

Чернівецький державний університет

ім. Юрія Федьковича

На правах рукопису

ТКАЧЕНКО

Микола Миколайович

ФЛУКТУАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ

НА МЕЖАХ ПОДІЛУ ЗЕРЕН ТА В ПОЛІКРИСТАЛАХ КРЕМНІЮ

01.04.10 – Фізика напівпровідників і діелектриків

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

Чернівці – 1994



AB 30.079

Робота виконана в Запорізькому індустріальному інституті
та в Інституті фізики напівпровідників АН України
Науковий консультант:

доктор фізико-математичних наук,
професор Н.Б. Лукьянчикова

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук,
професор В.А. Шендеровський
доктор фізико-математичних наук,
професор Б.М. Романюк
доктор технічних наук,
професор Г.Б. Сердюк

Провідна організація: Київський університет ім. Тараса Шевченка

Захист дисертації відбудеться 17 червня 1994 року о 15.00 на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.16.01. Чернівецького
державного університету ім. Юрія Федьковича (274012, Чернівці,
вул. Коцюбинського, 2, Велика фізична аудиторія).

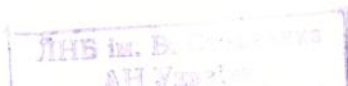
З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці
Чернівецького державного університету, вул. Лесі Українки, 23.

Відгуки на автореферат просимо надсилати за вказаною адресою
на ім'я вченого секретаря спеціалізованої вченої ради.

Автореферат розіслано " 6 " травня 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

М.В.Курганецький



Актуальність роботи. Інтерес до полікристалічного кремнію, як до відносно недорогого і, до того ж, простого у виготовленні матеріалу для резисторів, міжелементних з'єднань у мікросхемах, частин активних елементів транзисторів і сонячних батарей, виник вже більше двох десятиліть тому. Але, хоч вивченню провідності або фотоелектричним ефектам було присвячено велику кількість оригінальних робіт та монографій, на час початку цієї роботи проблема вивчення електричного шуму в полікристалах залишалася практично не зачепленою. В той же час, дослідження низькочастотного шуму, як відомо, дозволяє не тільки визначати експлуатаційні характеристики напівпровідника, але й зрозуміти тонкі особливості фізичних процесів, які зумовлюють формування основних параметрів об'єктів дослідження.

Зараз застосування полікристалічного кремнію проводиться так широко, що неможливо вже залишати осторонь проблему визначення характеристик електричного шуму в ньому, дослідження природи процесів, які зумовлюють флуктуації його електричних параметрів, пошук шляхів зниження шуму в цих елементах і приладах електроніки. Крім того, цілком очевидно стало, що нехтування при вивченні природи низькочастотного $1/f$ -шуму таким фізичним об'єктом, як полікристалічний кремній, виключає із досліджень багатий за властивостями матеріал, що містить практично всі елементи фізичних систем, із якими пов'язують походження $1/f$ шуму в напівпровідниках: пастки для носіїв та потенціальні бар'єри, шари слабо- та сильнолегованого напівпровідника, включення сторонніх матеріалів та поверхневі шари. Одним із найбільш потужних рушійних факторів цієї роботи стало бажання дослідити зв'язки механізму формування $1/f$ шуму із такими фундаментальними характеристиками напівпровідників, як час життя носіїв заряду τ , рухливість носіїв μ , їх кон-центрація n , про відносну роль яких у механізмі формування $1/f$ - шуму точиться дискусія вже не один десяток років.

Проведення шумових досліджень в напівпровідниках неможливо без знання чіткої картини електричних процесів в таких системах. Тому при вивченні флуктуацій в таких складних системах, якими є полікристали, неможливо без розв'язання задач аналітичного і екс-

периментального визначення особливостей формування електричних характеристик полікристалів, процесів, які відповідають за формування цих характеристик, впливу їх на механізм генерації флуктуацій в таких структурах. Досі задачі такої постановки в полікристалах не розв'язувались. Всі ці фактори зумовлюють актуальність і вагомість дослідження флуктуаційних процесів на межах зерен і в полікристалах. Крім того, по ходу роботи було розв'язано багато інших важливих супутних задач.

В зв'язку із цим основною метою цієї роботи стало:

1. Проведення експериментальних фізичних досліджень, спрямованих на визначення природи низькочастотного шуму в ізольованих межах поділу зерен та в полікристалічних зразках кремнію. Сформульовані на основі таких досліджень висновки дозволили створити не-суперечливу картину протікання нерівноважних процесів переносу та захоплення носіїв на межах зерен, виявити нові особливості змін заселеності межових станів, встановити основні закономірності фізики низькочастотних флуктуацій, які розвиваються на межах поділу зерен полікристалічного кремнію із потенціальними бар'єрами та без них.

2. На основі отриманих експериментальних фактів визначення ролі окремих фізичних ефектів в формуванні низькочастотних флуктуацій в полікристалічному кремнії за умов контрольованого впливу на шум μ -, τ - та p -факторів в широкому діапазоні величин для отримання нових даних з метою розв'язання проблеми встановлення природи $1/f$ - шуму в полікристалах.

3. Вивчення низькочастотного шуму в структурах, які містять межі поділу: в плівках і резисторах на їх основі, в гомо- і гетеро-переходах на основі полікристалічного кремнію, в транзисторних структурах із полікристалічними шарами в області емітера, визначення зв'язку шуму із іншими параметрами структур та ролі зміни заселеності зерномежових станів на характеристики шумових процесів, які з ними пов'язані.

4. Опрацювання досі недостатньо розвинутих моделей нерівноважних процесів рекомбінації, переносу носіїв та дифузії домішок на межах зерен напівпровідника.

Наукова новизна роботи полягає в такому:

1. Вперше виконано систематичне експериментальне дослідження низькочастотного шуму на межах поділу зерен різного виду: вирощених за методами Степанова та Чохральського, виготовлених методом дифузійного зрошування під тиском, та полікристалічних зразків, отриманих різними способами: методом лиття та газофазного осадження в реакторі пониженого тиску, що дозволило встановити причини та закономірності поведінки низькочастотного шуму в таких системах, а саме: відносну роль процесів надбар'єрної емісії та тунелювання носіїв в генерації $1/f$ -шуму при різних рівнях легування полікристалів; вплив процесів зміни заселеності зерномежових пасок на механізм генерації надлишкового шуму, який супроводжує протікання струму вздовж і впоперек меж поділу зерен; причину генерації надлишкового струмового шуму на електрично нейтральних межах зерен, яка полягає в виникненні флуктуацій рухливості в деформованих областях меж поділу.

2. Досліджено зв'язок $1/f$ шуму, часу життя неосновних носіїв, механічної міцності полікристалічних зразків та віднайдено кореляцію зміни цих параметрів, яка спостерігається із зміною розмірів зерен та їх рекомбінаційною активністю, що дозволяє стверджувати про існування глибинного зв'язку між механізмом утворення $1/f$ -шуму та станом кристалічної ґратки полікристалла, в тому числі характером її пострекомбінаційних релаксацій.

3. Віднайдено явище електростимульованої зміни опору меж зерен та полікристалів в широкому діапазоні рівнів легування і на основі комплексного аналізу температурної залежності шуму та опору полікристалів доведено, що причиною цього явища є електродифузійні процеси в області меж поділу зерен.

4. Опрацьовано та розвинуто нові аспекти моделей змін енергетичної структури полікристалів біля меж зерен, рекомбінаційних процесів на межах поділу, формування вольтамперних характеристик в полікристалічних бар'єрних структурах: фотоперетворювачах та транзисторах, прискореної дифузії в сильнолегованих напівпровідниках та межах поділу зерен.

Практична цінність роботи полягає в такому.

1. Встановлено рівень і характер поведінки низькочастотного шуму в полікристалічних резисторах, фотопретворювачах та транзисторах із полікристалічними шарами в емітері, що дозволить тепер обирати оптимальні з точки зору можливості зниження шуму режими їх виготовлення та використання.

2. Розроблено конструкції фотопретворювачів, в яких оптимізовано ряд елементів для збільшення їх ефективності, в тому числі області потенціального бар'єру та форма контактної сітки. Розроблені конструкції гетеропереходних транзисторів, в яких передбачається значне збільшення їх швидкодії. Створені моделі розрахунку їх характеристик, в тому числі і шумових.

3. Розроблено методику електростимульованої зміни опору полікристалічних резисторів, за рахунок чого створено інтегральні схеми затримки електричних сигналів із можливістю регулювання параметрів мікросхем в широкому діапазоні часів затримки та температурних коефіцієнтів, які характеризують зміни цих параметрів.

4. Матеріали дисертації разом з роботами співавторів із Білоруського державного університету лягли в основу підготовленої до друку в видавництві "Університетське", м. Мінськ, монографії А.К.Федотова, А.А.Патріна, М.М.Ткаченка, І.Б.Снапіро "Електронні процеси на межах зерен кремнію і германію".

На захист виносяться:

1. Результати дослідження флуктуаційних процесів на межах поділу зерен та полікристалічних шарах кремнію, а також віднайдені в процесі досліджень специфічні закономірності виникнення та поведінки низькочастотних електричних флуктуацій в цих об'єктах та розроблені для їх пояснення моделі, а саме:

1.1. Виявлена зміна закону зростання шумової активності станів на межах поділу зерен та спосіб розрахунку змін функції заповнення цих станів за шумовими вимірами.

1.2. Експериментально встановлені факти температурної стабільності $1/f$ -шуму полікристалічних шарів в широкому температурному інтервалі, які пов'язані із процесами тунелювання носіїв крізь потенціальні бар'єри на межах поділу зерен.

1.3. Кореляція між величиною $1/f$ -шуму, часом життя неосновних носіїв та механічною міцністю шарів полікристалічного кремнію.

1.4. Закономірності впливу модуляції зарядового стану зерно-межових пасток на процес генерації надлишкового шуму струму, який протікає вздовж і впоперек меж поділу зерен.

1.5. Виникнення надлишкового шуму на межах поділу зерен без потенціальних бар'єрів пов'язано із процесом флуктуації рухливості в деформованих областях, які оточують межі поділу зерен.

2. Електростимульовані явища зміни опору полікристалічного кремнію та трансформації шуму, виявлені в діапазоні рівнів легувань $10^{17} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

3. Виникнення низькочастотного шуму в полікристалічних гомо-і гетеропереходних структурах зумовлено фізичними процесами, які відбуваються на потенціальних бар'єрах на межах поділу: при малих струмах - в області просторового заряду макроскопічного р-п переходу, а при великих струмах - в квазінейтральних областях цих структур.

4. Ідея, що однією із причин підвищеної швидкості дифузії домішок в сильнолегованих напівпровідниках є зміна законів статистики при концентраціях домішок, більших, ніж густина станів в зоні, а також застосування цієї ідеї для пояснення електростимульованої зміни опору полікристалічного кремнію електростимульованою дифузією домішок в області меж поділу зерен.

5. $1/f$ -шум в бар'єрних структурах омичних контактів, діодах типу метал-напівпровідник на основі ZnS, гетеропереходах на основі ZnSe-GaAs, GaAs-AlGaAs, ITO - кремній пов'язано із флуктуацією заселеності пасток на межах поділу, а зміна заселеності під впливом світла і напруги змінює характер $1/f$ -шуму і закономірності його залежності від електричної напруги.

6. Результати дослідження характеристик та ідеї конструювання резисторів, фотоперетворювачів, біполярних транзисторів, мікросхем ліній затримки електричних сигналів із використанням полікристалічного кремнію.

Вірогідність одержаних результатів фізичних експериментів та сформульованих основних висновків, підтверджується дотриманням необхідних вимог до метрологічного забезпечення дослідів і обробки

їх результатів, узгодженням між розвинутими модельними уявленнями та отриманими експериментальними даними. Справедливість більшості наукових висновків, опублікованих автором за останні роки, було підтверджено в роботах, виконаних в інших лабораторіях колишнього Радянського Союзу та закордону. До таких висновків належать виявлені особливості проявлення μ - та p -флуктуацій на межах зерен та в полікристалах, електростимульованої зміни опору в полікристалах при високих рівнях легування, закономірності поведінки шуму в біполярних транзисторах. Що стосується тих результатів, які вперше були отримані в цій роботі: залежність інтенсивності флуктуацій напруги на межах зерен від електричного поля, прикладеного до меж; кореляція поведінки низькочастотного $1/f$ -шуму, часу життя неосновних носіїв та міцності шарів полікристалічних зразків; проявлення шуму тунельного типу в межах зерен та полікристалах; виявлення шумової активності електрично пасивних меж зерен; електростимульовані зміни опору та шуму полікристалічних зразків в широкому діапазоні рівнів легування; закономірності проявлення шуму квазінейтрального емітера біполярних транзисторів в шумі емітерного та колекторного струму, логічно впливають із всього комплексу шумових та електрофізичних досліджень, проведених в цій роботі, а також із залучених до їх пояснення результатів теоретичних та експериментальних робіт, виконаних в провідних вітчизняних та закордонних наукових закладах.

Публікації. В дисертації відбито результати, викладені в 41 наукових публікаціях та 8 авторських свідоцтвах автора.

Апробація роботи Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на Всесоюзній конференції "Фізичні процеси в гетеропереходах" (Кишинів, 1974 р.), V Європейській конференції з досліджень твердотілих приладів (Франція, Гренобль, 1975 р.), IV Всесоюзній нараді "Фізика, хімія і технологічні застосування напівпровідників A^2B^6 " (Одеса, 1976 р.), IX Міжнародному симпозіумі з детекторів фотонів (Угорщина, Вишеград, 1980 р.), II Всесоюзній конференції "Структура та фізичні властивості меж зерен в металах і напівпровідниках" (Воронеж, 1987 р.), II, IV, V, VI Всесоюзних і міжнародних конференціях "Флуктуаційні явища в фізичних системах" (Вільнюс, 1979 р., Пушино, 1985 р., Паланга, 1988, 1991 р.р.), на засіданнях Всесоюзної науково-технічної школи "Шумові і деградаційні процеси в напівпровідникових приладах" (Москва, 1989 р., 1993 р., Чорноголовка, 1990 р.), на XII Всесоюзній конференції по фізиці напівпровідників (Київ, 1990 р.), на VII Міжнародній конференції "Мікроелектроніка-90" (Мінськ, 1990 р.), на Другій

науковій сесії Наукового Товариства ім. Т.Г. Шевченка (Львів, 1991р.), на Міжнародній конференції "Мікроелектроніка'92" (Варшава, 1992р.), семінарах в Інституті фізики напівпровідників АН України (Київ, 1973-1994 р.р.), IV Міжнародній конференції "Фізика і технологія тонких плівок" (Івано-Франківськ, 1993р.).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 5 глав, заключення, додатків та списку літератури, який містить 288 найменувань. Дисертація викладена на 344 стор., включаючи машинописний текст, 83 рисунки та 5 таблиць.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, викладено її мету, новизну, практичну цінність, а також основні наукові положення, які виносяться на захист, наведені данні, що стосуються апробації роботи і її основних матеріалів.

В главі 1 описані результати впливу характерних особливостей меж поділу зерен на основні властивості полікристалів, що зумовляють їх відмінність від монокристалічних напівпровідників. Це пов'язано із одним із кількох перелічених далі факторів (або кількома разом): утворенням на межах поділу зерен механічно деформованих шарів, сегрегацією домішок, утворенням на межах поділу пасток, які слугують центрами прилипання та рекомбінації вільних носіїв, а захоплення носіїв на центри, розташовані на межі зерна, приводить до виникнення шарів просторового заряду.

В рамках моделі стінки дислокацій, які розташовані на відстані h одна від одної по вісі "у", встановлені такі зміни зонної структури полікристалів по зрівнянню із монокристалічним матеріалом: внаслідок механічної деформації напівпровідника в області межі поділу зерна подалік (по вісі "х") від області межі поділу зерна вплив деформації такий, що дно зони провідності (E_C) зсувається до низу, а вершина валентної зони (E_V) - догори, і, таким чином, ширина забороненої зони виявляється менша, ніж у недеформованого кремнію. Поблизу межі зерна ($X=x/h \leq 1$) ширина забороненої зони може як збільшитися, так і зменшитися, що визначається, в основному, зміною характеристик валентної зони:

$$\Delta E_c = \frac{b(1-2\nu)}{4\pi(1-\nu)} (2\varepsilon_d + \varepsilon_u) \operatorname{ctg} \gamma, \quad (1)$$

$$\Delta E_v = \frac{b(1-2\nu)}{4\pi(1-\nu)} (c \cdot \operatorname{ctg} \gamma - 2a \cdot \operatorname{ctg} \gamma). \quad (2)$$

де ν - коефіцієнт Пуассона, b - величина вектора Бюргерса дислокації, ε_u , ε_d , c , d - константи деформаційного потенціалу. В кремнії значення цих констант такі, що в останній формулі другий доданок більше першого в 5-7 разів, що може призвести до появи "ям" і "горбів" в структурі зон. Таким чином вдалося показати, що внаслідок механічної деформації поблизу межі зерна може утворюватись досить складний несиметричний профіль зон.

Далі проаналізовано поширені відомості про створення потенціальних бар'єрів заперного типу на межах зерен і розраховано параметри збагачувального шару поблизу межі поділу зерна і величину дифузійної довжини неосновних носіїв поблизу такого шару. Показано, що дифузійна довжина в полікристалічному матеріалі є така величина, яка залежить від умов спостереження і може бути набагато більше розміру зерен полікристалів д:

$$L_{\text{диф}} = d \frac{L_g}{(ad)^{1/2}} \gg d, \quad (3)$$

де $L_g = \left(\frac{\chi kT}{2\pi e^2 p_0} \right)^{1/2}$ - дебаєвська довжина, $a = \frac{\chi kT}{\pi e^2 N_s}$, p_0 - концентрація дірок в квазінейтральній області, N_s - поверхнева густина заряду на межі поділу, а нерівність (3) получено за умови $\frac{ad}{L_g^2} \ll 1$.

Вперше розглянуто фотомігнітний ефект в полікристалах і показано, що при великих значеннях коефіцієнту дифузії носіїв заряду і малій швидкості рекомбінації носіїв на межах поділу зерен ефективна дифузійна довжина неосновних носіїв може стати набагато більше розміру зерен. В протилежному випадку ефективна дифузійна довжина виявляється порядку розмірів зерна. Отримано числові співвідношення між ефективною дифузійною довжиною неосновних носіїв в полікристалічних зразках із дифузійною довжиною в монокристалічному матеріалі за тих самих умов спостереження фотомігнітного ефекту, що дозволяє тепер інтерпретувати результати його вимірювання для

визначення характерних параметрів полікристалічного напівпровідника.

Переходячи від особливостей меж зерен, пов'язаних із поведінкою вільних і захоплених носіїв заряду, до особливостей поведінки домішок на ділянках меж зерен, вдалося запропонувати оригінальну модель прискореної дифузії в високолегованих напівпровідниках та на межах поділу зерен. Збільшення швидкості дифузії пояснюється зміною статистики заряджених частинок в сильнолегованих напівпровідниках та межах поділу зерен при високій концентрації домішок в них, коли $N/N_c > 1$, де N , N_c — концентрація домішок і густина станів в зоні провідності відповідно. Це призводить до виникнення в області межі зерна електричного поля, яке значно прискорює дифузію. Показано, що дрейфовий потік $j_{др}$ іонізованих атомів домішок описується таким співвідношенням :

$$j_{др} = (\pi/6)^{1/3} (N/N_c)^{2/3} D_0 \nabla N. \quad (4)$$

Таким чином, врахування виродження дозволяє пояснити нелінійність дифузії, коли коефіцієнт дифузії D сильно залежить від концентрації домішки N : $D(N) \sim N^{2/3}$. Це набагато краще відповідає відомим експериментальним даним, чим висновки інших розповсюджених аналітичних моделей, що, однак, не виключає їх справедливості.

Далі в цій главі розглянуті відомі на час початку роботи дані про дослідження струмового шуму полікристалів кремнію і застосування моделі флуктуації рухливості для пояснення віднайденної залежності рівня $1/f$ -шуму від концентрації легуючої домішки в полікристалах. Після з'ясування некоректності застосування моделі до деяких із наведених експериментальних результатів зроблено висновки, що до цього часу при розгляді проблеми шуму полікристалів напівпровідників зовсім випущено можливість існування шумів тунельних струмів на межах зерен.

Аналіз літературних джерел дозволив заключити, що в р-п гомо- і гетеропереходах на основі полікристалічного кремнію низькочастотний шум взагалі не досліджували, а для транзисторних структур із полікристалічним емітером, відома лише одна робота, в якій було звернуто увагу на шум полікристалічного емітера.

Наступний опис методики проведення дослідження шумових і електричних характеристик меж зерен кремнію, виконаний в цій главі, завершується визначенням точності результатів вимірювання, яка у вибраній методиці вимірювання шуму способом порівняння при обраних для проведення цієї роботи приладах була не гірше 12%.

В главі 2 наведено результати проведеного комплексного дослідження шуму меж поділу зерен, виготовлених за різними технологіями: за методами Чохральського, Степанова, отриманих способом дифузійного зрощування. Зразки було виготовлено у вигляді структур із зондами і проведено дослідження основних електричних характеристик: залежності опору зразків, концентрації і рухливості носіїв заряду в них від температури, визначення висот потенціальних бар'єрів на межах поділу зерен. Дослідження електричних характеристик дозволило поділити зразки на електрично активні - в них існував потенціальний бар'єр на межах поділу зерен, і на електрично пасивні - в них не було виявлено існування потенціального бар'єру на межах поділу зерен. За результатами структурного дослідження зразків було визначено параметри меж поділу зерен в рамках понять моделі співпадаючих вузлів. В першому випадку (наявність потенціального бар'єру) зразки належали до меж зерен із Σ 9,11,13, в другому (відсутність бар'єру) - до класу Σ 3, але в другому випадку електронномікроскопічні дослідження показали існування 2-5 мікронного шару деформованої області поблизу меж поділу зерен.

Застосування зондової методики і вибір електричних режимів дозволили позбутися контактних шумів. Встановлено такі основні характеристики низькочастотного шуму меж поділу зерен.

В електрично активних межах зерен, вирощених за методом Степанова, надлишковий шум був пов'язаний саме із межою поділу і в області низьких частот спектр шуму був за формою близький до лоренцівського, але величина його виявилась набагато більше за рівень шуму, який відповідав би флуктуаціям процесу захоплення носіїв на дискретний рівень пастки на межі поділу зерна. Із зростанням частоти форма спектру шуму змінювалася на $1/f$ -тип. Припускаючи, що, як і у випадку межі поділу кремній - оксид кремнію, потенціальний бар'єр на межі поділу зерна неоднорідний в просторі, вдалося пояснити високий рівень і специфічну форму спектру надлишко-

вого шуму. При цьому використали модель "транзистора на пастках", тобто відому модель модуляції великого надбар'єрного струму малим струмом захоплення носіїв на пастки, що змінює зарядовий стан пасток і, таким чином, висоту потенціального бар'єру на межі поділу зерна.

За величиною шуму і формою його спектру $S_v(f)$ розраховані параметри пасток, відповідальних у такий спосіб за модуляцію висоти потенціального бар'єру: їх концентрація N_{CB} , переріз захоплення S_p , стала часу релаксації τ , а також стандартне відхилення σ_v значення висоти V_{CB} потенціального бар'єру від середнього значення висоти $\overline{V_{CB}}$, тобто ступінь неоднорідності потенціального бар'єру, оскільки в рамках "транзисторної моделі" знайдено зв'язок між $S_v(f)$ і цими параметрами пасток:

$$S_v(f) = \frac{2kTq^2N_{CB}}{C^2 2\pi f A (2\pi\sigma_s^2)^{1/2} \Omega} \int_{-\infty}^{\infty} \ln [1 + \Omega^2 \exp(2U_s)] \times \\ \times \exp\left(-\frac{U_s^2}{2\sigma_s^2} - U_s\right) dU_s, \quad (5)$$

$$\text{де } U_s = q/kT (V_{CB} - \overline{V_{CB}}),$$

$$\Omega = 2\pi f \tau, \quad \Omega \exp U = 2\pi f \tau.$$

Порівняння залежностей густин зерномежових станів від енергії $N_{CB}(E)$, розрахованих за результатами вимірювань електричних і шумових характеристик, показало, що в шумових процесах бере участь набагато більше зерномежових станів, ніж в процесах утворення потенціального бар'єру на межі зерна. Віднайдено, що у всіх типах активних меж поділу зерен величина перерізу захоплення пасток, зміна заселеності яких визначала величину $1/f$ -шуму, залежить від напруги, прикладеної до межі зерна, як це було відзначено в для меж зерен, вирощених за методом Чохральського, в роботах, виконаних в інституті ім Макса Планка, Німеччина, результати яких були опубліковані раніше за результати цієї роботи. Крім того, в дослідженнях, виконаних по темі цієї дисертації, було виявлено, що шум-вольтова залежність активних меж зерен "заломлюється" при невеликих ($V \approx 0,1$ В) зміщеннях. На жаль, в роботах попередників за-

лежність перерізу захоплення від напруги не змогли пояснити, а на "заломлення" шум-вольтової залежності не звернули уваги.

В межах зерен, вирощених за методом Чохральського, віднайдено надлишковий шум, спектри якого мали як довгі ділянки $1/f$ -типу, так і вигини, які характерні для генераційно-рекомбінаційних шумів. Таким чином, можна було вважати, що особливості спектрів шуму відповідали механізму модуляції висоти потенціального бар'єру суперпозицією кількох пасток різної глибини і високої концентрації на фоні шуму континіуму пасток низької концентрації. Змодельовані температурні залежності величини шуму у випадках флуктуації рухливості носіїв і флуктуацій заселеності пасток, розташованих на межі поділу зерна, показали, що саме за температурною залежністю можна було б дискримінувати механізми μ - та n - шуму. Дослідження температурної поведінки надлишкового шуму меж поділу зерен дозволило однозначно встановити, що в межах зерен, вирощених за методом Чохральського і вивчених в цій роботі, реалізується саме суперпозиція кількох шумових процесів, пов'язаних із флуктуаціями заселеності пасток на межах зерна.

Проявлення ефекту зміни нахилу шум-вольтових залежностей в різних типах меж поділу зерен примусило шукати загальну причину цього явища. В результаті вдалося запропонувати його модель, яка полягає у врахуванні потоків обміну зерномезових пасток носіями із правим (r) та лівим (l) зернами, що впливає на величину функції заповнення f_c пасток, і, таким чином, на шум межі поділу зерна. Із використанням кінетичного рівняння було отримано:

$$f_{t_0} = \frac{K_{lt} n_l + K_{rt} n_r}{K_{lt} n_l + K_{rt} n_r + K_{tl} + K_{tr}}, \quad (6)$$

де $n_{l,r}$ - концентрація носіїв ліворуч і праворуч від межі поділу відповідно, K_{lt} і K_{rt} - кінетичні коефіцієнти захоплення носіїв заряду на пастки, K_{tl} і K_{tr} - кінетичні коефіцієнти емісії носіїв з пастки до зони, що залежать від напруги. Показано, що зміни кінетичних коефіцієнтів внаслідок порушення рівноваги при прикладенні напруги до межі поділу можуть призвести до змін f_c по зрівнянню із її рівноважним значенням. Виходячи із того, що величина шуму S_v пропорційна добутку $N_{cb} \cdot f_c$, визначив значення

вого шуму. При цьому використали модель "транзистора на пастках", тобто відому модель модуляції великого надбар'єрного струму малим струмом захоплення носіїв на пастки, що змінює зарядовий стан пасток і, таким чином, висоту потенціального бар'єру на межі поділу зерна.

За величиною шуму і формою його спектру $S_v(f)$ розраховані параметри пасток, відповідальних у такий спосіб за модуляцію висоти потенціального бар'єру: їх концентрація N_{cb} , переріз захоплення S_p , стала часу релаксації τ , а також стандартне відхилення σ . Значення висоти V_{cb} потенціального бар'єру від середнього значення висоти $\overline{V_{cb}}$, тобто ступінь неоднорідності потенціального бар'єру, оскільки в рамках "транзисторної моделі" знайдено зв'язок між $S_v(f)$ і цими параметрами пасток:

$$S_v(f) = \frac{2kTq^2N_{cb}}{C^2 2\pi f A (2\pi\sigma_s^2)^{1/2} \Omega} \int_{-\infty}^{\infty} \ln [1 + \Omega^2 \exp(2U_s)] \times \\ \times \exp\left(-\frac{U_s^2}{2\sigma_s^2} - U_s\right) dU_s, \quad (5)$$

де $U_s = q/kT (V_{cb} - \overline{V_{cb}})$,

$$\Omega = 2\pi f \tau, \quad \Omega \exp U = 2\pi f \tau.$$

Порівняння залежностей густин зерномежових станів від енергії $N_{cb}(E)$, розрахованих за результатами вимірювань електричних і шумових характеристик, показало, що в шумових процесах бере участь набагато більше зерномежових станів, ніж в процесах утворення потенціального бар'єру на межі зерна. Віднайдено, що у всіх типах активних меж поділу зерен величина перерізу захоплення пасток, зміна заселеності яких визначала величину $1/f$ -шуму, залежить від напруги, прикладеної до межі зерна, як це було відзначено в для меж зерен, вирощених за методом Чохральського, в роботах, виконаних в інституті ім Макса Планка, Німеччина, результати яких були опубліковані раніше за результати цієї роботи. Крім того, в дослідженнях, виконаних по темі цієї дисертації, було виявлено, що шум-вольтова залежність активних меж зерен "заломлюється" при невеликих ($V=0,1$ В) зміщеннях. На жаль, в роботах попередників за-

лежність перерізу захоплення від напруги не змогли пояснити, а на "заломлення" шум-вольтової залежності не звернули уваги.

В межах зерен, вирощених за методом Чохральського, віднайдено надлишковий шум, спектри якого мали як довгі ділянки $1/f$ -типу, так і вигини, які характерні для генераційно-рекомбінаційних шумів. Таким чином, можна було вважати, що особливості спектрів шуму відповідали механізму модуляції висоти потенціального бар'єру суперпозицією кількох пасток різної глибини і високої концентрації на фоні шуму континіуму пасток низької концентрації. Змодельовані температурні залежності величини шуму у випадках флуктуації рухливості носіїв і флуктуацій заселеності пасток, розташованих на межі поділу зерна, показали, що саме за температурною залежністю можна було б дискримінувати механізми μ -та n -шуму. Дослідження температурної поведінки надлишкового шуму меж поділу зерен дозволило однозначно встановити, що в межах зерен, вирощених за методом Чохральського і вивчених в цій роботі, реалізується саме суперпозиція кількох шумових процесів, пов'язаних із флуктуаціями заселеності пасток на межах зерна.

Проявлення ефекту зміни нахилу шум-вольтових залежностей в різних типах меж поділу зерен примусило шукати загальну причину цього явища. В результаті вдалося запропонувати його модель, яка полягає у врахуванні потоків обміну зерномежових пасток носіями із правим (r) та лівим (l) зернами, що впливає на величину функції заповнення f_t пасток, і, таким чином, на шум межі поділу зерна. Із використанням кінетичного рівняння було отримано:

$$f_t = \frac{K_{lt} n_l + K_{rt} n_r}{K_{lt} n_l + K_{rt} n_r + K_{tl} + K_{tr}}, \quad (6)$$

де $n_{l,r}$ - концентрація носіїв ліворуч і праворуч від межі поділу відповідно, K_{lt} і K_{rt} - кінетичні коефіцієнти захоплення носіїв заряду на пастки, K_{tl} і K_{tr} - кінетичні коефіцієнти емісії носіїв з пастки до зони, що залежать від напруги. Показано, що зміни кінетичних коефіцієнтів внаслідок порушення рівноваги при прикладенні напруги до межі поділу можуть призвести до змін f_t по зрівнянню із її рівноважним значенням. Виходячи із того, що величина шуму S_v пропорційна добутку $N_{св} \cdot f_t$, визначив значення

відношення величини S_v на початковій ділянці шум-вольтової залежності, де її можна було б екстраполювати залежністю $S_v \propto V^2$, до величини S_v , яка експериментально спостерігається при даній напрузі, а також визначивши $N_{\text{св}}(E)$ при данному положенні рівня Фермі, можна встановити характер змін f_c . Розрахунок за цією моделлю продемонстрував добре співпадіння із результатами експерименту: залежність функції заповнення пасток від електричної напруги, розрахована за цією моделлю, виявилася такою ж, як і залежність функції заповнення, що була розрахована за результатами шумових вимірювань.

Протікання струму вздовж меж поділу зерен також супроводжується виникненням надлишкового шуму, хоч величина його виявилась меншою, ніж у випадку проходження струму перпендикулярно до межі поділу. Причина виникнення $1/f$ -шуму полягає в модуляції величини струму та перерізу нейтральної області напівпровідника, по якій він проходить, внаслідок захоплення носіїв на зерномежові пастки та модуляції ширини потенціального бар'єру на межі поділу зерна.

При вивченні всіх типів меж зерен, на яких не існувало потенціальних бар'єрів, вдалося виявити, що електрично пасивні межі зерен, які за рівнем величини опору, а також за характером його температурної поведінки абсолютно не відрізнялися від матеріалу зерна, демонструють набагато вищий рівень $1/f$ -шуму, ніж це властиво матеріалу зерна.

Дослідження шуму електрично нейтральних меж зерен, отриманих методом дифузійного зрощування під тиском, продемонструвало, що відсутність потенціального бар'єру на межах зерен не заважає генерації досить великого $1/f$ -шуму на таких межах, що, маючи на увазі встановлену нами підвищену шумову активність електрично нейтральних меж зерен, вже не викликало здивування. В той же час, незрозумілою залишалася причина цього явища. Для того, щоб отримати додаткову інформацію для проясненню питань щодо цієї проблеми, були проаналізовані шумові характеристики омичних контактів до напівпровідника. Для цього були обрані структури на основі сульфіду цинку. Довгий час створити омичні контакти до таких структур не вдавалося. Причиною цього була, мабуть, мала величина електронної спорідненості низькоомного сульфіду цинку, внаслідок чого навіть матеріали із досить невеликою роботою виходу утворюють із

ним контакти, які характеризуються значною висотою потенційного бар'єру, і, отже, високим опором. Створення низькоомних омичних контактів практично відкрило шлях до розробки в Інституті напівпровідників АН України блакитних світлодіодів на основі контактів метал - сульфід цинку, шумові властивості яких досліджені в главі 3.

Виявилось, що струмові шуми в зразках омичних контактів були надлишковими типу $1/f$, причому між їх шумовими характеристиками і якістю вдалося знайти тісний взаємозв'язок: рівень шуму в контактах із більшим контактним опором R_c завжди виявлялася більшим; сходинкове підвищення R_c , яке відбувалося при пониженні температури, супроводжувалась зростом S_1 , причому кожній сходинці на кривій $R_c(T)$ відповідав "сплеск" залежності $S_1(T)$. Останнє дозволило, враховуючи, що максимуми на кривих $S_1(T)$ обумовлені, очевидно, зміною заселеності рівнів на підконтактній поверхні, що відбувається при зміні температури, припустити, що велике R_c зумовлено наявністю на поверхні рівнів акцепторного типу. Порівняння залежності рівня $1/f$ -шуму контактів від температури із температурною залежністю питомого опору самого монокристалу дало можливість вивести, що рівень контактних шумів пропорційний величині питомого опору, що, як вдалося показати, легко пояснити тунельним характером струму в області контакту. На основі всього вищенаведеного зроблено висновок про те, що на омичному контакті до низькоомного сульфиду цинку також існує деякий (очевидно) невеликий бар'єр, а омичність пояснюється його достатньою прозорістю.

Продовження дослідження $1/f$ -шуму нейтральних штучних меж зерен дозволило встановити, що в таких об'єктах відсутній шум, пов'язаний із бар'єрним механізмом долаття носіями області меж зерен, а також фононним механізмом розсіяння носіїв в цій області. На основі аналізу температурної залежності рухливості і шуму доведено, що його причина - флуктуації процесу розсіяння носіїв заряду на дефектах нейтральної деформованої області навколо межі поділу зерна.

В главі 3 вивчено шум полікристалічних шарів кремнію, отриманих методом газозафазного осадження і легованих способом іонної імплантації бору в діапазоні концентрацій $2 \cdot 10^{17}$ - $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Зразки для досліджень були виготовлені у вигляді резисторів із

кількома зондовими контактами. За температурними залежностями опору резисторів були визначені висоти потенціальних бар'єрів на межах поділу зерен і встановлено залежність висот бар'єрів від рівня легування полікристалу. За результатами виміру питомого опору, вольтамперних характеристик були розраховані величини густини зерномежових станів в резисторах і було доведено, що із зростанням рівня легування у всьому дослідженому діапазоні концентрацій N_d росте від $7 \cdot 10^{11}$ до $5 \cdot 10^{12} \text{ eB}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ і спадає із наближенням до середини забороненої зони при одному рівні концентрації.

Шум всіх вивчених резисторів був надлишковим типу $1/f$ аж до частоти 10 кГц і струму 10^{-3} A . За всіх інших рівних умов шум був тим більше, чим меншим був рівень легування плівки. За шумовими даними було розраховано розподіл густини зерномежових станів по енергії в рамках модифікованої моделі рухливості шляхом складання та розв'язання системи рівнянь, які пов'язують шум $S_i(f)$, сталу Хоуге α_n і падіння напруги на лівій V_L і правій V_R частинах області просторового заряду на межі поділу зерна площини A із концентраціями домішки в зернах N_d , пасток на межі поділу N_{CB} та висотою зерномежового бар'єру V_{CB} :

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{S_i(f) 3kTAN_{CB} \epsilon \epsilon_0 f}{(qI)^2 \alpha_n} \cdot \left(\frac{qN_d}{2\epsilon \epsilon_0} \right)^{1/2} = (V_{CB} - V_L)^{1/2} \exp \left(\frac{q(V_{CB} - V_L)}{kT} \right) + \\ & + (V_{CB} + V_R)^{1/2} \exp \left(\frac{q(V_{CB} + V_R)}{kT} \right) \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$V = (V_L + V_R) \cdot N_{CB}$$

Було виконано порівняння цього розподілу із даними, отриманими із вимірювань опору та вольтамперних характеристик. Цікаво відзначити, що разом із підтвердженням загального характеру залежності $N_{CB}(E)$ було доведено, що за шумовими даними N_{CB} виходить набагато більша, ніж за вимірами електричних характеристик. Це стало ще одним підтвердженням віднайденної нами і описаної в попередній главі підвищеної по зрівнянню із матеріалом зерен шумової активності меж зерен навіть у тих випадках, коли в електричних характеристиках (висота потенціального бар'єру і т.і.) електричної

активності меж зерен не відмічається. Таким чином, у полікремнієвих резисторах низького рівня легування всі експериментальні результати добре узгоджуються із результатами, які передбачаються моделлю флуктуацій рухливості, якщо в ній врахувати вплив модуляції заселення зерномежових станів, який змінюється під впливом струму. Але при більш високих рівнях легування розбіжності між теорією і моделлю були настільки великими, що це вимагало кардинальної зміни підходу в інтерпретації даних. Логічно було шукати розв'язку задачі на шляху дослідження типових фізичних змін, які відбуваються в потенціальних бар'єрах при зростанні рівня легування напівпровідника. Найбільш характерною зміною при цьому є збільшення відносної ролі тунелювання і, відповідно, зменшення відносної ролі термоемісії у визначенні загального струму через потенціальний бар'єр. Для того, щоб мати достатньо вагомі аргументи для визначення впливу на шум цього ефекту, було звернуто увагу на результати проведеного в цій роботі дослідження шуму тунельних струмів контактів метал-напівпровідник на основі сульфиду цинка.

Було досліджено $1/f$ -шум, який виникав при протіканні прямих тунельних струмів, що викликали ефективну блакитну електролюмінесценцію в контактах золото - сульфід цинка. На основі співпадіння рівня таких шумів і шумів ерс холостого ходу, які виникають при освітленні контактів, зроблено висновок про те, що $1/f$ -шуми супроводжують процес протікання прямого струму крізь контакти. Відсутність видимої температурної залежності шумів при сталих струмах дозволила встановити, що $1/f$ шум супроводжує тунельний струм основних носіїв. Спільний аналіз шумових та електричних характеристик контактів дозволив відповісти на питання про джерело шуму, яким виявилися флуктуації заселеності центрів на контактній поверхні потенціальних бар'єрів. Екстремуми в струмовій залежності шуму з'являлися в тому випадку, коли пересування рівня Фермі при електричному зміщенні контактів приводило до виключення активно шумлячих центрів із процесу генерації шуму. Температурні залежності положення цих екстремумів повністю відповідали висловленим припущенням про механізм генерації віднайдених $1/f$ -шумів в контактах метал - напівпровідник. Змодельовано струмову залежність $1/f$ -шуму, який супроводжує струм в контакті метал-тонкий діелектрик-напівпровідник і пов'язаний із флуктуаціями пасток на

межі поділу. Використання встановлених із вольтамперних і вольтфарадних характеристик параметрів кожної частини структури, дозволило показати добре узгодження експериментальних даних із властивостями моделі.

Далі було змодельовано температурну залежність шуму, який супроводжував би термоємисійні струми через потенціальний бар'єр. Порівняння цієї залежності із експериментальними даними для полікристалічних плівок високих рівнів легування доводило, що для пояснення залежностей, які ми спостерігали, треба залучати поняття про шум тунельних струмів. Температурні залежності шуму в зразках різного рівня легування показали поступову зміну характеру шумів: якщо при низьких рівнях легування він супроводжував термоємисійний струм, то при високих – тунельний. Зміна температурних залежностей опору в цьому діапазоні рівнів легування зразків полікремнієвих резисторів повністю підтверджувало попередні припущення.

В полікристалічних резисторах, вивчених в цій роботі, було віднайдено можливість струмового регулювання величини опору у всьому діапазоні концентрацій $2 \cdot 10^{17}$ – $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при густині струмів більших, чим 10^4 А/см^2 . Після електричного впливу, який приводив, як правило, до 15–50% зменшення опору, стало значення опору резистора трималося так довго, доки не пропускають крізь резистор такий же великий струм. Ніякими раніше запропонованими моделями зміни опору, які спиралися на можливість розплавлення меж поділу зерен, віднайдені в цій роботі факти зміни опору не могли бути пояснені. Тим більше, що в ході роботи було встановлено, що зміна полярності імпульсів регулюючої напруги призводила до зворотнього ходу процесу регулювання: спочатку опір зростав, аж до досягнення значень величини опору близьких до вихідних, після чого зростання зупинялося, потім знову величина опору зменшувалася при підтримці одного і того ж значення величини імпульсів напруги регулювання. Це дозволило припустити, що основним фактором, який зумовлював віднайдений в цій роботі ефект, є електричний стан межі зерна та середовища, яке оточує межу зерна. При врахуванні широко відомого факту прискорення процесу дифузії домішок і беручи до уваги наведену в главі 1 причину цього, було припущено, що причиною зміни опору полікристалічних резисторів є процес електростимульованої зміни зарядового стану і місцеположення пасток, існування

яких обумовлює формування потенціального бар'єру на межах зерен, і, отже, величину опору резисторів.

Вивчення $1/f$ -шуму показало, що зміна опору резисторів супроводжується такою зміною шуму: при малих рівнях легування зменшення опору приводить до появи ознак "тунельного" механізму генерації шуму, а зміна величини опору в зворотньому напрямку викликала повернення характеристик шуму до попереднього виду. Зміна опору резисторів адекватно відповідала зміні висоти потенціального бар'єру на межах поділу зерен, а поведінка шуму слідувала в межах експериментальної похибки за ходом опору таким чином, як це було і при зміні легування плівок.

При високий рівнях легування зміна опору меж поділу зерен, на яких за цих умов відсутні потенціальні бар'єри, відбувалася за рахунок зміни рухливості носіїв, яка визначалась в цих зразках зміною упорядкованості дефектних областей меж поділу внаслідок електродифузійних процесів в цих областях, на що вказували зміни величини і температурної залежності надлишкового $1/f$ -шуму.

В главі 4, продовжуючи послідовне вивчення впливу рекомбінаційних властивостей меж зерен на характеристики полікристалічного напівпровідника, розраховано модель освітленого р-п переходу на основі полікристалічного кремнію. Було розраховано вольтамперну характеристику фотоперетворювача в умовах сильної рекомбінації на межах зерен. Аналіз вольтамперної характеристики приводить до логічного висновку про те, що за таких умов природньо вважати ефективну довжину носіїв рівною за порядком величини розміру зерна. В той же час, існують носії, які інжектуються або генеруються світлом на різній відстані X від межі зерна, проходять по висі Y до своєї загибелі відстані порядку X , тобто їх дифузійна довжина складає величину порядку X . При накопиченні внесків в струм від усіх електронів виникає логарифмічна розбіжність поблизу межі зерна, через те, що густина струму зворотно пропорційна дифузійній довжині. Проведено точний розрахунок, який дозволяє усунути таку розбіжність, і відзначено, що поняття "дифузійна довжина" в полікристалах потребує досить коректного вжитку. Врахування цього дозволило продемонструвати, що рекомбінація на межах зерен може суттєво впливати на характеристики фотоперетворювача навіть при великих ~~зернах~~ зернах.

Досліджено вплив на характеристики фотоперетворювачів форми контактної сітки шляхом розрахування характеристик відомих із теорії симетрії сіток Шубникова-Лавеса. Для кожного типу сіток були обраховані втрати електричної енергії, пов'язані із опором розтікання і затіненням частини поверхні фотоперетворювача контактними смужками. За результатами дослідження була обрана форма сітки, котра забезпечувала 7% перевагу перед іншими, враховуючи традиційну сітку у вигляді гребінки.

Були виготовлені фотоперетворювачі на основі полікристалічних пластин із різним розміром зерен, в якості випрямляючого контакту використовували контакти метал-напівпровідник, дифузійні р-п переходи, прозорі гетеропереходи на основі оксидів індію та олова (ITO). На основі співставлення експериментальних даних і результатів аналізу еквівалентної шумової схеми діоду було встановлено, що $1/f$ -шум, який супроводжував протікання прямого струму в таких структурах, пов'язаний при малих зміщеннях із модуляцією параметрів вузьких місць в потенціальному бар'єрі, локалізованих на ділянках меж поділу зерен, а при великих зміщеннях, коли потенціальний бар'єр розігнуто, із шумом меж зерен в нейтральній області діодів. Вперше проведені зондові вимірювання коефіцієнта кореляції шуму загального струму крізь діод, шуму струму в області бази і потенціального бар'єру дозволили підтвердити цей висновок.

Враховуючи, що встановлений вплив пасток, розташованих на межах поділу зерен, може бути суттєвим і для гетеропереходів різного типу, було експериментально вивчено шумові характеристики гетеропереходу ZnSe-GaAs, який за електричними характеристиками вважали за "ідеальний". Було встановлено, що зміна заселеності пасток на межі поділу гетеропереходу під впливом світла та напруги приводить до зростання тунельних струмів через гетероперехід і величини шумів, які їх супроводжують, а також до виникнення нового джерела шумів - флуктуацій процесів захоплення фотодірок на межові пастки.

В гетеропереходах ITO-кремній було виявлено $1/f$ -шум із такими ж властивостями, як і в попередньому випадку. Збільшення напруги приводило до появи "перелама" шум-вольтової залежності, як і в випадку меж поділу зерен. Збільшення товщини діелектричного шару до тих меж, поки це не починало обмежувати струм, призводило до

інтенсифікації ефекту переламу шум-вольтової залежності, що добре укладалося в запропоновану в главі 2 цієї дисертації модель впливу змін функції заповнення пасток на величину $1/f$ -шуму в випадку меж поділу зерен.

Вперше було виконано комплексне дослідження шумових та рекомбінаційних характеристик пластин полікристалічного кремнію. Для того, щоб мати можливість розраховувати за результатами вимірювання фотомагнітного ефекту малі часи життя неосновних носіїв, характерні для полікристалічного кремнію, була використана розроблена в главі 1 методика розрахунку фотомагнітного ефекту, і, крім того, сконструйована установка для вимірювання малого часу життя неосновних носіїв методом інжекції із точкового контакту. Були вивчені полікристалічні шари із розміром зерен від 0.1 мкм до 1 см. Вдалося віднайти існування кореляції між величиною $1/f$ -шуму та часом життя неосновних носіїв в полікристалах кремнію: більша величина $1/f$ -шуму відповідала меншому часу життя, шум падав із збільшенням розміру зерен, час життя при цьому збільшувався. Встановлено, що аналогічно співвідношенню Хоуге, яке застосовується до монокристалічних зразків, у випадку полікристалів, що були досліджені в цій роботі, можна записати:

$$S_1(f) = \alpha_\tau \frac{I^2}{\tau f} \quad (8)$$

де $\alpha_\tau = 3-4 \cdot 10^{-17} \text{с}^{-1}$ в діапазоні розмірів зерен $d = 10^{-4}-10^{-3} \text{см}$, а при $d > 10^{-3} \text{см}$ величина $\alpha_\tau \propto (d - 0,1 \text{см})^2$. Відзначимо, що існування мінімуму α_τ при $d \approx 0,1 \text{см}$ ніяк не пов'язано із поведінкою рухливості, мінімум залежності якої при рівні легування зразків, які досліджено, лежав в області 0,001 см. Фізичною причиною віднайденого зв'язку S_1 і τ є, звичайно ж, залежність механізму і рівня шумів від структурних та електричних властивостей меж зерен, які обумовлюють практично всі особливості протікання фізичних процесів в полікристалах при цьому рівні легування. Очевидно, ці результати вказують на існування глибинного зв'язку між механізмом генерації $1/f$ -шуму і процесами пострекомбінаційної релаксації кристалічної ґратки напівпровідника. Для перевірки припущення, що в цьому випадку має існувати зв'язок величини $1/f$ -шуму із певним параметром, який характеризу-

вав би ступінь різниці стану кристалічної ґратки, було вивчено механічну міцність полікристалів із різним розміром зерна. Вдалося встановити, що механічне навантаження, при якому відбувалося руйнування пластини полікристалу, повністю корелювало із величиною $1/f$ шуму: чим більше був шум, тим при менших навантаженнях руйнувався полікристал. Встановлена кореляція шуму, рекомбінаційних та міцностних характеристик полікристалів відкрила новий бік фундаментальних зв'язків механізму генерації надлишкового шуму в полікристалах із навістю в них меж зерен, чутливих до збуджень.

В главі 5 вивчено низькочастотний шум біполярних кремнієвих транзисторів із полікристалічними плівками в області емітера. Як відомо, інтерес до використання полікристалічних плівок кремнія в емітерах біполярних транзисторів історично виник через ті технологічні зручності, які властиві використанню високолегованих полікремнієвих плівок як джерел легуючої домішки для створення емітерного р-п переходу. Але створення таких багат шарових структур в емітері призвело до несподіваного і великого зростання коефіцієнта підсилення транзисторів по струму, що, можливо, було пов'язано із гетеропереходним ефектом у емітері.

Для дослідження шуму структур із полікремнієвими емітерами в цій роботі було створено плівки полікристалічного кремнія і плівки SIPOS (seminsulating polycrystalline silicon), які потім наносили на поверхню емітера біполярних транзисторів. Вивчення спектрів оптичного відбиття плівок SIPOS із різним вмістом кисню дозволило виявити зміни зонної структури цих плівок порівняно із зонною структурою монокристалічного кремнію. Таким чином, це дозволяло сподіватися на проявлення гетеропереходного ефекта і значне збільшення струмового коефіцієнта підсилення в транзисторів із такими плівками в емітері. Дійсно, в виготовлених структурах β значно виросло $\beta \approx 300$, в той же час структури без SIPOS-шарів мали набагато менший струмовий коефіцієнт підсилення $\beta \approx 100$.

Були вивчені вольтамперні та вольтфарадні характеристики транзисторів, в поведінці яких були виявлені відмінності від характеристик транзисторів без полікристалічних шарів. По-перше, напруга відсічки вольтфарадної характеристики (залежність квадрату зворотньої ємності від напруги) емітеру набагато перевищувала значення дифузійного потенціалу р-п переходу, а, по-друге, при малих зворот-

тніх зміщеннях в вольтфарадній характеристиці спостерігалися ділянки плавної зміни нахилу. Характеризуючи межу полікремній - монокремній окремою ємністю і опором, вдалося пояснити ці особливості вольтфарадних характеристик, і, застосувавши спеціальну методику, не тільки визначити величину цієї ємності, але й її залежність від напруги. Причина існування такої ємності - накопичення заряду в розупорядкованих ділянках межі монокремній - полікремній, існування яких виявлено в багатьох роботах.

Давня проблема визначення послідовного опору квазінейтрального емітера знайшла новий розвиток в ході цієї роботи. Було запропоновано новий спосіб визначення цього важливого параметру транзистора, який знімав протиріччя, що здавалися раніше нездоланими, і базувався на вимірюванні імпеданса транзистору, який знаходиться у режимі насичення, а його колектор розімкнуто по постійному струму.

Було проаналізовано еквівалентну шумову схему біполярного транзистора і зроблені висновки про можливість її застосування до зразків, які досліджуються в цій роботі. Вимірювання спектрів шуму в режимах холостого ходу і короткого замикання по змінному сигналу на вході транзистора дозволило встановити, що в режимі холостого ходу $1/f$ -шум колекторного струму визначається підсиленням шумом струму бази, пов'язаним із флуктуаціями рухливості носіїв, котрі дифундують в області квазінейтрального емітера. Відзначено, що надлінійна струмова залежність цього шуму може бути частково обумовлена впливом вбудованого в квазінейтральні ділянки електричного поля, що виникає за рахунок нерівномірного розподілу легуючої домішки. При короткому замиканні по змінному сигналу входу транзистора шум струму колектора виявляється набагато меншим. Виникнення його супроводжує модуляцію товщини квазінейтральної бази.

Розроблено для транзисторних структур і застосовано до транзисторів із полікристалічним емітером метод визначення шуму квазінейтрального емітера, S_{re} . На підставі аналізу малосигнальної шумової схеми транзистора встановлено, що

$$S_{V_{CES}} = \left(\frac{kT}{q} \right)^2 \alpha_1^{-2} S_{\alpha} + S_{re} I_B^2, \quad (9)$$

де $S_{V_{CES}}$ і S_{α} - спектральні густини флуктуацій напруги насичення

вав би ступінь різниці стану кристалічної ґратки, було вивчено механічну міцність полікристалів із різним розміром зерна. Вдалося встановити, що механічне навантаження, при якому відбувалося руйнування пластини полікристалу, повністю корелювало із величиною $1/f$ шуму: чим більше був шум, тим при менших навантаженнях руйнувався полікристал. Встановлена кореляція шуму, рекомбінаційних та міцностних характеристик полікристалів відкрила новий бік фундаментальних зв'язків механізму генерації надлишкового шуму в полікристалах із навністю в них меж зерен, чутливих до збуджень.

В главі 5 вивчено низькочастотний шум біполярних кремнієвих транзисторів із полікристалічними плівками в області емітера. Як відомо, інтерес до використання полікристалічних плівок кремнія в емітерах біполярних транзисторів історично виник через ті технологічні зручності, які властиві використанню високолегованих полікремнієвих плівок як джерел легуючої домішки для створення емітерного р-п переходу. Але створення таких багат шарових структур в емітері призвело до несподіваного і великого зростання коефіцієнта підсилення транзисторів по струму, що, можливо, було пов'язано із гетеропереходним ефектом у емітері.

Для дослідження шуму структур із полікремнієвими емітерами в цій роботі було створено плівки полікристалічного кремнія і плівки SIPOS (semiinsulating polycrystalline silicon), які потім наносили на поверхню емітера біполярних транзисторів. Вивчення спектрів оптичного відбиття плівок SIPOS із різним вмістом кисню дозволило виявити зміни зонної структури цих плівок порівняно із зонною структурою монокристалічного кремнію. Таким чином, це дозволяло сподіватися на проявлення гетеропереходного ефекта і значне збільшення струмового коефіцієнта підсилення в транзисторів із такими плівками в емітері. Дійсно, в виготовлених структурах в значно виросло $\beta \approx 300$, в той же час структури без SIPOS-шарів мали набагато менший струмовий коефіцієнт підсилення $\beta \approx 100$.

Були вивчені вольтамперні та вольтфарадні характеристики транзисторів, в поведінці яких були виявлені відмінності від характеристик транзисторів без полікристалічних шарів. По-перше, напруга відсічки вольтфарадної характеристики (залежність квадрату зворотної ємності від напруги) емітеру набагато перевищувала значення дифузійного потенціалу р-п переходу, а, по-друге, при малих зворот-

тніх зміщеннях в вольтфарадній характеристиці спостерігалися ділянки плавної зміни нахилу. Характеризуючи межу полікремній - монокремній окремою ємністю і опором, вдалося пояснити ці особливості вольтфарадних характеристик, і, застосувавши спеціальну методику, не тільки визначити величину цієї ємності, але й її залежність від напруги. Причина існування такої ємності - накопичення заряду в розупорядкованих ділянках межі монокремній - полікремній, існування яких виявлено в багатьох роботах.

Давня проблема визначення послідовного опору квазінейтрального емітера знайшла новий розвиток в ході цієї роботи. Було запропоновано новий спосіб визначення цього важливого параметру транзистора, який знімав протиріччя, що здавалися раніше нездоланими, і базувався на вимірюванні імпеданса транзистору, який знаходиться у режимі насичення, а його колектор розімкнуто по постійному струму.

Було проаналізовано еквівалентну шумову схему біполярного транзистора і зроблені висновки про можливість її застосування до зразків, які досліджуються в цій роботі. Вимірювання спектрів шуму в режимах холостого ходу і короткого замикання по змінному сигналу на вході транзистора дозволило встановити, що в режимі холостого ходу $1/f$ -шум колекторного струму визначається підсиленням шумом струму бази, пов'язаним із флуктуаціями рухливості носіїв, котрі дифундують в області квазінейтрального емітера. Відзначено, що надлінійна струмова залежність цього шуму може бути частково обумовлена впливом вбудованого в квазінейтральні ділянки електричного поля, що виникає за рахунок нерівномірного розподілу легуючої домішки. При короткому замиканні по змінному сигналу входу транзистора шум струму колектора виявляється набагато меншим. Виникнення його супроводжує модуляцію товщини квазінейтральної бази.

Розроблено для транзисторних структур і застосовано до транзисторів із полікристалічним емітером метод визначення шуму квазінейтрального емітера, S_{re} . На підставі аналізу малосигнальної шумової схеми транзистора встановлено, що

$$S_{V_{CES}} = \left(\frac{kT}{q} \right)^2 \alpha_1^{-2} S_{\alpha} + S_{re} I_B^2, \quad (9)$$

де $S_{V_{CES}}$ і S_{α} - спектральні густини флуктуацій напруги насичення.

транзистора, ввімкненого за схемою із загальним емітером при колекторі, розімкненому за постійним струмом, та інверсного коефіцієнта передачі α , струму I в схемі із загальною базою. Таким чином, вимірюючи S_{vces} та визначивши S_{α} , вдалося відкрити можливість встановлення ступеню впливу шуму квазінейтрального емітера S_{re} на загальний шум струму колектора S_i^c . Проведені досліді показали, що в полікристалічних емітерах специфіка структури емітера практично не впливає на шум колекторного струму.

Розвиваючи тему дослідження шумових властивостей біполярних транзисторів із складною структурою емітера, були вивчені властивості фототранзистору на основі структур $GaAs-AlGa_{1-x}As$. На ділянці досить низьких частот в фототранзисторах віднайдено компоненту $1/f$ -шуму. Для встановлення її природи досліджувались і порівнювались величини шуму в різних режимах роботи структури, а також поведінка диференційної провідності. Виявлено, що вирішальним фактором, який зумовлює рівень $1/f$ -шуму, є величина провідності, незважаючи на те, сполученням яких факторів (струм, світло, зміщення) вона завдається. Показано, що це можливо лише у випадку, коли шуми, які розглядаються, виникають на ділянці емітерного переходу.

Визначені порогові характеристики фототранзисторів в широкому діапазоні фонових підсвіток L , опорів навантаження R , робочих напруг V , частот f . Показано, що в широкому діапазоні f величина виявної здатності таких фототранзисторів може досягати досить великих значень $4 \cdot 10^{13} \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{1/2}$, знайдені оптимальні значення V та R . Встановлено, що на ділянці низьких частот порогові характеристики досліджених фототранзисторів визначаються шумовими властивостями емітерного переходу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Основні висновки дисертації були, по суті, наведені раніше в попередніх розділах, тому зараз можливо сформулювати їх у більш загальному порядку:

1. Комплексне дослідження низькочастотного струмового шуму та електричних характеристик меж поділу зерен полікристалічного кремнію дозволило встановити причини та закономірності поведінки низькочастотного шуму в таких системах, причому вперше було виявлено:

1.1. Зміну закону зростання надлишкового шуму меж поділу зерен, яка приводить до переламу шум-вольтової залежності при рості напруги, прикладеної да межі поділу зерна, що зумовлено зміною заселеності межових станів під інтегральним впливом як прямо – так і зворотньоозміщеної області просторового заряду, який оточує межу поділу.

1.2. Температурну стабільність $1/f$ -шуму полікристалічних шарів при відносно високих рівнях їх легування, що свідчить про суттєву роль процесів тунелювання в процесі генерації $1/f$ -шуму в потенціальних бар'єрах, які оточують межі поділу зерен.

1.3. Виявлена кореляція між величиною $1/f$ шуму, часом життя неосновних носіїв заряду та механічною міцністю полікристалічних зразків, а також залежність цих величин від розмірів зерен та їх рекомбінаційних властивостей, і, таким чином, продемонстровано наявність глибинного зв'язку між механізмом утворення $1/f$ -шуму та станом кристалічної ґратки полікристала, в тому числі характером її пострекомбінаційних релаксацій.

1.4. Низькочастотний шум струму крізь потенціальні бар'єри меж поділу зерен обумовлено модуляцією висоти бар'єрів процесом зміни зарядового стану пасток, розташованих на межах поділу, та (або) флуктуацією рухливості носіїв заряду в області просторового заряду меж поділу зерен, пов'язаною із фононним механізмом розсіювання носіїв. Проходження струму паралельно межах поділу зерен із потенціальними бар'єрами на них викликає генерацію надлишкового шуму через захоплення носіїв на пастки, розташовані на межах поділу, і модуляцією через це струму за рахунок зміни кількості

носіїв та перерізу нейтрального напівпровідникового каналу, яким іде струм, внаслідок модуляції ширини потенціального бар'єру межі поділу зерна.

1.5. Виникнення надлишкового шуму на межах поділу зерен без потенціальних бар'єрів на них, але із шарами деформованого кремнію навколо меж поділу, пов'язано із процесами флуктуації рухливості в деформованих областях, про що свідчить специфічна температурна залежність шуму таких меж поділу.

2. Виявлено факт електростимульованої зміни опору меж зерен та полікристалів в широкому діапазоні рівнів легування $2 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при пропусканні через них струму, густина якого перевищує 10^4 А/см^2 і на основі комплексного аналізу температурної залежності шуму та опору полікристалів доведено, що причиною цього явища є електродифузійні процеси в області меж поділу зерен.

3. Опрацьовані та розвинуті моделі змін енергетичної структури полікристалів біля меж зерен, рекомбінаційних процесів на межах, формування вольтамперних характеристик в полікристалічних бар'єрних структурах, прискореної дифузії в сильнолегованих напівпровідниках та межах поділу зерен.

4. Вивчено низькочастотний шум структур гетеропереходів на основі ZnS, ZnSe - GaAs, ITO - кремній і встановлено, що $1/f$ -шум в таких структурах пов'язано із модуляцією заселеності пасток на межах поділу та флуктуаціями процесів захоплення носіїв цими пастками. Змодельовано шум межі поділу метал - діелектрик - напівпровідник із використанням даних вивчення електричних характеристик та отримано добре узгодження теорії та експерименту. Виявлено, що перелам шум-вольтових залежностей відбувається і в гетеропереходах та добре узгоджується із моделлю, запропонованою для меж поділу зерен.

5. Вивчено надлишковий шум в фотоперетворювачах на основі полікристалічного кремнію, транзисторах із полікристалічними шарами в області емітера, досліджено зв'язок шуму із іншими параметрами структур, запропоновано схеми розрахунку різних джерел шуму в таких структурах.

6. Розроблено конструкції фотопретворювачів, в яких оптимізовані ряд елементів для збільшення їх ефективності, в тому числі потенціальні бар'єри та форма контактної сітки. Запропоновано конструкції гетеропереходних транзисторів, в яких передбачається значне збільшення їх швидкодії. Створено моделі розрахунку їх характеристик, в тому числі і шумових. Розроблено методику електростимульованої зміни опору полікристалічних резисторів, за рахунок чого створено інтегральні схеми затримки електричних сигналів із можливістю регулювання параметрів мікросхем в широкому діапазоні часів затримки та температурних коефіцієнтів, які характеризують зміни параметрів.

Додатки до дисертації містять 3 акти і один протокол випробування характеристик фотопретворювача. В останньому посвідчено, що у 1984 р. в НВО "Квант", м. Москва, випробувано ефективність фотопретворювача на основі полікристалічного кремнію, і встановлено, що к.к.д. фотопретворювача досягає 9%. В акті, виданому Запорізьким титано-магнієвим комбінатом, м. Запоріжжя, посвідчено, що роботи автора по дослідженню властивостей полікристалічного кремнію, виконані в 1983-1986 р.р., використані для створення промислової технології матеріалу для фотопретворювачів. В двох актах підтверджено, що роботи автора по дослідженню шуму транзисторів та властивостей полікристалічних резисторів, виконані в 1990 - 1992 р.р., впроваджені в Окремому конструкторському бюро "Елміс" Виробничого об'єднання "Гамма", м. Запоріжжя, що дозволило створити нові типи напівпровідникових приладів, які випускаються примисловістю, відзначено оригінальність технічних і наукових рішень автора.

1. Lukuanchikova N.B., Pekar G.S., Tkachenko N.N., Hoang Mi Shin, Sheinkman M.K. Physical Processes in Forward-Biased ZnS Schottky Diodes Exhibiting Effective Electroluminescence // 5th European Solid State Device Research Conf. Program & Abstracts. - France, Grenoble, 1975. - P.144-146
2. Лукьянчикова Н.Б., Ткаченко Н.Н., Корольков В.И., Ахмедов Ф.А. Обнаружительная способность и шумы фототранзисторов на основе гетеропереходов $\text{GaAs-Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ // ФТП.- 1977.- т.11, в.3.- С. 526-531.
3. Лукьянчикова Н.Б., Ткаченко М.М., Гаугаш П.В., Касьян В.А. Низькочастотний шум і особливості фізичних процесів в гетеропереходах п ZnSe-p GaAs // Укр.фіз.ж.-1977.- т.22, в.6.- С. 902-909.
4. Лукьянчикова Н.Б., Ткаченко Н.Н., Гаугаш П.В., Касьян В.А. Пороговые фотоприемники с высокой обнаружительной способностью на основе гетеропереходов п ZnSe-p GaAs // Радиотехника и электроника.-1977.- т.XXII, N 11.-С.2392-2395.
5. Lukuanchikova N.B., Pekar G.S., Tkachenko N.N., Hoang Mi Shin and M.K.Sheinkman. Ohmic contacts to low-resistivity ZnS: preparation, noise properties and nature of contact resistance // Solid-State Electron.-1977.- v.20, P.879-882.
6. Lukuanchikova N.B., Pekar G.S., Tkachenko N.N., Hoang Mi Shin and M.K.Sheinkman. Injection electroluminescence in forward-biased ZnS metal-semiconductor diodes // Phys. Stat. Sol.(a).- 1977.- v.41.-P.299-305.
7. Лукьянчикова Н.Б., Ткаченко Н.Н., Саченко А.В. Влияние поверхностных и объемных уровней на высоту потенциального барьера при освещении // Фотоэлектрические явления в полупроводниках.-Киев. "Наукова Думка", 1979.-С.161.
8. Лукьянчикова Н.Б., Пекарь Г.С., Ткаченко Н.Н., Шейнкман М.К. Токовый шум и механизм электролюминесценции инжекционных светодиодов на основе ZnS // II Всесоюзное совещание по широкозонным полупроводникам. Тезисы докладов.-Ленинград, 1979.-С.44.

9. Мелликов Э.Я., Лукьянчикова Н.Б., Никитин А.Б., Путилин А.Б., Хийе Я.В., Варема Т.Р., Ильина Н.О. и Ткаченко Н.Н. Способ изготовления регулярных фотоматриц. Авторское свидетельство N 795356. Зарегистрировано 8 сентября 1980 г.
10. Lukyanchikova N.B., Pekar G.S.; Tkachenko N.N. Photoelectric and Noise Properties of Photon Detectors Based on ZnS Schottky Diodes// Proc.9th Intern. Symp. on Photon Detectors.- Hungary, Visegrad, 1980. - V.1. - P.187-199.
11. Lukyanchikova N.B., Pavelko T.M., Pekar G.S., Tkachenko N.N., and M.K.Sheinkman. Mechanism of electroluminescence excitation in forward-biased MS and MIS light-emitting diodes based on wide-band-gap II-VI compounds // Phys. Status Sol.(a).- 1981.- v.64, N 2.-P.897-706.
12. Ткаченко Н.Н., Перова В.И., Назаренко В.Н., Карпенко В.Б. и Шварцман Л.Я. Способ изготовления фотопреобразователей на основе поликристаллических полупроводников. Авторское свидетельство N 1127502. Зарегистрировано 1 августа 1984 г.
13. Ткаченко Н.Н., Шварцман Л.Я. Фотодиоды типа контактов металл полупроводник на основе поликристаллического кремния // Диэлектрики и полупроводники.-1985.- в.27. -С.82-83.
14. Зінченко Е.А., Перова В.І., Пометун Б.В.,Ткаченко М.М., Сердега Б.К. Поперечна фото-ерс в полікристалічному кремнії // Укр. фіз.ж.- 1985.- т.30, N 5.- С.744-746.
15. Ткаченко Н.Н., Перова В.И., Назаренко В.Н., Печерица А.И., Шварцман Л.Я. Омические контакты к фотодиодам на основе поликристаллического кремния // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.-Киев:"Наукова Думка",1985.- в.7.- С.72-73.
16. Ткаченко Н.Н. Низкочастотный шум и механизм токопрохождения в диодах на основе поликристаллического кремния // Флуктуационные явления в физических системах. IV Всесоюзная конференция. Тезисы докладов.- М., 1985.- С.98-99.
17. Ткаченко Н.Н., Омелянович Л.В., Гаращенко Н.П., Лукьянчикова Н.Б., Шейнкман М.К. Биполярный транзистор на основе гетероперехода. Авторское свидетельство N 1409075, зарегистрировано 17 сентября 1985 г..

18. Березенко Л.Е., Каган М.Б., Ткаченко Н.Н., Холев Б.А., Фалькевич Э.С. Фотопреобразование в р-п переходе на основе поликристаллического кремния // Электротехника.-1986.- № 8.- С.15-16.
19. Ткаченко Н.Н., Омелянович Л.В., Волков Л.И., Данковский Ю.В., Шкляр Б.Л., Гаращенко Н.П. Способ определения содержания кислорода в пленках. Авторское свидетельство N 13949003, зарегистрировано 11 июня 1986.
20. Березенко Л.Е., Каган М.Б., Ткаченко Н.Н., Холев Б.А., Фалькевич Э.С. Исследование характеристик фотопреобразователей на основе поликристаллического кремния //Гелиотехника.-1986.-№ 6.- С. 54-57.
21. Ткаченко Н.Н., Назаренко В.Н., Фалькевич Э.С., Березенко Л.Е., Холев Б.А., Каган М.Б. Фотопреобразователь на основе поликристаллического полупроводника. Авторское свидетельство N 1477191, Зарегистрировано 7 июля 1986 г.
22. Ткаченко Н.Н., Березенко Л.Е., Фалькевич Э.С. Влияние зернистой структуры поликристаллического кремния на характеристики фотопреобразователей // Диэлектрики и полупроводники.-1987.-в. 31.-С.86-89.
23. Волков Л.И., Гаращенко Н.П., Конторович В.Н., Ткаченко Н.Н. Исследование энергетической зонной структуры полужолирующего поликристаллического кремния // Диэлектрики и полупроводники.- 1987.- в.31.- С.64-66.
24. Ткаченко М.М. Межі зерен і механізм струмопроходження в фотоперетворювачах на основі полікристалічного кремнію // Укр.фіз. ж.-1987.-т.32, № 3.-С.443-447.
25. Левинзон Д.И., Снапиро И.Б., Ткаченко Н.Н. Исследование фотогальваномагнитных эффектов на границах зерен в кристаллах кремния //Материалы Всесоюзного совещания по получению профилированных кристаллов и изделий способом Степанова и их применению в народном хозяйстве, Ленинград.-1989.-С.221-225.
26. Снапиро И.Б., Ткаченко Н.Н. Механизм нелинейной диффузии в полупроводниках // Письма в ЖЭТФ.-1989.- т.50, в.3.- С.111-112.
27. Снапиро И.Б., Ткаченко Н.Н. Фотомагнитный эффект в поликристаллическом полупроводнике // ФТП.-1990.- т.24, в.4.- С.345.

28. Снапиро И.Б., Ткаченко Н.Н. Деформационные эффекты на границах зерен в кремнии // Диэлектрики и полупроводники.-1990.-в.37.- С.26-29.
29. Снапиро И.Б., Ткаченко Н.Н. Влияние границ зерен на диффузионную длину носителей заряда // Диэлектрики и полупроводники. - 1990. - в. 38. - С.47-53.
30. Снапиро И.Б., Ткаченко Н.Н. Вольтамперные характеристики фотопреобразователей на основе поликристаллического кремния // Гелиотехника.- 1990.- N2.- С.43-48.
31. Снапиро И.Б., Ткаченко Н.Н. Нелинейная диффузия примесей по границам зерен в полупроводниках // ФТТ.-1990.- т.32, в.7.- С.2007 - 2009.
32. Ткаченко Н.Н., Коломоец Г.П., Федотов А.К., Ильяшук Ю.М., Снапиро И.Б. Токовый шум границ зерен в поликристаллическом кремнии // ФТТ.-1991.-Т.33,N5.-С.1593-1595.
33. Tkachenko N., Kolomoets G. Low-frequency noise of grain boundaries in semiconductors/Proc. of the 6th Sci. Conf. on Fluctuation Phenomena in Physical Systems, Palanga, Lithuania.- 1991.-P.95-96.
34. Ткаченко Н.Н., Коломоец Г.П. Избыточный шум в биполярных транзисторах с поликремниевым эмиттером //Укр.физ.ж.-1991.-Т.36, N6.- С.917 - 923.
35. Снапиро И.Б., Ткаченко Н.Н. Эффективность инжекции в биполярных транзисторах с поликремниевым эмиттером//Микроэлектроника. Изв. АН СССР. -1991.- т.20,в.2.-С.173-178.
36. Ткаченко Н.Н., Захаров С.В., Левинзон Д.И., Доброхотов Г.А. Способ измерения параметров поликристаллического кремния, зависящих от размеров кристаллитов. Авторское свидетельство N - 1686980, зарегистрировано 22 июня 1991 г.
37. Tkachenko N., Levinzon D., Kolomoets G. Current noise in bipolar transistors with polysilicon emitters/Proc. of the 6th Sci. Conf. on Fluctuation Phenomena in Physical Systems, Palanga, Lithuania.-1991.-P.177-179.
38. Снапиро И.Б., Ткаченко Н.Н. Оптимальная геометрия контактных сеток для полупроводниковых фотопреобразователей //Гелиотехника.-1991.- в.2.- С.45-48.

39. Мелентьев Н.Г., Остренко Д.В., Ткаченко Н.Н., Снапиро И.Б., Коломоец Г.П. Способ подгонки величины сопротивления поликристаллического резистора. Заявка N 48456556 приоритет от 2.07.90, Положительное решение от 29.04.92.
40. Мелентьев Н.Г., Остренко Д.В., Ткаченко Н.Н., Снапиро И.Б., Коломоец Г.П. Линия задержки с регулируемыми параметрами. Заявка N 485865 приоритет от 8.08.90, Положительное решение от 28.04.9244.
41. Tkachenko M.M. Low-frequency noise in polycrystalline elements of semiconductor devices / Proc. of Int. Conf. "Microelectronics'92", 21-23 September, 1992, Warsaw, Poland. Published by SPIE, USA.-1992.-V.1783.-P.213-222.
42. Tkachenko M.M., Kolomoets G.P., Melentjev N.G. Polycrystalline resistors with current-induced tuning of electrical parameters/Proc. of Int. Conf."Microelectronics'92", 21-23 September, 1992, Warsaw, Poland. Published by SPIE, USA.-1992.-V.1783.-P.233-243.
43. Tkachenko M.M., Kolomoets G.P., Nazarenko V.N. Parameter determination of the polysilicon emitter interface for bipolar transistors/Proc. of Int. Conf."Microelectronics'92", 21-23 September, 1992, Warsaw, Poland. Published by SPIE, USA.-1992.-V.1783.-P.223-232.
44. Гориславец В.Г., Нечипоренко Ю.Л., Левинзон Д.И., Ткаченко Н.Н. Время жизни неосновных носителей заряда в эпитаксиальных кремниевых слоях для фотопреобразователей // Фотозлектроника.- Одесса: Изд-во Одесского госуниверситета.-1992.- N 5.- С.133-137.
45. Коломоец Г.П., Ткаченко Н.Н., Левинзон Д.И., Назаренко В.Н. Исследование характеристик границы раздела в поликремниевых эмиттерах биполярных транзисторов // Микроэлектроника. Известия РАН.-1992.-Т.21, вып.6.-С.36-39.
- 46 Levinzon D.I., Nechiporenko Y.L., Onyshchuk V.N., Sajenko O.V. Tkachenko N.N., Vervika A.V. Investigation of the characteristics of the silicon solar cells with heterojunctions on the basis of the transparent conduction oxides / Proc. of the Institute of the physics of semiconductors.- Novosibirsk, 1992.- c.243.

47. Левинзон Д.И., Нечипоренко Ю.Л., Ткаченко Н.Н. Исследование характеристики кремниевых фотоэлементов с гетеропереходом на основе прозрачных проводящих оксидов // Датчики. Севастополь: УМК ВЗ.- 1993.-С.85-86.
48. Ткаченко Н.Н. $1/f$ шум и рекомбинационные процессы в поликристаллах // Письма в ЖЭТФ.- 1994.- т.59, в.4. С.255-257.
49. Ткаченко М. М., Строїтелева Н.І., Коломоець Г.П. Електричний шум сплавних (штучних) меж зерен у кремнії // Укр. фіз. ж. - 1994.- т.39, N3.- С.36-38.

Григорук

Підписано до друку 25.04.94. Формат 60х84 1/16. Офсетний друк.
Ум. друк. арк. 1.88. Тираж 100 екз. Замовлення 254 від 29.04.94р.
РВВ ЗІІ 330006, м. Запоріжжя, 226

457030

AB 30.079