

На правах рукопису

Д Р У Ж И Н І Н
Анатолій Олександрович

**СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ
В НАПІВПРОВІДНИКАХ ПІД ДІЄЮ
ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ
МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ**

05.27.06 — технологія напівпровідників
і матеріалів електронної техніки

05.27.01 — твердотіла електроніка і мікроелектроніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук



00802825 (P)

Робота виконана на кафедрі напівпровідникової електроніки державного університету «Львівська політехніка».

Науковий консультант — доктор фізико-математичних наук, професор
В. Г. САВИЦЬКИЙ

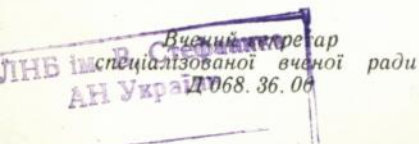
Офіційні опоненти: — член-кореспондент АН України, доктор фізико-математичних наук, професор **В. Г. ЛИТОВЧЕНКО**
— доктор фізико-математичних наук, професор **І. М. ВІКУЛІН**
— доктор фізико-математичних наук, професор **Й. М. СТАХІРА**

Провідна організація — Київський політехнічний інститут.

Захист відбудеться «17» грудня 1993 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.36.06 при державному університеті «Львівська політехніка» (290013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, головний корпус, ауд. 226).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці державного університету «Львівська політехніка» (290013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «15» листопада 1993 р.



Я. В. БОБИЦЬКИЙ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Прогрес в розвитку сучасної мікроелектроніки тісно пов'язаний з вивченням властивостей напівпровідникових матеріалів та розширенням можливості змінювати їх параметри при зовнішній дії для розробки перспективних технологій виготовлення приладних структур і інтегральних схем.

Використання теплової дії лазерного випромінювання відкриває перспективи для керування структурою матеріалу, концентрацією і розподілом дефектів в приповерхневих шарах напівпровідників, тобто дає можливість цілеспрямовано змінювати властивості напівпровідникових матеріалів і створювати принципово нові технологічні методи виготовлення мікроелектронних приладів. Разом з цим дія потужного лазерного випромінювання на напівпровідникові матеріали привертає увагу з точки зору фізичних досліджень і виявлення основних закономірностей процесів і механізмів структурних перетворень в матеріалах з різною хімічною стійкістю. Це є, насамперед, клас елементарних напівпровідників, в яких відсутні зміни хімічного складу при структурних перетвореннях і клас складних власнодефектних напівпровідникових матеріалів, в яких спостерігаються під тепловою дією лазерного випромінювання і структурні перетворення і зміна хімічного складу напівпровідника.

Поряд з традиційним використанням кремнію в сучасній мікроелектроніці інтенсивно ведуться наукові пошуки інших матеріалів, композицій і структур, зокрема розробки щодо створення елементів МОН ІС і мікроелектронних сенсорів на основі структур "кремній-на-діелектрику" (КНД-структур). Значне підвищення активності досліджень в цій області спостерігається за останні роки завдяки особливим властивостям КНД-структур, що дозволяє створювати на їх основі схеми з вертикальною інтеграцією елементів (трьохмірні ІС), а також модифікувати конструкції звичайних ІС з метою покращення їх характеристик за швидкодією, радіаційною стійкістю, уникнення тиристорного ефекту в КМОН схемах. Створення мікроелектронних сенсорів на основі КНД-структур дає можливість покращити їх характеристики і розширити діапазон робочих температур.

З іншого боку, власнодефектні напівпровідники $Cd_xHg_{1-x}Te$ (x - молярні проценти $CdTe$) на цей час є одними з найбільш популярних матеріалів для створення високочутливих і малоінер-

ційних детекторів ІЧ випромінювання для широкого спектрального діапазону $1\text{--}30$ мкм. Однак широке використання CdHgTe для виготовлення детекторів ІЧ випромінювання стримується технологічними труднощами вирощування досконалих і однорідних за складом кристалів, а також складнощами в технології виготовлення приладів, оснований на р-п-переходах. Що стосується технології фотовольтаїчних детекторів ІЧ випромінювання, то відомі способи створення р-п-переходів (дифузійний, іонне легування) мають деякі принципові недоліки, трудомісткі і не завжди при цьому отримуються якісні прилади, зокрема це стосується створення багатоелементних фотовольтаїчних детекторів ІЧ випромінювання, в яких виготовлення фотодіодних структур з освітлюваною р-областю є особливо актуальним.

З розробкою методу лазерного відпалу відкриваються нові перспективи для широкого використання CdHgTe і полікремнієвих шарів в мікроелектроніці і створюється можливість виявити основні закономірності процесів і механізмів структурних перетворень для представників двох різних класів напівпровідникових матеріалів. Це є, насамперед, процеси лазерної рекристалізації через рідку фазу при нагріванні за допомогою лазерного випромінювання до температури плавлення для хімічно стійких елементарних напівпровідників типу полікремнію на діелектричних підкладках і інверсії типу провідності при твердофазному лазерному відпалі для складних власнодефектних напівпровідників типу CdHgTe, які дисоціюють при нагріванні до температури плавлення. Обидва ці процеси лежать в основі розробок перспективних технологій створення напівпровідникових структур і мікроелектронних приладів в використанні структурних перетворень під дією лазерного випромінювання в напівпровідниках.

На початку виконання цієї роботи окремі дослідження структурних перетворень при дії лазерного випромінювання в CdHgTe і полі-Si були недостатніми для встановлення основних закономірностей цілеспрямованої зміни властивостей і процесів створення мікроелектронних приладів; в тому числі сенсорів. Також не досліджувались властивості і не були розроблені методи формування р-п-переходів в CdHgTe за допомогою лазерного випромінювання та виготовлення фотодіодів на їх основі.

Беликий науковий і практичний інтерес до названих проблем стимулював постановку цієї дисертаційної роботи.

Наукові дослідження, які закладені в основу дисертаційної роботи, виконувались у відповідності з Координаційним планом наукової ради АН УРСР з проблеми "Фізика напівпровідників" на 1986-1990 рр., розділ 1.3.7.8 "Вузьковонні напівпровідники" і Комплексною програмою Мінвузу УРСР "Розробка і впровадження в народне господарство лазерні технологічні обробки і отримання матеріалів з попередньо заданими властивостями" (затв. наказом Мінвузу УРСР N 143 від 3.07.1986 р. і N 229 від 29.07.1986 р.), Державної науково-технічної програми ДКНТ України "Розробка фізичних і технологічних основ створення багатофункціональних швидкодіючих і інтегральних схем нового покоління, в тому числі трьохмірної інтеграції, нових типів дискретних приладів та інтегральних датчиків на основі систем кремній-на-ізоляторі" (шифр проектів: 5.44.01/033-92; 5.44.01/025-93).

Метою роботи є встановлення загальних закономірностей структурних перетворень під дією лазерного випромінювання в напівпровідниках для цілеспрямованої зміни їх властивостей і розробки технології виготовлення напівпровідникових структур, елементів інтегральних схем і мікроелектронних сенсорів.

Для досягнення вказаної мети необхідно було розв'язати такі задачі:

1. Дослідити вплив лазерного випромінювання на структурні і електрофізичні властивості елементарних напівпровідникових матеріалів типу полікремнію, в яких відсутні зміни хімічного складу при структурних перетвореннях; встановити загальні закономірності мікроелектронної лазерної рекристалізації полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках з локалізацією границь зерен та оптимізувати технологію створення структур "кремній-на-діелектрику".

2. Дослідити особливості структурних перетворень під дією лазерного випромінювання в складних власнодефектних напівпровідниках типу $CdHgTe$ і встановити закономірності зміни концентрації власних дефектів структури під тепловою дією лазера для керування фізичними властивостями матеріалу.

3. Створити елементи МОН інтегральних схем на основі КНД-структур з використанням рекристалізованих лазерним випромінюванням полікремнієвих шарів та оптимізувати властивості матеріалу і розробити нові варіанти конструкцій КНД МОН-транзис-

торів для підвищення стабільності параметрів і вдосконалення технології їх виготовлення.

4. Розробити технологію виготовлення мікроелектронних сенсорів (тензорезистивних, ємнісних, оптоелектронних) з використанням лазерної рекристалізації полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках.

5. Розробити технологію створення фоточутливих р-п-переходів в CdHgTe за допомогою лазерного випромінювання та встановити кореляцію властивостей р-п-переходів з електрофізичними параметрами вихідного матеріалу CdHgTe.

6. Дослідити особливості фотодіодів на основі CdHgTe, пов'язані зі специфікою вихідного матеріалу та технологією створення р-п-переходів.

Основними об'єктами досліджень були вибрані представники двох класів напівпровідникових матеріалів: полікремнієві шари на діелектричних підкладках і власнодефектні тверді розчини CdHgTe. Це зумовлено:

- особливостями сил хімічного зв'язку в цих напівпровідниках, оскільки в полікремнієвих шарах, як елементарних напівпровідниках, відсутні зміни хімічного складу при структурних перетвореннях, а у власнодефектних твердих розчинах CdHgTe під тепловою дією лазерного випромінювання спостерігаються структурні зміни матеріалу і перетворення власних електрично активних точкових дефектів структури;

- можливостями застосування лазерного випромінювання в технології створення мікроелектронних приладів як при твердофазному відпалі, наприклад, в CdHgTe, так і при рекристалізації через рідку фазу в полікремнієвих шарах на діелектричних підкладках;

- перспективами широкого практичного використання вибраних матеріалів в мікроелектроніці.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні і узагальненні наукових результатів, які стосуються закономірностей структурних перетворень під дією лазерного випромінювання в напівпровідниках з різною хімічною стійкістю (полі-Si, CdHgTe) і впливу цих перетворень на їх фізичні властивості та розробки нових технологій виготовлення мікроелектронних приладів: Сукупність

наукових розробок, поданих в роботі, дозволила обґрунтувати перспективність нового напрямку створення напівпровідникових структур і мікроелектронних приладів та цілеспрямованої зміни фізичних властивостей матеріалу за допомогою лазерного випромінювання. До найбільш важливих результатів дисертаційної роботи слід віднести:

1. Встановлення закономірностей лазерної мікрозонної рекристалізації полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках через рідку фазу та оптимізацію умов локалізації границь зерен в процесі лазерної рекристалізації створенням заданого періодичного розподілу температури в зоні розплаву і використанням бічного епітаксійного росту від монокристалічної заготовки.

2. Вперше встановлені кореляції між властивостями рекристалізованого полікремнію, режимами лазерної обробки і типом вихідних структур; виявлений та пояснений вплив границь зерен на механізм проходження струму в матеріалі і напівпровідникових структурах, рекомбінаційні процеси. Встановлення анізотропії електричних і тензорезистивних властивостей рекристалізованих шарів полікремнію і моделювання тензорезистивного ефекту в полікремнії р-типу провідності для широкого діапазону концентрацій носіїв заряду і робочих температур.

3. Встановлено, що у власнодефектних напівпровідниках типу CdHgTe під тепловою дією лазерного випромінювання спостерігаються перетворення власних електрично активних точкових дефектів структури і показано, що лазерною обробкою можна модифікувати властивості приповерхневих шарів зокрема збільшувати концентрацію акцепторів при нагріванні до температур нижче температури плавлення напівпровідника.

4. Вперше запропоновану фізичну модель формування p^+ -областей у власнодефектному p -CdHgTe і інверсії типу провідності в приповерхневому шарі n -CdHgTe при дії лазерного випромінювання, на основі якої розроблено нові ефективні способи і технологію створення фоточутливих p - n -переходів у власнодефектних монокристалічних зразках і епітаксійних шарах CdHgTe.

5. Комплексний аналіз властивостей елементів МОН ІС на основі рекристалізованих лазерним випромінюванням КНД-структур та оптимізацію конструкції приладних структур для підвищення стабільності параметрів і вдосконалення технології КНД МОН транзисторів.

6. Вперше розроблені нові варіанти конструкцій КНД МОТ транзисторів, що дозволяють підвищити стабільність роботи приладів за рахунок усунення "кіяк"-ефекту; показано можливість покращення параметрів самосумішених КНД МОН транзисторних структур; фізичну модель КНД МОН транзистора з додатковим p^+ -контактом до інверсної області.

7. Розроблену серійноздатну технологію виготовлення мікроелектронних сенсорів (тензорезистивних, ємнісних, оптоелектронних) на основі КНД-структур з лазерною мікробонною рекристалізацією полікремнієвого шару; виявлений вплив текстури полікремнію на чутливість тензорезистивних сенсорів тиску і показано їх працездатність в діапазоні температур $-60...+300^{\circ}\text{C}$.

8. Вперше встановлено, що в неоднорідних зрачках з p - n -переходами спостерігається ряд особливостей на їх характеристиках, які зникають при високих гідростатичних тисках і низьких температурах, що вказує на наявність мікрровключень у вигляді напівметалевої фази у вихідному матеріалі CdHgTe ; виявлені особливості фотодіодів на основі CdHgTe , пов'язані зі специфікою вихідного матеріалу та технологією створення p - n -переходів.

Практична цінність і реалізація результатів роботи.

Методи створення структур "кремній-на-діелектрику" з лазерною рекристалізацією полікремнієвого шару використані для виготовлення активних елементів інтегральних схем на концерні "Родон" м. Івано-Франківськ та НДІ "Мікроприлад" м. Київ.

Запропоновані способи і методи створення фоточутливих p - n -переходів у власнодефектних напівпровідниках за допомогою лазерного випромінювання впроваджені в ЛДУ, ЛПІ для виготовлення фотодіодів на основі CdHgTe . Ці фотодіоди були використані в НДІ "Исток" м. Фрязіно в системах тепло- і лазеробачення, при відробці макетів активних локаційних лазерних систем на довжині хвилі CO_2 -лазера для реєстрації ІЧ випромінювання в гетеродинамічному режимі, а також при відлагодженні вимірювальних схем для дослідження проходження ІЧ випромінювання в атмосфері.

Розроблена серійноздатна технологія виготовлення в заводських умовах мікроелектронних сенсорів з використанням структур "кремній-на-діелектрику", рекристалізованих лазерним випромінюванням. Показано працездатність тензорезистивних сенсорів тиску в діапазоні температур $-60...+300^{\circ}\text{C}$. Сенсори

застосовуються в діючих стендах перевірки пульсоманометрів в СКТБ "Орізон" м. Івано-Франківськ та для розробки інформаційно-керуючих систем тракторів в СКТБ м. Вишгород Київської обл.

Новизна практичних розробок захищена авторськими свідоцтвами на винаходи (N 577859; N 613664; N 786769; N 1248479; N 1493910; N 1783937; пов. ріш. на заявку N 4923867/25) і відзначена срібною медаллю ВДНГ СРСР в 1989 р.

Окремі результати досліджень використані також підприємствами і установами "Квазар" м. Київ, "Полярон", "Карат" і "Полісенсор" м. Львів та ЗЧМ м. Світловодськ, а також в навчальному процесі при читанні спецкурсів, в лабораторному спецпрактикумі і в навчальному посібнику "Напівпровідникові діоди і транзистори" (Львів, вид. ЛПІ, 1984 р.) для студентів ЛПІ спеціальності "Мікроелектроніка та напівпровідникові прилади".

На захист вносяться результати комплексних експериментальних досліджень структурних перетворень під дією лазерного випромінювання в напівпровідниках для створення мікроелектронних приладів і наукові положення, які випливають з їх аналізу і теоретичного узагальнення:

1. Встановлені закономірності структурних перетворень в хімічно стійких елементарних напівпровідниках типу полікремнію під дією лазерного випромінювання та виявлені особливості мікробезонної лазерної рекристалізації полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках через рідку фазу; фізичні і технологічні основи формування структур "кремній-на-діелектрику" з локалізацією границь зерен, придатних для створення на їх основі елементів КНД МОН ІС і мікроелектронних сенсорів.

2. Виявлені особливості зміни структурних та електрофізичних властивостей власнодефектних напівпровідників типу CdHgTe, в яких під тепловою дією лазерного випромінювання відбуваються перетворення власних електрично активних точкових дефектів структури; фізичну модель формування р⁺-областей у власнодефектному p-CdHgTe і інверсії типу провідності в n-CdHgTe під дією лазерного випромінювання.

3. Нові конструктивно-технологічні способи підвищення якості КНД МОН транзисторів і покращення їх параметрів.

4. Фізичні і технологічні основи виготовлення мікроелектронних сенсорів на основі рекристалізованих структур "крем-

ній-на-діелектрику" та результати дослідження їх характеристик.

5. Нові технологічні способи створення фоточутливих р-п-переходів у власнодефектних напівпровідниках $CdHgTe$ за допомогою лазерного випромінювання та особливості поведінки фотодіодів, пов'язані зі специфікою матеріалу та технологією виготовлення р-п-переходів.

Апробація роботи. Основні результати, викладені в дисертації доповідалися на I Всесоюзній науково-технічній конференції "Одержання і властивості напівпровідникових сполук типу A^mB^ny і A^mB^ny і твердих розчинів на їх основі", (м.Москва, 1977 р.), IV, V, VI Всесоюзних симпозиумах з напівпровідників з вузькою забороненою зоною і напівметалів (м.Львів, 1975, 1980, 1983 рр.), I, II, III Всесоюзних конференціях з фізики і технології тонких плівок (м. Івано-Франківськ, 1981, 1984, 1990 рр.), V, VI, VII Всесоюзних нарадах з нерезонансних взаємодій оптичного випромінювання з речовиною (м.Ленінград, 1981 р., м.Паланга, 1984, м.Ленінград, 1988 р.), Республіканській науково-технічній конференції "Створення і використання лазерної техніки і технології в машинобудуванні і приладобудуванні" (м.Київ, 1985 р.), II Всесоюзній науково-технічній конференції "Застосування лазерів в приладобудуванні, машинобудуванні і медичній техніці" (м.Москва, 1979 р.), X, XII Всесоюзній конференції з мікроелектроніки (м.Таганрог, 1982 р., м.Тбілісі, 1987 р.), Всесоюзній науковій конференції "Стан і перспективи розвитку мікроелектронної техніки" (м.Мінськ, 1985 р.), I Всесоюзній школі з термодинаміки і технології напівпровідникових кристалів і плівок" (м.Івано-Франківськ, 1986 р.), III школі з актуальних питань фізики металів та вузькозонних напівпровідників (м.Тирасполь, 1987 р.), III Всесоюзній конференції "Застосування лазерів в технології, в системах передачі і обробки інформації" (м.Таллін, 1987 р.), Всесоюзних семінарах "Тонкі процеси в мікроелектроніці" (м.Суздаль, 1987, 1990 рр.), Всесоюзній науково-технічній нараді "Шляхи вдосконалення технології напівпровідникових і діелектричних матеріалів електронної техніки" (м.Одеса, 1988 р.), Науково-технічному семінарі "Застосування лазерів в промисловості" (м.Ленінград, 1988 р.), III, IV науково-технічному семінарі з електронних датчиків "Сенсор-89", "Сенсор-91" (м.Ужгород, 1989 р., м.Ленінград, 1991р.)

І Всесоюзній конференції "Автоматизація, інтенсифікація, інтеграція процесів технології мікроелектроніки" (м.Ленінград, 1989 р.), Всесоюзній конференції "Застосування лазерів в народному господарстві" (м.Шатура, 1989 р.), Всесоюзній науково-технічній конференції "Датчики на основі технології мікроелектроніки" (м.Москва, 1989 р.), VII Міжнародній конференції по мікроелектроніці "Microelectronics - 90" (м.Мінськ, 1990 р.), I Міжнародній конференції з епітаксійного росту кристалів (м.Будапешт, Угорщина, 1990 р.), Всесоюзній конференції "Мікроелектронні датчики в машинобудуванні" (м.Ульянівськ, 1990 р.), Міжнародних школах з мікроелектроніки сенсорів (м.Созополь, Болгарія, 1990, 1991 рр.), Всесоюзній конференції "Актуальні проблеми електронного приладобудування" (м.Новосибірськ, 1990 р.), III Європейській конференції з росту кристалів (м.Будапешт, Угорщина, 1991 р.), Міжнародній конференції з фізики напівпровідникових приладів (м.Н.-Делі, Індія, 1989 р.), Республіканській конференції "Фізика і хімія поверхні і межі поділу вузькощілинних напівпровідників" (м.Львів, 1990 р.), Республіканській науково-технічній конференції "Проблеми інтегральної МДН-електроніки" (м.Севастополь, 1990 р.), Науково-технічних семінарах "Методи і засоби вимірювання механічних параметрів в системах контролю і керування" (м.Пенза, 1991, 1992 рр.), Міжнародній науково-технічній конференції "Актуальні проблеми електронного приладобудування" (АПЕП-92) (м.Новосибірськ, 1992 р.), II міжреспубліканському науково-технічному семінарі "Фізико-технологічні проблеми створення КНІ-структур і елементів електронної техніки на їх основі" (м.Київ, 1992 р.), IV Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (м.Івано-Франківськ, 1993 р.), Міжнародній конференції "Фізика в Україні" (м.Київ, 1993 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в міжнародних, центральних і республіканських виданнях, збірниках матеріалів конференцій і семінарів. За темою дисертації опубліковано понад 100 наукових робіт, отримано 7 авторських свідоцтв на винаходи. Список основних публікацій за матеріалами дисертаційної роботи наведено в кінці автореферату.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, шести розділів, в яких викладені результати дослідження і загальних висновків. Вона містить 404 сторінки, в т.ч. 137 ілюстрацій, 13 таблиць і список літератури з 283 наєв.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі приведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність проблеми і вибір об'єктів дослідження, сформовані мета і задачі роботи, вказані наукова новизна, практична цінність, основні положення і результати досліджень, які виносяться на захист.

В першому розділі розглядається вплив лазерного випромінювання на структурні і електрофізичні властивості полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках як представника класу елементарних напівпровідників, в яких відсутні зміни хімічного складу при структурних перетвореннях.

На початку розділу дається короткий огляд робіт з аналізу методів лазерної рекристалізації полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках. Проведено аналіз модельних уявлень та механізмів, які обговорюються в літературі. Далі описуються фізичні і технологічні процеси формування структур "кремній-на-діелектрику" з використанням мікроезонної лазерної рекристалізації полікремнієвого шару. Досліджуються умови отримання крупнозернистих полікристалічних шарів кремнію з локалізацією границь зерен при рекристалізації через рідку фазу під дією скануючого лазерного випромінювання з використанням бічного епітаксійного росту від затравки.

Вихідними структурами для дослідження були полікремнієві шари товщиною ~ 0,5 мкм, отримані методом осадження з газової фази в реакторі зниженого тиску (LPCVD-метод) при температурі 625°C на термічно окислені пластини кремнію р-типу з орієнтацією (100). Лазерна обробка напівпровідникових структур проводилась скануванням променя ІАГ-лазера по поверхні пластини з утворенням круглої розплавленої зони. Оптимізація режимів лазерної обробки полікремнієвих шарів проводилась в таких діапазонах:

- | | |
|-----------------------------|--------------|
| - діаметр розплавленої зони | 100+150 мкм; |
| - вихідна потужність | 13+20 Вт; |

- ширина перекриття смуги сканування до 40%;
- швидкість сканування до 20 см/с;
- температура пластини до 600°C.

З метою модифікації температурних полів і створення оптимальних градієнтів в зоні дії лазерного випромінювання для локалізації дефектів, зокрема границь зерен, в заданих областях шару полікремнію використовувалась система антивідбиваючого і капсулюючого покриття у вигляді смуг Si_3N_4 і шарів SiO_2 . Були проведені розрахунки коефіцієнту відбивання лазерного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda=1,06$ мкм для системи шарів $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, з яких оптимальними для рекристалізації вибирались такі товщини: капсулюючого шару SiO_2 - 0,7 мкм; просвітлюючих смуг Si_3N_4 (шириною 5 мкм і кроком 30 мкм) - 0,1 мкм. Кристаліграфічна орієнтація рекристалізованих шарів полікремнію задавалась монокристалічною затравкою від підкладки.

Схематичний вигляд вихідних структур і етапи їх виготовлення наведені на рис.1.

Електронно-мікроскопічні дослідження показали, що шари полікремнію до лазерної обробки володіють дрібнозернистою структурою; кристаліти мають V-подібний вигляд, вісь $[110]$ текстури яких перпендикулярна до поверхні пластини. Середній розмір зерен у вихідних шарах полікремнію становить 35+40 нм. Вивчення особливостей структурних змін в шарах полікремнію під дією лазерного випромінювання вказують, що при рекристалізації через рідку фазу на декілька порядків збільшується розмір зерен полікремнію, при чому встановлено залежність розмірів зерен та їх форми від наявності затравки та капсулюючого і просвітлюючого покриття. Встановлено, що для зрачків з вільною поверхнею утворюється сітка границь зерен "мозаїчної" форми, зумовлена нестабільністю межі поділу "розплав - тверда фаза"; при наявності капсулюючого покриття домінуючими дефектами при лазерній рекристалізації є сітка границь зерен "шевронного" типу, що визначається термічним профілем лазерного променя з гауссовим розподілом інтенсивності. При оптимізації температурного поля в області фронту кристалізації зерна полікремнію трансформуються в довгі вузькі монокристали розмірами 30 x 500...800 мкм² з переважною орієнтацією (100) і локалізацією границь зерен під антивідбиваючими смугами Si_3N_4 .

Дослідження морфології рекристалізованих шарів полікрем-

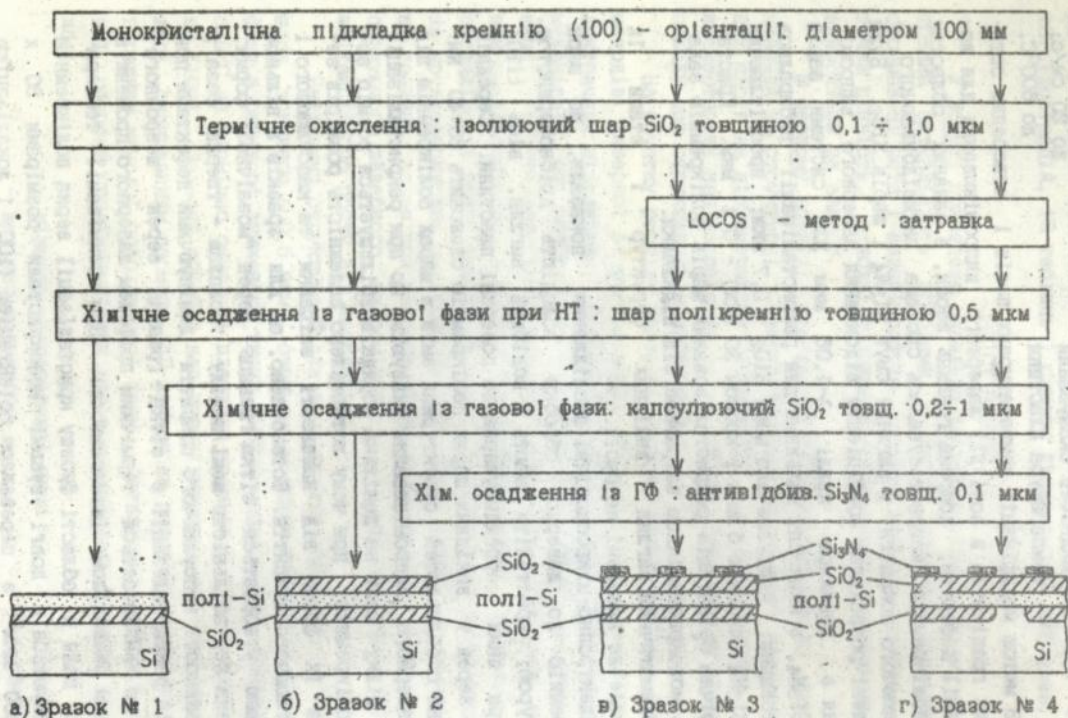


Рис.1. Схематичний вигляд вихідних КНД-структур і етапи їх виготовлення.

нію вказують також на суттєву роль калсуючого покриття в процесі рекристалізації полікремнію для стабілізації росту зерен, зменшення масопереносу і формування сильно вираженої (100)-текстури. Основними дефектами в рекристалізованих шарах полікремнію є сітка границь зерен з субграницями, двійники, дефекти пакування, окремі дислокації і їх скупчення.

Електрофізичні властивості полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках визначаються як структурою рекристалізованого матеріалу, наявністю домішок і дефектів так і, в більшій мірі, їх розподілом, зокрема спостерігається суттєва залежність від орієнтації границь зерен відносно напрямку протікання струму, а також їх локалізації у випадку рекристалізації полікремнієвих шарів з використанням антивідбиваючого покриття. На основі проведених досліджень рекомбінаційних властивостей було встановлено, що для вихідних полікремнієвих шарів з дрібнозернистою структурою ефективний час життя нерівноважних носіїв заряду дорівнює ~ 10 нс. В рекристалізованих зразках з "мозаїчною" структурою полікремнію час життя носіїв заряду зменшується до одиниць мікросекунд; а потенціальний бар'єр на міжзеренних границях укрупнених зерен суттєво підвищується. В зразках, для яких після рекристалізації були відсутні границі зерен, ефективний час життя нерівноважних носіїв заряду значно зростає.

Дослідження тензорезистивних властивостей шарів полікремнію, рекристалізованих лазерним випромінюванням, проводилось шляхом моделювання тензорезистивного ефекту в матеріалі р-типу провідності і експериментального вивчення властивостей шарів полікремнію для n- і р-типу провідності з концентрацією домішок $10^{17} \cdot 10^{21}$ см⁻³ при різних температурах. Оцінювався вплив висоти потенціального бар'єру на міжзеренних границях на питомий опір і тензочутливість досліджуваних зразків. Показано, що внесок бар'єру є суттєвим для порівняно низьких концентрацій домішок ($N_a \cdot 10^{17} + 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ для полі-Si р-типу), коли електروпровідність зерна і бар'єру є величинами одного порядку. При високих рівнях легування ($N_a \cdot 10^{19}$ см⁻³) внеском потенціального бар'єру на границі зерна в тензочутливість полі-Si можна нехтувати.

Для розрахунку тензоопору полікремнію р-типу провідності, який зумовлений деформаційною залежністю провідності через потенціальний бар'єр на міжзеренних границях, розглянено модель

термоемісійного механізму переносу носіїв заряду через бар'єр в поєднанні з дифузійним механізмом. Концентраційну залежність висоти потенціального бар'єру (U_B) було апроксимовано поліномом 3-го порядку. Температурну залежність U_B визначали згідно виразу

$$U_B = U_{B,0}(1 - \gamma T), \quad (1)$$

де γ - температурний коефіцієнт ($\gamma = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$). Максимальне електричне поле на границі зерен розраховувались за формулою:

$$E_{B,T} \left\{ \frac{2N_B kT}{\epsilon \epsilon_0} \left[\frac{eU_B}{kT} - 1 + \exp\left(-\frac{eU_B}{kT}\right) \right] \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

Проведено моделювання величин U_B , E_B в широкому діапазоні температур та концентрацій домішки.

Вивчено тензорезистивні властивості рекристалізованих шарів полікремнію в залежності від умов отримання КНД-структур. Встановлено, що лазерна рекристалізація полікремнієвого шару на діелектричних підкладках призводить до значного підвищення тензочутливості матеріалу і цей ефект збільшується зі зменшенням концентрації домішки в полікремнії. Отримане значення позовжнього коефіцієнту тензочутливості для рекристалізованого шару полікремнію збільшується в порівнянні з вихідним матеріалом і становить ~ 55 для рекристалізованих зразків при концентрації легуючої акцепторної домішки $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Одержані з експерименту усереднені значення позовжнього коефіцієнта тензочутливості (K_{II}), температурного коефіцієнта опору (ТКО), температурного коефіцієнта чутливості (ТКТЧ) та розраховані значення основних коефіцієнтів еластоопору (m_{1j}) для рекристалізованих шарів полікремнію наведені в табл. 1.

Отже для суттєвого покращення кристалічної якості і електрофізичних властивостей полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках запропоновано використати метод бічного епітаксійного росту від затравки, яка б задавала відповідну орієнтацію, а система капсулюючого і просвітлюючого покриття забезпечувала б стабільність фронту кристалізації, зменшення масопереносу та локалізацію границь зерен в наперед заданих областях полікремнієвого шару. При оптимальному розміщенні областей затравок можна отримати монокристалічні ділянки полікремнію на діелектричній підкладці, придатні для створення на їх основі елементів

інтегральних схем і мікроелектронних сенсорів.

Таблиця 1.

Тензорезистивні властивості рекристалізованих шарів полі-Si

N: Тип провідн. конц. дом., см ⁻³	Тенвочутл. K ₁₁	Коеф. еласто- опору, m ₁₁	TKO, град ⁻¹	TKTЧ, град ⁻¹
1. p-тип, 10 ¹⁷	55	m ₄₄ -27,5	-	-
2. p-тип, 10 ¹⁸	42	m ₄₄ -21	+2,3·10 ⁻⁴	-1,6·10 ⁻³
3. p-тип, 10 ²⁰	26	m ₄₄ -13	+1,1·10 ⁻³	-1,5·10 ⁻³
4. n-тип, 10 ²¹	-22	m ₁₁ -55	+1,2·10 ⁻³	-1,1·10 ⁻⁴

Другий розділ присвячений дослідженням особливостей структурних перетворень під дією лазерного випромінювання в складних власнодефектних напівпровідниках типу CdHgTe і встановленню закономірностей зміни концентрації власних електрично активних дефектів структури під тепловою дією лазера для керування фізичними властивостями матеріалу. В першій частині розділу приводиться аналіз основних фізичних властивостей твердих розчинів CdHgTe і механізмів утворення дефектів, а також обґрунтовується їх роль у формуванні характеристик матеріалу.

Досліджено властивості вихідних зразків CdHgTe, придатних для вивчення структурних перетворень під дією лазерного випромінювання та створення фоточутливих p-n-переходів на їх основі; умови формування мікрорельєфу в кристалах CdHgTe та вплив матеріалу контактів і методів їх виготовлення на характеристики CdHgTe. Концентрація носіїв заряду для вихідних зразків, які попередньо піддавались низькотемпературній обробці при 200°C становила $(0,6 \pm 3,0) \cdot 10^{15}$ см⁻³, рухливість $10^4 + 10^5$ см²/(В·с) при T=77 К. Фоторезистивні елементи, виготовлені на основі вихідного матеріалу CdHgTe, володіли фоточутливістю в діапазоні довжин хвиль 2+14 мкм і здатністю до виявлення $\sim 10^9 + 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Монокристалічні зразки і епітаксіальні шари CdHgTe, які при термообробці в парах ртуті змінювали тип провідності і концентрацію носіїв заряду, тобто власнодефектні матеріали, використовувались нами для дослідження структурних перетворень під дією лазерного випромінювання.

Встановлено, що при дії серії імпульсів лазера на монокристалічні зразки p-CdHgTe концентрація акцепторів в припо-

перхневому шарі товщиною $10+15$ мкм зростає на $1+2$ порядки і досягає $(3+9) \cdot 10^{17}$ см⁻³. З ростом інтенсивності імпульсів лазера концентрація носіїв заряду в шарі, підданому опроміненню, збільшується швидше, ніж зменшується їх рухливість. При цьому питома провідність зразка підвищується. Лазерна обробка кристалів CdHgTe на повітрі призводить також до зміни їх фотоелектричних властивостей, що пов'язується зі збільшенням швидкості поверхневої рекомбінації на опроміненій поверхні кристалу внаслідок її окислення і утворення додаткових центрів рекомбінації. Відмінності в залежностях спектрального розподілу фотопровідності досліджуваних зразків в повітрі і у вакуумі можна пов'язувати з процесами окислення поверхневого шару зразків, що знаходяться в різних середовищах.

Досліджено електрофізичні, фотоелектричні властивості і морфологію поверхні тонких шарів CdHgTe та їх зміни в результаті опромінення серіями лазерних імпульсів в режимі вільної генерації. З ростом густини енергії мілісекундних імпульсів спостерігаються необоротні зміни фотоелектричних і електрофізичних характеристик без будь-яких порушень стану поверхні. Показано закономірності зміни цих характеристик при обробці імпульсами лазера різних інтенсивностей. При збільшенні густини енергії вище порогової спостерігається погіршення стану поверхні - підвищення густини дислокацій, оплавлення поверхні.

Проведено також дослідження температурних залежностей коефіцієнта Хола і електропровідності тонких шарів CdHgTe та їх зміни в результаті обробки імпульсним випромінюванням неодимового лазера з застосуванням різних варіантів лазерної обробки, що дало можливість виключити окислення опроміненої поверхні, вплив контактної групи, можливість виходу ртуті через поверхню при великих енергіях опромінення і звести дію лазерного променя до короткотривалого термічного відпаду. Проведено розрахунок приросту температури на опроміненій поверхні. Спостережувані зміни в результаті лазерної обробки на досліджуваних зразках пов'язуються з формуванням дефектної структури в зоні дії лазера, що призводить до підвищення концентрації носіїв заряду - вакансій ртуті.

За результатами спостережуваних змін на спектрах фотопровідності в тонких епітаксійних шарах CdHgTe дію імпульсного лазерного випромінювання на вихідний матеріал можна

звести до двох механізмів лазерного відпалу: твердофазного і рідкофазного. Порогова густина енергії лазерного імпульсу, необхідна для досягнення кожного з цих випадків, визначається товщиною епітаксійного шару CdHgTe, станом поверхні, умовами тепловідводу і т.д. Рідкофазний відпал, як процес плавлення з наступною епітаксією супроводжується якісними змінами на поверхні матеріалу; максимум спектрального розподілу фотопровідності поряд з зростанням зміщується в короткохвильову область спектру.

Досліджено структурні перетворення в CdHgTe при дії скануючого неперервного лазерного випромінювання з використанням анодно-окисних плівок (АОП) як маскуючого покриття. Показано, що наявність АОП не заважає тенденції зміни властивостей зразків в бік р-типу, не дивлячись на маскуючі властивості АОП по відношенню до атомів ртуті. Основні зміни в зразках CdHgTe проходять за рахунок дефектів, створених лазерною обробкою, а не за рахунок дисоціації матеріалу і виходу ртуті через поверхню.

Аналіз теоретичних і експериментальних результатів досліджень різних способів імпульсного нагріву напівпровідникових матеріалів дозволив запропонувати фізичну модель структурних перетворень у власнодефектному CdHgTe під дією лазерного випромінювання. Зроблено висновок, що формування р⁺-областей у власнодефектному р-CdHgTe і інверсії типу провідності в приповерхневому шарі n-CdHgTe при теплової дії лазерного випромінювання і нагріві зразків до температури нижче температури плавлення проходить в результаті загартування нерівноважної високотемпературної концентрації власних електрично активних дефектів структури. Зміна величини концентрації акцепторів у власнодефектних зразках CdHgTe відбувається, ймовірно, завдяки термічній дії лазерного випромінювання на матеріал і, в основному, за рахунок іонізації існуючих в CdHgTe нейтральних комплексів типу атом телуру-вакансія ртуті-атом телуру, а також через появу нових пар вакансія-міжвузельний атом ртуті.

В третьому розділі розглядається створення елементів МОН ІС на основі рекристалізованих лазерним випромінюванням КНД-структур та дослідження їх властивостей.

Враховуючи те, що КНД МОН ІС мають ряд відмінних особливостей в порівнянні з ІС на основі монокремнію, для розробки технології виготовлення КНД МОН ІС, а також для вивчення ос-

новних характеристик рекристалізованого полікремнію (електрофізичних і структурних властивостей, межі поділу Si-SiO₂ і т.д.), розроблено і досліджено набір тестових елементів і структур та проведено аналіз технологічного маршруту виготовлення КНД МОН-транзисторів з індукованим п-каналом. Згідно вибраної технології розміщення приладів проводилось з врахуванням фактичного розподілу границь зерен. Для оцінки можливості створення ІС і для контролю технологічного процесу виготовлені p⁺-р-p⁺-структури, n-МОН-транзистори з різним співвідношенням геометричних розмірів каналу, інвертори та інші компоненти ІС. На базі інверторів створені дев'ятикаскадні кільцеві генератори; вихід функціональних, кільцевих генераторів на основі КНД МОН-транзисторів з пластини становить 25+30%.

Дослідження тестових МОН-конденсаторів, виготовлених на основі КНД-структур, дозволили оцінити параметри межі поділу в системі, що містить полікремнієві шари, опромінені лазером, що дає можливість підібрати оптимальні режими лазерної рекристалізації полікремнію. Отримана величина ефективного заряду в підзатворному діелектрику на межі з рекристалізованим полікремнієм дорівнює $6 \cdot 10^{10}$ см⁻²; в ізолюючому окисі на межі з монокристалічною підкладкою становить $3 \cdot 10^{11}$ см⁻²; в ізолюючому окисі на межі з рекристалізованим полікремнієм порядку $5 \cdot 10^{11}$ см⁻².

Вивчення впливу лазерного випромінювання на електричні властивості полікремнієвих p⁺-р-p⁺-структур дозволило встановити визначальні механізми проходження струму: при малих напругах змінюється домінує струм генерації - рекомбінації, далі відбувається різке зростання струму, зумовлене ефектом заповнення центрів захоплення, і при достатньо великих напругах змінюється спостерігається струм подвійної інжекції. Вивчено також вплив лазерного випромінювання на властивості МОН-структур з рекристалізованим полікремнієвим затвором.

Виявлено, що на електричні характеристики МОН-транзисторів, сформованих в полікремнієвих шарах на діелектрику, помітно впливають границі зерен рекристалізованого полікремнію і величина заряду на межі поділу Si-SiO₂. Покращення характеристик приладів, сформованих в шарах полікремнію, можна досягти за рахунок підвищення якості рекристалізованих шарів. Рухливість електронів в каналі n-МОН-транзисторів, виготовлених в рекристалізованих шарах полікремнію з локалізацією границь

зерен становить $520+720 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; порогова напруга - $0,9+1,5 \text{ В}$; підпороговий струм - $5\cdot 10^{-12}+10^{-11} \text{ А/мкм}$. Спостерігається деякий розкид параметрів МОН-транзисторів на кремнієвій пластині діаметром 100 мм, особливо в її периферійній частині. Недивлячись на подібність характеристик КНД МОН-транзисторів і транзисторів на основі монокремнію, існує ряд суттєвих фізичних відмінностей в їх роботі (вплив підкла як другого затвору; здатність одночасного збагачення верхньої і нижньої поверхні полікремнію; наявність "кінк"-ефекту і т.д.).

В роботі розроблено нові варіанти конструкцій КНД МОН-транзисторів, що дозволяють підвищити стабільність роботи приладів за рахунок усунення "кінк"-ефекту. Створення таких приладів не вимагає додаткових технологічних операцій в порівнянні з відомими. Досліджено електричні властивості КНД МОН-транзисторів з додатковим p^+ -контактом до інверсної області каналу транзистора; проведено аналіз режимів роботи і запропоновано фізичну модель таких приладів. Описується також розроблена конструкція КНД МОН-транзистора з матричною конфігурацією затвору, проведено аналіз конструктивно-технологічних особливостей структури і фізичної моделі приладу. Особливості конструкції такого транзистора дають можливість позбавитися "кінк"-ефекту і керувати пороговою напругою при одночасному покращенні параметрів і характеристик приладу.

Таким чином, використовуючи спеціальні технологічні, топологічні і конструктивні методи з врахуванням особливостей технології формування структур, принципів роботи і побудови елементів ІС, можна керувати якістю технології і параметрами КНД МОН-транзисторних структур.

В четвертому розділі описується технологія виготовлення мікроелектронних сенсорів (тензорезистивних, ємнісних, оптикоелектронних) на основі КНД-структур з лазерною рекристалізацією полікремнієвого шару; досліджуються характеристики мікроелектронних сенсорів; виявлений вплив текстури полікремнію на чутливість тензорезистивних сенсорів тиску і показано їх працездатність в діапазоні температур $-60\dots+300^\circ\text{C}$.

Розроблена серійноздатна технологія виготовлення в мікроелектронному варіанті сенсорів тиску з полікремнієвими тензорезисторами, рекристалізованими лазерним випромінюванням. Крім типових технологічних операцій, характерних для технології ін-

тегральних схем, при виготовленні сенсорів використовуються специфічні технологічні операції, пов'язані з лазерною рекристалізацією полікремнієвого шару, двостороннього суміщення, виготовленням кремнієвих мембран і т.д.

Розглядаються основні принципи проектування мікроелектронних сенсорів тиску, зокрема вплив топології тензорезистивного сенсора на його чутливість для різних текстур полікремнієвих шарів; виявлені параметри, які визначають температурну залежність вихідного сигналу сенсора.

Досліджуються мікроелектронні тензорезистивні сенсори тиску з квадратною мембраною, підкладкою в яких служить монокристалічний кремній, орієнтований в площині (100). Сторони мембрани паралельні напрямку [110]. Тензорезистивні елементи сенсора з рекристалізованого полікремнію розміщені на тонкій мембрані з активною площею $2,0 \times 2,0 \text{ мм}^2$.

Використовуючи значення розрахованих коефіцієнтів тензочутливості, можна визначити відносну зміну опору полікремнієвих тензорезисторів за формулою

$$\delta R_{\pm} = \gamma_{\pm} \cdot (a/h)^2 \cdot P, \quad (3)$$

де $2a$ - сторона мембрани, h - її товщина, γ - нормована чутливість тензорезистора, яка визначається структурою полікремнієвого шару та розташуванням тензорезисторів на мембрані. Топологія тензорезисторів вибиралась таким чином, щоб на тензорезистори, з'єднані в суміжні плечі мостової схеми, діяла деформація протилежних знаків, що дозволяє збільшити вихідний сигнал сенсора. Величина вихідного сигналу сенсора тиску з чотирма активними полікремнієвими тензорезисторами, з'єднаними в повну мостову схему, при живленні від джерела напруги визначається як

$$U = E \left(\frac{\delta R_+ + |\delta R_-|}{2} \right). \quad (4)$$

В анізотропному наближенні оптимізована топологія полікремнієвих тензорезисторів на монокристалічній мембрані. Були спроектовані і виготовлені тензорезистивні сенсори тиску на основі полікремнію з текстурою (100) з розташуванням тензорезисторів біля країв мембрани. Основні параметри розроблених сенсорів тиску наведені в таблиці 3.

Розроблено технологію виготовлення мікроелектронних емнісних сенсорів тиску на основі полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках; створені експериментальні зразки сенсорів тиску та досліджено їх характеристики. Проведено аналіз факторів, що визначають чутливість емнісних сенсорів тиску; впливу внутрішніх механічних напружень в мембранах, виготовлених у вигляді багат шарових структур на характеристики емнісних сенсорів тиску. Чутливість отриманих зразків сенсорів становить $(16,5+19,5) \cdot 10^{-2}$ пФ/бар для діапазону вимірюваних тисків 0...0,4 бар.

Таблиця 2.

Основні параметри тензорезистивних сенсорів тиску.

N	Параметри	Значення
1.	Діапазони вимірюваних тисків, бар	0+0,4; 0+1; 0+5; 0+100
2.	Максимальний вихідний сигнал, мВ	50 + 100
3.	Живлення від джерела напруги, В	5 + 15
4.	Чутливість до тиску при 20°C, мВ/(В·бар)	10 + 15
5.	Гістерезис, %	0,1
6.	Діапазон робочих температур, °C	-60++300
7.	Температурний коефіцієнт чутливості (вихідного сигналу) в діапазоні - 40++150°C, %·град ⁻¹	- (0,04+0,05)
8.	Допустиме перевантаження по тиску, %	до 200

На основі шарів полікремнію на діелектричних підкладках, рекристалізованих лазерним випромінюванням, створені оптоелектронні сенсори видимого випромінювання та досліджено їх характеристики. Координатна чутливість дорівнює ~ 4,1 В/мм·мВт; час формування вихідного сигналу не перевищує 10 мкс; стабільність в діапазоні температур 20+250°C - 0,1 %·град⁻¹. Застосування технології рекристалізації полікремнієвих шарів на діелектрику дозволяє створювати координатно-чутливі оптоелектронні сенсори сумісно з електронними схемами обробки інформації на одному кристалі у вигляді інтегрального модуля.

В п'ятому розділі описано запропоновані ефективні способи і розроблену технологію створення фоточутливих р-п-переходів у

власнодефектних монокристалічних зразках і епітаксійних шарах CdHgTe, а також одного або декількох фоточутливих р-п-переходів в об'ємі однієї і тієї ж епітаксійної варізонної структури CdHgTe за допомогою лазерного випромінювання та досліджено їх властивості. Схема створення р-п-переходів у варізонній гетероструктурі CdHgTe за допомогою лазерного випромінювання наведена на рис.2. Опір р-п-переходів при нульовій напрузі зміщення становить 10^2+10^3 Ом, напруга відсічки, отримана з ВАХ - $0,05+0,35$ В і збільшується зі зниженням температури та підвищенням процентного вмісту телуриду кадмію у вихідному матеріалі. Дослідження особливостей електричного пробію р-п-переходів вказують на домінуючу роль тунельного механізму. Глибина залягання р-п-переходів становить $5,0+20,0$ мкм. На основі вимірювань ВХХ переходів, отриманих за допомогою імпульсного лазерного випромінювання в монокристалічних зразках CdHgTe, встановлено ступінчастий профіль розподілу концентрації носіїв струму і утворення структури типу р⁺-п⁺-п. Оцінка товщини шару ОПЗ при нульовій напрузі зміщення дала значення $0,5+3,0$ мкм. Максимум фоточутливості переходів в залежності від складу вихідного матеріалу знаходиться в інтервалі довжин хвиль $4+12$ мкм.

Розроблено спосіб виготовлення фоточутливих р-п-переходів також в структурах CdTe-CdHgTe-АОП за допомогою лазерного випромінювання. Використання капсулюючого покриття у вигляді анодно-окисної плівки на поверхні CdHgTe дає можливість пасивувати поверхню кристалу і межу виходу р-п-переходу на поверхню, а також зменшити можливість виходу ртуті з матеріалу, що забезпечує кращу якість і стабільність виготовлених приладів. Проведено дослідження властивостей р-п-переходів, виготовлених запропонованим способом і аналіз механізму проходження струму при різних значеннях напруги зміщення р-п-переходу.

Для порівняння властивостей р-п-переходів, отриманих різними способами, розглядаються також р-п-переходи, створені дифузійю та іонним легуванням ртуті в CdHgTe ($0,18 < x < 0,25$). Вивчено деякі процеси лавинного помноження носіїв заряду в р-п-переходах в CdHgTe. Показано, що значення співвідношення сигнал - шум є максимальним, якщо коефіцієнт помноження дорівнює $3+5$.

Показано вплив неоднорідностей вихідного матеріалу CdHgTe на ВАХ і спектральний розподіл фоточутливості р-п-переходу.

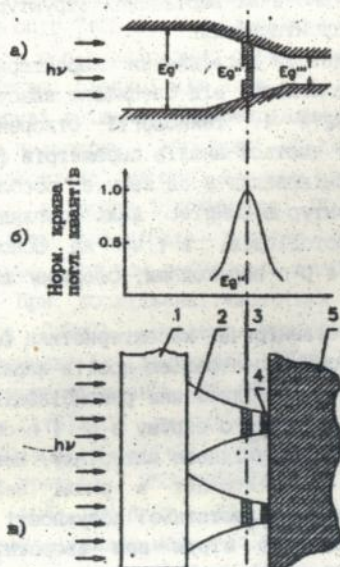


Рис.2. Схема створення р-п-переходів у варіаційній гетероструктурі CdHgTe. (1 - підкладка CdTe; 2 - шар CdHgTe; 3 - шар CdHgTe ($x=0,2$); 4 - припой In-Ga; 5 - тепловідвід).

Дослідження координатного розподілу fotocутливості дифузійних р-п-переходів показали суттєву нестабільність їх чутливості по периметру чутливого елемента.

Досліджено вплив неоднорідностей вихідного матеріалу CdHgTe при високих гідростатичних тисках і гелієвих температурах на електричні характеристики р-п-переходів. В р-п-переходах, отриманих в матеріалах з однорідним розподілом складу, спостерігаються плавні залежності першої і другої похідної струму від напруги зміщення. Для неоднорідних зразків з р-п-переходами спостерігаються деякі особливості, які зникають при тисках $\sim 9,0$ кбар, що дозволяє припустити наявність мікро-включень у вигляді напівметалевої фази у вихідному матеріалі CdHgTe. З ростом тиску пряма вітка ВАХ зміщується в бік більших напруг; оцінка коефіцієнту зміни контактного потенціалу з тиском дала значення $(9,6 \pm 10,2) \cdot 10^{-6}$ В/бар.

На основі проведених досліджень розроблені і опробовані технологічні схеми виготовлення fotocутливих р-п-переходів в

монокристалічних зразках і епітаксійних варізонних структурах CdHgTe за допомогою лазерного випромінювання.

Шостий розділ містить результати дослідження характеристик і параметрів фотодіодів в залежності від специфіки властивостей вихідного матеріалу CdHgTe і технології створення р-п-переходів. На початку розділу дається аналіз параметрів фотovoltaїчних детекторів ІЧ випромінювання у зв'язку з особливостями створення приладних структур в CdHgTe. Далі розглядаються конструктивні особливості фотодіодів, в т.ч. на основі епітаксійних варізонних структур з р-п-переходами, сформованими лазерним випромінюванням.

Досліджено електричні і фотоелектричні характеристики фотодіодів на основі CdHgTe з різною концентрацією носіїв заряду в п-області. Для більшості фотодіодів відношення рекомбінаційного струму в шарі ОПЗ до рекомбінаційного струму в р- і п-областях тим більше, чим більший склад вихідного матеріалу, менший час життя носіїв і більша їх концентрація в околі межі ОПЗ. При дії лазерного випромінювання достатньої потужності в фотодіодах з сильнолегованою п-областю струм при зворотній напрузі зменшення співрозмірний з величиною струму при прямому з'єднанні. Встановлено, що зі збільшенням концентрації носіїв заряду в п-шарі фотодіода спектр фото-е.р.с. розширяється в більш короткохвильову область. З метою аналізу спектрального розподілу fotocутливості вихідних зразків і фотодіодів на їх основі проведено розрахунок рівня Фермі і ефективної маси носіїв заряду CdHgTe в залежності від їх концентрації, складу матеріалу і температури. Показано, що найкраще узгодження розрахованої залежності ефективної маси від концентрації електронів з експериментальними даними буде при врахуванні більш віддалених верхніх зон. Оцінка положення рівня Фермі для фотодіодів з "просвітленою" п-областю дала значення 0,04±0,17 еВ. Розрахована концентрація електронів в п-області дорівнює $(0,5 \pm 0,0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

З метою аналізу вольт-ватної чутливості фотодіодів на основі CdHgTe проведені дослідження їх диференціального опору і квантової ефективності від зворотної напруги зменшення і потужності ІЧ випромінювання. Дослідження ВАХ фотодіодів показують, що для більшості приладів, особливо для тих, в яких р-п-перехід створений дифузією ртуті в неоднорідному матеріалі CdHgTe, характерні значні струми втрат. Для більш якісних фо-

тодіодів диференціальний опір дорівнює $10^2 + 10^3$ Ом, послідовний опір $7 + 25$ Ом. Дослідження диференціального опору фотодіодів з р-п-переходами, отриманими різними методами, не показали суттєвої різниці між ними. В більшості випадків при зворотній напрузі зміщення диференціальний опір залишається таким же, як при нульовому, або дещо збільшується, а далі зменшується. Встановлено, що при деякому значенні струму при зворотній напрузі зміщення і потужності ІЧ випромінювання вольт-ватна чутливість фотодіодів досягає свого оптимального значення, а далі з ростом потужності випромінювання зменшується.

При дослідженні частотних характеристик фотодіодів на основі CdHgTe виявлено три групи приладів з різним механізмом обмеження їх швидкодії. Для першої групи фотодіодів гранична частота становить: $65 + 130$ МГц, $\eta = 10 + 20\%$, $S_{\text{д}} = (0,1 + 1,0) \cdot 10^2$ В/Вт; $D^* = (1 + 5) \cdot 10^9$ см \cdot Гц $^{1/2} \cdot$ Вт $^{-1}$; для другої - $150 + 350$ МГц, $\eta = 20 + 40\%$, $D^* = (1 + 3) \cdot 10^{10}$ см \cdot Гц $^{1/2} \cdot$ Вт $^{-1}$, $S_{\text{д}} = (0,25 + 2,0) \cdot 10^3$ В/Вт; для третьої - $350 + 650$ МГц, $\eta = 40 + 70\%$, $D^* = (1 + 2) \cdot 10^{10}$ см \cdot Гц $^{1/2} \cdot$ Вт, $S_{\text{д}} = 10^2 + 10^3$ В/Вт. Для деяких фотодіодів висока чутливість спостерігалась майже до $1,0$ ГГц. В першому випадку механізмом обмеження швидкодії фотодіодів пов'язаний з часом дифузії або дрейфу носіїв заряду від місця їх генерації до потенціального бар'єру, в другому - з постійною часу заряду ємності р-п-переходу. Другий механізм обмеження величини швидкодії справедливий також і для фотодіодів третьої групи при малих значеннях зворотної напруги зміщення. При достатньо великих напругах зміщення швидкодія фотодіодів обмежена часом прольоту носіїв через ОПЗ р-п-переходу.

Проведені дослідження порогової чутливості фотодіодів в гетеродинному режимі. Мінімальна порогова чутливість фотодіодів з граничною частотою до 500 МГц становить величину порядку $6 \cdot 10^{-20} + 2 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц при оптимальному значенні потужності випромінювання гетеродина $0,15 + 0,9$ мВт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено закономірності структурних перетворень в хімічно стійких елементарних напівпровідниках типу полікремнію на діелектричних підкладках в залежності від умов лазерної обробки та типу вихідних структур. Оптимізовано умови формування крупнозернистих шарів полікремнію заданої кристалграфічної

орієнтації з локалізацією границь зерен при рекристалізації через рідку фазу під дією скануючого лазерного випромінювання.

2. Розроблено фізичні основи отримання полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках з контрольованими геометричними параметрами мікроструктури та технологію створення структур "кремній-на-діелектрику", придатних для виготовлення елементів інтегральних схем і мікроелектронних сенсорів.

3. Вперше встановлені кореляції між властивостями рекристалізованого полікремнію та режимами мікрозонної лазерної обробки. Виявлено анізотропію електрофізичних і тензорезистивних властивостей. Проведено моделювання тензорезистивного ефекту в полікремнії р-типу для широкого діапазону концентрацій носіїв заряду і робочих температур. Показано, що лазерна рекристалізація полікремнієвого шару призводить до значного підвищення тензочутливості матеріалу, значення поздовжнього коефіцієнта тензочутливості становить ~ 55 для зразків з $N_A \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

4. Встановлені закономірності зміни електрофізичних і фотоелектричних властивостей та морфології поверхні монокристалічних зразків і епітаксійних шарів CdHgTe під дією лазерного випромінювання. Показано, що дією потужного лазерного випромінювання на власнодефектні напівпровідники типу CdHgTe можна модифікувати властивості приповерхневих шарів. Концентрація акцепторів в приповерхневому шарі товщиною $10+15 \text{ мкм}$ в p-CdHgTe зростає на $1+2$ порядки і досягає $(3+9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Основним механізмом модифікації властивостей в CdHgTe є теплова дія лазерного випромінювання.

5. Вперше запропоновано фізичну модель структурних перетворень у власнодефектних напівпровідниках типу CdHgTe при дії лазерного випромінювання, згідно якої формування приповерхневих шарів з підвищеною концентрацією акцепторів в p-CdHgTe і інверсії типу провідності в n-CdHgTe при лазерному нагріванні проходить в результаті загартування нерівноважної високотемпературної концентрації власних електрично активних дефектів структури.

6. На основі КНД-структур з рекристалізованим лазерним випромінюванням полікремнієвим шаром створено елементи МОН інтегральних схем (МОН-транзистори, інвертори, $\text{p}^+\text{-p-p}^+$ -структури, кільцеві генератори), досліджено їх властивості та розроблено набір тестових мікроелектронних структур для контролю параметрів шарів полікремнію і приладів на їх основі.

7. Вперше розроблено нові варіанти конструкцій КНД МОН-транзисторів з підвищеною стабільністю, що досягається усуненням "кінк"-ефекту. Оптимізовано приладні структури і вдосконалена технологія створення КНД МОН-транзисторів.

8. Розроблено серійноздатну технологію виготовлення мікроелектронних сенсорів на основі структур "кремній-на-діелектрику" з лазерною рекристалізацією полікремнієвого шару та створенні експериментальні зразки сенсорів з покращеними параметрами і характеристиками, які мають переваги в порівнянні з існуючими сенсорами на основі монокристалічного кремнію:

- тензорезистивні сенсори тиску з чутливістю 10 ± 15 мВ/(В·бар) для діапазонів від 0+1 бар до 0+100 бар в широкому інтервалі температур $-60 \pm 300^\circ \text{C}$;

- ємнісні сенсори тиску з чутливістю $(16,5 \pm 19,5) \cdot 10^{-2}$ пФ/бар для діапазону тисків 0+0,4 бар;

- оптоелектронні сенсори видимого випромінювання з координатною чутливістю $\sim 4,1$ В/(мм·мВт).

9. Вперше запропоновано нові ефективні способи і технологічні методи створення фоточутливих в діапазоні довжин хвиль 4 ± 12 мкм р-п-переходів у власнодефектних монокристалічних зразках і епітаксійних шарах CdHgTe, а також одного або декількох фоточутливих р-п-переходів в об'ємі однієї і тієї ж епітаксійної варіаційної структури CdHgTe за допомогою лазерного випромінювання та досліджено їх властивості. Розроблена оригінальна конструкція і виготовлені фотодіоди на основі епітаксійних варіаційних структур CdHgTe.

10. Встановлено кореляції характеристик р-п-переходів з електрофізичними параметрами вихідного матеріалу та виявлено і пояснено вплив неоднорідностей вихідного матеріалу на вольтамперні характеристики і спектральний розподіл фоточутливості р-п-переходів.

11. Порівняння параметрів фотодіодів на основі CdHgTe, отриманими різними способами, вказує, що покращені параметри і характеристики властиві для фотодіодів, одержаних за допомогою лазерного випромінювання. Мінімальна порогова чутливість фотодіодів в гетеродинамному режимі з граничною частотою до 500 МГц становить величину порядку $6 \cdot 10^{-20} + 2 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц при оптимальному значенні потужності випромінювання гетеродина $0,15 \pm 0,9$ мВт.

Основні публікації за матеріалами дисертаційної роботи

1. Дружинин А.А., Матвиив М.В. Влияние некоторых физических параметров твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ на свойства р-п-переходов // Физическая электроника. Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Львов - 1975. - Вып. 10. - С.23-27.
2. Вовина Л.А., Брандт Н.В., Дружинин А.А. и др. Электрические свойства неоднородных р-п- переходов в $Cd_xHg_{1-x}Te$ при высоком гидростатическом давлении // Укр. физ. журнал. - 1977. - т.22 - №7. - С.1210-1213.
3. Луцив Р.В., Савицкий В.Г., Плячко Г.В., Дружинин А.А. и др. Воздействие импульсного лазерного излучения на $p-Cd_xHg_{1-x}Te$ // Физ. и техн. полупроводн. - 1978. - т.12. - В.3. - С.427-430.
4. Плячко В.Г., Савицкий В.Г., Луцив Р.В., Дружинин А.А. и др. Инверсия типа проводимости в сплавах $p-Cd_xHg_{1-x}Te$ под воздействием импульсного лазерного излучения // Докл. АН УССР. Сер.А. Физ.-мат. и техн. науки. - 1978. - №7. - С.645-647.
5. А.с. N 577850 СССР, МКИ Н01L 21/04, 1977. Способ изготовления р-п-переходов в собственноефектных полупроводниковых материалах / Дружинин А.А., Кияк С.Г., Котлярчук В.К. и др. - 6с.
6. А.с. N 613664 СССР, МКИ Н01L 21/266, 1976. Способ изготовления полупроводниковых структур / Савицкий В.Г., Луцив Р.В., Дружинин А.А. и др. - 7с.
7. А.с. N 736769 СССР, МКИ Н01L 31/18, 1979. Способ изготовления планарных р-п-переходов в теллуридах кадмия и ртути / Луцив Р.В., Матвиив М.В., Дружинин А.А. и др. - 7с.
8. Дружинин А.А., Васюк Н.Н., Осередько С.А. Формирование областей с повышенной концентрацией акцепторов в $CdHgTe$ с помощью лазерного излучения // В сб.: Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы. - Львов. - 1980. - ч.1. - С.135-137.
9. Васюк Н.Н., Дружинин А.А., Ильчук Г.А. и др. Исследование коэффициента Холла и электропроводности тонких слоев $CdHgTe$, подвергнутых лазерному облучению // Укр. физ. журнал. - 1983. - т.28. - №8. - С.1218-1220.
10. Дружинин А.А., Васюк Н.Н. Фотопроводимость тонких слоев $CdHgTe$ после обработки импульсами лазера // В сб.: Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы. - Львов.

1983. - С. 72-73.

11. Дружинин А.А. Полупроводниковые диоды и транзисторы. - Львов, ЛПИ. - 1984. - 61 с.

12. А.с. N 1248479 СССР, МКИ H01L 21/04, 1986. Способ изготовления p-n-переходов в структурах $CdTe-Cd_xHg_{1-x}Te$ / Вуджак Я.С., Дружинин А.А., Басюк Н.Н., Луцив Р.В. - 4с.

13. Дружинин А.А., Ермаков А.В., Когут И.Т. и др. Рекристаллизация поликремния на изолирующих подложках с помощью лазерного излучения // Физическая электроника. Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Львов. - 1988. - Вып. 36. - С.77-82.

14. Дружинин А.А., Кеньо Г.В., Костур В.Г. Поведение поликремниевых p^+-p^+ -структур при воздействии лазерного излучения // Электронная промышленность: - 1988. - N 57. - С.21-22.

15. Блыанюк А.В., Воронин Б.А., Дружинин А.А., Костур В.Г. Контроль мощности лазерного излучения при формировании структур типа "кремний-на-диэлектрике" // В сб. Прикладная физическая оптика.: Науч. труды Моск. энерг. ин-та, N 164. - М. - 1988. - С.45-49.

16. Басюк Н.Н., Дружинин А.А., Костур В.Г., Луцив Р.В. Необратимые изменения в $CdHgTe$, инициируемые лазерным облучением // Физическая электроника. Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Львов. - 1989. - Вып.37. - С.69-72.

17. Дружинин А.А., Костур В.Г., Лыба О.М. Применение лазерного излучения для рекристаллизации поликремниевых слоев на диэлектрических подложках // В сб.: Применение лазеров в промышленности. - Л., ЛДНТП. - 1989. - С.11-15.

18. Костур В.Г., Лыба О.М., Дружинин А.А. Применение лазерного излучения для рекристаллизации поликремниевых слоев, используемых в микроэлектронике // В сб.: Лазеры в народном хозяйстве. - М., МДНТП. - 1989. - С.63-68.

19. А.с. N 1493010 СССР, МКИ H01L 21/266, 1989. Способ изготовления самосовмещенных МСП структур типа кремний на изоляторе / Воронин Б.А., Дружинин А.А., Когут И.Т. и др. - 4с.

20. Дружинин А.А., Литвин И.С., Костур В.Г. Точечные структуры на основе слоев поликремния, рекристаллизованных лазерным излучением // Физическая электроника. Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Львов - 1990. - Вып. 40. - С.119-122.

21. Дружинин А.А., Костур В.Г., Бидный Д.И., Когут И.Т.

Структуры кремний-на-диэлектрике: лазерная рекристаллизация поликремния, свойства границ раздела // VII Междунар. конф. по микроэлектронике, "Microelectronics'90": Матер. конф. - Минск. - 1990. - ч.2. - С.186.

22. Voronin V.A., Druzhinin A.A., Maryamova I.I. et al. Recrystallized Polysilicon as a Material for mechanical values sensors // 13 th International annual school with posters on microelectronic sensors and semiconductor layers. Sozopol, Bulgaria, 14-18 May 1990, p.93-100.

23. Дружинин А.А., Кеньо Г.В., Когут И.Т., Костур В.Г. Физическая модель КНИ МШП-транзистора для неравновесного состояния // Электронная техника, сер. 3. Микроэлектроника. - 1990. - Вып.5 (139). - С.89-91.

24. Федорчук Е.Н., Дружинин А.А. Оптимизация параметров интегрального триггера на МШП-транзисторах // Физическая электроника. - 1990. - Вып. 41. - С.94-97.

25. Дружинин А.А., Кеньо Г.В., Когут И.Т. Тестовые структуры для контроля параметров слоя поликремния на диэлектрике // Электронная промышленность. - 1991. - N 1. - С.65 -68.

26. Voronin V.A., Druzhinin A.A., Kostur V.G., Lyba O.M. Laser-induced Epitaxial Growth of Silicon Layers on Insulating Substrates // Proc. 1.st Int. Conf. Epitaxial Crystal Growth, Budapest, Hungary, Apr. 1-7, 1990, Crystal Prop. Prep., vol. 32-34 (1991), p.88-88.

27. Druzhinin A.A., Kenio G.V., Kogut I.T., Kostur V.G. Microelectronic structures in laser-induced epitaxial silicon layers on insulator // Proc. 1st Int. Conf. Epitaxial Crystal Growth, Budapest, Hungary, Apr. 1-7, 1990, Crystal Prop. Prep. vol. 32-34 (1991), p.89-92.

28. Voronin V.A., Druzhinin A.A., Maryamova I.I. et al. Laser-recrystallized polysilicon layers in sensors // Workshop on Microelectronic Sensors "EAST-WEST", Abst. May 7-9, 1991, Sozopol, Bulgaria, p.64.

29. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Костур В.Г. Сенсоры с тензорезисторами на основе поликремниевых слоев с лазерной рекристаллизацией // В сб.: Актуальные проблемы электронного приборостроения. Сенсорная электроника. - Новосибирск. - 1991. - С.44-50.

30. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Костур В.Г. и др. Пье-

зореєзистивні сенсори на основі структур " кремній-на-ізолятор" // Метрологія. - 1991. - № 5. - С.20-25.

31. Druzhinin A.A., Kostur V.G., Lyba O.M. and Pankevich I.M. Structure changes and crystallization process peculiarities of polysilicon layers under laser irradiation effect // Proc. 3rd. European Conf. on Crystal Growth, Budapest, Hungary, Maj 5-11, 1991. Crystal Prop. Prep. vol. 36-38 (1991) pp. 388-393.

32. Дружинин А.А., Когут И.Т., Костур В.Г. и др. Структурные изменения в капсулированных слоях поликремния под действием сканирующего лазерного излучения // Физика и химия обработки материалов. - 1992. - № 3. - С.38-43.

33. Дружинин А.А., Марьямова И.Я., Когут И.Т., Панков Ю.М. Сенсоры механических величин нового поколения на основе рекристаллизованных лазером слоев поли-Si // В сб.: Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-92, т.4. Сенсорная электроника. - Новосибирск. - 1992. - С. 67-74.

34. Voronin V.A., Druzhinin A.A., Maryamova I.I. et al Laser recrystallized polysilicon layers in sensors // Sensors and Actuators, 1992, Vol.30, N 1-2, pp.143-147.

35. Дружинин А.О., Мар'ямова І.Я., Костур В.Г. та ін. Дослідження тензореєзистивних властивостей рекристалізованих полікремнієвих шарів // Фізична електроніка. Респ. міжвід. наук. техн. зб. - Львів - Вип.42. - 1992. - С.83-88.

36. А.с. N 1783937 СССР, МКИ H01L 27/12, 1992. КНД МШП-транзистор // Дружинин А.А., Кеньо Г.В., Когут И.Т. и др. - 4 с.

37. Дружинин А.О. Структури кремній-на-ізоляторі і елементи електронної техніки на їх основі // IV Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок. - Ч.П. - Івано-Франківськ. - 1993. - С.354.

38. Druzhinin A.A., Maryamova I.I., Lavitska E.N., Pankov Y.M. The new generation of microelectronic silicon-on-insulator // Proc. of Int. Conf. "Physics in Ukraine", Kiev, 22-27 June, 1993, Radiophysics and Electronics, 1993, p. 85-88.

39. Дружинин А.О. Структурні перетворення при дії лазерного випромінювання у власнодефектних напівпровідниках CdHgTe // Перша Міжнар. конф. "Конструкційні та функціональні матеріали" КІМ'93. - Львів. - 1993. - с.201-202.

РЕЗЮМЕ

В работе установлены закономерности структурных превращений в химически стойких элементарных полупроводниках типа поликремния и изучены процессы лазерной микрзонной рекристаллизации поликремниевых слоев на диэлектрических подложках, а также выявлены особенности изменений структурных и электрофизических свойств сложных собственноефектных полупроводников типа CdHgTe, в которых под тепловым воздействием лазерного излучения происходят превращения электрически активных точечных дефектов структуры.

Разработаны физические и технологические основы изготовления микроэлектронных сенсоров на основе рекристаллизованных структур "кремний-на-диэлектрике" и предложены новые конструктивно-технологические способы повышения качества КНД МОН-транзисторов и улучшения их параметров, а также новые технологические способы создания фоточувствительных р-п-переходов в собственноефектных полупроводниках CdHgTe с помощью лазерного излучения и изготовлены на их основе фотодиоды для регистрации слабого ИК-излучения.

SUMMARY

In the work the mechanisms of structural transformations in chemically resistant elementary semiconductors, in particular in polysilicon, have been revealed. The processes of the laser micro-zone recrystallization of polysilicon layers on insulating substrates have been studied. The key features of the structural and electrical properties change have been revealed in complex native-defect semiconductors such as CdHgTe where the transformations of electrically active point defects of structure occur under the thermal influence of laser irradiation.

The physical and technological basis has been developed to produce the microelectronic sensors with recrystallized "silicon-on-insulator" structures and the new constructive-technological methods have been proposed to increase the quality of SOI MOS transistors and to improve their parameters. The new technological methods have been developed to create the photosensitive p-n junctions in native-defect CdHgTe by laser irradiation; the photodiodes have been manufactured on their basis for the weak IR irradiation registration.

Підписано до друку 19.10.93. Формат 60×84/16. Друк. офсет. Папір д/мас.
вид. Умов. др. арк. 1,86. Умов. фарб.-відб. 2,1. Обл.-вид. арк. 1,6. Тираж
100 прим. Зам. 2784.

Обласна книжкова друкарня, Львів, вул. Стефаника, 11.

464500

AB 28.457

AB 28.457