кўрсатилган).

Ишчи тоқнинг 5 мкАдан 20 мкА гача ошиш чегарасида ҳарорат коэффиценти сезгирлиги 2.33 мВ/°Сдан 1.76 мВ/°С гача пасаяди. Бундай тенденция тўғри дифференциал қаршилиқнинг ҳароратга боғлиқлиги билан тушунтирилади. Тадқиқ этилган майдон транзисторини ҳарорат қайд қилгичи сифатида қўлланилиши учун оптимал ток сифатида $5 \div 10 \text{ мкА}$ ток интервали ҳисобланади (5-расм). Шу сабабли тўғри токни чеклаш режимидаги *p-n*-ўтишли майдон транзисторида ток ҳосил бўлиш жараёнлари ва маълум даражада ташувчиларнинг инжекция даражаси билан



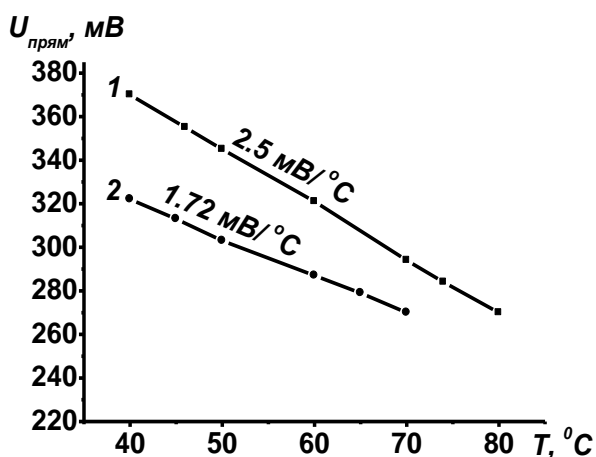
5-расм. Майдон транзистори затвор-канали *p-n*-ўтишининг тўғри тармоғи вольтампер характеристикаси

Ишчи кучланишнинг катталиги R_1 резистори билан, ток эса R_2 резистори билан тўғрилагич токи ўтиши чекланади. Майдон транзисторининг диод ва биполяр транзистор структураларидан фарқи шундаки, базавий соҳа (канал) қалинлиги фиксацияланган қийматга эга бўлиб, затвор соҳасида ташувчилар концентрацияси ($1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) икки-уч марта канал соҳасига нисба-



6-расм. Затвор-исток ўтишнинг термосезгирлик параметрини ўлчаш схемаси

тан ($2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) юқоридир, бу эса p - n -ўтишнинг кескинлигини кафолатлайди.



7-расм. Диодли-уланган майдон транзисторининг тўғри тушаётган кучланишининг ҳароратга боғлиқлиги

7-расмда R_2 қаршилик-токни чекловчидан диодни таъминловчининг турли кучланишларида тушаётган кучланишга боғлиқлиги келтирилган. Эгри чизик 1 ёпилиш кучланиши 1.2 В ва таъминловчи кучланиш 4.9 В да, 2-эгри чизик эса таъминловчи кучланиши 2.3 В бўлган намунада олинган. 7-расмдан кўринадики, таъминловчи кучланишини камайтирганда ҳарорат сезгирлиги ҳам пасаяди. Бунда тушаётган кучланиш катталиги ёпилиш кучланиши кичик бўлган намунада катта бўлади (1-эгри чизик).

Ҳарорат коэффицентларининг фарқ қилишини затворнинг p - n -ўтишидан ток ўтказиш механизми асосида изоҳловчи тенглик билан тушунтириш мумкин:

$$I_{\text{мыг}}^{\text{const}} = I_{\text{нас}} (\exp(qU_{p-n} / nkT) - 1) \quad (11)$$

Структурада токнинг ўзгаришсиз сақланиши тушаётган кучланишнинг ҳароратга боғлиқлигига олиб келади. Тегишлича (12) формулага асосан тўғри

$$nkT = \frac{qU_{p-n}}{\ln\left(\frac{I_{\text{мыг}}^{\text{const}}}{I_{\text{нас}}} + 1\right)} \quad (12)$$

токнинг p - n -ўтишда силжиш кучланиши катталигининг ўзгаришидан вужудга келадиган тескари токка нисбатининг ўзгариши ҳарорат коэффицентларининг фарқланишига олиб келади (7-расм, 1- ва 2-эгри чизиқлар).

$$\alpha = (U_{myz}^{T_2} - U_{myz}^{T_1}) / (T_2 - T_1) \quad (13)$$

Хусусан, силжиш кучланишининг пасайишида α ҳарорат коэффиценти 2.5 мВ/°С дан 1.72 мВ/°С гача камаяди. Бунда тўғри ток чекланган ва мос қийматга $I_{myz}^{const} = I_{чез}$ эга бўлганлиги сабабли p - n -ўтишда тушаётган кучланиш U_{p-n} диодли уланган майдон транзисторининг ҳароратига пропорционал ўзгаради.

Катталиги жиҳатидан берилаётган кучланиш (мусбат) p - n -ўтишли затвор U_d нинг диффузион потенциали (манфий қиймат)га тенг бўлган берилган ҳарорат билан аниқланади:

$$U_d = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_{кан} N_{зам}}{n_i^2} \quad (14)$$

ҳароратнинг ошиши билан хусусий ташувчилар концентрацияси n_i нинг ошиши билан камаяди. Майдон транзисторининг диоддан фарқи унинг базавий соҳаси-канал қалинлигининг фиксацияланганлигида бўлиб, бунда ёпилиш режимида базавий соҳанинг ҳажмий заряд қавати билан эгалланишига олиб келади. Яъни, тўғри силжиш режимида ҳам база соҳасида ташувчилар рекомбинациясига боғлиқ жараёнлар кузатилади. Оддий диодда база қалинлиги чекланмаган ва p - n -ўтишга нисбатан кетма-кет қаршиликка эга бўлади, бу эса рекомбинацион тоқларнинг ўзгариши натижасида кўшимча кучланиш пасайганда потенциаллар контакт фарқига нисбатан структуранинг сезгирлигини пасайтиради.

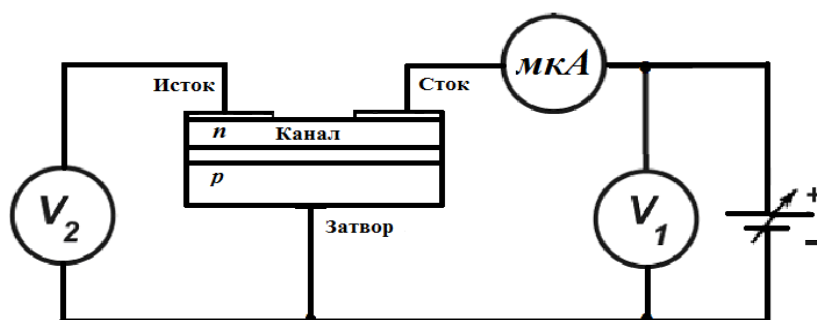
Тўғри токнинг p - n -ўтиш орқали чекланганлиги сабабли (I_{myz}^{const}), ҳароратнинг ошиши тушаётган кучланишнинг камайишига олиб келади. Бунда тўғри токнинг тўйиниш токига нисбатининг ўзгариши ҳарорат коэффиценти бошқариладиган ўзгаришини таъминлайди (13-формулага қаранг). Бунда намуналар тўпламидан ҳарорат коэффицентларини идентификациялаш имконияти пайдо бўлади.

Шу сабабли тўғри токни чеклаш режимидаги p - n -ўтишли майдон транзистори ток ўтказиш механизмига асосан ҳарорат сезгирлигига эга бўлиб, уни ташувчилар инжекцияси даражаси билан бошқариш мумкин. Олинган тўғри тушаётган кучланишнинг ҳарорат сезгирлиги қийматлари (2.5 мВ/°С) диод ва транзистор структуралардаги қийматларидан қолишмайди.

Ёпилиш кучланиши ҳарорат коэффиценти билан тушаётган кучланиш ҳарорат коэффиценти солиштириш шуни кўрсатдики, иккала ҳолатда ҳам улар ёпилиш кучланиши катталигига боғлиқ. Тўғри силжиш режимида ҳарорат коэффиценти тўғри токнинг тескари токка нисбати билан аниқланади, яъни катталикни бошқариш мумкин. Бунда ёпилиш кучланиши

кичик бўлган намуналарда тушаётган кучланиш катта қийматга эга бўлиб, бу ўлчовнинг аниқлигини оширади. Хулоса қилиб айтганда, майдон транзисторининг ҳарорат коэффиценти база соҳаси қалинлиги билан пропорционал бўлиб, улар физикавий бошқарилади.

8-расмда исток-затвор ўтишида кучланишнинг тушишини ўлчаш учун майдон транзисторининг электрик схемаси уланиши келтирилган. Биринчи вольтметрга уланган блок манбасидан ишчи кучланиш микроамперметрдан сток-затвор ўтишига берилади.

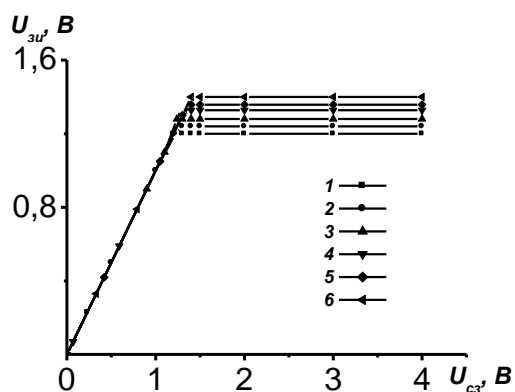


8-расм. Сток-затвор кучланиши билан канал ёпилиш режимида исток-затвор ўтишида кучланишнинг тушишини ўлчаш схемаси

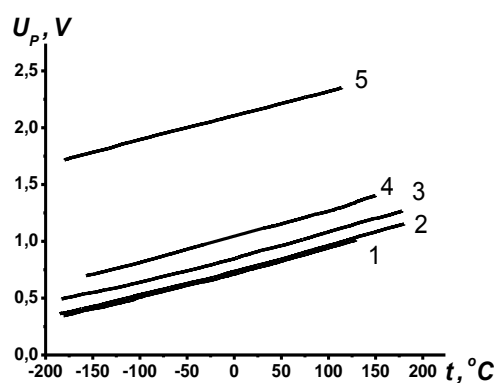
Исток-затвор ўтишида кучланишнинг тушишини схема асосида тадқиқ этилганда ҳароратнинг ошиши (9-расм) ёпилиш кучланишининг ҳарорат коэффиценти (мВ/°С) нинг ошишига олиб келади.

$$\alpha_{enu} = (U_{enu}^2 - U_{enu}^1) / (T_2 - T_1) \quad (15)$$

Олинган ҳарорат коэффиценти қийматлари (2.3 мВ/град) (10-расм) ишлаб чиқарилган диод структуралардан икки марта каттадир.



9-расм. Сток-затвор кучланишнинг затвор-исток кучланишига боғлиқлиги 1-20 °С, 2-40, 3-50, 4-60, 5-70, 6-80 °С.



10-расм. Турли технологик параметрли майдон транзисторлари канал ёпилиш кучланишининг ҳароратга боғлиқлиги

Ҳарорат билан канал ёпилиш кучланишининг ортишини p - n -ўтиш потенциалининг контакт фарқининг камайиши билан тушунтириш мумкин, бунда ҳарорат ошганда хусусий ташувчилар концентрацияси ошади.

$$U_D = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_{кан} N_{зам}}{n_i^2} \quad (16)$$

Натижада $U_{зи} = 0$ учун ҳажмли заряд соҳасининг бошланғич қалинлиги кичраяди:

$$W_{ооз} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 U_d (N_{кан} + N_{зам})}{q \cdot N_{кан} \cdot N_{зам}}} \quad (17)$$

p-n-ўтишнинг сигими катталашади:

$$C_{p-n} = \frac{\epsilon_0 A}{W_{хсз}} \quad (18)$$

бу каналнинг ўтказиш қисми қалинлигининг катталашувиغا олиб келади:

$$\Delta d = a - W_{хсз} \quad (19)$$

Шунинг учун канал отсечкасига каттароқ ёпувчи кучланиш $U_{мес}$ керак бўлади.

$$U_{ёни} = \frac{N_{кан} q a^2}{2\epsilon_0} \left(1 + \frac{N_{кан}}{N_{зам}} \right) = U_{мес} + U_D \quad (20)$$

Берилган режимдаги тадқиқ этилган майдон транзистори диод структуралардан қолишмайдиган ҳарорат сезгирлигига эга бўлиб, амалда энергия сарфламаслиги билан устунликка эгадир. Бунда ёпилиш кучланиши коэффициенти

$$\alpha_{мес} = (U_{мес}^2 - U_{мес}^1) / (T_2 - T_1) \quad (21)$$

2.2 мВ/градусни ташкил этиб, тўғри токни чеклаш режимидаги диод структураларда кузатиладиган қийматлар даражасини ~ 10 мА ташкил этади.

Германий асосида биполяр транзистор структураларнинг ҳарорат сезгирлиги вольтампер характеристикаларини ҳарорат датчиги сифатида қўлланилиш нуқтаи назаридан тадқиқ этилиши шуни кўрсатдики, тўғри силжиш режимида база-коллектор ўтишида ҳароратнинг ошиши билан текис тармоқ кичик кучланишлар соҳасига параллел силжийди, аммо қиялашади (11-расм), бу эса кескин ўзгарувчан ҳароратни регистрациялашда қўллашни чегаралайди.

11-расмда келтирилган берилган ҳарорат интервали асосида олинган маълумотларни ҳарорат коэффициенти қийматларини ҳисоблаш натижалари 2-жадвалда келтирилган.

2-жадвал

Коллектор-база ўтишида ҳарорат коэффициентининг ток маълумотлари

Ҳарорат интервали, °С	20÷30	30÷40	40÷50	50÷60
α_1 , мкА/град	1.2	1.9	2.3	2.7

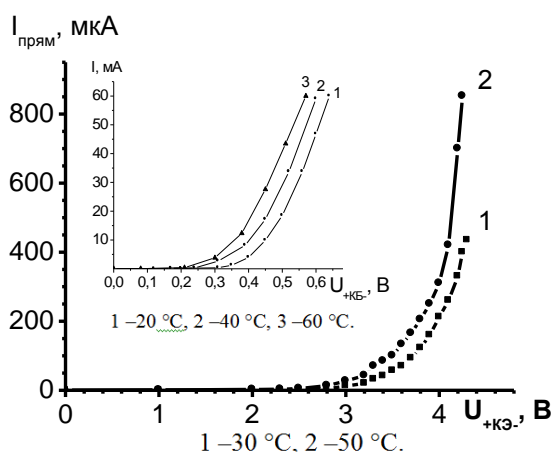
Жадвалдан кўринадикки, ҳарорат 20 дан 60 °С га кўтарилганида, ёпилиш ўтишининг ток ҳарорат коэффициенти 1.2 мкА/град дан 2.7 мкА/град гача ошади. Тегишли равишда алоҳида олинган ёпилиш режимида база-коллектор

ўтишга нисбатан (11-расм) икки қутбли улаш режимида олинган коллекторли ўтиш ёпилиш режими ишчи кучланиш билан бошқариладиган ҳарорат сезгирлигини олиш имконини беради (12-расм).

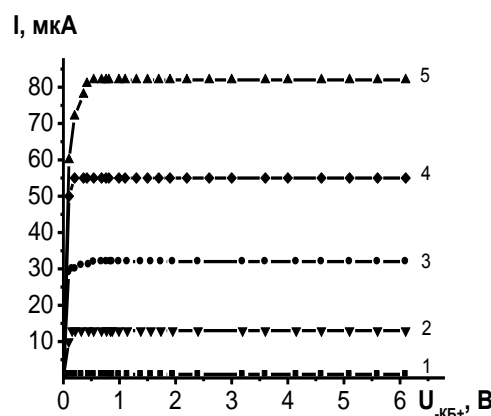
Тадқиқ этилган транзисторда берилган фиксацияланган ток учун ҳарорат коэффиценти кучланиши

$$\alpha_U = \frac{U_1 - U_2}{\Delta T} \quad (22)$$

диод структурадагидек 2 мВ/град эканлигини кузатиш мумкин. Бу режимда фиксацияланган ишчи токни 7 мА дан каттароқ олиш керак бўлади, бунда база-коллектор ўтишида кучланиш тушиши ҳарорат сезгирлиги ўзагармас қийматга эга бўлади.



11-расм. Текис силжиш режимида коллектор-база ўтишининг турли ҳароратларда (киритма) ва эмиттер ўтишни ёпишда эркин базали икки қутбли режим (+)р-п-р⁻(-) да токнинг кучланишга боғлиқлиги



1-20 °С, 2-30 °С, 3-40 °С.
4-50 °С, 5-60 °С.
12-расм. Турли ҳароратларда коллектор-база ўтишининг ёпилиш режимида токнинг кучланишга боғлиқлиги

Хусусан, бундай тоқларда ҳароратнинг ошиши билан кучланишнинг камайиши чизиқли бўлади, бу эса унинг ҳароратни ўлчаш параметри сифатида қўлланилишини тасдиқлайди.

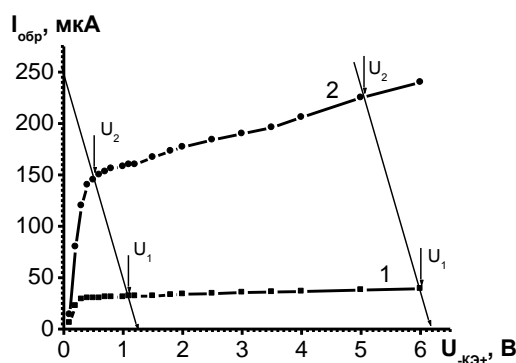
Коллектор-база р-п-ўтишнинг ёпилиш режимида берилган ҳароратда кучланишининг ошиши билан ток ўзгармайди (12-расм), ҳароратнинг ошиши билан эса токнинг ҳарорат коэффиценти ошиши ток қийматини чизиқли равишда катталаштиради:

$$\alpha_I = \frac{I_2 - I_1}{\Delta T} \quad (23)$$

Демак, коллекторнинг тескари токини ҳам ўлчов параметри сифатида ишлатиш мумкин.

13-расмда (-)р-п-р⁺(+)- структура ишчи токининг ортишини токнинг ўтказиш коэффиценти коллектор-эмиттер кучланишига боғлиқлиги ва ҳарорат ортиши билан катталашини орқали тушунтириш мумкин, бу эса

ташувчиларнинг коллекторли ўтишида генерацияланадиган миқдори ошиши билан изоҳланади.



1–30 °C, 2–50 °C.

13-расм. Икки қутбли улаш режимида (-)р-п-р⁺ (+) сузувчи (эркин) базали коллекторли ўтишнинг ёпилишида токнинг кучланишга боғлиқлиги

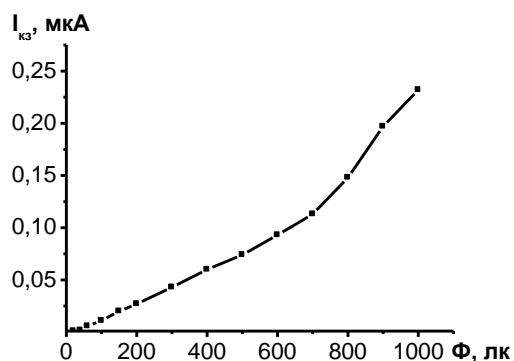
Бунда эмиттерли ўтишнинг қаршилиги ҳароратнинг таъсирига, коллекторли ўтишнинг қаршилиги эса ёпилиш кучланишига сезгирроқ бўлади. Шунинг учун (-)р-п-р⁺(+)-структурали транзистор икки қутбли режимда уланишида алоҳида олинган диоддан юқори ҳарорат сезгирликка ва кичик ишчи токка эга бўлади. Бундай датчиклар авиация, автомобиль ва бошқа ишлаб чиқариш соҳаларида қўлланилиши жиҳатидан аҳамиятга эга.

Тўртинчи боб «**Майдон транзисторининг ёруғлик нурланиши ва босимга сезгирлиги хусусиятлари**» деб номланиб, унда майдон транзисторининг фотоэлектрик характеристикаларига интеграл ёритилганликнинг таъсири ва деформациянинг хусусиятлари ҳамда улар асосида амалий схемалар келтирилган.

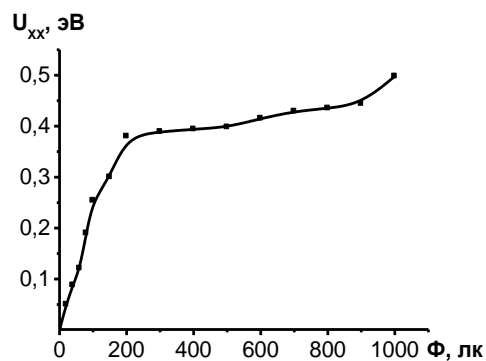
Тадқиқ этилган транзисторда канал соҳасининг ёритилганлиги затворканал ўтиши жиҳатидан фотодиодга ва р-п-ўтиш бошқариладиган кучайтиргич майдон тразисторига эквивалент, яъни майдон транзисторини диодли улашда қўллаш мумкин.

14-расмда қисқа туташув токининг ёритилганлик интенсивлигига боғлиқлиги келтирилган. Расмдан кўринадики, қисқа туташув токи икки барьерли Шоттки фотодиод структуралардан фарқли равишда пасайиш ўрнига, чизиқли равишда 600 лк ёритилганликкача ошади, сўнг ночизиқли ошиши кузатилади.

Қисқа туташув токининг ёритилганлик интенсивлигига суперчизиқли боғлиқлигига мойиллигини, майин плёнкали эпитаксиал каналларда ёритилганлик интенсивлиги натижасида фототашувчилар генерацияси билан тушунтириш мумкин. Бунда фотовольтаик қабул қилгичда қисқа туташув токи ва салт юриш кучланишининг ёритилганлик интенсивлиги 200 лк гача қийматда чизиқли боғлиқ соҳалари мавжуд бўлади, бу уни паст оптик сигнал интенсивлигида ишлатиш имконини яратади (15-расм).



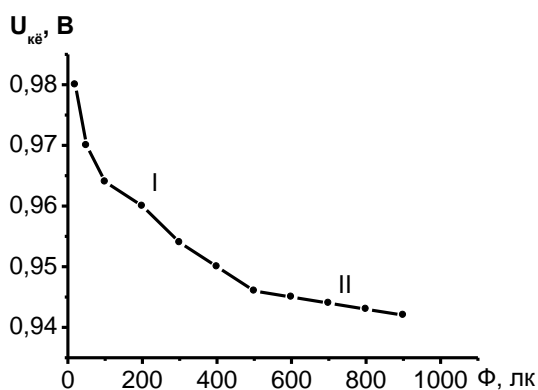
14-расм. Қисқа туташув токининг ёритилганлик интенсивлигига боғлиқлиги



15-расм. Салт юриш кучланишининг ёритилганлик интенсивлигига боғлиқлиги

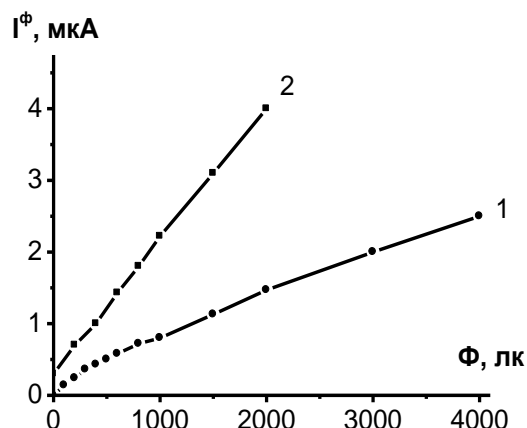
Сток-затвор кучланиши билан каналнинг ёпилиш режимда тадқиқ этилган майдон транзисторининг ёруғлик нурланишига сезгирлиги натижаларига ўтсак, бунда кучланишнинг пасайиши, яъни ёритилганиликнинг интенсивлиги ошиши (500 лк гача) билан унинг катталиги чизиқли равишда маълум коэффициентли (16-расм, I соҳа) пасаяди, сўнгра кучланишнинг пасайиши секинлашади ва бу коэффициентнинг қиймати ярим даражага камаяди (16-расм, II соҳа).

Ёпилиш кучланишининг бундай ўзини тутишини ёруғлик нурланишининг ўрнига таъсир этаётган ёруғликнинг иссиқлик характери билан тушунтириш мумкин. Яъни, ёритилганликнинг кичик интенсивликларида структуранинг қизиши салмоқли эмас, аммо кейинроқ структуранинг ҳарорати ошиб, ёпилиш кучланишининг пасайиш жараёни секинлашади ва ҳароратнинг таъсири ошади. Бундан ёпилиш кучланиши ошиши керак (16-расм), бу эса юқори интенсивликда (600 лк) кузатилади.



I-0.000048 мВ/лк = 0.048 мкВ/лк, U_{ке}=0.97 В;
II-0.00001 мВ/лк = 0.01 мкВ/лк, U_{ке}=0.98 В

16-расм. Сток-затвор кучланиши билан каналнинг ёпилиш режимда затвор-исток ўтиши кучланишининг пасайишига ёритилганликнинг боғлиқлиги



17-расм. Қисқа туташуш (1) ва сток-затвор кучланиши билан каналнинг ёпилиш (2) режимда фототокнинг ёритилганлик интенсивлигига боғлиқлиги

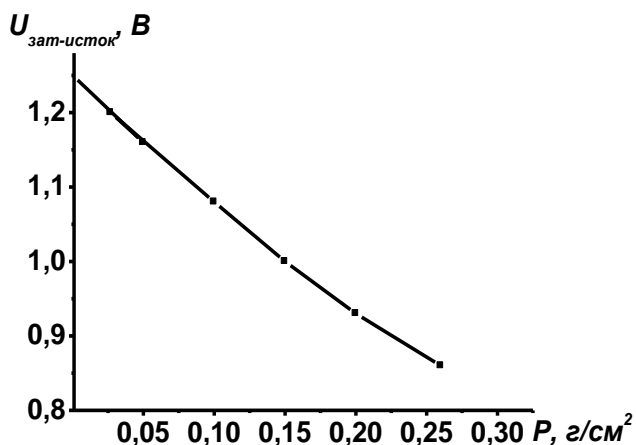
Физика қонунлари асосида каналнинг ҳажмли заряд соҳаси ёритилганда, затвор-канал ўтишида электрон-ковакли жуфтлик генерацияланиб, исток-затвор ўтишида фототок ҳосил қилади ва бу ўтишнинг қаршилигини камайтиради

$$R_{zu}^{p-n} = U_{enu} / (I^T + I^{\Phi}) \quad (24)$$

бу эса ўз навбатида кучланишнинг пасайишига олиб келади ва сток-затвор токининг ошишини (каналнинг ўтказиш қисми қалинлигининг ошиши ҳисобига) таъминлайди. Бу ерда иккита параметр бўлади: ёпилиш кучланиши ва сток-затвор ўтишидаги фототок.

Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, қисқа туташув режимида затвор ва исток чиқишлари амперметр орқали қисқа туташтирилиб галоген лампа ёрдамида канални ёритиш интенсивлиги оширилганда, фототок тўғри чизиқликка яқинлашади (17-расм, 1-эгри чизиқ). Бунда сток-затвор кучланиши билан канални ёпилиш режимида сезгирлиги 0.0018 мкА/лк бўлган икки карра ортиқ фототокка эга бўламиз (17-расм, 2-эгри чизиқ). Ёпилиш кучланишига қараганда сток-затвор ўтиш фототоки анча информатив ҳисобланади, у маълум бўлган улаш режимлари ва стандарт фото қайд қилгичларнинг ёруғлик нуридан ҳосил бўладиган фототокдан икки марта ёки бир даража каттадир, бунда сток токи ва канал ёпилиши кучланишидан чизиқли характеристикаси билан фарқ қилади.

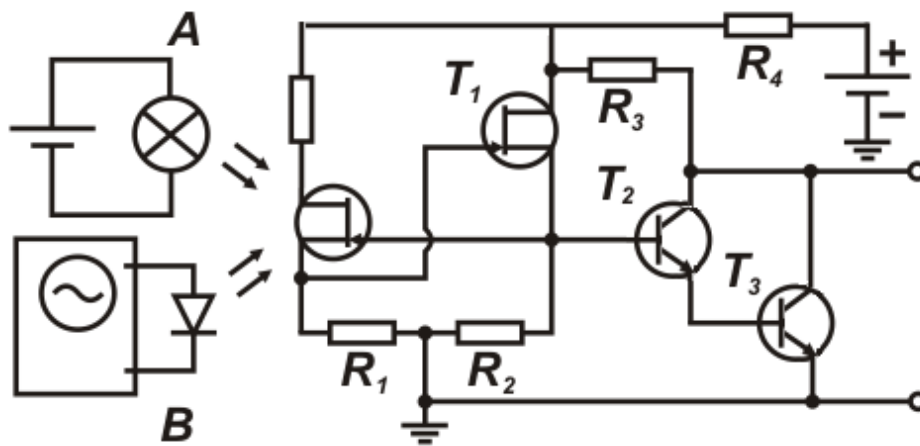
Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, босим таъсирида (18-расм) затвор-исток ўтишида тушаётган кучланиш (ёпилиш кучланиши) чизиқли пасаяди. Босимнинг 0.027 г/см² дан 0.26 г/см² гача оширилиши ёпилиш кучланишининг 1.2 В дан 0.86 В гача камайишига олиб келади. Ёпилиш кучланиши коэффициентининг босимга сезгирлиги 1.46 В/(г/см²) ёки 1.46·мВ/Па ни ташкил қилади, бу эса биполяр транзистор коллекторли ўтиши



18-расм. Канал ёпилиш кучланишининг босимга боғлиқлиги

$$\alpha_{enu} = (U_{enu}^2 - U_{enu}^1) / (P_2 - P_1), \text{ мВ/ (г/см}^2\text{)} \quad (25)$$

тензосезгирлигидан икки марта юқоридир. Ёпилиш кучланишининг пасайишини босим таъсирида p-n-ўтишнинг ҳажмли заряди қавати қалинлиги ва каналнинг умумий қалинлигининг кичрайиши билан тушунтириш мумкин, натижада каналнинг ёпилиши учун кам кучланиш талаб этилади.



19-расм. Майдон транзистори ва сигнал кучайтиргич асосида тайёрланган оптик сигналларни қабул қилувчи электрон схема

Майдон фототранзисторининг фото қабул қилиш хоссаларини тадқиқ қилиш учун уланиш режимида кириш каскадли майдон транзисторига ва манба кучланиши 3.0 В бўлган, Дарлингтон схемаси бўйича бирлаштирилган иккита биполяр транзисторларга асосланган тежамкор кучайтиргич йиғилди (19-расм). Майдон транзистори интеграл ёруғлик билан қўзғатилиб оптик сигнал 9 лк дан 150 лк га қадар оширилганда, 3-жадвалда кўрсатилганидек, кучайтириш коэффиценти камаяди. Кириш каскадида майдон фототранзисторни қўллаш ҳисобига кучсиз ёруғлик сигналига сезгирлик ошиши таъминланади.

Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, ёритилганлиги 9 лкдан 150 лкга ошадиган чўғ лампа билан диод транзисторининг фото ЭЮКини 10 мВ дан 350 мВ гача оширилганда, чиқиш сигнали қиймати 0.8 В дан 2.2 В га ошади. Бунда 20мВ дан бошлаб чиқиш сигнали катталиги доимий бўлиб, 2.2 В га тенг.

3-жадвал.

Оптик сигнал интенсивлигидан олинган чиқиш сигналлари

Φ, лк	9	12	25	50	70	90	150
U _{хх} , мВ	20	30	50	100	150	200	300
U _{чик} , В	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
K _{куч}	110	73.3	44	22	14.6	11	7.3

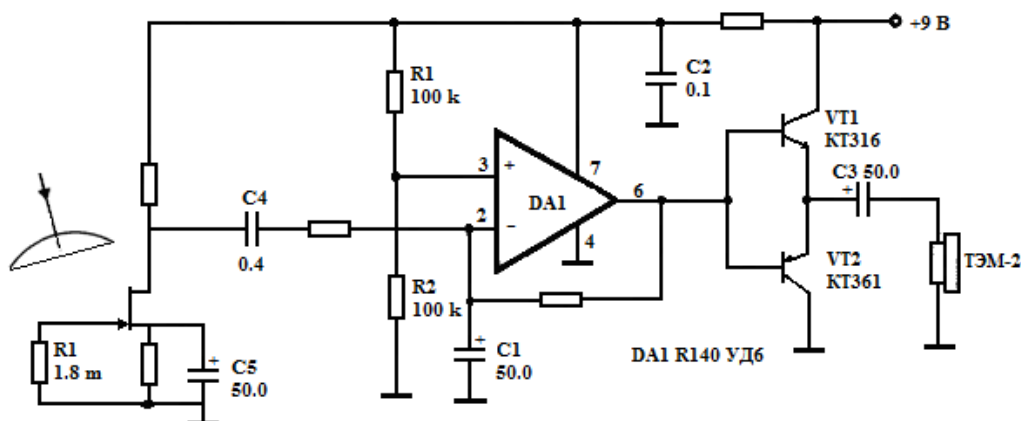
Аналогик равишда светодиоддан модуляция частотаси 100 Гц бўлган модуляцияланган нурланиш юборилганда, фотодиоднинг чиқишида 300 мВ фото ЭЮК ҳосил бўлса, тегишли кучланиш коэффицентлари таъминланади (4-жадвал).

4-жадвал

Кичик кучланишли схема кучайтиргич коэффиценти ва чикувчи сигналнинг кириш сигнали катталигига боғлиқлиги

U _{хх} , мВ	100 Гц						
	20	30	50	100	150	200	300
U _{чик} , В	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
K _{куч}	110	73.3	44	22	14.6	11	7.3

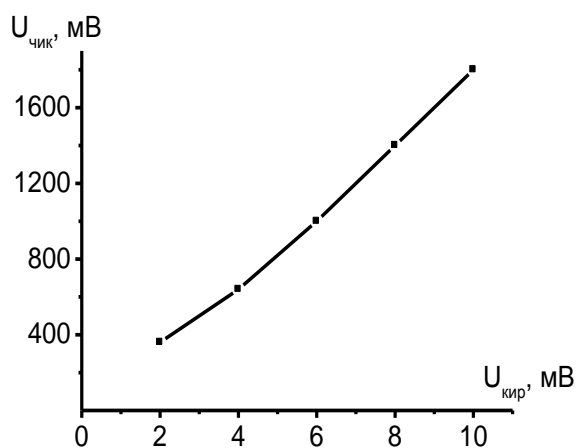
Кичик автоматик силжиши режимда қабул қилувчи сифатида майдон транзисторини қўллаш бўйича тақлиф этилган электрон схема (20-расм) кичик ўзгарувчан сигналларни (4мВ) бузилишсиз қабул қилишни таъминлади.



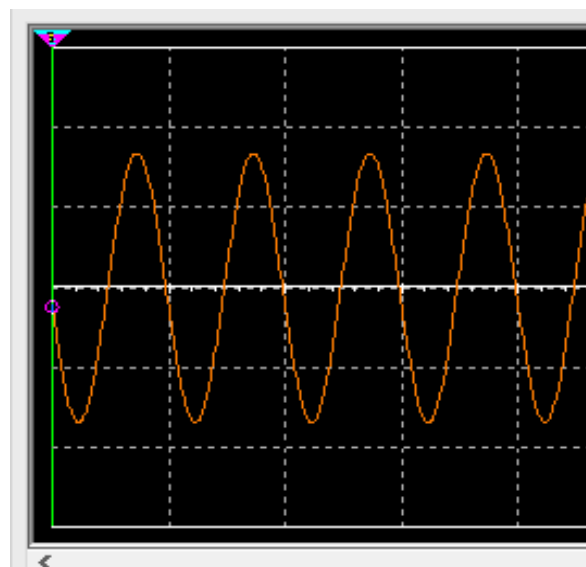
20-расм. Оптик сигналларни қабул қилиш модули
электрик схемаси

Каналга оптик сигналларни юборишни овоз сигналларини генерацияловчи ГЗ-109 га уланган яримўтказгич лазер нури линзадан ўтказилиб, чиқаётган кучайтирилган сигнални мослаш учун С1-70 осциллографи ишлатилди.

21-расмдан кўринадикки, кириш сигнали 4 дан 10 мВ гача кенг диапазонда чиқиш сигнали чизиқли ошади ва бузилишсиз кучайтирилган. Умумий ис-токли схемани қўллаш ҳам ток ҳам, кучланиш бўйича кириш сигналини кучайтириш имконини беради (умумий эмиттерли биполяр транзистор схемаси аналогини).



а)



б) вертикал бўйича клетка 100 мВ,
горизонтал бўйича клетка 1 мс

21-расм. Чиқиш сигналнинг кириш сигналига боғлиқлиги (а) ва (б) майдон фототранзистори чиқишида кучайтирилган сигналнинг формаси

Майдон фототранзисторини оптик сигналлар қабул қилувчиси сифатида қўллашдан мақсад шундаки, кўпгина фотоприемниклардаги лавинали

фотодиолар чегаравий (максимал) режимда ишлаши сабабли хизмат кўрсатиш муддати камайишига ва тез ишдан чиқишига олиб келади.

Оптик сигналлар қабул қилиш модуллари оптик сигналларни узатиш ва қабул қилиш системаларини конструкциялашда, алоқа системалари, тиббиёт, халқ хўжалиги ва хусусий типдаги қўриқлаш сигнализациялари учун истиқболли ускуна ва асбоблар яратишда, оптик телефон ва турли регистрцияловчи ускуналарда қўлланилиши мумкин. Шу билан бирга технологик электр ускуналар ишини дистанцияли бошқаришда ҳам қўлланилиши мумкин.

ХУЛОСА

Майдон транзисторининг ташқи (босим, ёруғлик ва иссиқлик) таъсирларга сезгирлигини каналнинг ёпилиш режимда ўрганиш бўйича ўтказилган тадқиқот натижалари асосида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Ҳарорат ортиши билан канал ёпилиши кучланишининг ортиши *p-n*-ўтиш контакт потенциалларининг фарқи камайиши ва хусусий ташувчилар концентрацияси ошиши билан аниқланиши топилган.

2. Майдон транзисторининг температуравий сезгирлик коэффициенти, канал ёпилиши режимда ҳарорат туфайли база қалинлиги катталаниши жараёни билан боғлиқ бўлиб, транзисторли структураларнинг технологик параметрларидан қатъи назар барча майдоний транзисторлар учун айнан битта қонунга бўйсунуши аниқланган.

3. Майдон транзисторининг босимга сезгирлиги канал ўтказувчи қисмининг қалинлиги камайиши ва *p-n*-ўтиши хажмий заряд соҳаси дастлабки қалинлигининг ортиши билан боғлиқлиги кўрсатилган.

4. Диодли режимда майдон транзисторининг фотосезгирлик механизми таклиф қилинган, унга кўра ёритилганлик интенсивлигининг ортирилиши нурланиш ютилишининг чуқурлиги ортади, *p-n*-ўтишдаги контакт потенциаллар фарқи кичрайиб (*n*-қаватда диффузион потенциал тўлиқ жойлашган) *n*-қават канали ўтказиш қисми қалинлигининг ортишига олиб келади. Бу ўз навбатида генерацияланган фототашувчилар концентрациясининг ёритилганлик интенсивлигига пропорционал ошишига ва канал қаршилигининг камайишига (қалинлиги $1 \div 2$ мкм) олиб келиб, люксампер хараakterистикасининг суперчизиқли боғлиқлигини таъминлаган.

5. Тажриба асосида канал ёруғлик нури (4000 лек) билан нурлантирилганда, сток-затвор кучланиши ортиши билан канал ёпилиш содир бўлгунча исток-затвор ўтишида кучланишнинг тушиши ҳам ортади, аммо бу 0.8 В дан паст кучланишда содир бўлади. Бунда стокда ҳам фототок пайдо бўлиши кўрсатилган.

6. Сток-затвор кучланиш билан каналнинг ёпилиш режимда майдон транзисторининг фотосезгирлик механизми таклиф этилган: квантлар энергияси $h\nu$ бўлган (тақиқланган зона кенглигидан катта) ёруғлик билан майдон транзистори канали ёритилганда, исток-затвор ўтишида фототок ҳосил

бўлади, бу эса исток-затвор ўтишининг қоронғилик қаршилигини камайтиради натижада ёпилиш кучланишининг камайишига олиб келади. Ёритилганлик интенсивлиги қанча юқори бўлса, исток-затвор ўтишининг қаршилиги ва ундаги кучланишнинг тушиши шунча кичик бўлиши тажрибада аниқланган.

7. Майдоний транзистор асосидаги кўп функцияли қайд қилгич кичик автоматик силжишда оптик сигналларни қабул қилиш функциясини бажариши тажрибада кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.28.02.2018.FM.60.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ АНДИЖАНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТУРАЕВ АКМАЛ АТАЕВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО
ТРАНЗИСТОРА В РЕЖИМЕ ОБЕДНЕНИЯ КАНАЛА**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

АНДИЖАН – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.2.PhD/FM87.

Диссертация выполнена в Бухарском государственном университете.

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

Научный руководитель: **Джураев Даврон Рахманович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Шарибоев Носиржон Юсупжонович
доктор физико-математических наук

Ведущая организация: **Каракалпакский государственный университет**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2018 года в ____ часов на заседании Научного совета PhD.28.02.2018. FM.60.01 при Андижанском государственном университете. Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университет, дом 129. Зал конференций Андижанского государственного университета. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Андижанского государственного университета (зарегистрирована за № ____). Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университет, дом 129. зал конференций Андижанского государственного университета. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu_info@edu.uz.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 г.
(протокол рассылки № _____ от «__» _____ 2018 г.).

С.З. Зайнабидинов
Председатель Научного совета по присуждению
ученой степени, д.ф.-м.н., академик

А.О. Курбанов
Ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученой степени, к.ф.-м.н.

И.Н.Каримов
Председатель Научного семинара при
Научном совете по присуждению
ученой степени, д.ф.-м.н.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире в бурно развивающейся области физики полупроводников уделяется особое внимание одному из перспективных направлений полупроводникового приборостроения-повышению чувствительности к внешним воздействиям (давлению, оптическому и тепловому излучениям), способствующему расширению их функционального назначения. В этом аспекте выявление особенностей чувствительности к внешним воздействиям полевого транзистора в режиме отсечки канала является одной из важных задач.

В мире на сегодняшний день большое внимание уделяется датчикам на основе полупроводников, исследованию их фотоэлектрических и тепловых параметров. При этом одной из важных задач является проведение целевых научных исследований в следующих направлениях: разработка и исследование влияния тепла и света на транзисторные структуры с *p-n*-переходом; определение зависимости напряжения отсечки от температуры и деформации в режиме отсечки канала; выяснение особенностей фотоэлектрических эффектов в полевом транзисторе при различных режимах включения; расширение функциональных параметров полупроводниковых датчиков.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан имеет важное значение стимулирование разработок эффективного механизма внедрения достижений научных исследований, целенаправленная реализация физических процессов, протекающих в полупроводниковых приборах, способствующих эффективному управлению технологическими процессами. Является целесообразным развитие активного предпринимательства, инновационных идей и технологий, нацеленных на получение новых научных результатов, отвечающих современным требованиям научного развития. В этом аспекте является важным применение физических процессов, протекающих в полупроводниковых приборах в практике, их использования при управлении технологическими процессами, и на этой основе обеспечить широкое применения полупроводниковых датчиков. В этом аспекте разработка нового типа функциональных датчиков предназначенных для управлению технологическими процессами в электротехнической промышленности позволит обеспечить создание усовершенствованных изделий соответствующих международному стандарту и повышение их конкурентоспособности.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан ПП–1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011-2015 гг.» от 15 декабря 2015 года, № УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года и №ПП-2789 «О мерах по дальнейшему

совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данная исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики: «III. Развитие использования источников возобновляемой энергии».

Степень изученности проблемы. Ученые Манчестерского университета (США) разработали беспроводные датчики для мониторинга температуры, а ученые Агрофизического НИИ Россельхозакадемии разработали датчики влажности. Термодатчики различного типа начали производиться компаниями Analog Devices и National Semiconductor.

Следует отметить, что в развитие этого направления внесли определенный вклад ученые Узбекистана М.К.Бахадирханов и Б.Э. Эгамбердиев. Ими заложены основы создания термодатчиков с нанокластерными включениями. Однако проблемы применения полупроводниковых транзисторных структур в новом назначении, в частности, датчиков температуры и светового излучения, а также возможности расширения их функциональных свойств остаются неизученными.

До сегодняшнего дня в мире для управления технологическими процессами остаются широко используемыми приборами термо и фоторезисторные структуры, термодпары, однако их быстродействие перестает удовлетворять растущим требованиям. Для удовлетворения в определенной степени поставленных требований задача разработки новых структур или раскрытие их режимов включения, обеспечивающих достижение быстродействия и чувствительности диодов и транзисторов, остаётся актуальной.

Связь темы диссертационного исследования с тематическими планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана фундаментальных и прикладных исследований а также в проекте молодых ученых ЁА-4-001 «Создание датчиков на основе фототранзисторных структур, регистрирующих солнечный поток» (2016 г.).

Целью исследования является установление особенностей чувствительности к внешним воздействиям (давлению, световому и тепловому излучениям) полевого транзистора в режиме отсечки канала.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи исследования:**

установить зависимость напряжения отсечки полевого транзистора от температуры в режиме запираия;

выяснить особенности фотовольтаических эффектов полевого транзистора в диодном режиме включения;

исследовать влияние давления на напряжение отсечки канала полевого транзистора;

исследовать световые характеристики от интегрального освещения при различных режимах включения;

выявить новые функциональные возможности полевого транзистора, включенного в режим отсечки канала.

Объектами исследования являются полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом в режиме обеднения канала.

Предметом исследования являются физические процессы в полевом транзисторе, протекающие при внешних воздействиях.

Методы исследования. В работе использованы вольтамперные, вольт-фарадные методы изучения структур с *p-n*-переходом; методы измерения фоточувствительности структур при различных рабочих напряжениях.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлен механизм температурной чувствительности напряжения отсечки, согласно которому с повышением температуры контактная разность потенциалов *p-n*-перехода уменьшается, а собственная концентрация носителей увеличивается, приводя к увеличению толщины проводящей части канала и напряжению отсечки;

показано, что температурный коэффициент напряжения отсечки подчиняется одному и тому же закону для всех полевых транзисторов одного типа-номинала (шириной и длиной канала) независимо от технологических параметров транзисторной структуры в широком температурном диапазоне от -150°C до $+150^{\circ}\text{C}$;

выявлен механизм фоточувствительности полевого транзистора в режиме отсечки. Соответственно от запирающего напряжения сток-затвор на переходе исток-затвор создается падение напряжения (напряжение отсечки) и по мере повышения интенсивности освещения канала падение напряжения на истоке (сопротивление исток-затвор) уменьшается, а величина фототока, возникающего на стоке, увеличивается;

механизм тензочувствительности полевого транзистора заключается в том, что при всестороннем давлении толщина проводящей части канала относительно исходной толщины области объемного заряда *p-n*-перехода затвора уменьшается, приводя к уменьшению значения напряжения для запираения канала;

экспериментально показано, что датчик на полевом транзисторе с предложенными характеристическими параметрами канала в режиме малого автоматического смещения может быть использован в приемном модуле оптических сигналов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

полевой транзистор в режиме отсечки канала можно использовать для измерения температуры или давления, если принять в качестве измерительного параметра напряжение отсечки канала;

в режиме запираения напряжением сток-затвор полевой транзистор можно использовать в качестве высокочувствительного фотоприемника.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением для исследования современных стандартных и апробированных устройств и приборов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в расширении представлений о физических процессах, протекающих в режиме отсечки канала напряжением сток-затвор.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что многофункциональность полевого транзистора в режиме запираания можно использовать для изготовления приборов диагностики, работающих в режиме микротоков.

Внедрение результатов исследования. В результате исследования чувствительности к внешним воздействиям в режиме запираания полевого транзистора с *p-n*-переходом:

на многофункциональный датчик на основе полевого транзистора получен патент Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан «Многофункциональный датчик на основе полевого транзистора» (№ IAP 05120 от 12.10.2015). Разработанный многофункциональный датчик на полевом транзисторе позволил зарегистрировать температуру, свет и деформацию в электронных измерительных системах;

способы измерения температуры с помощью электронных схем на основе полевого транзистора при использовании напряжения отсечки в качестве измерительного параметра Бухарским государственным университетом при выполнении проекта Ф2-ФА-0-83921/Ф2-ФА-Ф0383 «Сильные корреляционные взаимодействия в сверхпроводниках и магнитных материалах и их критические параметры» 2014-2016г. позволил измерить задаваемую температуру в исследуемых объектах (Справка Агенства по науке и технологиям Республики Узбекистан ФТА-02-11 / 941 от 24 октября 2017 года). Использование научных результатов позволило улучшить стабильность поддержания температуры сверхпроводящих материалов.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 5 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По материалам диссертации опубликовано 22 научные работы, из них 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации, и получен 1 патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Текст диссертации изложен на 118 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе под названием **«Анализ состояния исследований по влиянию светового, теплового и деформационного воздействий на характеристики диодных и транзисторных структур»** рассмотрены механизмы чувствительности резисторных, диодных и транзисторных структур к температуре, световому излучению и деформации. На основе анализа имеющихся экспериментальных данных по исследованию влияния температуры, светового излучения и деформации сформулирована постановка задачи.

Вторая глава под названием **«Физико-технологические особенности многофункционального датчика»** посвящена обоснованию выбора полевого транзистора в качестве чувствительного элемента, физическим принципам повышения чувствительности его функциональных характеристик, особенностям ключевых параметров полевых транзисторов.

Известные диодные и биполярные транзисторные структуры кроме прямого назначения-усиления электрических сигналов-могут быть использованы для измерения температуры или при соответствующем подборе параметров базовой области для измерения светового излучения и др. Среди них полевые транзисторы отличаются множеством режимов включения, при этом реализация нетрадиционных режимов включения позволила придать им новые свойства, которых нельзя достичь в обычных режимах включения.

Нами для создания многофункционального датчика предлагается включать полевой транзистор в режиме отсечки канала, а в качестве измерительного параметра использовать напряжение отсечки канала. В данном режиме внешнее воздействие (температура, свет, давление) будет приводить к изменению толщины проводящей части канала слоем объёмного заряда затвора, что, в свою очередь, приведет к соответствующему изменению напряжения отсечки, которое идентифицируется с воздействующим фактором (температура, свет, давление). На этом принципе основан предлагаемый многофункциональный датчик.

Напряжение отсечки, фиксируемое высокоомным вольтметром, используется в качестве измерительного параметра. Например, данное напряжение отсечки соответствует первичному значению U_{omc}^1 , а при изменении температуры (освещенности, давления) канала напряжение отсечки принимает новое значение U_{omc}^2 . Отношение разности напряжения отсечки на воздействующий фактор представляет собой чувствительность полевого транзистора.

В частности, коэффициенты чувствительности определяются из выражений:

температурная чувствительность

$$\alpha_{omc} = (U_{omc}^2 - U_{omc}^1) / (T_2 - T_1), \text{ мВ/град}; \quad (1)$$

а фоточувствительность

$$S^\Phi = (U_{omc}^2 - U_{omc}^1) / (\Phi_2 - \Phi_1), \text{ мВ/люкс} \quad (2)$$

или чувствительность к давлению

$$S_p = (U_{omc}^2 - U_{omc}^1) / (P_2 - P_1), \text{ мВ/(гр/см}^2\text{)}. \quad (3)$$

Экспериментально показано, что известные кремниевые полевые транзисторы с р-п-переходом типа КП102 с каналом р-типа имеют токи насыщения $I_{сн} = 0.18 \div 6$ мА, крутизну $S = 0.25 \div 0.7$ мА/В, напряжение отсечки при токе стока 20 мкА составляет $2.8 \div 10$ В, рабочее напряжение сток - исток до 15 В, то есть имеют высокие значения напряжения отсечки (больше 2.8 В) связанные с неоптимизированностью толщины канала для обеспечения чувствительности к свету и деформации, непригодностью для приема световых сигналов. Сравнительно низкое значение выходного динамического сопротивления за счет положительного градиента примесей в канале, полученного диффузией легирующей примеси и на $20 \div 30\%$ большее напряжение отсечки канала по сравнению с эпитаксиальными структурами, разброс параметров, связанный с технологическими условиями.

Для придания существенной чувствительности к давлению, магнитному полю, радиационному, световому и тепловому излучениям транзисторной структуры предложен полевой транзистор с р-п-переходом, содержащий низкоомную подложку первого типа с нижним электродом затвора, эпитаксиальный высокоомный слой второго типа со сформированными на ее поверхности омическими контактными областями стока и истока, между которыми расположен канал, толщину канала выбирают сравнимым с исходной толщиной обедненного слоя p^+ - n -перехода.

Выбор толщины канала в предлагаемой взаимосвязи с заданной концентрацией носителей канала и толщиной области объемного заряда p^+ - n -перехода затвора дает оптимальное значение толщины канала и ее необедненной части сравнимой с модулируемой тепловым, световым излучением толщиной, что обеспечивает максимальную чувствительность для выбранной концентрации носителей канала.

Для обеспечения высокой чувствительности к деформации и магнитному полю оптимальное соотношение ширины образца W к длине L должна лежат в пределах $1.25 < W/L < 1.5$, в частности, толщина канала $1 \div 2$ мкм, ширина 40 мкм, длина $100 \div 200$ мкм.

Предлагаемый многофункциональный датчик изготовлен на основе кремния. Для этого на подложке кремния p^+ -типа проводимости с толщиной 200 мкм и концентрацией носителей $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ выращивался эпитаксиальный

слой n -типа проводимости с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ толщиной $1 \div 1.5 \text{ мкм}$, рис. 1.

Ключевыми параметрами исследуемого полевого транзистора являются, динамическое сопротивление канала (стока), ток стока в режиме запирания, напряжение запирания (отсечки), напряжение пробоя.

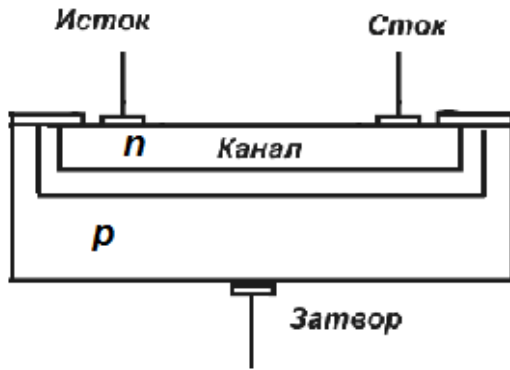


Рис. 1. Геометрия исследуемого полевого транзистора с p - n -переходом

Исследования статических характеристик полевого транзистора осуществляются в схеме с общим истоком. Рабочее напряжение прикладывается между стоком и истоком, а запирающее к переходу исток-затвор. Путем увеличения запирающего напряжения до отсечки создается семейство выходных стоковых характеристик. Как приведено на рис. 2 от приложенного напряжения между стоком и истоком ток стока увеличивается, приобретая насыщающийся характер.

При нулевом смещении на затворе ток стока имеет максимальное значение и по мере увеличения запирающего напряжения затвора канал охватывается областью объемного заряда, уменьшая толщину непокрытой части канала.

При достижении напряжения отсечки ток стока становится минимальным.

Для полевого транзистора с напряжением отсечки 0.6 В и током стока 580 мкА (рис. 2) динамическое сопротивление при нулевом смещении составляет 164 кОм и по мере увеличения запирающего напряжения до 0.4 В его величина увеличивается до 625 кОм .

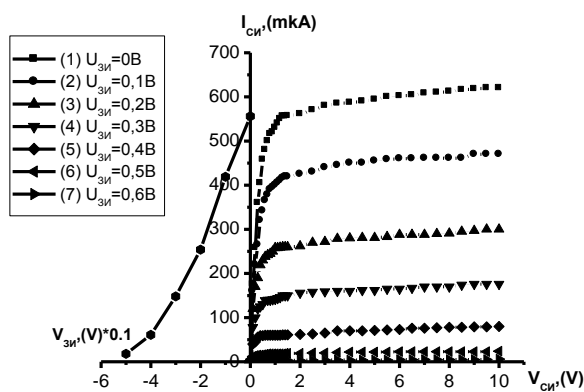


Рис. 2. Передаточная и стоковая вольтамперные характеристики полевого транзистора

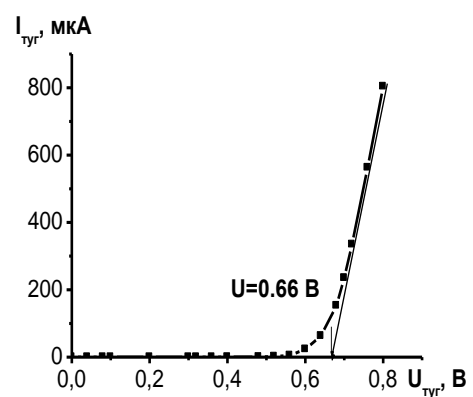


Рис. 3. Прямая ветвь вольтамперной характеристики перехода затвора полевого транзистора

Зависимости тока стока от запирающего напряжения формируют передаточную характеристику (рис.2, левый квадрант), где его наклон отражает

крутизну

$$S = \frac{I_{2cu} - I_{1cu}}{U_{2zu} - U_{1zu}} = \frac{\Delta I_{cu}}{\Delta U_{zu}} \quad (4)$$

Выходное динамическое сопротивление определяется из наклона стоковой характеристики

$$R_{дин}^{cu} = \frac{U_{2cu} - U_{1cu}}{I_{2cu} - I_{1cu}} = \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_{cu}} \quad (5)$$

Характеристика перехода затвор-исток, то есть $p-n$ -перехода подобна характеристикам полупроводникового диода, рис. 3. При этом зависимости прямого тока от напряжения затвора носят экспоненциальный характер. В области напряжения до 0.5В ток минимален и далее при напряжениях свыше 0.65В ток линейно возрастает.

Динамическое сопротивление канала определяет усилительные свойства полевого транзистора и степень стабилизации тока в режиме ограничителя, который представляет собой отношение приращения напряжения стока к приращению тока стока

$$r_{дин} = \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_{cu}} \Big|_{U_{zu} = const} \quad (6)$$

Как будет показано ниже, его коэффициент усиления будет улучшаться с увеличением запирающего напряжения за счет увеличения выходного сопротивления. Соответственно, чем выше будет динамическое сопротивление, тем выше будет уровень сигнала, поскольку выходное сопротивление усилительной схемы определяется сопротивлением нагрузки R_H и динамическим сопротивлением стока R_D , как параллельно включенные:

$$R_{ВЫХ} = \frac{R_D R_H}{R_D + R_H} \quad (7)$$

Коэффициент усиления по напряжению равен:

$$K_H = \frac{S_{МАКС} \cdot R_D \cdot R_H}{R_D + R_H} = \frac{\mu \cdot R_H}{R_D + R_H} \quad (8)$$

где μ - собственный коэффициент усиления транзистора по напряжению.

$$\mu = S_{МАКС} \cdot R_D \quad (9)$$

Обычно собственный коэффициент усиления полевого транзистора рассчитывается из статических стоковых вольтамперных характеристик как произведение статической крутизны на сопротивление нагрузки или выходное сопротивление.

Темновой ток затвора должен быть как можно малым в пределах пико-наноампер, тогда регистрируемый полезный сигнал будет на уровне десятков наноампер.

Напряжение отсечки должно быть порядка контактной разности потенциалов выпрямляющего p - n -перехода, то есть в пределах $0.5 \div 1.0$ В.

Отличие p - n -перехода затвора от классического диодного перехода состоит в том, что они имеют меньшее дифференциальное сопротивление и влияние сопротивления базы на падение напряжения исключается. Именно, исходя из этих позиций, в качестве датчиков выбраны не диффузионные, а эпитаксиальные структуры.

На основе зависимости толщины области объемного заряда p^+ - n -перехода затвора от концентрации носителей определены оптимальные значения толщины канала, обеспечивающие высокую чувствительность.

Для одного из полевых транзисторов с напряжением отсечки 0.6 В и током стока 580 мкА (рис. 2.), принимая значение напряжения отсечки $U_{отс} = 2U_D$ по экспериментально расчетным данным (табл. 1), при нулевом смещении имеем толщину объемного заряда равную $0,65$ мкм с контактной разностью потенциалов 0.61 В.

Таблица 1

Данные толщины слоя объемного заряда от обратного напряжения

$U_{обр}, В$	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,3	1,6
$W_{оз}, мкм$	0,65	0,70	0,74	0,83	0,90	0,97	1,04	1,13	1,22

Тогда для напряжения отсечки 0.61 В $\times 2 = 1.22$ В или для запирающего канал обратного напряжения $U_{обр} = 0.6$ В имеем толщину $W_{оз} = 0.90$ мкм. То есть при увеличении напряжения в два раза область объемного заряда увеличивается в $\sqrt{2}$ раза, что соответствует оптимальной толщине канала.

Для данного полевого транзистора напряжение отсечки (0.6 В) канала практически совпадает с контактной разностью потенциалов, что обеспечивает однозначное изменение толщины канала от внешнего воздействия.

Третья глава под названием «**Электрофизические параметры полевого транзистора при воздействии температуры**» посвящена рассмотрению температурных свойств полевого транзистора в диодном режиме включения, исследованию температурной зависимости напряжения отсечки, рассмотрены температурные чувствительности биполярной транзисторной структуры в двухполюсном режиме.

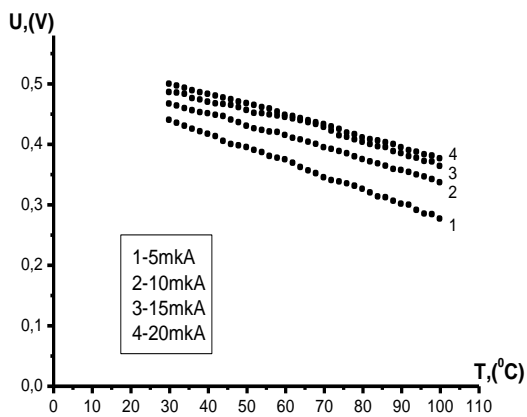
Несмотря на то, что полевой транзистор работает в режиме запирающего переходов, входная характеристика отдельно взятого перехода затвор-исток совпадает с характеристикой диодного p - n -перехода. При этом она в режиме отсечки канала превращается в обратно включенные диоды. Поэтому полевой транзистор можно рассматривать как диод с отсекаемой слоем объемного заряда базой, что до сих пор остается малоизученным, в особенности в новых приложениях как фотоприемник, датчик температуры.

Исследования вольтамперных характеристик перехода затвор-исток показывают, что они отличаются в прямом направлении малыми токами продолжающимися до 0.55 В и затем сравнительно резко переходящими в рост тока. В обратном направлении участок роста тока расположен в узком диапа-

зоне до 1.0 В и далее выходит на насыщение с малыми токами порядка 2 нА. Это обстоятельство создает условия для работы в режиме прямого смещения.

Увеличение температуры в режиме прямого смещения приводит к смещению вольтамперной характеристики в область меньших напряжений. Для заданного тока ограничения, например, 10 мкА, создаваемого ограничителем тока на полевом транзисторе, температурный коэффициент представляет собой отношение разницы падающих напряжений на разность температур:

$$\alpha = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta U}{\Delta T}. \quad (10)$$



- 1 - $U_{np}=0,439$ V, $I_{np}=5$ mA, $\tau=2,33$ mV/°C
 2 - $U_{np}=0,467$ V, $I_{np}=10$ mA, $\tau=1,86$ mV/°C
 3 - $U_{np}=0,485$ V, $I_{np}=15$ mA, $\tau=1,76$ mV/°C;
 4 - $U_{np}=0,499$ V, $I_{np}=20$ mA, $\tau=1,76$ mV/°C;

Рис. 4. Зависимости падения напряжения от температуры при различных рабочих токах

Такая тенденция связана с увеличением прямого дифференциального сопротивления с повышением температуры. Наиболее оптимальным током для использования исследуемого полевого транзистора в качестве датчика температуры является интервал токов 5÷10 мкА, рис. 5.

Таким образом, в режиме ограничения прямого тока полевой транзистор с *p-n*-переходом обладает температурной чувствительностью, определяемой процессами формирования тока и в определенной степени уровнем инжекции носителей. Полученное значение температурной чувствительности напряжения прямого смещения не уступает значениям, имеющим место в диодных структурах, а миниатюрная конструкция

В измеренном интервале температур от -90 до +60 градусов Цельсия имеем падение напряжения от 0.85 В до 0.51 В для разности температур 150 градусов, соответственно температурный коэффициент напряжения составляет 0.0023 В, то есть 2.3 мВ/град, что в два и более раза больше, чем в диодных структурах. Как видно из рис. 4 данные значения температурного коэффициента остаются неизменными в интервале токов от 15 до 20 мкА. Температурные коэффициенты чувствительности по мере увеличения рабочего тока от 5 мкА до 20 мкА уменьшаются от 2.33 мВ/°C до 1.76 мВ/°C.

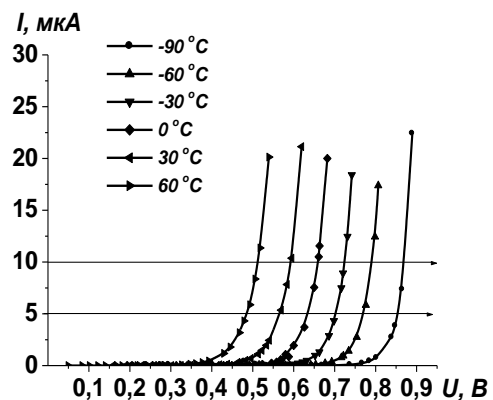


Рис. 5. Прямая ветвь ВАХ *p-n*-перехода затвор-канал полевого транзистора

полевого транзистора позволяет использовать его для определения температуры в узких зазорах различных устройств и оборудования.

Наилучшие показатели температурного коэффициента на основе полупроводниковых диодов и дискретном биполярном транзисторе составляют $2.3 \div 2.6$ мВ/°С. Однако сведения об исследованиях, проведенных на основе полевого транзистора, и механизмах управления температурным коэффициентом их параметров до сих пор отсутствуют. Также малоизученными остаются возможности использования полевого транзистора по новому назначению при нетрадиционных режимах включения. В качестве термочувствительного параметра принято изменение величины прямого смещения, падающее на переходе затвор-исток, как показано на схеме рис. 6.

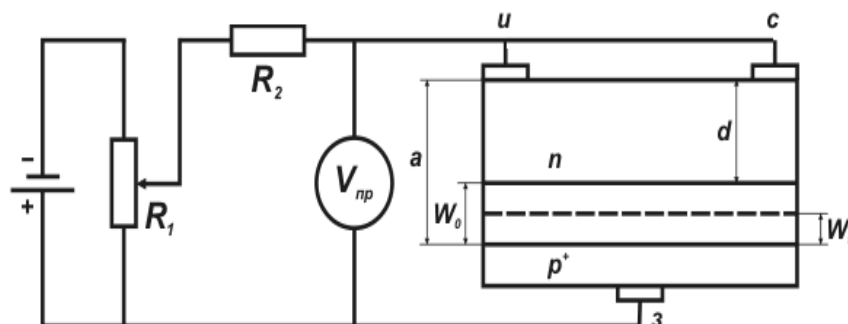


Рис. 6. Схема измерения термочувствительного параметра перехода затвор-исток

Величина рабочего напряжения регулируется резистором R_1 , а ток через выпрямляющий переход ограничивается резистором R_2 . Отличие полевого транзистора от диодных и биполярных транзисторных структур состоит в том, что толщина базовой области (канала) имеет фиксированное значение, а концентрация носителей в затворной области ($1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) на два-три порядка выше чем в канальной области ($2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), что гарантирует резкость p - n -перехода.

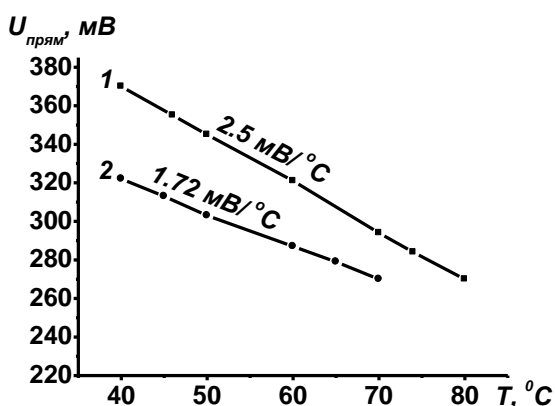


Рис. 7. Зависимости прямого падающего напряжения диодно-включенного полевого транзистора от температуры

На рис. 7 приведены зависимости падающего напряжения при различных напряжениях питания диода через сопротивление R_2 -ограничитель тока. Кривая 1 получена на образце с напряжением отсечки 1.2 В при напряжении питания 4.9 В, а кривая 2 при напряжении питания 2.3 В. Как видно из рис. 7, уменьшение напряжения питания приводит к снижению температурной чувствительности. При этом величина падающего напряжения больше в образце с меньшим напряжением отсечки.

Наблюдаемое различие температурных коэффициентов можно объяс-

нить на основе механизма токопереноса через p - n -переход затвора описываемого выражением:

$$I_{\text{прям}}^{\text{const}} = I_{\text{нас}} (\exp(qU_{p-n}/nkT) - 1) \quad (11)$$

Сохранение неизменности тока через структуру приводит к зависимости падающего напряжения от температуры. Соответственно

$$nkT = \frac{qU_{p-n}}{\ln\left(\frac{I_{\text{прям}}^{\text{const}}}{I_{\text{нас}}} + 1\right)} \quad (12)$$

Согласно формуле (12) изменение отношения прямого тока к обратному, создаваемое путем изменения величины напряжения смещения на p - n -переходе приведет к различию температурных коэффициентов (рис. 7, кривые 1 и 2).

$$\alpha = (U_{\text{прям}}^{T_2} - U_{\text{прям}}^{T_1}) / (T_2 - T_1) \quad (13)$$

В частности, при уменьшении напряжения смещения температурный коэффициент α уменьшается от 2.5 мВ/°С до 1.72 мВ/°С. Соответственно уменьшаются токи рекомбинации. При этом, так как прямой ток ограничен и имеет фиксированное значение $I_{\text{прям}}^{\text{const}} = I_{\text{огр}}$, то напряжение падающее на p - n -переходе U_{p-n} , будет изменяться пропорционально температуре диодно-включенного полевого транзистора.

По величине прикладываемое (положительное) напряжение будет равно диффузионному (отрицательного знака) потенциалу p - n -перехода затвора U_d определяемого заданной температурой:

$$U_d = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_{\text{кан}} N_{\text{зам}}}{n_i^2}, \quad (14)$$

уменьшение которого обусловлено увеличением собственной концентрации носителей n_i в связи с повышением температуры. Отличие полевого транзистора от диода заключается в фиксированности значения толщины базовой области – канала, что способствует охвату базовой области слоем объемного заряда в режиме запираения. То есть, в режиме прямого смещения тоже имеем процессы, обусловленные рекомбинацией носителей в конкретной базовой области. В обычном диоде толщина базы не ограничена и относительно p - n -перехода создает последовательное сопротивление, что из-за дополнительного падения напряжения на нем при изменении рекомбинационных токов ослабляет чувствительность структуры по отношению к контактной разности потенциалов.

В связи с тем, что прямой ток через p - n -переход задается ограниченным ($I_{\text{прям}}^{\text{const}}$), то увеличение температуры приводит к уменьшению падающего напряжения. При этом изменение соотношения прямого тока с током

насыщения обеспечивает управляемое изменение температурного коэффициента (см. формулу 13). При этом появляется возможность идентификации температурных коэффициентов из набора образцов.

Таким образом, в режиме ограничения прямого тока полевой транзистор с *p-n*-переходом обладает температурной чувствительностью определяемой механизмом токопереноса и управляемым уровнем инжекции носителей. Полученное значение температурной чувствительности прямого падающего напряжения (2.5 мВ/°С) не уступает значениям, имеющим место в диодных и транзисторных структурах.

Сравнение температурных коэффициентов напряжения отсечки с температурным коэффициентом падающего напряжения указывает на то, что в обоих случаях они связаны с величиной напряжения отсечки. В режиме прямого смещения температурный коэффициент определяется отношением прямого тока к обратному, то есть ее величина управляема. При этом в образцах с меньшим напряжением отсечки падающее напряжение имеет большее значение, что повышает точность измерения. Таким образом, температурные коэффициенты полевого транзистора обратно пропорционально связаны с толщиной базовой области и они физически управляемы.

Электрическая схема включения полевого транзистора для измерения падения напряжения на переходе исток-затвор приведена на рис. 8.

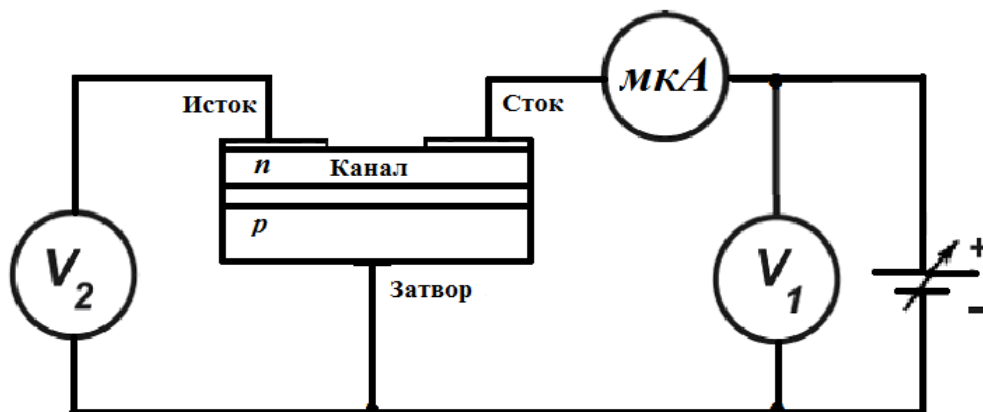


Рис. 8. Схема измерения падения напряжения на переходе исток-затвор в режиме запирания канала напряжением сток-затвор

Рабочее напряжение с блока питания, к которому подключен первый вольт-метр, через микроамперметр подается к переходу сток-затвор. Исследования падения напряжения на переходе исток-затвор с помощью схемы (рис. 8) показали, что повышение температуры (рис. 9) приводит к увеличению напряжения отсечки с температурным коэффициентом напряжения отсечки (мВ/°С)

$$\alpha_{omc} = (U_{omc}^2 - U_{omc}^1) / (T_2 - T_1) \quad (15).$$

Полученное значение температурного коэффициента (2.3 мВ/град) (рис. 10) в два раза больше чем в заводских диодных структурах.

Наблюдаемое увеличение напряжения отсечки канала с температурой

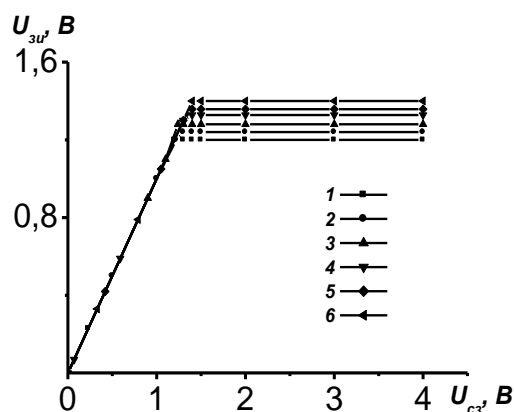


Рис.9. Зависимости напряжения затвористок от напряжения сток-затвор 1-20 °С, 2-40, 3-50, 4-60, 5-70, 6-80 °С

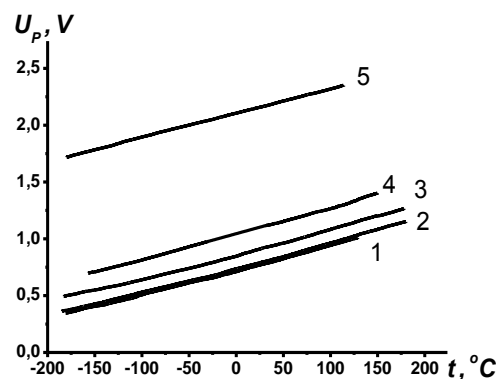


Рис.10. Зависимости напряжения отсечки канала полевых транзисторов от температуры с различными технологическими параметрами

можно связать с уменьшением контактной разности потенциалов p - n -перехода, обусловленной увеличением собственной концентрации носителей при повышении температуры

$$U_D = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_{кан} N_{зат}}{n_i^2} \quad (16)$$

В результате исходная толщина области объемного заряда для $U_{зи} = 0$ уменьшится

$$W_{ооз} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 U_d (N_{кан} + N_{зат})}{q \cdot N_{кан} \cdot N_{зат}}} \quad (17)$$

а емкость p - n -перехода увеличится

$$C_{p-n} = \frac{\epsilon_0 A}{W_{ооз}} \quad (18)$$

что приведет к увеличению толщины проводящей части канала

$$\Delta d = a - W_{ооз} \quad (19)$$

Поэтому для отсечки канала требуется еще большее запирающее напряжение $U_{обр}$. В данном режиме исследуемый полевой транзистор обладает температурной чувствительностью, не уступающей чувствительности диодным структурам, но с тем преимуществом, что практически не потребляет энергии.

$$U_{омс} = \frac{N_{кан} q a^2}{2\epsilon_0} \left(1 + \frac{N_{кан}}{N_{зат}} \right) = U_{обр} + U_D \quad (20)$$

При этом температурный коэффициент напряжения отсечки

$$\alpha_{омс} = (U_{омс}^2 - U_{омс}^1) / (T_2 - T_1) \quad (21)$$

составляет 2.2 мВ/градус, что находится на уровне значений, имеющих место в диодных структурах в режиме ограничения прямого тока ~ 10 мА.

Исследования температурной чувствительности вольтамперной характеристики биполярной транзисторной структуры на основе германия с точки зрения ее применения в качестве датчика температуры показали, что в режиме прямого смещения перехода база-коллектор с повышением температуры прямая ветвь смещается параллельно в область меньших напряжений, но является пологим (рис. 11, вставка), что ограничивает её применение для регистрации резко изменяющихся температур. Результаты расчета значений температурного коэффициента, полученные на основе, приведенных на рис. 11, данных для заданных интервалов температур, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные токового температурного коэффициента перехода коллектор-база

Интервал температуры, °С	20÷30	30÷40	40÷50	50÷60
α_I , мкА/град	1.2	1.9	2.3	2.7

Как видно из таблицы токовый температурный коэффициент запираемого перехода с повышением температуры от 20 до 60 °С увеличивается с 1.2 мкА/град до 2.7 мкА/град. Соответственно, по сравнению с режимом запираения отдельно взятого перехода база-коллектор (рис. 11), режим запираения коллекторного перехода при двухполюсном режиме включения обеспечивает большую температурную чувствительность, управляемую рабочим напряжением, рис. 12.

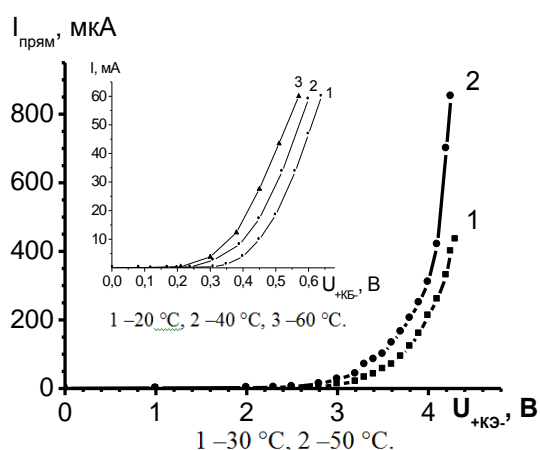


Рис. 11. Зависимости тока от напряжения при различных температурах в режиме: прямого смещения перехода коллектор-база (вставка) и в двухполюсном режиме (+)р-п-р⁺ (-) с плавающей (свободной) базой при запираении эмиттерного перехода

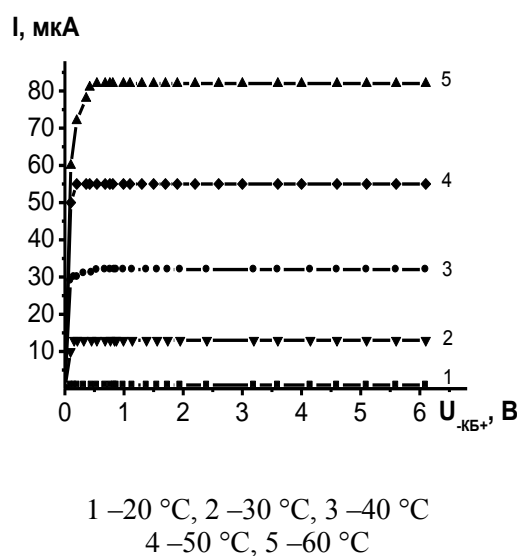


Рис. 12. Зависимости тока от напряжения в режиме запираения перехода коллектор-база при различных температурах

Можно заметить, что в исследуемом транзисторе для заданного фиксированного тока температурный коэффициент напряжения, как и в диодных структурах, составляет 2 мВ/град.

$$\alpha_U = \frac{U_1 - U_2}{\Delta T} \quad (22)$$

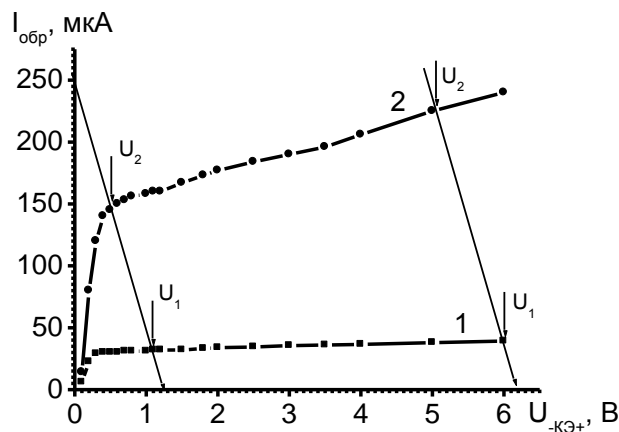
В этом режиме фиксированный рабочий ток необходимо выбирать больше 7 мА, где температурная чувствительность падения напряжения на переходе база-коллектор принимает неизменные значения. В частности, при этих токах с повышением температуры падение напряжения линейно уменьшается, что подтверждает возможность его использования в качестве параметра для измерения температуры.

В режиме запирания p - n -перехода коллектор-база для заданной температуры с увеличением напряжения ток остается неизменным (рис. 12), а по мере повышения температуры значение тока увеличивается линейно с возрастающим токовым температурным коэффициентом:

$$\alpha_I = \frac{I_2 - I_1}{\Delta T} \quad (23)$$

Следовательно, обратный ток коллектора также можно использовать в качестве измерительного параметра.

Наблюдаемое на рис. 13 нарастание рабочего тока $(-)p$ - n - $p^+(+)$ -структуры можно объяснить тем, что коэффициент передачи тока зависит от напряжения коллектор-эмиттер и увеличивается с повышением температуры, благодаря возрастающему количеству генерируемых в коллекторном переходе носителей.



1 –30 °С, 2 –50 °С.

Рис. 13. Зависимости тока от напряжения в двухполюсном режиме включения $(-)p$ - n - $p^+(+)$ с плавающей (свободной) базой при запирании коллекторного перехода

При этом сопротивление эмиттерного перехода становится более чувствительным к воздействию температуры, а сопротивление коллекторного перехода-к запирающему напряжению.

Таким образом, транзисторная $(-)p$ - n - $p^+(+)$ -структура при двухполюсном режиме включения обладает высокой температурной чувствительностью и малым рабочим током в отличие от отдельно взятого диодного включения.

Такие датчики представляют интерес для применения в авиационной, автомобильной и в других отраслях промышленности.

В четвертой главе под названием «**Особенности чувствительности к световому излучению и давлению полевого транзистора**» исследуется влияние интегрального освещения на фотоэлектрические характеристики и особенности чувствительности полевого транзистора к деформации, а также практические схемы по их применению.

В исследуемом полевым транзисторе переход затвор-канал при подсветке канальной области эквивалентен фотодиоду и усилительному полево- транзистору с управляющим *p-n*-переходом, то есть полевой транзистор можно использовать в диодном включении.

На рис. 14 приведена зависимость тока короткого замыкания от интенсивности освещения. Как видно из рисунка фототок короткого замыкания, в отличие от фотодиодных структур с двумя барьерами Шоттки, вместо спада, увеличивается линейно вплоть до освещенности 600 лк и далее наблюдается его нелинейный рост. Склонность к суперлинейной зависимости тока короткого замыкания от освещенности, повидимому, можно объяснить особенностями генерации фотоносителей в тонкопленочном эпитаксиальном канале от интенсивности освещения. При этом фотовольтаический приемник имеет участки линейной зависимости тока короткого замыкания и напряжения холостого хода при интенсивностях освещения до 200 лк, что открывает возможность для его использования при малых интенсивностях оптического сигнала (рис. 15).

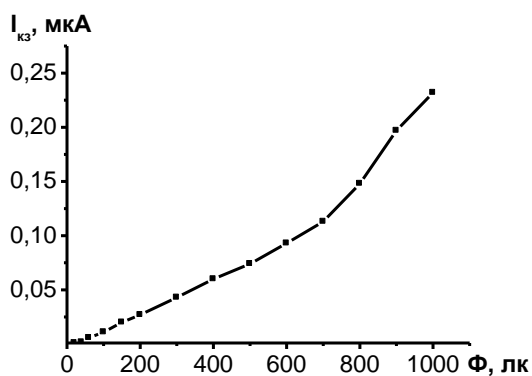


Рис. 14. Зависимость тока короткого замыкания от интенсивности освещения

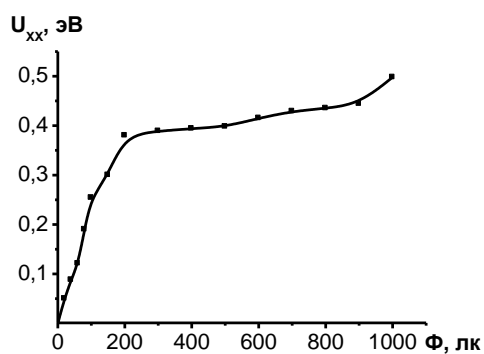
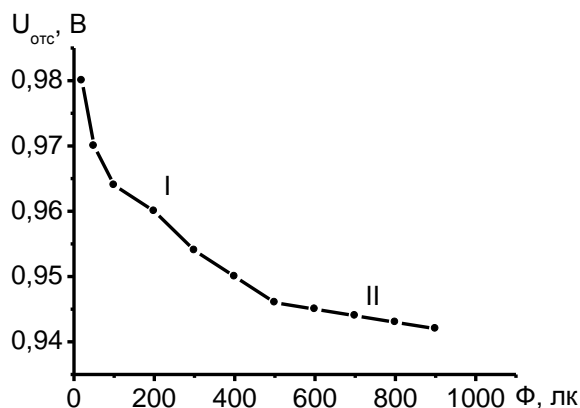


Рис. 15. Зависимость напряжения холостого хода от интенсивности освещения

Переходя к чувствительности полевого транзистора и световому излучению в исследуемом режиме запирающего канала напряжением сток-затвор, следует отметить, что падение напряжения, то есть его величина с увеличением интенсивности освещения вначале при малых интенсивностях (до 500 лк) линейно уменьшается с определенным коэффициентом (участок I), и далее снижение напряжения замедляется и значение этого коэффициента уменьшается на полпорядка, рис. 16 (участок II). Такое поведение напряжения отсечки от светового излучения можно объяснить сменой воздействующего светового характера тепловым.

То есть, при малых интенсивностях освещения разогрев структуры незначителен и его вклад на напряжение отсечки незаметен, однако в дальнейшем температура структуры начинает повышаться и процесс снижения напряжения отсечки замедляется, начинает превалировать влияние температуры, от которого напряжение отсечки должно увеличиваться (рис. 16), что и наблюдается при больших интенсивностях (свыше 600 лк).



I-0.000048 мВ/лк = 0.048 мкВ/лк, $U_{отс}=0.97$ В;
 II-0.00001 мВ/лк = 0.01 мкВ/лк, $U_{отс}=0.98$ В

Рис. 16. Зависимости падения напряжения на переходе затвор-исток от освещенности в режиме запирающего напряжения сток-затвор

По законам физики при подсветке канала в области объемного заряда перехода затвор-канал генерируются электронно-дырочные пары, которые создают фототок на переходе исток-затвор, приводя к уменьшению сопротивления этого перехода

$$R_{зи}^{p-n} = U_{отс} / (I^T + I^\Phi) \quad (24)$$

что, в свою очередь приведет к уменьшению падения напряжения и к соответствующему увеличению тока сток-затвор (за счет увеличения толщины проводящей части канала). Здесь имеем два параметра: напряжение отсечки и фототок на переходе сток-затвор. Как показали исследования, в режиме короткого замыкания, когда выводы затвора и истока закорочены через амперметр с повышением интенсивности освещения канала от галогенной лампы фототок увеличивается близко к линейному, рис. 17, кривая 1. При этом в режиме запирающего напряжения сток-затвор имеем в два раза больший фототок (кривая 2) с чувствительностью 0.0018 мкА/лк. В отличие от напряжения отсечки фототок перехода сток-затвор является более информативным и имеет более чем в два раза большее значение или на порядок больший фототок в отличие от известных режимов включения и стандартных фотодатчиков световому излучению, при этом отличается линейностью характеристики в отличие от тока стока и напряжения отсечки канала. Исследования показали, что под воздействием давления, (рис.18, нап-

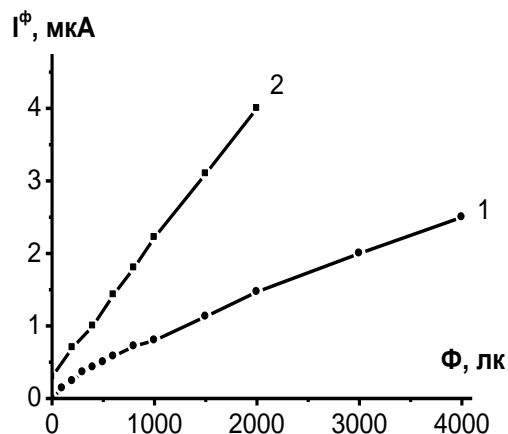


Рис. 17. Зависимости фототока от интенсивности освещения в режиме короткого замыкания (1) и (2) запирающего напряжения сток-затвор

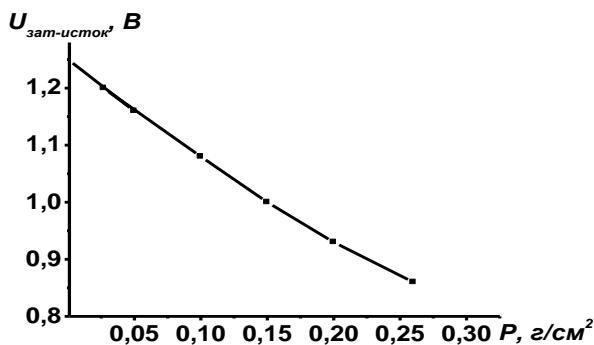


Рис. 18. Зависимости напряжения отсечки от давления

$$\alpha_{\text{отс}} = (U_{\text{отс}}^2 - U_{\text{отс}}^1) / (P_2 - P_1), \text{ мВ/ (г/см}^2\text{)} \quad (25)$$

тензочувствительности коллекторного перехода биполярного транзистора. Наблюдаемое уменьшение напряжения отсечки можно объяснить тем, что под воздействием давления уменьшается толщина слоя объемного заряда p - n -перехода и общая толщина канала, в результате для запираения канала требуется меньшее напряжение.

Для проведения исследования фотоприемных свойств полевого фототранзистора в фотовольтаическом режиме включения был собран экономичный усилитель на основе полевого транзистора во входном каскаде и на двух биполярных транзисторах, соединенных по схеме Дарлингтона с напряжением питания 3.0 В, рис. 19.

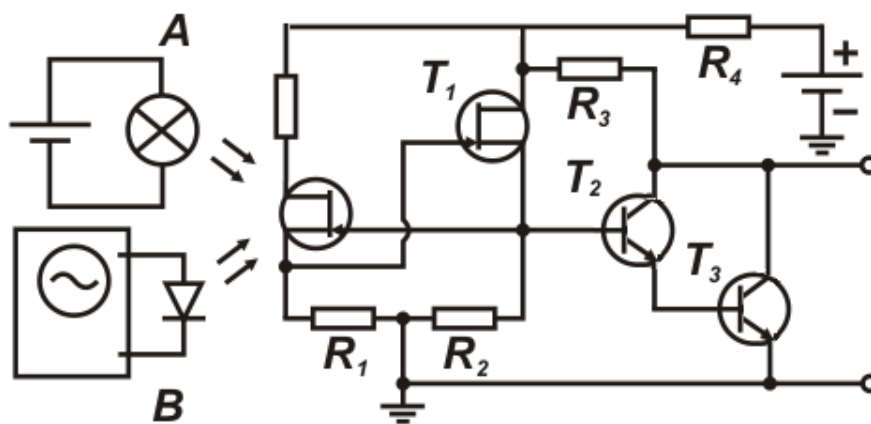


Рис. 19. Электронная схема приемника оптических сигналов на основе полевого фототранзистора и экономичного усилителя

При возбуждении полевого фототранзистора интегральным светом коэффициент усиления уменьшается по мере увеличения оптического сигнала от 9 лк до 150 лк, как приведено в табл. 3.

Благодаря использованию во входном каскаде полевого фототранзистора обеспечивается высокая чувствительность для слабых световых сигналов. Как показали исследования, по мере увеличения фотоЭДС диодного транзистора от 10 мВ до 350 мВ, освещаемого лампой накаливания с увеличивающейся освещенностью от 9 лк до 150 лк, величина

выходного сигнала увеличивается от 0.8 В до 2.2 В. При этом, начиная с 20 мВ, величина выходного сигнала постоянна и равна 2.2 В.

Таблица 3

Данные выходного сигнала от интенсивности оптического сигнала

Φ , лк	9	12	25	50	70	90	150
U_{xx} , мВ	20	30	50	100	150	200	300
$U_{вых}$, В	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
K_{yc}	110	73.3	44	22	14.6	11	7.3

Аналогично при подаче на транзисторный фотодиод модулированного излучения от светодиода с частотой модуляции 100 Гц, когда на выходе фотодиода создается фотоЭДС 300 мВ, обеспечиваются соответствующие коэффициенты усиления (табл. 4).

Таблица 4

Зависимости коэффициента усиления и выходного сигнала экономичной схемы от величины входного сигнала

	100 Гц						
U_{xx} , мВ	20	30	50	100	150	200	300
$U_{вых}$, В	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
K_{yc}	110	73.3	44	22	14.6	11	7.3

Использование полевого транзистора в приемном модуле в режиме малого автоматического смещения в предлагаемой электронной схеме (рис. 20) позволило получить усиление малых переменных сигналов (4мВ) практически без искажений.

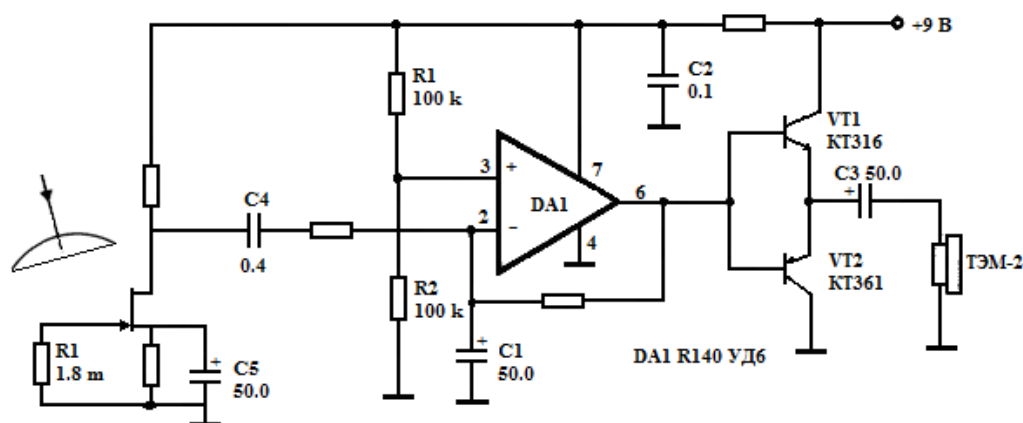
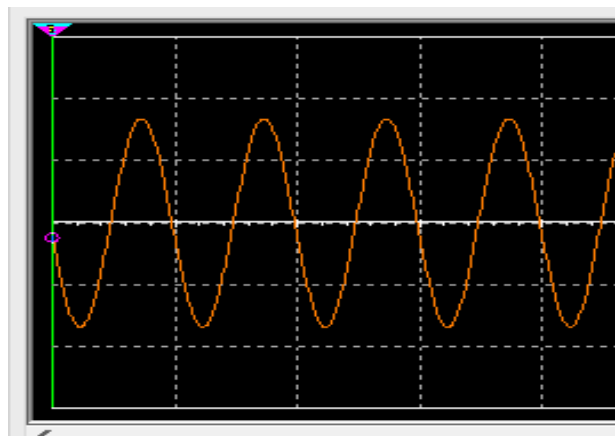
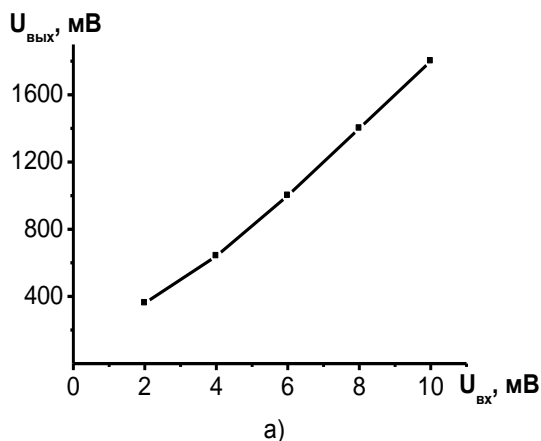


Рис. 20. Электрическая схема модуля приема оптических сигналов

Подачу оптического сигнала осуществляли через линзу в канал от полупро-водникового лазера, подключенного к генератору звуковых сигналов ГЗ-109 с последующей фиксацией усиленного выходного сигнала осциллографом С1-70. Как видно из рис. 21, в широком диапазоне входного сигнала от 4 до 10 мВ выходной сигнал линейно увеличивается и усиливается без искажений. Использование схемы с общим истоком

позволяет получить усиление входного сигнала как по току, так и по напряжению (аналог схемы с общим эмиттером для биполярного транзистора).



б) по вертикали клетка 100 мВ,
по горизонтали клетка 1 мс

Рис. 21. Зависимость выходного сигнала от входного сигнала (а) и (б) форма усиленного сигнала на выходе полевого фототранзистора

Применение полевого фототранзистора в качестве приемника оптических сигналов обусловлено тем, что используемые во многих фотоприемных устройствах лавинные фотодиоды работают в предельном режиме, что приводит к снижению срока их службы и к преждевременному выходу из строя.

Приемные модули оптических сигналов могут быть использованы при конструировании систем передачи и приема оптических сигналов, перспективных для создания устройств и приборов для систем связи, медицины, бытового и служебного назначения типа охранной сигнализации, оптического телефона и различных регистрирующих устройств. А также дистанционного управления работой различных технологических электроприборов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований чувствительности к внешним воздействиям (давлению, световому и тепловому излучениям) полевого транзистора в режиме отсечки канала сделаны следующие выводы:

1. Найдено, что с повышением температуры увеличение напряжения отсечки канала обусловлено уменьшением контактной разности потенциалов *p-n*-перехода за счет увеличения собственной концентрации носителей.

2. Установлено, что температурный коэффициент чувствительности полевого транзистора в режиме отсечки канала обусловлен процессом прироста толщины базы от температуры и подчиняется одному и тому же закону для всех полевых транзисторов независимо от технологических параметров транзисторной структуры.

3. Выявлено, что чувствительность полевого транзистора к давлению связана с уменьшением толщины проводящей части канала и увеличением исходной толщины области объемного заряда *p-n*-перехода затвора.

4. Предложен механизм фоточувствительности полевого транзистора в диодном режиме, согласно которому по мере увеличения интенсивности освещения увеличивается глубина поглощения излучения, а контактная разность потенциалов p - n -перехода (диффузионный потенциал которого полностью расположен в n -слое) будет уменьшаться, приводя к увеличению толщины проводящей части канала - n -слоя. Это, в свою очередь, приведет к увеличению концентрации генерированных фотоносителей пропорционально интенсивности освещения и уменьшению сопротивления канала (толщиной $1 \div 2$ мкм), обуславливая суперлинейную зависимость люксамперной характеристики.

5. Экспериментально показано, что при подсветке канала световым излучением (4000 лк) по мере увеличения напряжения сток-затвор также увеличивается падение напряжения на переходе исток-затвор до наступления отсечки канала, но уже при меньшем напряжении 0.8 В. При этом на стоке также появляется фототок;

6. Предложен механизм фоточувствительности полевого транзистора в режиме запирающего канала напряжением сток-затвор: при освещении канала полевого транзистора светом с энергией квантов $h\nu$ (большей ширины запрещенной зоны) на переходе исток-затвор создается фототок, который уменьшает темновое сопротивление перехода исток-затвор и в результате приводит к уменьшению запирающего напряжения. Чем больше будет интенсивность освещения, тем меньше будет сопротивление перехода исток-затвор и падение напряжения в нем.

7. Экспериментально показано, что многофункциональный датчик на полевом транзисторе в режиме малого автоматического смещения выполняет функцию приемника оптических сигналов.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREE
PhD.28.02.2018.FM.60.01 AT ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

BUKHARA STATE UNIVERSITY

TURAEV AKMAL ATAYEVICH

**FEATURES OF SENSITIVITY OF MULTIFUNCTIONAL SENSOR
BASED ON FIELD EFFECT TRANSISTOR IN CHANNEL
DEPLETION MODE**

01.04.10- Physics of semiconductors

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

ANDIJAN – 2018

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2017.2.PhD/FM87.

Dissertation has been prepared at Bukhara state university.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website of scientific council (www.adu.uz) and on the «Ziyonet» Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Djurayev Davron Rakhmonovich**
doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents: **Onarkulov Karimberdi Egamberdievich**
doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Shariboev Nosirjon Yusupjonovich
doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organization: **Karakalpak State University**

Defense will take place «____» _____ 2018 at _____ at the meeting of Scientific Council number PhD.28.02.2018. FM.60.01 at Andijan state university. Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu_info@edu.uz.

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Andijan state university (is registered under No.____) Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu_info@edu.uz.

Abstract of dissertation sent out on «____» _____ 2018
(Registry record No. _____ on «____» _____ 2018)

S.Z.Zaynabidinov

Chairman of Scientific council on award of scientific degree, DSc in physics and mathematics, academician

A.O. Kurbanov

Scientific secretary of Scientific council on award of scientific degree, PhD in physics and mathematics

I.N. Karimov

Chairman of Scientific seminar at Scientific council on award of scientific degree, DSc in physics and mathematics

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of research work is to determine the sensitivity to external influences (pressure, light and thermal radiation) of a field-effect transistor in the channel cut-off mode.

The objects of research are field-effect transistors with a controlling p-n junction in channel depletion mode.

Scientific novelty of dissertation work:

a mechanism for the temperature sensitivity of the cross-section voltage is established, according to which the contact potential difference of the p-n junction decreases with increasing temperature, and the carrier's own concentration increases, leading to an increase in the thickness of the channel's conductive part and the cut-off voltage;

It is shown that the temperature coefficient of the cut-off voltage obeys the same law for all field-effect transistors of the same type-nominal (channel width and length), regardless of the technological parameters of the transistor structure in a wide temperature range from -150°C to $+150^{\circ}$;

the mechanism of photosensitivity of the field-effect transistor in the cut-off mode is revealed. Accordingly, a voltage drop (cut-off voltage) is created at the source-gate transition from the blocking voltage of the drain-gate at the source-gate transition and as the intensity of the channel illumination increases, the voltage drop at the source (source-gate resistance) decreases, and the magnitude of the photocurrent arising on the drain increases;

the mechanism of the strain-sensitivity of the field-effect transistor is that, at all-round pressure, the thickness of the conducting part of the channel relative to the initial thickness of the space-charge region of the gate's p-n-junction decreases, leading to a decrease in the voltage value for the channel pickup;

it has been shown experimentally that a sensor with a field effect transistor with the proposed characteristic parameters of the channel in the mode of small automatic bias can be used in the receiving module of optical signals.

Implementation of the research results. As a result of the study of sensitivity to external influences in the mode of locking the field effect transistor with p-n-junction:

a multifunctional sensor based on a field-effect transistor received a patent of the Agency of Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan «Multifunctional sensor based on a field-effect transistor» (No. IAP 05120 of 12.10.2015). The developed multifunctional sensor on the field-effect transistor allowed to record temperature, light and deformation in electronic measuring systems;

methods of measuring temperature using electronic circuits based on a field effect transistor when using the cut-off voltage as a measuring parameter by the Bukhara State University in the implementation of the project $\Phi 2-\Phi A-0-83921 / \Phi 2-\Phi A-\Phi 0383$ "Strong correlation interactions in superconductors and magnetic materials and their critical parameters »2014-2016. made it possible to measure the target temperature in the objects under investigation (reference to the Agency for Science and Technology of the Republic of Uzbekistan FTA-02-11 / 941 of

October 24, 2017). The use of scientific results has made it possible to improve the stability of maintaining the temperature of superconducting materials.

Approbation of research results. The main results of the dissertational work were reported and discussed at 5 international and 7 republican scientific and practical conferences.

Published results of research. 22 research papers were published on the dissertational materials, 9 of them were published in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of the thesis, and 1 patent for the invention was obtained.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, a list of used literature and applications. The text of the dissertation is set out on 118 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Патент РУз № IAP 05120. 12.10.2015. Расмий ахборотнома. – 2015 (30.11.2015 Бюл. № 11) // Майдоний транзистор асосидаги кўп функцияли қайд қилгич. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Джураев Д.Р., Тураев А.А.

2. Karimov A.V., Djurayev D.R., Turaev A.A. Physical-technological aspects of a multifunctional sensor based on a field-effect transistor // World Journal of Engineering Research and Technology, 2017, Vol. 3, Issue 2, 57 – 63. (№23, SJIF IF=4.326).

3. Karimov A.V., Djurayev D.R., Turaev A.A. Investigation temperature sensitivity of the field-effect transistor in channel depletion mode // Journal of Scientific and Engineering Research, 2017, 4(2):1-4. (№5, GIF, IF=0.325)

4. A.V. Karimov, D.R. Dzhuraev, Sh.M. Kuliev, and A.A. Turaev. Distinctive features of the temperature sensitivity of a transistor structure in a bipolar mode of measurement. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 89, No. 2, March, 2016. P.514-517. (№40, Research Gate, IF=0.500)

5. Karimov A.V., Djuraev D.R., Abdulhaev O.A., Rahmatov A.Z., Yodgorova D.M., A.A.Turaev. Tensо properties of field-effect transistors in channel cutoff mode // International Journal of Engineering Inventions 2278-7461, Volume 5, Issue 9 [Oct. 2016] -PP 42-44. (№5, GIF, IF=0.325)

6. Каримов А.В., Джураев Д.Р., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А., Тураев А.А. Особенности чувствительности полупродниковых многофункциональных датчиков под внешним воздействием // Вухоро davlat universiteti ilmiy axboroti 2016/3(51) Б. 8-11. (01.00.00. №3)

7. Тураев А.А., Саидов К.С. Динамик юкламали схемада майдоний транзисторнинг кучайтириш хоссалари // Вухоро davlat universiteti ilmiy axboroti. 2016/4(64) Б. 31-35. (01.00.00. №3)

8. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Каманов Б.М., Тураев А.А. Фотовольтаический эффект в диодном режиме включения полевого транзистора // Гелиотехника. 2015, №4, С.87-90. (01.00.00.№1)

9. Abdulkhaev O.A., Yodgorova D.M., Karimov A.V., Kamanov B.M., Turaev A.A. Features of the temperature properties of a field-effect transistor in a current-limiting mode // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Springer. 2013, Vol. 86, No. 1, pp. 248-254. (№40, Research Gate, IF=0.500)

10. Тураев А.А. Яримўтказгичли диодларнинг р-п, нуқтали, электрон тешикчали ўтиши // Вухоро davlat universiteti ilmiy axboroti. 2013/3(51) Б. 8-11. (01.00.00. №3)

II бўлим (II часть; II part)

11. Джураев Д.Р., Тураев А.А., Бебитов Р.Р. Исследование температурной чувствительности полевого транзистора в режиме запираания напряжением сток-затвор // Республиканская научная конференция «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах» к 70 – летию академика АН РУз А.Т.Мамадалимова. 1-2 февраля 2017. – Ташкент. С.90-92.

12. Abdulkhayev O.A., Dzhurayev D.R., Yodgorova D.M., Karimov A.V., Rakhmatov A.Z., Тураев А.А. Physico-technological aspects multi-functional sensor on field-effect transistor // New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects 10-11 November 2016, Tashkent, Uzbekistan. PP: 231-234.

13. Джураев Д.Р., Тураев А.А. Стоковых характеристика полевого транзистора // «Конденсатланган мухитлар физикаси ва физика ўқитишнинг долзарб муаммолари» халқаро иштирокчилар билан республика илмий-амалий анжуманлар тўплами. 8-9 июль 2016. Наманган. Б.152-155.

14. Джураев Д.Р., Ёдгорова Д.М., Тураев А.А. Многофункциональный датчик на основе полевого транзистора // Современный проблемы физики конденсированного состояния – СПФКС-2016 тезисы докладов республиканской научной конференции 12-14 апреля 2016. Бухара. С.157-159

15. Джураев Д.Р., Каримов А.В., Кулиев Ш.М., Тураев А.А. Модуль приёма оптических сигналов с входным каскадом на полевом фототранзисторе // Международная конференция «Фундаментальные вопросы физики» 5-6 ноября 2015. – Ташкент. С.203-205.

16. Тураев А.А. Майдон транзисторларининг хоссалари // Замонавий физика ва астрофизиканинг долзарб муаммолари. III республика илмий-амалий анжумани. 2015. Қарши. Б.82-85.

17. Тураев А.А. Атмосфера оптик алоқа системаларида майдон транзисторлари асосидаги кўп функционал датчиклардан фойдаланиш // «XXI аср-интеллектуал авлод асри» ёш олимлар ва талабаларнинг республика илмий-амалий анжумани материаллари. 19-20 ноябрь 2015. Тошкент. Б.182-187.

18. Каримов А.В., Джураев Д.Р., Ёдгорова Д.М., Тураев А.А. Приёмник оптического сигнала на полевом транзисторе // Сборник материалов Международной научно-практической конференции 27-30 июня 2014. Чехия. Praha Publishin House <Education and Science> s.r.o С.56-58.

19. Тураев А.А., Ниязов Л.Н. Атмосферные оптические линии связи нового поколения // The 8th Intenational Conference «Modern achievements of physics and fundamental physical education» October, 9-11, 2013. Kazakhstan, Almaty Book of Abstracts. С.256-258.

20. Джураев Д.Р., Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Тураев А.А. Особенности напряжения отсечки канала полевого транзистора // Наманган давлат университети «Ярим ўтказгичлар физикаси ва қурилмалари ҳамда уларни

ўқитишнинг муаммолари» ҳудудий илмий анжуман. 26-апрел 2013. Наманган. Б.119-120.

21. Тураев А.А., Джураев Д.Р. Майдон транзисторлари ва уларнинг ташқи таъсирларга сезгирлиги (магнит майдонга, намликка, ёриғликка) // Навоийский государственный горный институт VI международная научно-техническая конференция «Современная техника и технологии горнометаллургической отрасли и пути их развития» 14-16 мая 2013. Навои. С. 260-262.

22. Рахматов А.З., Каманов Б.М., Джураев Д.Р., Тураев А.А. Исследование стоковых характеристик полевого транзистора в качестве ограничения тока // Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Материалы международной конференции, посвященной 80-летию академика М.С.Саидова 24-25 ноябрь 2010. Ташкент. С.271-273.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Андижон давлат университетининг «Илмий хабарнома» журнали
тахририятида тахрирдан ўтказилди.
(25.05.2018 йил)

Босишга рухсат этилди: 1.06.2018 йил.
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3,7. Адади: 100. Буюртма: № 195.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.