

на правах рукопису

СТРОИТЕЛЕВА НІНА ІВАНІВНА

СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЮВАННЯ ТА ТОКОВІ ФЛУКТУАЦІЇ

В КРЕМНІЇ З РІЗНИМИ ВИДАМИ ДЕФЕКТІВ

01.04.10. - фізика напівпровідників та діелектриків

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Робота виконана в Запорізькому



00778599 (2)

Наукові керівники: доктор технічних наук, професор

Д.І.Левінзон

кандидат фізико-математичних наук, доцент

М.М.Ткаченко

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор

А.Ю.Кудзін

кандидат фізико-математичних наук, доцент

В.С.Бахрушин

Провідна установа - Херсонський індустріальний інститут.

Захист відбудеться " 17 " червня 1994р. в 15<sup>00</sup> годин  
на засіданні Спеціалізованої вченої ради К 068.52.02 при  
Запорізькому державному університеті за адресою:  
330055, м.Зпоріжжя, вул.Жуковського, 66.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Запорізького  
державного університету.

Автореферат разісланий " 14 " маг 1994г.

Вчений секретар

Спеціалізованої ради

кандидат технічних наук, доцент

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Ю.О.Сисосв

Актуальність теми. Сучасна твердотільна електроніка використовує широкий спектр кристалів кремнію та шарових композицій на його основі з великим діапазоном структурних недосконалостей – від точкових дефектів та їх асоціацій до межзерених меж. Дослідження характеру та механізмів їх трансформації в умовах неминучих високотемпературних обробок та оцінка їх електричної активності у функціональних областях приладів на основі таких структур уявляється традиційно актуальною та дуже важливою науковою і практичною проблемою напівпровідникового матеріалознавства. Освоєння у промисловому масштабі технології виготовлення бездислокаційного кремнію не звільнює від необхідності глибокого вивчення проблем, пов'язаних з присутністю в цих монокристалах термодинамічно обумовлених мікроефектів. Саме тому одним з найбільш важливих напрямків фізичних досліджень є вивчення природи їх утворення та еволюції і, внаслідок цього, їх впливу на електрофізичні властивості напівпровідникового кремнію та приладів на його основі.

Присутність дефектів призводить до появи енергетичних рівнів в забороненій зоні, які визначають величину провідності кристалів, а також характер розсіяння носіїв заряду і рекомбінаційних процесів та особливості надлишкового струмового шуму. Одним із найчутливіших та високоінформаційних методів дослідження електричної активності дефектів в напівпровідниках є метод струмових флуктуацій. Найбільший інтерес уявляється вивчення надлишкового низькочастотного струмового шуму типу  $1/f$ , який практично завжди супроводжує протікання струму в напівпровідникових структурах. Дослідження особливостей електричного шуму в кристалах кремнію, які мають різні типи структурних недосконалостей як мікро-, так і макророзмірів (від мікроефектів до меж зерен), уявляється собою самостійною науковою проблемою, тому що до цього часу немає єдиного уявлення про зв'язок механізму генерації шуму з процесами, що відбуваються в кристалі з дефектами.

Вибір об'єктом досліджень бездислокаційного монокристалічного кремнію з мікроефектами є обґрунтованим, тому що до цього часу немає єдиної теорії виникнення мікроефектів різного типу, а для її побудови необхідне детальне вивчення процесів росту та трансформації мікроефектів під час різноманітних технологічних

операцій. Оцінка електричної активності мікрodefektів може бути проведена на основі відомих уявлень про шумові процеси на межах зерен в кремнії, які уявляють собою плоскі дефекти структури з усіма особливостями проявлення електричної активності як у мікрodefektів. Тому бікрystalи кремнію з межами зерен різного типу обрані другим об'єктом досліджень.

Метою роботи є дослідження структурних перетворювань та низькочастотного струмового шуму в кремнії з різними видами мікрodefektів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати та уточнити теоретичні механізми утворення мікрodefektів та моделі струмових флуктуацій типу  $1/f$ .
2. Розробити комплексну методику електронномікроскопічних досліджень зразків з мікрodefектами.
3. Розробити методику і технічне забезпечення шумових вимірювань.
4. Досліджувати трансформацію мікрodefektів в бездислокаційному кремнії в процесі відпалення, епітаксійного нарощування та іонної імплантації.
5. Досліджувати особливості низькочастотного шуму у зразках кремнію з різними дефектами.

#### Наукова новизна роботи

1. Встановлено, що процес трансформації мікрodefektів в бездислокаційному кремнії в процесі високотемпературних обробок іде за схемою: D- мікрodefекти → B- мікрodefекти → A- мікрodefекти → дислокації, при цьому D- мікрodefекти можуть уявляти собою малі дислокаційні петлі з векторами Бюргерса  $b=1/2[100]$  і  $b=1/2[110]$ .
2. Вперше за допомогою модифікованих шумових методик досліджена природа та рівні струмових флуктуацій в кремнії з широким спектром дефектів структури - від мікрodefektів до меж зерен.
3. Вперше встановлені нові аспекти природи струмових флуктуацій в кремнії з межами зерен (зміна нахилу шум-вольтової характеристики активної межі зерна, пов'язана з флуктуаціями концентрації пасток та ширини області просторового заряду; підвищена шумова активність штучних меж зерен, яка зумовлена додатковим

розсіянням на специфічних для них дефектах структури; зв'язок рівня шуму в нейтральних межах зерен з пострекомбінаційною релаксацією кристалічної ґратки кристалу поблизу межі зерна), що дозволило суттєво доповнити сучасні уявлення про теоретичні моделі струмових флуктуацій.

#### Практична цінність роботи

1. Запропоновані критерії відбору вихідного кремнію для технологічного процесу виготовлення високоомних структур методом оберненої епітаксії.
2. Показано, що на сучасному рівні технологій виробництва найбільш масових напівпровідникових приладів та мікросхем надлишковий шум монокристалічного кремнію з мікроефектами несуттєво впливає на їх показники якості та технологічності.
3. Змодельовані температурні залежності шуму на межі зерен для моделей флуктуації рухливості або концентрації можуть бути використовані для аналізу температурної стабільності параметрів кремнію з різними видами меж зерен.

Вірогідність одержаних результатів підтверджується додержанням необхідних вимог по метрологічному забезпеченню експерименту та математичної обробки результатів вимірювань, погодженістю між розробленими модельними уявленнями та отриманими експериментальними результатами, включаючи данні інших авторів, узгодженням позицій та висновків з нормами та вимогами практичного матеріалознавства та приладобудування.

#### На захист виносяться:

1. Обґрунтування схеми трансформації мікроефектів в бездислокаційному кремнії в процесі високотемпературних обробок: D- мікроефекти → B- мікроефекти → A- мікроефекти → дислокації.
2. Модель виникнення надлишкового струмового  $1/f$ -шуму в монокристалічному кремнії з різними типами мікроефектів.
3. Результати досліджень надлишкового шуму в активних межах зерен, вирощених методом Чохральського, та твердження про те, що його природа пов'язана з флуктуаціями як заселеності локалізованих на межі електронних станів, так і ширини області просторового заряду на межі внаслідок просторових флуктуацій висоти потенціаль-

ного бар'сру на межі зерна.

4. Модель механізму впливу зворотно зміщеної частини області просторового заряду на заселеність пасток на активній межі.
5. Результати досліджень надлишкового шуму в спеціальних штучних межах зерен, які одержані методом дифузійного зрошування, та твердження про те, що причиною такого шуму є флуктуації рухливості носіїв заряду внаслідок їх розсіяння на дефектах розупорядкування кристалічної ґратки в області електрично нейтральної межі.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи докладалися на обласній научній конференції "Компоненти та матеріали електронної техніки" (Запоріжжя, 1990), на 3 Всесоюзній конференції "Фізика і технологія тонких напівпровідникових шарів" (Івано-Франківськ, 1990), на Всесоюзній конференції по електронним матеріалам (Новосибірськ, 1992), на 1 Українській конференції молодих вчених і спеціалістів (Ужгород, 1992), на 4 Міжнародній конференції "Фізика і технологія тонких напівпровідникових шарів" (Івано-Франківськ, 1993), на науково-технічному семінарі "Шумові та деградаційні процеси в напівпровідникових приладах" (Москва, 1993), на науковому семінарі кафедри фізичної електроніки XII (Херсон, 1994), на науковому семінарі кафедри твердотільної електроніки та мікроелектроніки ЗДУ (Запоріжжя, 1994), на засіданні Запорізького регіонального наукового семінару з фізики, матеріалознавства і технічному використанню напівпровідників - періодично, на засіданнях та наукових семінарах кафедри компонентів та матеріалів електронної техніки ЗІІ - періодично.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 робіт.

Структура та об'єм дисертації. Робота складається з вступу, п'яти глав і висновків. Робота викладена на 175 стор., включаючи 41 малюнок, 3 таблиці та список літератури з 154 найменувань.

В вступі обґрунтована актуальність і наукова новизна роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, визначена практична цінність результатів роботи, викладені основні положення, які вносяться на захист.

Перша глава присвячена аналізу сучасного стану проблеми виникнення та трансформації мікрodefektів в бездислокаційному кремнії. Розглянуті основні уявлення про А-, В-, С- і D- мікрodefekти, приведені результати електронномікроскопічних досліджень природи цих типів мікрodefektів та вплив термообробки і домішок на їх утворення. Всі літературні дані стосуються монокристалів кремнію діаметром 28мм, вирощених методом бестигельної зони плавки (БЗП). Розглянута проблема дослідження електричної активності мікрodefektів та їх впливу на електрофізичні параметри напівпровідникових приладів і ІМС. Обговорюються відомості про вивчення електричної активності інших видів структурних дефектів у кремнії, таких як дислокації та межі зерен (МЗ), за допомогою метода струмових шумів. Аналіз відповідних наукових результатів дозволив виявити невирішені проблеми, які існують в даній області досліджень, і сформулювати мету та задачі, які необхідно вирішити для виконання поставленої мети.

В другій главі проаналізовані теоретичні моделі утворення і росту мікрodefektів. В основі кожної моделі лежать різні уявлення про тип домінуючих точкових дефектів (вакансій і міжвузлових атомів кремнію) і природу їх виникнення, що базуються на різноманітних експериментальних даних. Найбільш повною моделлю утворення мікрodefektів на сьогоднішній день є модель Воронкова, в основі якої лежить принцип рекомбінаційно-дифузійного відбору, відповідно якому тип домінуючих точкових дефектів в кремнії не є фіксованим і залежить від співвідношення швидкості росту кристала до осьового температурного градієнту. Підкреслюється, що механізм Воронкова не є закінченою теоретичною моделлю і погано узгоджується з кількома відомими експериментальними даними та вимагає подальшого детального вивчення.

Докладно розглянуті відомі моделі  $1/f$ -шуму в кремнії з МЗ, в яких основним джерелом флуктуацій вважають флуктуації концентрації локалізованих на МЗ електронних станів або флуктуації рухливо-

сті носіїв заряду внаслідок їх розсіяння в області просторового заряду на межах. Були розглянуті тільки ті моделі, які можуть бути використовані для аналізу флуктуаційних явищ в монокристалічному кремнії, який містить мікрodefекти.

На основі розглянутих гіпотез проведено моделювання струмових флуктуацій, які виникають в монокристалічному кремнії, що містить різні типи мікрodefектів при їх різній просторовій орієнтації. Розглянуті два випадки протікання електричного струму через модельний кристал: паралельно и перпендикулярно площині (111), в якій містяться мікрodefекти. Результати комп'ютерного розрахунку демонструють кореляцію між геометричними розмірами мікрodefектів та рівнем надлишкового шуму, що генерується ним. При протіканні струму паралельно площині (111) основний внесок в шум модельного кристалу кремнію вносить процес захоплення носіїв заряду на мікрodefектах - плоских скупченнях міжвузлових атомів кремнію і кисню - по механізму Мак-Уортера. У випадку протікання струму перпендикулярно площині (111) припускається, що проходження носіїв заряду крізь площину мікрodefекта аналогічно доланню їми потенціального бар'єру, який існує в області дефекта. Область мікрodefекта розглядається як область межі, яка ділить два зерна в бікристалі, і може бути свосереднім джерелом центрів захоплення носіїв заряду, яке змінює їх концентрацію, рухливість і вносить свій внесок в низькочастотний шум модельного кристалу.

Проведено комп'ютерне моделювання температурних залежностей струмового шуму на МЗ для моделі флуктуації рухливості та для моделі флуктуації концентрації. Встановлено характерні залежності температурної поведінки шуму в цих моделях: падіння рівня струмового шуму з підростанням температури в любом частотному інтервалі в моделі флуктуації рухливості; присутність максимуму в температурній залежності струмового шуму в моделі флуктуації концентрації. Встановлені залежності використовані далі для аналізу температурної стабільності параметрів різних видів МЗ.

Третя глава містить опис методик структурних та шумових досліджень. Наведено опис металлографічних досліджень, різних методик аналізу електронномікроскопічних зображень (ЕМЗ), використання яких дозволяє ідентифікувати мікрodefекти. Дослідження проводилися на електронному мікроскопі JEM-7A і ПРЕМ-200. Приготування зразків кремнієвих структур для електронномікроскопічних

досліджень виконувалося методом хіміко-динамічної поліровки на установці, оригінальна конструкція якої дозволяє готувати зразки з великою площею поверхні, прозорі для електронного випромінювання. Режими травління були підібрані експериментально в процесі проведення досліджень.

Приведено опис вимірювальної установки і методики вимірювань шумових характеристик (послідовна аналогова фільтрація). Дослідження  $1/f$ -шуму виконувалося за допомогою аналізу величини спектральної густини потужності флуктуацій напруги  $S_V$ , прикладеної до зразка. Обґрунтовано необхідність чотирьохзондової конфігурації зразків для виключення контактного шуму і приведена методика вимірювання шуму для таких зразків. Наведено опис технологічних процесів виготовлення зразків для досліджень та омічних контактів до них.

В роботі досліджувалися:

а) кремнієві одношарові обернені епітаксійні структури

КООЕС 28  $\frac{260 \text{ КДВ } 0,01 \text{ ТД}}{80 \text{ КВ}0-2\text{В}729,5\text{С}}$  (КООЕС);

б) монокристали кремнію, вирощені методом БЗП з швидкостями 2;3;6 и 8 мм/хвл ( $\text{Si} \langle \text{B} \rangle$ ,  $N_A = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ );

в) монокристали кремнію, вирощені методом Чохральського, які пройшли іону імплантацію миш'яком ( $\text{Si} \langle \text{As} \rangle$ ,  $N_A = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ );

г) МЗ різного типу, вирощені методом Чохральського ( $\text{Si} \langle \text{B} \rangle$ ,  $N_A = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ );

д) спеціальні штучні МЗ, виготовлені методом дифузійного зрощування ( $\text{Si} \langle \text{B} \rangle$ ,  $N_A = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ).

В четвертій главі наведено результати електронномікроскопічних досліджень еволюції мікрodefektів в бездислокаційних монокристалах кремнію. Вивчено дефекти структури в серійних КООЕС. Використання КООЕС в сучасних напівпровідникових приладах ставить високі вимоги до якості цих структур, особливо, до якості робочого шару. Структурна досконалість робочого шару в значному ступені залежить від структури самої кремнієвої підкладки, а також від умов формування епітаксійних шарів, їх морфології та структурних параметрів. В роботі встановлено, що для виготовлення КООЕС в промислових умовах використовуються кремнієві підкладки, які виготовлені із бездислокаційного кремнію, що має різні швидкості росту; контроль умов вирощування матеріалу підкладки перед процесом епітаксійного нарощування на виробництві не проводиться. Це

призводить до того, що в процесі виробництва КООЕС не враховується важлива особливість вихідних підкладок, а саме, розбіжність їх структурних властивостей.

Досліджено вплив трансформації структурних дефектів в вихідних кремнієвих бездислокаційних підкладках в процесі епітаксійного нарощування. Як матеріал підкладки для нарощування були вибрані монокристали кремнію, які вирощені методом БЗП при різних швидкостях росту та містять різні типи мікрodefektів. Встановлено, що термообробка монокристалічних підкладок кремнію, що проводиться під час епітаксійного нарощування при виробництві КООЕС, є основною причиною погіршення структурних параметрів робочого шару оберненої структури. Це пов'язане з тем, що під час вплива високих температур в монокристалах кремнію змінюється об'ємне розподілення мікрodefektів, їх ріст та перетворення з одного типу мікрodefektів в другі за схемою D- мікрodefekти → B- мікрodefekти → A- мікрodefekти → дислокації. Основним джерелом структурних дефектів в готових КООЕС є A-мікрodefekти, що уявляють собою дислокаційні петлі межвузельного типу та генерують лінії дислокацій в процесі високотемпературної обробки. Для поліпшення структурних параметрів робочого шару КООЕС рекомендовано для матеріалу підкладки використовувати монокристали кремнію діаметром 28мм, вирощені за підвищеними швидкостями ( $V_p \geq 6 \text{ мм/хвл}$ ).

Наведено результати вивчення еволюції мікрodefektів в імплантованому миш'яком кремнії після відпалення при 650°C і 850°C, які підтверджують допущення про безперервну трансформацію мікрodefektів під час різних високотемпературних обробок. У відпалених зразках спостерігалися зростання та зміна об'ємного розподілу мікрodefektів на фоні розпаду пересиченого твердого розчину кремній-миш'як.

Для підтвердження припущення про послідовну трансформацію мікрodefektів в процесі високотемпературної обробки за схемою D → B → A проведено порівняльний аналіз чорно-білого контрасту EM3 B- і D- мікрodefektів. Показано, що D- мікрodefekти можуть бути джерелом утворення B- мікрodefektів та уявляють собою малі дислокаційні петлі з векторами Бюргерса  $\vec{b} = 1/2[100]$  і  $\vec{b} = 1/2[110]$ .

На основі одержаних експериментальних результатів запропонована версія механізму утворення, росту та трансформації різних типів мікрodefektів, яка узгоджується з основними положеннями мо-

делі Воронкова. Запропонована модель враховує факт одночасного співіснування в кристалі кремнію при різних швидкостях росту мікрodefektів вакансійного і міжвузлового типів та неможливість їх рекомбінації із-за наявності ентропійного бар'єру при температурі плавлення кремнію та заключається в такому. Розпад пересиченого розчину власних точкових дефектів в кремнії поблизу температури плавлення протікає одночасно за двома механізмами: вакансійному та міжвузловому. В першому випадку слід очікувати утворення, як чисто вакансійних скопичень, так і сумісних вакансійно-домішкових агрегатів, які можуть бути утворені домішкою кисню. Зниження концентрації вакансій в процесі охолодження призводить до того, що домішковий розчин стає пересиченим. В цьому випадку осадження домішки веде до зміни типу деформації з вакансійного на міжвузловий.

В другому випадку термодинамічно більш вигідним є утворення скупчень власних міжвузлових атомів, в якому можуть брати участь міжвузлові атоми домішок (наприклад, вуглеця). Зростання міжвузлових скупчень визиває сильне зменшення концентрації міжвузлових атомів кремнію, і можуть виникнути умови для преципітації домішок. Преципітати, які ростуть, генерують атоми кремнію в розчин власних міжвузлових атомів. При цьому існує можливість утворення двох типів мікрodefektів, тобто міжвузлових скупчень (стоків для міжвузлових атомів кремнію) та домішкових преципітатів (джерел цих же атомів). Обидва механізми призводять до утворення малих міжвузлових скупчень - D- мікрodefektів- в площині {100}, які в свою чергу генерують надлишкові міжвузлові атоми кремнію. Поглинання цих атомів сприяє виникненню дислокаційних петель в площинах {111}. Таким чином, D- та B-мікрodefekти, можуть існувати у двох видах - плоских скупченнях точкових дефектів в площинах {100} і малих дислокаційних петель в площинах {111}. Подальший ріст плоских скупчень у площинах {100} призводить до генерації дислокаційних петель в площинах {110} за рахунок дії механізму призматчного видавлення. Наприкінці утворюються A-мікрodefekти, які уявляють собою дислокаційні петлі з вектором Бюргерса  $\vec{b} = 1/2[110]$  та містяться у площинах {111} і {110}.

П'ята глава присвячена експериментальній перевірці теоретичних моделей  $1/f$ -шуму, які були розглянуті в другій главі, з вико-

ристанням різних зразків дефектного кремнію. Проведена експериментальна перевірка результатів моделювання надлишкового струмового шуму в зразках монокристалів кремнію, які містять різні типи мікрodefектів при пропусканні струму паралельно та перпендикулярно площині, в якій містяться мікрodefекти. Встановлено, що орієнтація мікрodefектів А-типу в об'ємі монокристалу кремнію впливає на величину шуму, але різниця в рівнях експериментально отриманих шумів, що виникають у зразку при різних напрямках протікання струму, незначна. Шум монокристалу кремнію з А-мікрodefектами, що спостерігався на практиці, був на 2 порядки менше величини шуму, яка розрахована за механізмом модуляції струму через кристал внаслідок захоплення носіїв на пастки А-мікрodefектів (модифікована в цій роботі модель Мак-Уортера), та значно перевищив всі інші змодельовані види шумів. Зроблено висновок про те, що змодельований вклад шуму на діелектричних включеннях в загальний шум зразка з А-мікрodefектами є завищеним, що пов'язане з різницею між параметрами пасток, що існують на діелектричних областях А-мікрodefектів, та параметрами рівней захоплення носіїв на межі кремній - оксид в моделі Мак-Уортера. Встановлено, що в зразках з D-мікрodefектами не спостерігається суттєвої різниці в рівні шуму при різних напрямках проходження струму. Зроблено висновок про слабу, по зрівнянню з А-мікрodefектами, орієнтаційну залежність шуму D-мікрodefектів в монокристалі кремнію. Порівняння експериментальних та змодельованих спектрів шуму D-мікрodefектів показало, що змодельований шум по механізму Мак-Уортера є домінуючим в загальному шумі об'єму кристалу, на відміну від інших механізмів шуму, в яких передбачалося, що мікрodefект є межею в бікристалі.

Досліджено електричну та шумову активність МЗ різних типів, які були вирощені за методом Чохральського. Вивчення електрофізичних характеристик цих МЗ дозволило поділити їх на активні та пасивні. За даними термоактиваційної залежності опору визначена висота потенціального бар'єру на активній МЗ. В активних межах встановлено надлишковий шум, спектри якого в деяких ділянках мали ознаки  $1/f$ -шуму, а також демонстрували особливості генераційно-рекомбінаційного шуму. Встановлено також, що шум нейтральних МЗ був надлишковим та перевищував шум нейтрального матеріалу, що був розрахований за моделлю Хоухе. Порівняння екс-

периментальних шумових спектрів активних МЗ з розрахованими за відомими теоретичними моделями виявило, що окремі ділянки спектрів узгоджувалися з моделлю флуктуації концентрації. В активних МЗ, вирощених методом Чохральського, виявлено надлишковий шум, в якому проявляється суперпозиція шумових процесів, що характеризуються різним часом релаксації. Розбіжність значень часу релаксації, пов'язана майже з одним енергетичним рівнем центрів розсіяння, може бути задовільно пояснена на основі явища просторових флуктуацій висоти потенціального бар'єру на МЗ, і, внаслідок цього, ширини області просторового заряду на межі. Вперше виконане дослідження температурної залежності такого виду шуму дозволило визначити його характеристики.

Встановлен факт зміни нахилу шум-вольтової залежності в активній МЗ. Запропоновано модель цього явища, яка враховує вплив зворотно зміщеної частини ОПЗ на заселеність пасток на межі. Розрахунок відхилення функції заповнення пасток на МЗ від рівноважного значення проведено на основі кінетичних рівнянь, що описують зміну заселеності пастки на МЗ. Функція заповнення станів на МЗ має вигляд:

$$f_{\tau} = \frac{K_{lt} n_l + K_{rt} n_r}{K_{lt} n_l + K_{rt} n_r + K_{tl} + K_{tr}}$$

де  $n_l$  і  $n_r$  - концентрація домішки в об'ємі зерна відповідно ліворуч та праворуч від межі;

$K_{lt}$  і  $K_{tl}$ ;  $K_{rt}$  і  $K_{tr}$  - кінетичні коефіцієнти захоплення і емісії носіїв на пастках відповідно ліворуч та праворуч від межі.

В роботі розраховано залежність  $f_{\tau}$  від прикладеної напруги  $V$  в припущенні, що емісія носіїв з центрів захоплення в валентну зону ліворуч та праворуч від ОПЗ відбувається із значеннями кінетичних коефіцієнтів, що відрізняються від рівноважних:

$$K_{tl} = K_{tlo} \exp\left(\frac{-V}{kT/e}\right) \quad \text{і} \quad K_{tr} = K_{tro} \exp\left(\frac{V+V_s}{-kT/e}\right).$$

Розрахунок за цю моделлю показав зменшення значення функції заповнення з ростом прикладеної напруги та задовільне співпадіння встановленої залежності з результатами експерименту.

Досліджено надлишковий  $1/f$ -шум спеціальних штучних меж зерен (ШГЗ), виготовлених методом дифузійного зрощування. Дослідження електрофізичних характеристик ШМЗ дозволило встановити їх

відзнаку від властивостей однорідного матеріалу, визначити відсутність потенціального бар'єру на межах і класифікувати їх як пасивні. На всіх межах встановлено надлишковий по зрівнянню з однородним об'ємом зерна шум типу  $1/f$ . Порівняння результатів експерименту з результатами інших робіт по дослідженню струмових флуктуацій в кремнії показало, що в зразках з пасивними ІМЗ надлишковий шум не пов'язаний з фононим механізмом розсіювання. Сумісне дослідження температурних залежностей рухливості та рівня струмового шуму в зразках дозволило встановити єдину причину шуму на всіх досліджених ІМЗ – флуктуації рухливості носіїв заряду внаслідок їх розсіювання на дефектах розупорядкування кристалічної ґратки в області електрично нейтральної межі.

Встановлена залежність рівня струмового шуму на нейтральній МЗ від часу життя неосновних носіїв заряду. На основі комплексного аналізу експериментальних фактів і відомих теоретичних моделей генерації  $1/f$ -шуму, що враховують вплив повільних процесів релаксації кристалічної ґратки на виникнення шуму, найбільш імовірною причиною дослідженої залежності встановлена модуляція рухливості носіїв заряду в механічно деформованій області, що оточує МЗ, процесом пострекомбінаційної релаксації межі.

В заключенні сформульовані основні результати роботи:

1. В процесі впливу високих температур в монокристалах кремнія змінюється об'ємний розподіл мікрodefektів, їх зростання та перетворення одного типу мікрodefektів в інші за схемою: D-мікрodefekти → B-мікрodefekти → A-мікрodefekти – дислокації.

2. Струмовий шум мікрodefektів різного типу несуттєво впливає на процеси переносу носіїв заряду в монокристалі бездислокаційного кремнію, що визначають його застосування в електронній промисловості.

3. Природа надлишкового шуму в активних МЗ, вирощених методом Чохральського, пов'язана з флуктуаціями як заселеності локалізованих на МЗ електронних станів, так і ширини ОПЗ на межі внаслідок просторових флуктуацій висоти потенціального бар'єру на МЗ.

4. Зміна нахилу шум-вольтової характеристики активної МЗ обумовлена впливом зміни функції заповнення пасток на МЗ під дією електричного поля зворотно зміщеної частини ОПЗ.

5. Природа надлишкового шуму в спеціальних ІМЗ, виготовлених методом дифузійного зрощування, пов'язана з флуктуаціями рухливо-

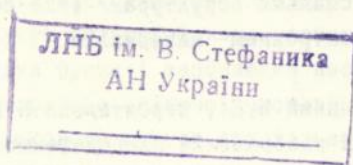
сті носіїв заряду внаслідок їх розсіювання на дефектах розупорядкування кристалічної ґратки в області електрично нейтральної межі.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Строителева Н.И., Таланин И.Е. Анализ электронномикроскопических изображений микродефектов в бездислокационном кремнии/ Компоненты и материалы электронной техники: Сб. науч. тр. / Отв. ред. Левинзон Д.И. - Киев: УМК ВО, 1989. - С.85-88.
2. Городокин В.А., Резниченко Т.П., Таланин И.Е., Строителева Н.И. Электронномикроскопические исследования структурного совершенства пластин кремния после ионной имплантации мышьяком/ Тез. докл. на обл. научн. конференции "Компоненты и материалы электронной техники". - Запорожье. - 1990. - С.45.
3. Таланин И.Е., Строителева Н.И. Трансформация микродефектов в бездислокационных монокристаллах кремния/ Тез. докл. на обл. научн. конференции "Компоненты и материалы электронной техники". - Запорожье. - 1990. - С.46.
4. Галкин П.Н., Левинзон Д.И., Таланин И.Е., Токарев В.П., Строителева Н.И., Цаболова М.Ю. Исследование структурного совершенства кремниевых обращенных эпитаксиальных структур/ Тез. докл. на 3 Всесоюзной конференции "Физика и технология тонких полупроводниковых пленок". - Ивано-Франковск. - 1990. - С.182-183.
5. Исследование структурного совершенства кремниевых структур на основе кремния. Отчет о НИР (заключительный) Отв. исполнитель Строителева Н.И./ Запорожский индустриальный институт. - Н ГР 02910048205. - Запорожье, 1990. - 77с.
6. Исследование структурного совершенства кремниевых структур, полученных методом обращенной эпитаксии. Отчет о НИР (заключительный) Отв. исполнитель Строителева Н.И./ Запорожский индустриальный институт. - Н ГР 01900008068. - Запорожье, 1991. - 44с.
7. Левинзон Д.И., Таланин И.Е., Токарев В.П., Строителева Н.И. Исследование процесса дефектообразования в кремниевых однослойных обращенных эпитаксиальных структурах/ Тез. докл. на Всесоюзной конференции по электронным материалам. - Новосибирск. - 1992. - С.251-252.
8. Левинзон Д.И., Таланин И.Е., Строителева Н.И. Анализ электронномикроскопических изображений микродефектов в бездислокационном кремнии/ Тез. докл. на 1 Украинской конференции молодых

- ученых и специалистов.- Ужгород.- 1992. -С.140-144.
9. Левинзон Д.И., Таланин И.Е., Городокин В.А., Строителева Н.И. Исследование трансформации ростовых микродефектов в процессе различных технологических обработок в кремнии/ Тез. докл. на 1 Украинской конференции молодых ученых и специалистов.- Ужгород.- 1992. -С.136-139.
10. Левинзон Д.И., Таланин И.Е., Токарев В.П., Строителева Н.И. Исследование процесса распада твердого раствора мышьяка в кремнии/ Тез. докл. на 4 Международной конференции "Физика и технология тонких полупроводниковых пленок".- Ивано-Франковск.- 1993.-С.89.
11. Левинзон Д.И., Головки О.П., Токарев В.П., Строителева Н.И. Эволюция микродефектов в кремниевых бездислокационных пластинах в процессе роста эпитаксиальных пленок/ Тез. докл. на 4 Международной конференции "Физика и технология тонких полупроводниковых пленок".- Ивано-Франковск.- 1993.- С.90.
12. Таланин И.Е., Левинзон Д.И., Токарев В.П., Строителева Н.И. Исследование дефектообразования в кремниевых обращенных эпитаксиальных структурах// УФЖ.- 1993.- т.38, N10.- С.1517-1519.
13. Ткаченко Н.Н., Строителева Н.И. Шум специальных искусственных границ зерен кремния/ Тез. докл. на н.-т. семинаре "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах".- Москва.- 1993.- С. 64-65.
14. Ткаченко Н.Н., Строителева Н.И. Колomoец Г.П., Поляк Л.Е., Кишнева М.Е., Степанцов Е.А. Электрический шум сплавных (искусственных) границ зерен// УФЖ.- 1994.- т.39, N3.- С.43-46.

*Журнал*









AB 30.270