

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису

НАЗАРОВ Олексій Миколайович

ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ ТОНКИХ
ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ПРИПОВЕРХНЕВИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ШАРІВ
У КРЕМНІЄВИХ СТРУКТУРАХ
ПРИ НЕРІВНОВАЖНИХ ВПЛИВАХ

(01.04.10 — фізика напівпровідників та діелектриків)

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ — 1993

Роботу виконано в Інституті фізики напівпровідників
АН України

Офіційні опоненти: член-кореспондент АН України
доктор фізико-математичних наук,
професор **Литовченко В. Г.**
доктор фізико-математичних наук,
професор **Жарких Ю. С.**
доктор фізико-математичних наук
Дякін В. В.

Провідна установа: Інститут фізики АН України

Захист відбудеться 24 вересня 1993 р. о 14 годині на за-
сіданні спеціалізованої наукової ради Д 016.25.01. при Інсти-
туті фізики напівпровідників АН України за адресою:

252650, Київ-28, проспект Науки, 45

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці
Інституту фізики напівпровідників АН України

Автореферат розіслано « 11 » листопада 1993 р.

Вчений секретар ради
доктор фіз.-мат. наук

С. С. Іщенко

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00802211 (E)

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

AB-20.051

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми Сучасна технологія виготовлення великих інтегральних схем (ІС) в основному базується на багат шарових кремнієвих структурах типу метал-діелектрик-напівпровідник (МДН). Створення на цій основі нових типів приладів та схем (таких, як V-MOSN транзистори, схеми пам'яті з УФ чи електричним стиранням) та перехід до субмікронної технології постійно збільшує вимоги до електрофізичних властивостей тонких приповерхневих шарів напівпровідника, а також стабільності діелектричного покриття. Разом з цим мініятуризація приладів та ІС призводить до потреби розробки нових технологій, які дозволять більш гнучко керувати процесами формування тонких активних напівпровідникових шарів та діелектричних плівок. Одним з таких широко використовуваних у даний час засобів є іонне легування, яке в поєднанні з нерівноважними методами відпалу матеріалів (фотонним, електронним, плазмовим), дає можливість формувати тонкі напівпровідникові та діелектричні шари з унікальними можливостями.

У багатьох випадках при нерівноважних відпалах значну роль у перетворенні фізичних властивостей відіграють процеси радіаційної стимуляції та гідрогенізації. Введення водню в матеріал під час гідрогенізації призводить до зміни його фундаментальних фізичних властивостей: ширини забороненої зони і положення глибоких рівнів дефектів у забороненій зоні напівпровідників; процесів утворення і відпалу дефектів в матеріалі; термостійкості та радіаційної стабільності матеріалу. Розвиток фізики взаємодії водню з дефектами та домішками у напівпровідниках та діелектриках дав змогу зрозуміти на мікрорівні причини змінення фізичних властивостей матеріалів і у наш час призвів до створення нового напрямку в фізиці аморфних та кристалічних тіл, а також у технології створення нових матеріалів та приладів.

Важливу роль у процесах гідрогенізації матеріалів відіграло застосування та розвиток плазмо-хімічних процесів, які в даний час використовуються у напівпровідниковій технології на усіх етапах виготовлення приладів. Вивчення та розробка фізичних основ взаємодії плазми з аморфними та кристалічними речовинами дали змогу розвинути важливі нові технологічні напрямки - плазмово-

водневу модифікацію матеріалів, яка сумісна з методами плазмохімічної технології та дає змогу при низьких температурах впорядковувати структуру аморфних та кристалічних матеріалів, активувати імплантовані легуючі домішки в напівпровіднику, відпалювати заряди в діелектрику та на межі поділу метал-діелектрик та метал-напівпровідник.

Згадані нерівноважні впливи одночасно змінюють електрофізичні властивості усіх компонентів багат шарової структури ДН: приповерхневої області напівпровідника; межі поділу та перехідного шару діелектрик-напівпровідник; тонкого шару діелектрику. В зв'язку з цим виникає необхідність розвитку неруйнуючих методів контролю, які селективно-чутливі до різних шарів цих структур.

На час початку роботи існували лише окремі спроби вивчити фізичні процеси, які йдуть при нерівноважних відпалах у багат шарових системах ДН, що широко використовуються у мікроелектроніці; процеси взаємодії водню з матеріалами у багатьох випадках були нез'ясовані і знаходились на рівні початкових досліджень; електрофізичні методи дослідження багат шарових структур у багатьох випадках давали незрозумілі результати і не дозволяли з єдиної методологічної позиції аналізувати усі головні області таких систем і враховувати взаємний вплив електронних та іонних процесів, які йдуть у цих областях.

Метою роботи є комплексне дослідження природи фізичних процесів, які відбуваються під час модифікації тонких приповерхневих кремнієвих та діелектричних шарів за допомогою іонної імплантації та плазмово-водневої обробки, а також при керуванні властивостями кремнієвих структур діелектрик-напівпровідник за допомогою різних нерівноважних відпалів.

У зв'язку з цим головними науковими завданнями праці були :

1. Розробка і розвиток комплексу методів дослідження, побудованих на принципі термоактиваційної релаксації заряду, які дозволяють з однієї методологічної позиції аналізувати головні властивості багат шарових структур: енергетичні спектри поверхневих електронних станів і глибоких рівнів в області просторового заряду напівпровідника; наявність і параметри приповерхневих потенціальних бар'єрів; процеси переносу та накопичення заряду в діелектрику.

2. Вивчення особливостей утворення та відпалу дефектів іонної імплантації в тонких приповерхневих шарах кремнію в структурах $\text{SiO}_2\text{-Si}$.

3. Виявлення та вивчення природи нетермічних процесів, які проявляються при впливі нерівноважних відпалів на багатшарові структури діелектрик-напівпровідник.

4. За допомогою комплексу методів вивчення низькотемпературних процесів структурних та фазових перетворень, які йдуть у сильно порушених і аморфних кремнієвих шарах при плазмових відпалах.

5. Розробка нових фізичних уявлень і моделей процесів відпалу дефектів у кремнію та двоокису кремнію при плазмово-водневих обробках, які несуперечно пояснюють всю сукупність результатів, що спостерігаються, і прогнозують нові явища.

НАУКОВА НОВИЗНА роботи полягає у наступному:

1. Вперше була з'ясована природа прискореного відпалу радіаційних дефектів і прискореної активації імплантованих легуючих домішок у приповерхневому шарі кремнію при ВЧ плазмовій обробці структур $\text{SiO}_2\text{-Si}$. Показана визначальна роль водню у цих процесах і запропонована нова фізична модель, яка зв'язала процеси відпалу вакансійних дефектів та прискореного впровадження легуючої домішки у вузли кристалічної ґратки напівпровідника, а також пояснила ряд важливих для фізики напівпровідників ефектів.

2. Вперше були виявлені і з'ясовані: пряма кореляція концентрації електрично активних розірваних зв'язків у кремнії з зменшенням середньостатистичного розкиду кутів зв'язку кремнієвого тетраедру та внутрішньої потенціальної енергії в аморфній фазі кремнію при ВЧ плазмовій обробці. Застосування нового підходу до ВЧ плазмового впливу, як до методу введення атомарного водню з одночасною радіаційно-термічною обробкою, який призводить до релаксації напружених зв'язків у матеріалі, дозволило запропонувати і розвинути нові методи утворення термо- та радіаційностійких багатшарових структур.

3. Встановлені закономірності термічного, фотонного і плазмового відпалу різних дефектів у кремнії, на межі поділу $\text{SiO}_2\text{-Si}$ та у двоокису кремнію, що надало можливість вперше запропонувати і дослідити нові комбіновані обробки багатшарових структур, які поєднують термічний, фотонний із наступним ВЧ плазмовим відпалом і

більш ефективно зменшують позитивний заряд у діелектрику, концентрацію поверхневих електронних станів на межі поділу SiO_2 -Si, глибоких рівнів в області просторового заряду (ОПЗ) кремнію, а також більш ефективно активують імплантовану легуючу домішку у напівпровіднику, ніж кожна обробка зокрема.

4. Встановлено, що імплантація іонами середніх мас різної хімічної природи дає однаковий енергетичний спектр глибоких рівнів у кремнії по близу межі поділу SiO_2 -Si. Вперше вивчені і з'ясовані процеси генезису емісійних параметрів глибоких рівнів при накопиченні аморфних включень у приповерхневій області кремнію при іонній імплантації.

5. Вперше отримані і з'ясовані сильні термічні та частотні залежності смності і провідності імплантованих МДН-структур. Збудована феноменологічна теорія цих процесів, що враховує наявність в таких системах приповерхневого потенціального бар'єру і його шунтування дифузійно-дрейфовим електричним струмом. Виявлення ефекту дав змогу запропонувати новий принцип діагностування приповерхневих шарів напівпровідника МДН-структур і новий принцип створення сенсорів температури.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ РОБОТИ

Дисертаційна робота перш за все має практичну цінність в області розвитку прикладних питань фізики напівпровідників та напівпровідникових приладів, яка містить в собі наступне:

1. Розвинуті фізичні основи нового технологічного напрямку - плазмово-водневої модифікації матеріалів.

2. Розвинута феноменологічна теорія смності та провідності широко використовуваних на практиці структур метал-діелектрик-напівпровідник з приповерхневими потенціальними бар'єрами, що створюються як легуючою домішкою, так і дефектами.

3. Розширена і розвинута теорія процесів термоактиваційного збудження заряду з глибоких рівнів у приповерхневому шарі напівпровідника та поверхневих електронних станів на межі поділу діелектрик-напівпровідник в МДН-структурах, які широко застосовуються для практичних цілей.

Значну цінність результати праці мають для практичного застосування в технології, яка полягає:

1. В розробці і оптимізації нового низькотемпературного проце-

су відпалу багатшарових структур за допомогою ВЧ плазмової обробки.

2. В розробці і оптимізації нових низькотемпературних і висококофективних процесів відпалу багатшарових структур за допомогою комплексних обробок, що поєднують термічний, фотонний із слідуєчим за ними ВЧ плазмовим відпалом.

3. В розробці і оптимізації нових котроточасних технологічних процесів відпалу іоннолегованих систем $\text{SiO}_2\text{-Si}$, таких як фотонний і електронний відпали.

В області розвитку методів діагностики електрофізичних параметрів напівпровідникових приладів практична цінність роботи полягає:

1. В розробці і створенні комплексу неруйнуючих методів контролю електрофізичних параметрів багатшарових МДН-структур, заснованих на процесах термоактиваційної релаксації заряду і дозволяючих аналізувати всі головні області таких об'єктів (приповерхневий шар напівпровідника, межу поділу діелектрик-напівпровідник і шар діелектрику).

2. В розробці нових методів визначення параметрів МДН-структур з приповерхневими р-п переходами і нових конструкцій смістових сенсорів температури, які мають змінні діапазони вимірювання.

НА ЗАХИСТ ВИСУВАЮТЬСЯ

1. Результати комплексних досліджень природи нетермічних процесів, які мають місце при ВЧ плазмовій обробці імплантованих різними іонами структур $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$ і свідчать про вплив водню на зниження температури відпалу вакансійних дефектів у приповерхневій області напівпровідника і температури активації імплантованої легуючої домішки у цей шар.

2. Фізична модель відпалу вакансійних дефектів і активації легуючої домішки у приповерхневому шарі кремнію за участю атомарного водню, яка полягає в захопленні атомарного водню обірваними зв'язками вакансійного дефекту, що сприяє значній релаксації кристалічної ґратки в області дефекту та зниженню величини потенціального бар'єру у разі взаємодії дефекта та міжвузловинного атому кремнію чи легуючої домішки. Після впровадження міжвузловинного атому у вузол кристалічної ґратки водень залишає місце, де йшов процес.

3. Механізми та закономірності відпалу позитивного заряду у

SiO_2 та поверхневих електронних станів на межі поділу SiO_2 -Si під час ВЧ плазмової обробки, які полягають у впорядкуванні структури аморфної сітки двоокису кремнію чи перехідного шару діелектрика на межі поділу SiO_2 -Si за участю водня, як каталізатора процесу упорядкування.

4. Ефект повної механічної релаксації аморфної фази кремнію при плазмовому впливі, що вперше спостерігався, та взаємозв'язок цього ефекту з нейтралізацією розірваних кремнієвих зв'язків, що проходить в цей час. Цей ефект є прямим доказом впорядкування матеріалу при ВЧ відпалі дефектів і дає змогу прогнозувати шлях утворення аморфних матеріалів з підвищеною термостабільністю.

5. Результати досліджень і закономірності формування енергетичного спектру глибоких рівнів, що спостерігаються під час іонної імплантації у приповерхневі шари кремнію структур SiO_2 -Si свідчать: 1) про утворення однакового спектру глибоких рівнів у забороненій зоні напівпровідника під час імплантації структур малими дозами іонів різних хімічних домішок; 2) про поліпшення ефективності утворення глибоких рівнів без зміни їх енергетичних параметрів під час імплантації іонів на межу поділу SiO_2 -Si; 3) про збільшення перерізу захоплення глибоких рівнів і порядку кінетики емісії з них носіїв заряду при утворенні у приповерхневому шарі кремнію аморфних кластерів, які перекриваються при збільшених дозах імплантації, що можна пояснити значним збільшенням локальної концентрації дефектів і перекриттям їх потенціальних ям при гетеруванні дефектів на периферії аморфних кластерних включень.

6. Запропонована і розроблена феноменологічна теорія адмітансу МДН-структур, яка вперше враховує присутність у напівпровіднику приповерхневих потенціальних бар'єрів, які шунтуються дифузійно-дрейфовими струмами. Теорія є спільною для різних багатшарових систем з діелектричними шарами і дає змогу пояснити їх температурні та частотні залежності, виділити вплив дефектів і легуючих домішок на приповерхневі потенціальні бар'єри і зв'язати їх головні параметри.

7. Розроблені комплексні методи термоактиваційного аналізу МДН-структур, що використовують одночасні температурні і часові зміни властивостей системи при заданому характері зміни температури, які дозволяють з єдиної методологічної позиції аналізувати

складні процеси перебудови дефектів в тонких приповерхневих шарах напівпровідників, енергетичні спектри поверхневих електронних станів на межі поділу діелектрик-напівпровідник і процеси перенесення заряду в діелектричних шарах.

В результаті роботи автора був розроблений новий актуальний напрямок у фізиці напівпровідників та діелектриків - фізика плазмово-водневої модифікації матеріалів і приладів і зроблено значний внесок у розвиток фізичних основ формування під час нерівноважних впливів тонких напівпровідникових та діелектричних шарів з новими фізичними властивостями.

ПУБЛІКАЦІЇ Головні матеріали праці відображені у 46 наукових роботах автора, надрукованих у центральних вітчизняних і міжнародних виданнях, у тому числі 3 авторських свідотствах і узагальнені у кількох оглядах. Перелік основних робіт подано у кінці автореферату.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ Основні результати роботи доповідались і обговорювались на:

1. Всесоюзному симпозіумі з фізики систем напівпровідників двоокису кремнію (м.Рига, 1974р.).

2. Об'єднанія виїздня наукові сесії наукових рад по проблемам ФІТ і ФІТ АН СРСР (м.Севастополь, 1976р.).

3. 6-9 Всесоюзних нарадах (симпозіумах) по електронним процесам на поверхні і в тонких шарах напівпровідників (1977, 1984рр., м.Київ; 1980, 1988рр., м.Новосибірск).

4. 3-4 Всесоюзних нарадах "Дефекти структури в напівпровідниках" (1978, 1984рр., м.Новосибірск).

5. Республіканських семінарах "Фізичні принципи МОН інтегральної електроніки" (м.Київ, 1978р.; м.Севастополь, 1980р.).

6. Всесоюзних нарадах-семінарах "Математичне моделювання і експериментальні дослідження електричної релаксації в елементах інтегральних схем" (м.Гурауф, 1981, 1982р.; м.Одеса, 1985р.).

7. 4, 5, 9 Всесоюзних конференціях по взаємодії частинок з твердим тілом (м.Харків, 1976р.; м.Мінськ, 1978р.; м.Москва, 1989р.).

8. Всесоюзні конференції "Фізичні методи дослідження поверхні і діагностика матеріалів та елементів обчислюваної техніки" (м.Київ, 1986р.).

9. Всесоюзні конференції "Фізичні і фізико-хімічні основи мікроелектроніки" (м.Вільнюс, 1987р.).

10. Всесоюзному семінарі "Аморфні напівпровідники і діелектрики на основі кремнію в електроніці" (м.Одеса, 1989р.).

11. Міжнародних робочих нарадах по іонній імплантації в напівпровідники та інші матеріали (м.Прага, ЧСР, 1981р.; м.Вільнюс, 1983р.; м.Балатонліга, УНР, 1985р.; м.Еленіте, НРБ, 1990р.).

12. 26 та 29 міжнародних колоквиумах (м.Ельменау, НДР, 1981, 1984рр.).

13. Міжнародних конференціях "Energy pulse and particle beam modification of materials" (м.Дрезден, НДР, 1987, 1989рр.).

14. 7 Міжнародні конференції по мікроелектроніці "MICROELECTRONICS' 90" (м.Мінськ, 1990р.).

15. Міжнародних конференціях "Insulating films on semiconductors" (м.Мюнхен, ФРН, 1989р.; м.Ліверпуль, Англія, 1991р.).

СТРУКТУРА ТА ОБ'ЄМ ДИСЕРТАЦІЇ Дисертація складається із вступу, шести глав і заключення. Вона викладена на 360 сторінках друкованого тексту, включаючи 124 малюнки, 14 таблиць та бібліографію із 319 згадувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність вибраної теми, формулюється мета і задачі досліджень, положення, висунуті на захист, її новизна і практична цінність.

Перша глава дисертації присвячена розробці методів термоактиваційної спектроскопії глибоких рівнів з метою їх застосування до МДН-структур, які широко використовувались під час усієї роботи. У главі аналізуються різні методи визначення параметрів глибоких рівнів в ОПЗ напівпровідника і поверхневих електронних станів (ПЕС) на межі поділу діелектрик-напівпровідник. Пропонуються оптимальні методи, які дають можливість, не зважаючи на порядок кінетики емісії заряду, визначати енергетичну глибину залягання пастки та концентрацію глибоких рівнів.

Описані оригінальні комплексні методи, які об'єднують термоактиваційний аналіз і нерівноважні низькочастотні або квазістатичні вольт-фарадні характеристики, виміряні при різних температурах, і дають змогу поділити усі види енергетичного і просторового роз-

поділу рівнів в приповерхневому шарі напівпровідника і на межі поділу діелектрик-напівпровідник в МДН-структурі. Запропоновані нові засоби визначення розподілу глибоких рівнів у приповерхневому шарі напівпровідника, придатні для профілювання поодиноких та близько розташованих по енергії рівнів для випадку різких змін їх концентрації. Розглянуті методи обробки квазінеперервних спектрів ПЕС, коли вимірювання МДН-структур проводяться за допомогою метода термоактиваційного звільнення заряду (ТЗЗ) та запропонований метод фракційного польового розчищення спектру, який дає можливість відділити енергетичний розподіл концентрації поверхневих станів від енергетичної залежності їх перерізу захоплення.

В главі аналізується вплив зміни ємності ОПЗ напівпровідника і напруженості електричного поля в ОПЗ напівпровідника на головні параметри глибоких рівнів, розміщених на межі поділу ДН, які визначаються методом ТЗЗ. Показано, що при легуванні напівпровідникової підкладки, яке широко використовується в мікроелектроніці, найбільший вплив ємність ОПЗ виявляє до величини концентрації глибоких рівнів, яка визначається з амплітуди сигналу ТЗЗ. Пропонуються методи врахування помилок, які в подальшому постійно використовуються в роботі. Крім того в главі вивчається вплив ефектів сильного електричного поля на форму та положення піків струму ТЗЗ. Порівняння експериментальних даних і теорії, дало змогу виявити закон впливу сильного електричного поля на енергію активації глибоких рівнів та їх перерізу захоплення, при їх появі у випадку імплантації іонів As^+ на межу поділу ДН. Розділ демонструє широкі можливості методів термоактиваційної спектроскопії глибоких рівнів у МДН-структурах, що піддавались різним впливам і різним технологічним обробкам.

Глава друга присвячена результатам досліджень впливу іонної імплантації тонких приповерхневих шарів кремнію на електрофізичні властивості структур $Al-SiO_2-Si$ та керування їх температурними та частотними залежностями, а також розробці методів визначення параметрів таких приповерхневих напівпровідникових шарів.

Вперше проведено детальний аналіз зміни форми вольт-фарадних характеристик (ВФХ) МДН-структур, одного з самих поширених методів діагностики багатшарових систем, в залежності від параметрів приповерхневого потенціального бар'єру. Цей бар'єр виникає при ім-

півпівпроводячій ДН-структурі іонами, які легують приповерхневий шар напівпроводяча протилежним типом порівняно з напівпровідниковою підкладкою. За допомогою експериментальних досліджень і розробленої феноменологічної теорії ємності МДН-структури з приповерхневим потенціальним бар'єром було показано, що форма ВФХ в залежності від параметрів приповерхневого імплантованого шару може мати наступний вигляд:

1. Форма ВФХ не змінюється, якщо напруженою на металевому електроді можна повністю змістити приповерхневий бар'єр (чи р-п перехід) у прямому напрямку, до початку реалізації на поверхні умови сильної інверсії по відношенню до основних носіїв приповерхневого шару;

2. Значення максимальної ємності ВФХ знижується порівняно із геометричною ємністю діелектрика, якщо приповерхневий потенціальний бар'єр (р-п перехід) не можна повністю змістити у прямому напрямку, але можна зовнішнім електричним полем знизити його величину;

3. ВФХ слабо модулюється напруженою електричного поля або вона приймає форму, характерну для протилежного типу легування порівняно з напівпровідниковою підкладкою, якщо приповерхневий р-п перехід не можна знизити зовнішнім електричним полем.

Вперше показано, що структури з приповерхневим потенціальним бар'єром виявляють сильну температурну залежність. Теоретичне та експериментальне вивчення фізичних процесів, які відповідають даному явищу, показали, що у випадку знижених потенціальних бар'єрів температурна та частотна залежність ємності або провідності МДН-структури пов'язані з шунтуванням потенціального бар'єру дифузійно-дрейфовим струмом; причому провідність шунтуючого струму експоненційно зв'язана з величиною приповерхневого потенціального бар'єру.

На основі вивченого ефекту та розробленої теорії були запропоновані нові методи діагностики наявності у МДН-структурах приповерхневого потенціального бар'єру у напівпровіднику і визначення його величини, товщини легуваного приповерхневого шару, його ефективної концентрації, а також запропоновані конструкції ємносних сенсорів температури. Детальні дослідження частотних та температурних залежностей ВФХ МДН-структур, які мають приповерхневі р-п

переходи значної товщини ($d > x_{dmax} + 1$, де x_{dmax} - рівноважна глибина шару збіднення p-n переходу, яка поширюється у приповерхневий шар), дали можливість розробити простий метод профілювання легуючих домішок у приповерхневому імплантованому шарі.

Вперше проведені дослідження і теоретичні розрахунки впливу радіаційних дефектів у приповерхневому шарі напівпровідника на форму, температурну та частотну залежність ВФХ МДН-структур. Показано, що глибокі пастки акцепторної природи або мілкі акцепторні легуючі домішки збільшують в окремих випадках крутість ВФХ. При значних концентраціях дефектів, що компенсують головні легуючі домішки у приповерхневому напівпровідниковому шарі МДН-структури, виникає сильна температурна залежність величини максимальної ємності структури, яка має чітко виражену частотну дисперсію. Така частотна дисперсія не виникає у випадку утворення приповерхневого p-n переходу.

У третій главі представлені дослідження процесів накопичення та відпалу дефектів іонної імплантації в тонких приповерхневих шарах окисненого кремнію, проведені за допомогою методів термоактиваційного звільнення заряду, температурних залежностей ємності та провідності МДН-структур та в окремих випадках доповнених методами ЕПР та дифракції швидких електронів на відбиття.

Проведені експериментальні дослідження впливу: межі поділу SiO_2 -Si на утворення і параметри глибоких рівнів у приповерхневому шарі кремнію; типу та маси імплантованих іонів на спектр глибоких рівнів в ОПЗ напівпровідника. Вперше показано, що незалежно від типу іонів для іонів середніх мас у приповерхневому шарі напівпровідника при іонній імплантації утворюється однаковий спектр глибоких рівнів, що може бути пояснено виникненням структурних дефектів у кремнії, в склад яких входять домішки, що спочатку існують у напівпровіднику.

Близкість межі поділу SiO_2 -Si призводить до полегшення утворення глибоких рівнів без зміни їх енергетичних характеристик. Проведене детальне вивчення відпалу глибоких рівнів, локалізованих поблизу межі поділу, визначена їх енергетична глибина залягання, а також аналіз літературних даних дали можливість передбачити природу ряду дефектів, що утворюються в нашому випадку при іонній імплантації. Передбачається, що ряд дефектів пов'язані з різними ва

кансійними дефектами в кремнії та їх комплексами.

Вперше були проведені комплексні дослідження впливу гетерогенної аморфізації приповерхневого шару кремнію в МДН-структурах на процеси емісії заряду з глибоких рівнів, локалізованих в цій області. Використовуючи переваги методу термоактиваційного звільнення заряду при застосуванні його до сильно порушених шарів напівпровідника МДН-структур було показано, що у випадку утворення аморфних кластерів значних розмірів, що перекриваються, збільшується переріз захоплення глибоких рівнів більш ніж на 2 порядки, збільшується концентрація більш мілких рівнів і змінюється кінетика емісії з них носіїв заряду. Цей ефект пояснюється гетеруванням вторинних дефектів іонної імплантації крупними аморфними включеннями та значним зростанням їх локальної концентрації.

Застосування метода температурної залежності провідності до МДН-структур з сильно порушеними приповерхневими шарами дало можливість за допомогою неруйнуючого методу провести оцінку ступеня аморфізації приповерхневого шару, яка виникає при імплантації кремнія іонами фосфора.

Четверта глава присвячена вивченню фізичних процесів, що протікають в широко використовуваних в мікроелектроніці структурах $\text{SiO}_2\text{-Si}$, $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$ та $\text{Al-поліSi-SiO}_2\text{-Si}$ при їх обробці в ВЧ плазмовому розряді, а також процесам модифікації властивостей діелектрика та межі поділу діелектрик-напівпровідник і метал-напівпровідник таких структур при плазмовій обробці.

На початку глави приведений детальний аналіз існуючих на теперішній час в науковій літературі даних про радіаційно-термічні та плазмові впливи на кремній та прикладні структури на їх основі, а також роль водню в цих процесах. Розглянуті дослідження на теперішній час процеси взаємодії водню з дефектами і домішками в кремнії і на межі поділу $\text{SiO}_2\text{-Si}$ та виділений великий клас явищ, в яких водень відіграє роль посередника і природа якого до останнього часу була не ясна.

В главі представлені нові результати по низькотемпературному ВЧ плазмовому відпалі заряду в двоокисі кремнію та ПЕС на межі поділу $\text{SiO}_2\text{-Si}$: 1) методом ЕПР продемонстровано більш ефективне зменшення концентрації кисневих вакансій в SiO_2 (E' -центри), ніж при термічному відпалі при температурі 450°C ; 2) додавання водню в ат-

мосферу плазмового розряду прискорює відпал позитивного заряду в SiO_2 ; 3) встановлено, що залежність зміни сумарної концентрації ПЕС на межі SiO_2 -Si, так само як і залежність зміни фіксованого позитивного заряду в SiO_2 , від часу ВЧ плазмової обробки має мінімум і схожа з такою ж залежністю при термічному відпалі в атмосфері водню.

В главі вперше приведені детальні дослідження впливу різноманітних факторів, що проявляються при ВЧ плазмовому розряді, на діелектричний шар і межу поділу багат шарової МДН-структури.

1. За допомогою методів Оже-спектроскопії та еліпсометричного аналізу, поєднаного з пошаровим хімічним травленням, показано, що низькоенергетичне бомбардування іонами та електронами значно модифікує відкритий приповерхневий шар двоокису кремнію: приповерхневий шар стає більш "рихлий", що збільшує його швидкість травлення; в приповерхневий шар з атмосфери плазмового розряду вводиться азот та алюмінія, що збільшує його коефіцієнт заломлення. При підвищенні потужностей ВЧ плазмової обробки відбувається деяке зростання коефіцієнта заломлення по всій товщині окису без введення туди додаткових домішок, що пояснено з точки зору згущення двоокису кремнію під впливом ультрафіолетового та м'якого рентгенівського випромінювання.

2. Проведені теоретичні оцінки температури та її вимірювання при ВЧ плазмовій обробці за допомогою термочутливих барвників дали можливість встановити, що температура об'єкту при самих форсованих режимах впливу не перевищувала 450°C . Калібровка температури пластинок при різних питомих потужностях ВЧ плазмової обробки показала підвищену ефективність відпалу структур Al-SiO_2 -Si порівняно з термічним нагрівом.

3. Спільний вплив температури та наведеного електричного потенціалу на металі МДН-структури під час ВЧ плазмового впливу було вперше вивчено за допомогою методу термостимульованих іонних струмів. Було показано, що під час ВЧ плазмової обробки проходить зміщення рухливого позитивного заряду в SiO_2 до межі поділу метал-діелектрик у випадку розміщення структури металевим електродом до розряду, що свідчить про наведення на металевому електроді негативного електричного потенціалу. При обробці структури Al-SiO_2 -Si в певних режимах проходить ефективне гетерування іонів Na^+ на межі

Al-SiO₂, що було пояснено модифікацією цієї межі внаслідок низькоенергетичного бомбардування металу іонами та електронами та інтенсивними інжекційними процесами, що протікають при ВЧ плазмовій обробці.

4. Методом термодесорбційної мас-спектроскопії водню та вимірювання профілів концентрації вільних носіїв в приповерхневому шарі кремнію, легovanого бором, було встановлено, що при обробці структури SiO₂-Si ВЧ плазмовим розрядом в атмосфері азоту в приповерхневу область напівпровідника структур Al-SiO₂-Si поступає водень в атомарній формі, який при низькотемпературних режимах ВЧ обробки пасивує бор. У випадку розміщення об'єкта тильною стороною до плазми (кремнієва підкладка звернена до плазмового розряду) атомарний водень не проникає в приповерхневий шар кремнію під затворний діелектрик.

Застосування методів термоактиваційного звільнення заряду в області криогенних температур (від 4 до 25К) та квазістатичних вольт-фарадних характеристик для вивчення спектрів мілких пасток в перехідному шарі SiO₂ та спектрів ПЕС на межі поділу SiO₂-Si, відповідно, після ВЧ плазмових обробок вперше дало можливість спостерігати повну кореляцію сумарної концентрації ПЕС з сумарною концентрацією мілких рівнів, пов'язаних з напруженими та обірваними зв'язками в перехідному шарі SiO₂. На основі цих досліджень був зроблений висновок про впорядкування структури перехідного шару при ВЧ плазмовій обробці.

Дослідження накопичення заряду в структурах SiO₂-Si при впливі на них γ -квантів показали зменшення ступеня утворення фіксованого позитивного заряду в SiO₂ та ПЕС на межі поділу SiO₂-Si після ВЧ плазмової обробки структур, що є підтвердженням структурного впорядкування аморфної сітки двоокису кремнія та межі поділу SiO₂-Si при плазмовому впливі.

На основі отриманих даних пропонується нова модель впорядкування структури SiO₂ при участі водню та електричної перезарядки напружених та обірваних зв'язків в двоокису кремнія. Модель полягає в захопленні водню на один з напружених зв'язків у ланцюжку Si-O-Si і його розриву з наступною релаксацією аморфної сітки і відновленням Si-O-Si ланцюжка, але вже з мінімальною внутрішньою енергією. Водень в цьому процесі грає роль посередника і після

встановлення зв'язку перезахоплюється на сусідній або обірваний зв'язок, або об'єднується в молекулу H_2 .

В главі визначені оптимальні режими ВЧ плазмового відпалу структур SiO_2-Si та виявлені деградаційні явища, що виникають при неправильному виборі режиму обробки.

В главі п'ятій систематизуються проведені автором дослідження по перетворенню та відпалу сильно порушених та аморфізованих іонною імплантацією приповерхневих окиснених шарів під час ВЧ плазмової обробки.

Аналізуються результати вперше запропонованого автором низькотемпературного плазмового відпалу дефектів імплантації в шарах кремнію. Застосування методів термоактиваційного звільнення заряду для аналізу спектрів глибоких рівнів, нерівноважного ємносного профілювання концентрації вільних носіїв в ОПЗ напівпровідника, а також розробленого за участю автора метода профілювання концентрації глибоких рівнів для порівняльних досліджень після термічних та плазмових обробок імплантованих різними іонами структур $Al-SiO_2-Si$, дало можливість виявити суттєві відмінності в процесах відпалу глибоких рівнів. Відмінності полягають: в зменшенні більш ніж на $200^{\circ}C$ температури відпалу глибоких рівнів під час плазмової обробки, порівняно з термічною; ефективний плазмовий відпал глибоких рівнів у вузькій приповерхневій області кремнію, тим часом як при термічній обробці глибокі рівні скупчуються біля межі поділу SiO_2-Si ; спостереження процесів збільшення залишкової концентрації глибоких рівнів при великій тривалості плазмової обробки.

В главі подані результати експериментів по відпалу глибоких рівнів та активації імплантованої легуючої домішки в імплантованих структурах $Al-SiO_2-Si$, оброблених в плазмі з лицевої та тильної сторін, які дають однозначне підтвердження суттєвого вкладу нетермічних факторів у процеси плазмового відпалу основних дефектів імплантації та впровадження імплантованої домішки в вузли кристалічної ґратки кремнію. Експерименти проводилися як вказаними вище методами, так і методом низькотемпературної фотолюмінисценції екситон-домішкових комплексів, який дає можливість оцінити ступінь впровадження конкретної домішки в вузол кристалічної ґратки напівпровідника.

Комплексні дослідження сильно порушених іонною імплантацією

структур за допомогою метода ЕПР, термоактиваційного звільнення заряду та оберненого резерфордського розсіяння іонів He^+ показали, що одночасно із зменшенням концентрації електрично-активних дефектів, які можна віднести до дефектів вакансійної природи, при ВЧ плазмовій обробці проходить ефективне впорядкування структури приповерхневого шару напівпровідника.

Проаналізовані можливі нетермічні механізми відпалу дефектів в кремнії та показано, що результати, які спостерігаються, неможливо пояснити без залучення участі в цьому процесі хімічно-активної частинки, якою є водень.

Для несуперечного пояснення всієї сукупності результатів відпалу основних глибоких рівнів та активації імплантованої легуючої домішки в роботі пропонується модель прискореного відпалу дефектів вакансійної природи в кремнії при участі водню, яка полягає в релаксації гратки в області вакансійного дефекта при захопленні на нього атомарного водню та зменшенні при цьому величини потенціального бар'єру, який необхідно здолати для акту анігіляції міжвузловинного атому та вакансійного дефекту. Якщо міжвузловинним атомом виступає легуюча домішка, то крім відпалу дефекта спостерігається ще і активація легуючої домішки. Передбачається, що водень виступає каталізатором реакції відпалу дефекта і після її проходження залишає місце реакції та переходить на сусідній обірваний зв'язок або в молекулярну форму.

Систематичне дослідження поведінки різних глибоких рівнів при ВЧ плазмовій обробці і після неї дали можливість розділити рівні, що спостерігаються, на три класи: 1) глибокі рівні ($E_c - 0.18$; $E_c - 0.22$; $E_c - 0.38$; $E_c - 0.44$ eV), які ефективно зменшують свою концентрацію при обробці і не відновлюють її після прогрівів у вакуумі до $450^\circ C$; 2) глибокі рівні (наприклад $E_c - 0.55$ eV), які ефективно зменшують свою електричну активність при обробці та частково відновлюють її після термічних прогрівів у вакуумі; 3) рівні, для відпалу яких необхідні високі температури нагріву (X-центр з енергією головної лінії $1.0^{+0.99}$ eV). Перший клас глибоких рівнів віднесених в роботі до дефекту вакансійного типу, який при плазмовій обробці може прискорено відпалюватись; другий клас - до неконтрольованих домішок типу Fe або Co, що контролюють час життя неосновних носіїв кремнію, які пасивуються атомарним воднем з наступним відновленням

своєї електричної активності при прогрівах; третій клас - до дефектів, в склад яких входить міжвузловинний кремній і введення водню в його оточення здатно збільшити його термічну стабільність.

В розділі розглянені результати досліджень методом оберненого резерфордовського розсіяння, ЕПР та комбінаційного розсіяння світла модифікації властивостей тонких приповерхневих шарів кремнія, аморфізованих іонною імплантацією, при впливі на них ВЧ плазмової обробки. Показано, що такий вплив призводить: 1) до значної нейтралізації обірваних зв'язків кремнію в аморфній області; 2) до суттєвого зростання долі кристалічної фази в цьому шарі порівняно з термічним відпалом при 450°C ; 3) до повної релаксації внутрішніх механічних напруг в аморфній фазі кремнія без протікання фазового переходу в кристалічний стан. Спостерігається повна кореляція зменшення числа обірваних зв'язків, що спостерігаються методом ЕПР, при ВЧ плазмовому впливі та зменшенням середньоквадратичного розкиду кутів в кремнієвому тетраедрі аморфної фази, яка пояснюється введенням атомарного водню в приповерхневий шар кремнію, його захопленням на обірвані зв'язки та нейтралізацією при цьому їх електричної активності, а також зняття механічних напруг та релаксації напружених зв'язків у найближчому оточенні кремнієвого тетраедра.

Шоста глава присвячена дослідженням впливу різних нерівноважних відпалів (лазерного, електронного, фотонного) та комбінованих обробок з застосуванням ВЧ плазмової обробки на властивості багатшарових структур $\text{SiO}_2\text{-Si}$.

Вперше показано, що відпал структур $\text{SiO}_2\text{-Si}$ імпульсом рубінового лазера тривалістю порядку 50нс призводить до виникнення додаткових глибоких рівнів в приповерхневому шарі кремнія та незначної активації імплантованої домішки і відпалу дефектів імплантації в двоокисі кремнію. Запропонована модель утворення дефектів за рахунок нерівноважного гартування кремнія після імпульсового впливу при значному збудженні електронно-дірочних пар.

Фотонний відпал галогенними лампами тривалістю від 0.1 до 10сек структур $\text{SiO}_2\text{-Si}$, що піддавалися іонній імплантації міддю, як і призводив до відпалу глибоких рівнів більш ніж на порядок величини і активації легуючої домішки, проте з утворенням значної (10^{12}см^{-2}) концентрації ПЕС на межі поділу $\text{SiO}_2\text{-Si}$. Застосування подальшого ВЧ плазмового відпалу дало змогу випалити виникаючі при

фотонному впливі ПЕС та понизити час фотонної обробки для отримання високого ступеня активації імплантованої домішки. В роботі передбачається, що утворення поверхневих станів при фотонному відпаді пов'язано з різними коефіцієнтами термічного розширення кремнію та SiO_2 та утворенням зсувних потоків в SiO_2 при короткочасному нагріві структури.

Методами термоактиваційного звільнення заряду та ємного профілювання концентрації вільних носіїв в приповерхневому шарі кремнія, а також фотолюмінісцентної спектроскопії глибоких рівнів та низькотемпературної фотолюмінісценції екситон-домішкових комплексів показана підвищена ефективність активації легуючої домішки при малих інтенсивностях плазмової обробки та хороша ефективність термічного відпаду ряду глибоких рівнів при температурах порядку 450°C . Вперше продемонстрована висока ефективність комбінованої обробки (термічний низькотемпературний відпал та ВЧ плазмовий відпал), яка дає можливість досягти активації легуючої домішки миль'яка до 80% при нагрівах об'єкта не більше 450°C .

Досліджено вплив сфокусованого електронного пучка на відпал дефектів імплантації та активацію легуючої домішки в окисненому кремнії. Показано, що використання режиму багатокадрового сканування електронного пучка по пластині дає можливість досягти повної активації легуючої домішки в кремнії та відпаду глибоких рівнів до 10^{16}см^{-2} по всій ширині забороненої зони. Дослідження природи відпаду дефектів імплантації показали, що в даному випадку реалізується чистий термічний відпал без внеску будь-яких нетермічних процесів.

На закінчення дисертації приведені основні висновки роботи.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблена теорія методу термостимульованого звільнення заряду з врахуванням впливу ємності області просторового заряду, електричного поля в ОПЗ на процеси емісії. Запропоновані та застосовані нові методи розчистки та обробки складних спектрів струмів ТЗЗ, що виникають в МДН-структурах, які дають змогу розділити об'ємні та поверхневі стани, визначити енергетичні розподіли концентрації поверхневих станів та їх переріз захоплення; визначити розподіл кожного глибокого рівня по області просторового заряду

напівпровідника.

2. Виявлення ефект температурної та частотної залежностей максимальної величини ємності імплантованих МДН-структур. Вперше проведені всебічні дослідження цього ефекту і побудована феноменологічна теорія малосигнальної провідності МДН-структур з приповерхневим потенціальним бар'єром, який шунтується дифузійно-дрейфовими струмами. Запропоновані нові методи визначення параметрів тонких імплантованих напівпровідникових шарів в МДН-структур з приповерхневими р-п переходами та дефектними шарами, які дають змогу розділити дефектні та бездефектні приповерхневі шари, оцінювати величини приповерхневого потенціального бар'єру та товщину шару з протилежним типом провідності, визначати профіль легуючої домішки в таких приповерхневих шарах, оцінювати ступінь аморфізації приповерхневого напівпровідникового шару.

3. Застосування методів термоактиваційної спектроскопії глибоких рівнів до структур $\text{SiO}_2\text{-Si}$, імплантованих іонами різних хімічних домішок, надало можливість визначити енергетичні спектри глибоких рівнів в приповерхневому шарі кремнію. Показано, що: 1) для іонів середніх мас в незалежності від їх типу утворюється однаковий спектр глибоких рівнів, що може бути пов'язано з утворенням однакового виду структурних порушень; 2) межа поділу $\text{SiO}_2\text{-Si}$ не впливає на енергетичне положення глибоких рівнів дефектів, однак збільшує ефективність їх утворення порівняно з об'ємом кремнію; 3) термічний відпал глибоких рівнів ($E_c - 0.38$ та $E_c - 0.44$ eV), локалізованих поблизу межі поділу веде з генерацією більш мілких рівнів, що призводить до часткової стабілізації концентрації цих рівнів із збільшенням температури.

4. Вивчено вплив ступеню аморфізації приповерхневого кремнієвого шару на енергетичний спектр та емісійну здатність глибоких рівнів, локалізованих у цьому шарі. Виявлено ефект значного збільшення перерізу захоплення та зміни кінетики емісії носіїв заряду із пасток при виникненні в області їх локалізації аморфних кластерів, що перекриваються. Запропоновано механізм, що з'ясовує даний ефект, який пов'язаний з гетеруванням точкових дефектів у полі механічних напруг аморфних включень, які мають значні розміри.

5. Вивчено вплив нерівноважних імпульсних впливів на структури $\text{SiO}_2\text{-Si}$, до складу яких входять імпульсне лазерне випромінювання,

короткочасний вплив випроміненням галогенних ламп та потужним електронним пучком.

Встановлено, що вплив на структури SiO_2 -Si потужного лазерного випромінення імпульсами тривалістю порядку декількох десятків наносекунд призводить до утворення значної концентрації глибоких рівнів у приповерхневому шарі кремнію, які мають ту ж саму енергетичну локалізацію, що і рівні після іонної імплантації. При інтенсивностях випромінення, які не викликають руйнування діелектричного шару, спостерігається невисока ступінь активації імплантованої легуючої домішки.

Показано, що потужний імпульсний вплив некогерентного випромінення галогенних ламп тривалістю порядку секунди дає можливість ефективно відпалювати глибокі рівні у приповерхневому шарі та активувати імплантовану легуючу домішку, проте створює значну (порядку 10^{12} см^{-2}) концентрацію поверхневих електронних станів на межі поділу SiO_2 -Si та вводить в окис значний позитивний фіксований заряд. Застосування подальшої ВЧ плазмової обробки дає змогу створити тонкі приповерхневі шари в кремнії без "розпливання" легуючої домішки з низькою густиною поверхневих електронних станів на межі поділу діелектрик-напівпровідник та глибоких станів в області просторового заряду напівпровідника. Встановлено, що сканування потужним сфокусованим електронним пучком у багатоканальному режимі дає можливість повністю активувати імплантовану легуючу домішку та відпалювати залишкові дефекти імплантації без погіршення властивостей діелектрика та "розпливання" профілю легуючої домішки; при цьому реалізується чисто термічний механізм відпалу.

8. Вивчено вплив низькотемпературної ВЧ плазмової обробки на фіксований та рухливий заряд в токих шарах SiO_2 , а також на поверхневі електронні стани та мілкі рівні в перехідному шарі діелектрику поблизу межі поділу SiO_2 -Si структур метал-діелектрик-напівпровідник. Показано, що при плазмовому впливі відбувається впорядкування структури аморфної сітки діелектрика та перехідного шару у межі SiO_2 -Si, яке збільшує радіаційну стійкість системи. Запропоновано механізм низькотемпературного відпалу заряду в діелектрику за участю атомарного водню та електричної перезарядки дефектів та напружених зв'язків. Пояснено ефект зменшення концентрації рухливих іонів в SiO_2 після ВЧ плазмового впливу. Запропо-

новано метод створення шарів SiO_2 зі збільшеною стійкістю до іонізуючого випромінювання.

7. Виявлені та вивчені ефекти відпалу радіаційних дефектів іонної імплантації та активації імплантованої легуючої домішки в приповерхневому шарі напівпровідника під час плазмової обробки структур SiO_2 -Si. Показано, що ці процеси пов'язані з прискореним впорядкуванням структури приповерхневого шару напівпровідника та введенням у цей шар атомарного водню. Запропонована нова модель, яка дає змогу пояснити з єдиної точки зору зниження температури відпалу вакансійних дефектів та активацію імплантованої домішки. Модель включає у себе процеси релаксації кристалічної ґратки поблизу вакансійного дефекту при захопленні на обірвані зв'язки атомарного водню, що призводить до зниження потенціального бар'єру при взаємодії дефекту та міжвузловинного атому.

8. За допомогою комплексу методів, що поєднують в собі спектри оберненого резерфордського розсіяння, комбінаційного розсіяння світла та електронного парамагнітного резонансу, вивчено вплив низькотемпературної ВЧ плазмової обробки на аморфізовані іонною імплантацією кремнієві шари, покриті діелектриком. Виявлено ефект повної релаксації внутрішніх механічних напруг аморфної фази, який корелює з ефектом нейтралізації електрично активних обірваних зв'язків кремнію. Показано значне збільшення розмірів мікрокристалітів в аморфізованих іонною імплантацією шарах кремнію після впливу ВЧ плазмової обробки, а також відсутність при цьому різкого переходу аморфної фази в кристалічну. Запропоновано метод створення механічно відрелаксованих аморфних шарів кремнію.

9. Методами термоактиваційної спектроскопії глибоких рівнів, фотолюмінесценції та електронного парамагнітного резонансу здійснено аналіз відпалу різних типів дефектів у приповерхневому шарі кремнію під час ВЧ плазмової модифікації. Встановлені основні типи дефектів, які мають різну поведінку при плазмовому впливі: 1) дефекти, які відпалюються при більш низькій температурі, ніж при термічному відпалі (ймовірно, вакансійного походження); 2) дефекти, які ефективно пасивуються атомарним воднем, але не відпалюються при цьому (ймовірно, міжвузловинні атоми домішок, що не контролюються); 3) дефекти, для відпалу яких необхідний значний термічний нагрів (ймовірно, дефекти, які включають міжвузловинний кремнія та

інші міжвузловинні домішки). На підставі проведених досліджень запропоновані комбіновані низькотемпературні ефективні методи упорядкування імплантованих приповерхневих напівпровідникових шарів в структурах $\text{SiO}_2\text{-Si}$, які дають змогу домагатися високого ступеню активації легуючої домішки в цих шарах.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ

1. Дубчак А.П., Лысенко В.С., Назаров А.Н., Атаманенко В.Т., Локшин М.М., Полишук Ю.Я. Исследование границы раздела диэлектрик-полупроводник методом термостимулированного освобождения заряда после внедрения ионов B^+ // УФЖ. - 1976. - Т.21. - N.7. - С.1197-1201.
2. Lysenko V.S., Sachenko A.V., Dubchak A.P., Nazarov A.N., Atamanenko V.T., Lokshin M.M., Polishuk Yu.Ya. Properties of MOS structures after B^+ ion bombardment // Phys. Stat. Sol.(a). - 1976. - V.38. - N1. - P.131-138.
3. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Касчиева С.Б. Влияние лазерного облучения на электрофизические свойства границы раздела МДП-структур, имплантированных ионами B^+ // ФТП. - 1977. - Т.11. - вып.11. - С.2254-2257.
4. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Касчиева С.Б., Локшин М.М., Полишук Ю.Я., Устилко В.В. Энергетический спектр радиационных дефектов в МОП-структурах, имплантированных ионами бора различных энергий // УФЖ. - 1978. - Т.23. - N8. - С.1379-1382.
5. Lysenko V.S., Nazarov A.N. Effect of laser beam irradiation on the electrophysical properties of interface in boron ion implanted MIS structures // Phys. Stat. Sol.(a). - 1978. - V.49. - N2. - P.405-411.
6. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Касчиева С.Б., Локшин М.М. Влияние легирования ионами бора на вид вольт-ферадных характеристик МОП-структур // Болг. физ. журнал. - 1978. - Т.5. - N1. - С.57-62.
7. Лысенко В.С., Назаров А.Н. Радиационные дефекты и активация примеси в МОП-структурах, имплантированных ионами бора // Микроэлектроника. - 1979. - Т.8. - N8. - С.526-533.
8. Lysenko V.S., Nazarov A.N. Formation and annealing of radiation damage in boron ion implanted MOS structures // Phys. Stat.

Sol.(a). - 1979, - V.52. - N1. - P.211-216.

9. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Турчаников В.И. Электрофизические свойства МОП-структур, имплантированных ионами бора // В кн.: Проблемы физики поверхности полупроводников / Под ред. О.В.Снитко. - Киев: Наукова думка. - 1981. - С.127-152.
10. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Локшин М.М. Активация легирующей примеси с помощью лазерного облучения в тонких приповерхностных слоях окисленного кремния, имплантированного ионами бора // Микроэлектроника. - 1982. - Т.11. - N1. - С.74-77.
11. Lysenko V.S., Litovskii R.N., Nazarov A.N., Kulichkov V.P. Temperature dependence of capacitance-voltage characteristics in implanted MOS structures // Phys. Stat. Sol.(a). - 1982. - V.70. - N2. - P.719-728.
12. Лысенко В.С., Назаров А.Н. Радиационные дефекты в приповерхностном слое окисленного кремния, имплантированного ионами различных химических примесей // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1982. - Т.1. - N5. - С.81-85.
13. Litovskii R.N., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Rudenko T.E., Kaschieva S.B., Nedev N.R. The influence of defect surface layers on the capacitive properties of MOS structures // Phys. Stat. Sol.(a). - 1983. - V.77. - N2. - P.699-707.
14. Щербакова М.Ф., Лысенко В.С., Назаров А.Н., Ляшенко А.Ф., Локшин М.М., Товмач Е.С. Способ изготовления запоминающих элементов. - а.с. N1074312 от 15.10.1983.
15. Лысенко В.С., Локшин М.М., Назаров А.Н., Руденко Т.Е., Ткаченко А.С. Высоочастотный отжиг дефектов в имплантированных МДП-структурах // Письма в ЖТФ. - 1983. - вып.13. - С.796-799.
16. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е., Манькова Л.Н., Федулов В.В. Исследование емкостных характеристик МДП-варакторов с ионно-легируемым приповерхностным р-п переходом // Микроэлектроника. - 1984. - Т.13. - N3. - С.252-259.
17. Лысенко В.С., Назаров А.Н. Термостимулированное освобождение заряда из ловушек приповерхностного слоя окисленного кремния, нарушенного имплантацией ионов мышьяка // УФЖ. - 1986. - Т.31. - N3. - С.428-434.
18. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е., Ячмевев С.Н.,

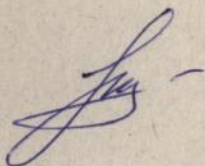
- Локшин М.М. Электронно-лучевой отжиг имплантированных слоев кремния в структурах $\text{SiO}_2\text{-Si}$ // УФЖ. - 1986. - Т.31. - №3. - С.434-438.
19. Щербакова М.Ф., Лысенко В.С., Литовский Р.Н., Локшин М.М., Назаров А.Н. Полупроводниковый датчик температуры. - а.с. N1191756 от 15.07.1985г.
 20. Lysenko V.S., Lokshin M.M., Nazarov A.N., Rudenko T.E. RF plasma annealing of implanted MIS structures // Phys. Stat. Sol.(a). - 1985. - V.88. - N2. - P.705-712.
 21. Lysenko V.S., Nazarov A.N., Rudenko T.E. Simple method for the determination of the doping profile in MIS structures with implanted shallow p-n junction // Phys. Stat. Sol.(a). - 1985. - V.91. - N2. - P.K173-K178.
 22. Гирия В.А., Куницкий И.Э., Лысенко В.С., Назаров А.Н., Шаховцов В.И. Радиационные процессы в системах металл-диэлектрик-полупроводник // Препринт N10, ИФ АН УССР. - 1986. - 52с.
 23. Lysenko V.S., Sytenko T.N., Snitko O.V., Zimenko V.I., Nazarov A.N., Osiyuk I.N., Rudenko T.E., Tyagulskii I.P. Interrelation between surface states and transition layer defects in Si-SiO_2 structures // Sol. St. Commun. - 1986. - V.57. - N3. - P.171-174.
 24. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е., Ткаченко А.С., Березкин В.В. Проявление нестатистических факторов при ВЧ отжиге приповерхностного имплантированного слоя окисленного кремния // УФЖ. - 1987. - Т.32. - №7. - С.1068-1070.
 25. Лысенко В.С., Литовский Р.Н., Назаров А.Н., Руденко Т.Е. Способ определения эффективной концентрации легирующей примеси в приповерхностном полупроводниковом слое с противоположным относительно подложки типом проводимости и глубины металлургического p-n перехода в МДП-структуре // а.с. N1308011 от 03.01.1987.
 26. Локшин М.М., Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е., Ткаченко А.С., Ярандин В.А. Способ отжига кремниевых полупроводниковых приборов и интегральных схем // а.с. N1345955 от 15.08.1987.
 27. Руденко Т.Е., Садовничий А.А., Назаров А.Н., Лысенко В.С.

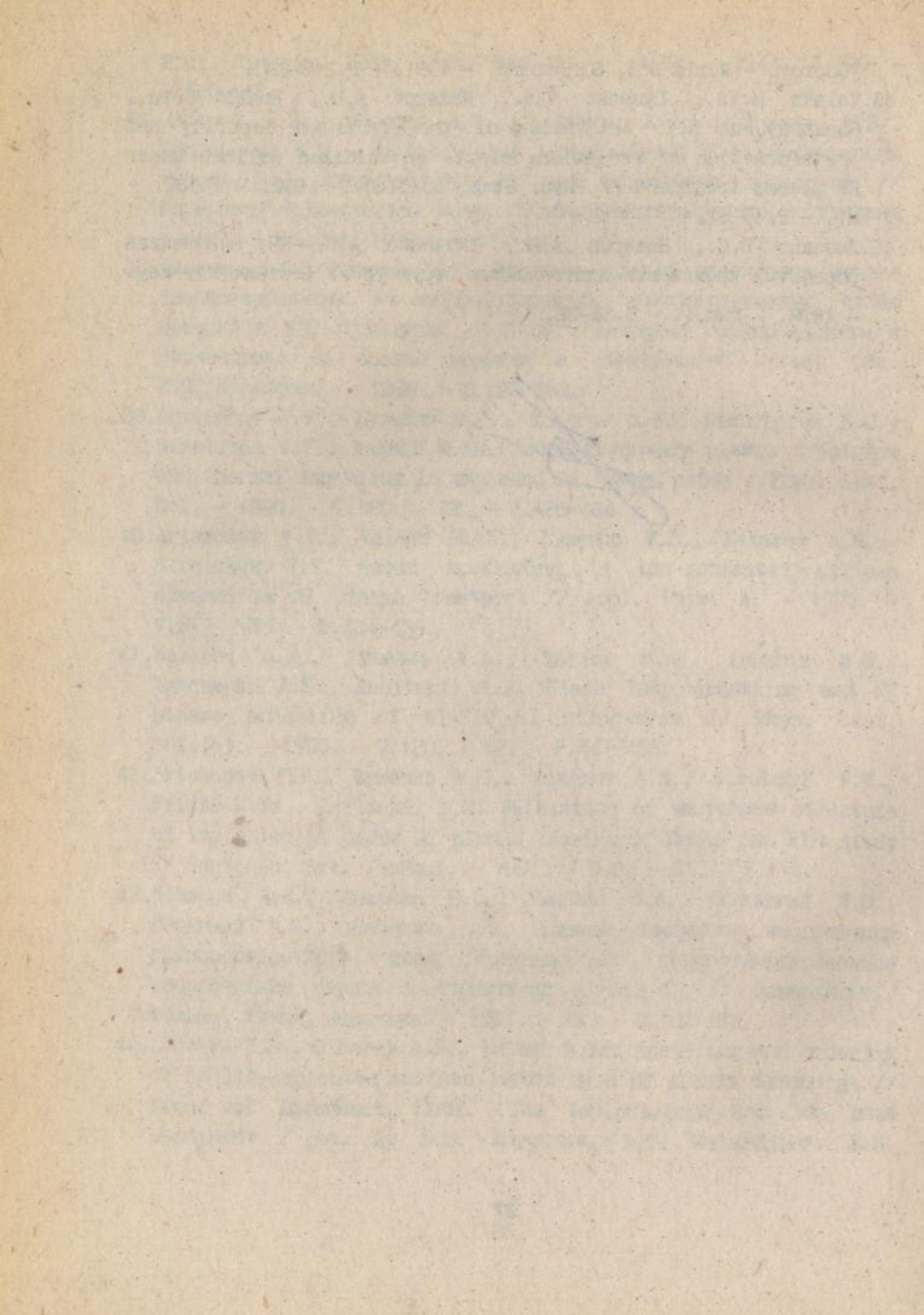
- Аномальная генерация носителей заряда в кремниевых МДП-структурах, подвергнутых различным воздействиям // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1986. - №. - С.61-68.
28. Валиев С.А., Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е. Особенности ВЧ отжига приповерхностного имплантированного полупроводникового слоя в МДП-структурах // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1988. - №12. - С.50-54.
29. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е. Метод профилирования глубоких уровней в полупроводнике МДП-структур // Микроэлектроника. - 1989. - Т.18. - №6. - С.515-522.
30. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Турчаников В.И. Методы термостимулированного освобождения заряда для исследования элементов интегральных схем // Электронная промышленность. - 1989. - №2. - С.3-14.
31. Lysenko V.S., Nazarov A.N., Osiyuk I.N., Turchanikov V.I. Transformation of Si-SiO₂-Al structures under RF plasma treatment // Appl. Surf. Scien. - 1989. - V.39. - №2. P.388-391.
32. Lysenko V.S., Nazarov A.N., Valiev S.A., Zaritskii I.M., Rudenko T.E., Tkachenko A.S. EPR and TSCR investigations of implanted Al-SiO₂-Si system treated with RF plasma discharge // Phys. Stat. Sol.(a). - 1989. - V.113. - №2. - P.653-664.
33. Валиев С.А., Лысенко В.С., Назаров А.Н., Ткаченко А.С. ВЧ отжиг структур Al-SiO₂-Si, имплантированных ионами фосфора // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. - 1989. - вып.15. - С.85-89.
34. Lysenko V.S., Nazarov A.N., Naumovets G.A., Popov V.B., Tkachenko A.S. Manifestation of hydrogen in Al-SiO₂-Si structures subjected to a RF plasma annealing // Phys. Stat. Sol.(a). - 1989. - V.112. - №1. - P.K9-K12.
35. Lysenko V.S., Nazarov A.N., Zaritskii I.M., Serfozo G., Battisting G., Gyulai J., Dozsa L. RF plasma modification of heavily destroyed ion implanted subsurface silicon layers // Phys. Stat. Sol.(a). - 1989. - V.115. - №1. - P.75-80.
36. Valakh M.Ya., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Rudko G.Yu., Tkachenko A.S., Shakhryaychuk N.I. Enhanced activation of implanted phosphorus in silicon under RF plasma treatment //

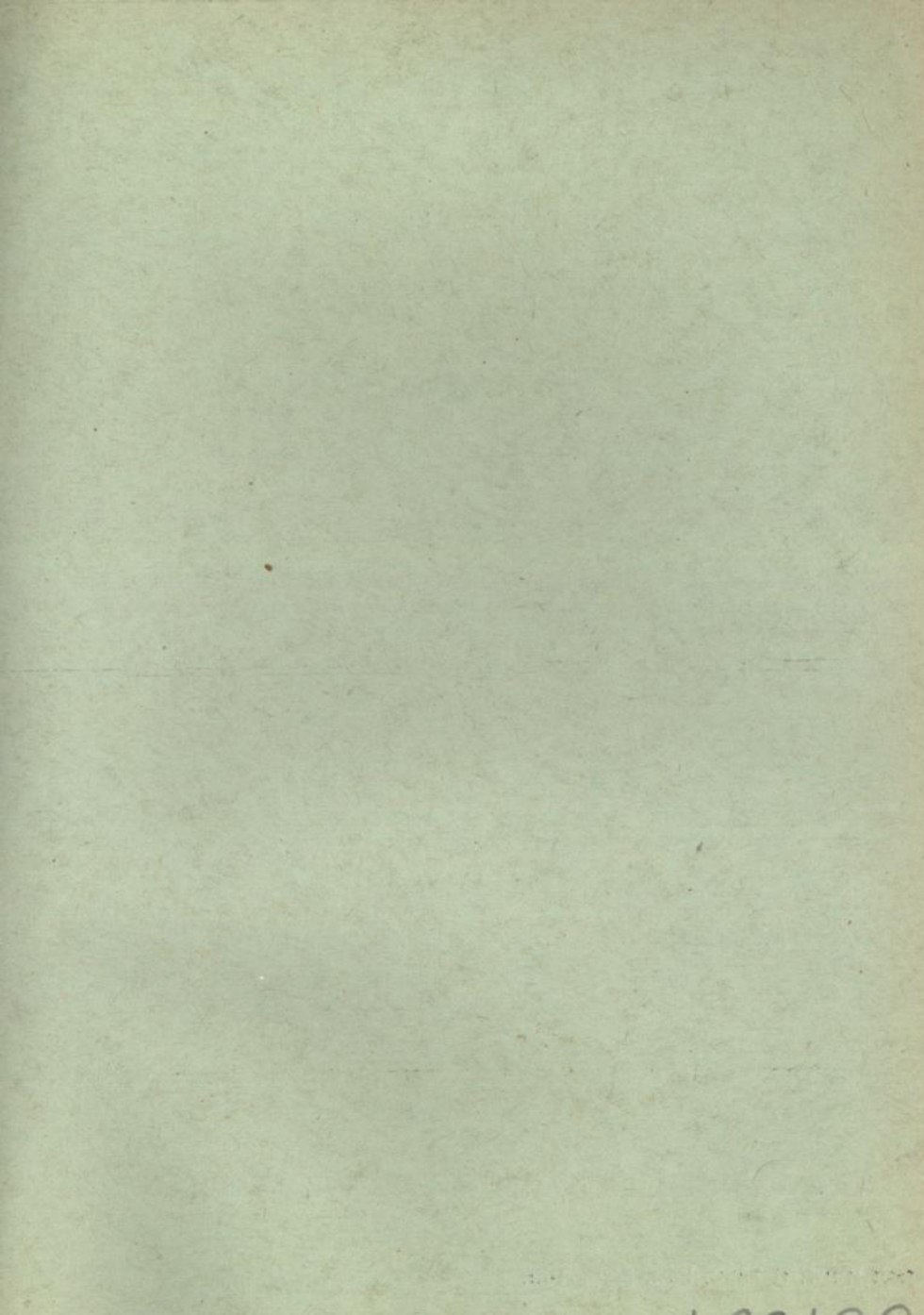
Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.(B). - 1989. - V.44. - N3. - P.146-148.

37. Назаров А.Н., Лысенко В.С., Ткаченко А.С., Гаврилюк И.В., Городынский М.И., Михайлов С.Н., Скрышевский В.А. Модификация плёнок SiO_2 структур SiO_2 -Si при плазменной обработке // Материалы 9 Всесоюзной конф. "Взаимодействие частиц с твердым телом". - Москва, 1989. - С.44-46.
38. Лысенко В.С., Назаров А.Н. Процессы при ВЧ плазменном отжиге сильнонарушенных и аморфизированных приповерхностных слоев кремния в МДП-структурах // В сб. "Аморфные полупроводники и диэлектрики на основе кремния в электронике" / под ред. Н.П. Коваленко. - 1989. - С.272-286.
39. Artamonov V.V., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Nechiporuk B.D., Strelchuk V.V., Valakh M.Ya. Radio-frequency plasma treatment and thermal annealing in implanted Si. Raman study // Phys. Stat. Sol. - 1990. - V.120. - N2. - P.475-484.
40. Artamonov V.V., Valakh M.Ya., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Strelchuk V.V. Raman scattering in ion-implanted silicon exposed to RF plasma treatment // Appl. Phys. A. - 1990. - V.51. - N6. - P.434-436.
41. Nazarov A.N., Lysenko V.S., Valiev S.A., Lokshin M.M., Tkachenko A.S., Kunitskii I.A. Flash lamp annealing and RF plasma annealing of Al-SiO₂-Si structures // Phys. Stat. Sol.(a). - 1990. - V.120. - N2. - P.447-456.
42. Artamonov V.V., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Strelchuk V.V., Valakh M.Ya., Zaritskii I.M. Relaxation of amorphous structure of implanted Si under RF plasma treatment: Raman and EPR study // Semicond. Sci. Technol. - 1991. - V.6. - N1. - P.1-4.
43. Назаров А.Н., Лысенко В.С., Валиев С.А., Куницкий И.Э., Зарицкий И.М., Михайлов С.Н. Влияние частичной аморфизации приповерхностного слоя кремния на термостимулированное освобождение заряда в структурах Al-SiO₂-Si // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1991. - N4. - С.102-109.
44. Lysenko V.S., Nazarov A.N., Valakh M.Ya. Annealing and ordering of Si ion-implanted surface layers by a RF plasma discharge // Proc. of Internect. Conf. "Ion implantation and ion beam equipment" / ed. by D.S. Karpuzov, I.V. Katardjiev, S.S.

- Todorov. - World Sci. Singapore. - 1991. - P.216-230.
45. Valakh M.Ya., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Rudko G.Yu., Shakhraychuk N.I. Activation of the implanted impurity and transformation of radiation defects in oxidized silicon under RF plasma treatment // Phys. Stat. Sol.(a). - 1992. - V.130. - N1. - P.45-51.
46. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Ткаченко А.С. ВЧ плазменная обработка кремниевых многослойных структур // Вестник ноу-хау. - 1992. - вып.1. - С.35-38.







AB 28.031