

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ**

На правах рукопису
УДК 621.315.592

ПАНІЧЕВСЬКА ТЕТЯНА ВОЛОДИМИРІВНА

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА РЕЛАКСАЦІЇ
НЕРІВНОВАЖНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕФЕКТІВ
В ПОВЕРХНЕВО — БАР'ЄРНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
СТРУКТУРАХ**

01.04.07 — фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 1997



Дисертація є рукопис

Роботу виконано в Інституті фізики напівпровідників НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
САЧЕНКО АНАТОЛІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
АКОПЯН АРСЕН АРТАШЕСОВИЧ
кандидат фізико-математичних наук
ЗІНЕЦЬ ОЛЕГ СЕРГІЙОВИЧ

Провідна організація: Національний університет ім. Тараса Шевченка,
м. Київ

Захист відбудеться "16" травня 1997 р. о 14 год. 15 хв.
на засіданні Спеціалізованої ради К 50.07.02 при Інституті фізики
напівпровідників НАН України за адресою: 252650, м. Київ-28,
проспект Науки, 45.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту фізики
напівпровідників НАН України за адресою: 252650, м. Київ-28, проспект
Науки, 45.

Автореферат розісланий "31" березня 1997 р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради
кандидат фізико-математичних наук

Рудько Г.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Поверхнево — бар'єрні напівпровідникові структури широко застосовуються в техніці, особливо в оптоелектроніці та в сонячній енергетиці. Такі структури можуть реалізуватись на основі контакту напівпровідник—діелектрик, напівпровідник—метал, напівпровідник—електроліт або в напівпровідникових гетеропереходах. В формуванні фотоелектричного сигналу в цих структурах важливу, а в багатьох випадках і визначну, роль відіграють фізичні процеси, що відбуваються в приповерхневій області просторового заряду (ОПЗ) напівпровідника, а також на його поверхні або на межі розділу напівпровідник—діелектрик, напівпровідник—метал. Тому наукові дослідження фотоелектричних ефектів в поверхнево — бар'єрних структурах сьогодні є актуальними.

Особливий інтерес останнім часом викликають поверхнево — бар'єрні структури з інверсійними бар'єрами, одною з найбільш відомих реалізацій яких є структури Si — SiO₂ з вбудованим в діелектрик зарядом. Їх, зокрема, використовують у високоефективних перетворювачах сонячної енергії в електричну, які надалі ми будемо називати інверсійними сонячними елементами (ІСЕ). Основною перевагою ІСЕ є дуже мала глибина залягання $p-n$ — переходу і наявність сильного електричного поля в інверсійній області, тому рекомбінаційні втрати в короткохвильовій та ультрафіолетовій областях сонячного спектру в них набагато менші, ніж в СЕ з об'ємними $p-n$ — переходами. З цієї ж причини вказані структури є перспективними для використання їх в фотоелементах з високою чутливістю в короткохвильовій області.

Незважаючи на те, що фотоелектричні властивості поверхнево — бар'єрних структур досліджуються вже давно, проте багато проблем до останнього часу не розв'язані, або розв'язані в простих, напівемпіричних моделях і потребують свого подальшого розвитку. Існують також експериментальні результати, які не мають теоретичного обґрунтування або пояснені некоректно.

Мета роботи. Дисертація виконана з метою дослідження теоретичними методами особливостей формування і релаксації нерівноважних фотоелектричних ефектів в поверхнево — бар'єрних напівпровідникових структурах саме для вказаних випадків, причому базовою для проведених досліджень була обрана структура Si — SiO₂ з інверсійними бар'єрами.

Основні завдання, розв'язані в роботі:

1. Запропоновано модель і проведено теоретичні розрахунки, які пояснюють збільшення вигину зон біля поверхні (аномальна поверхнева фотоерс) або зміну знаку фотоструму (аномальна фотонапряга), що спостерігалися експериментально при домішковому поглинанні світла.

2. Теоретично досліджено кінетику встановлення фотоструму в поверхнево — бар'єрних структурах з тунельним діелектриком та обґрунтовано її незалежність від перезарядки поверхневих станів для високоефективних фотоперетворювачів. Останнє узгоджується з експериментом.

3. Теоретично проаналізовано поведінку поверхнево — чутливих фотоелектричних ефектів (фотопровідність, поверхнева фотоерс, фотомагнітний ефект (ФМЕ)) в напівпровідниках з порушеними приповерхневими шарами.

4. Проведено розрахунки величини і знаку фотомагнітного ефекту в напівпровідниках з малими довжинами дифузії.

5. Отримано теоретичні закономірності затухання сигналу нелінійної поверхневої фотоерс в структурах з інверсійними бар'єрами при локальному фотозбудженні, що дало змогу проаналізувати умови застосування скануючої методики, яка використовується для визначення однорідності електрофізичних параметрів напівпровідників по площі структури.

6. Виконано теоретичний розрахунок фотоструму в ICE з контактною сіткою на освітленій поверхні, на основі якого сформульовано умови оптимізації ICE за збиранням фотоструму.

7. Пояснено незвичайні (з максимумом) експериментальні залежності ерс фотоелементів від інтенсивності освітлення впливом умов на тилово-контакті, який може бути і неомічним.

Наукова новизна роботи визначається тим, що в результаті проведених досліджень в ній вперше: а) показано, що аномальний знак поверхневої фотоерс при домішковому поглинанні світла може бути пояснений значною тунельною рекомбінацією в напівпровіднику; б) доведено, що перезарядка поверхневих станів не впливає на кінетику фотоструму поверхнево — бар'єрних структур з тунельним діелектриком при умові ефективної роботи фотоперетворювача; в) теоретично доведено, що експериментальним критерієм можливості описання рекомбінації в порушеному шарі параметром “ефективна швидкість поверхневої рекомбінації” є однакова спектральна залежність малосигнальної поверхневої фотоерс та фотомагнітного ефекту; г) показано, що аномальний фотомагнітний ефект не може існувати в напівпровідниках з довжинами дифузії неосновних носіїв, значно меншими за товщину області просторового заряду; д) проведено аналіз двовимірного рівняння неперервності, що дозволило дослідити закономірності затухання сигналу нелінійної фотоерс в інверсійних структурах з локальним фотозбудженням та обрахувати збирання фотоструму в ІСЕ з контактною сіткою.

Положення, що виносяться на захист:

1. Механізм формування поверхневої фотоерс аномального знаку, яка виникає при домішковому поглинанні світла з участю поверхневих станів і обумовлена багатоступінчатою тунельною рекомбінацією в напівпровідниках між зоною основних носіїв в об'ємі і зоною неосновних носіїв на поверхні, та теорія цього ефекту. Розрахунки фотоерс та фотонапруги аномального знаку в більш складній системі напівпровідник — тунельний діелектрик — провідник.

2. Висновок про незалежність кінетики встановлення фотоструму від параметрів поверхневих станів для фотоперетворювачів на основі поверхнево — бар'єрних структур з тунельним діелектриком у актуальному випадку, коли ефективна швидкість емісії неосновних носіїв заряду в контакт значно перевищує ефективну швидкість поверхневої рекомбінації.

3. Теоретичні розрахунки спектральної залежності фотопровідності, поверхневої фотоерс і фотомагнітного ефекту в напівпровідниках з порушеними приповерхневими шарами, яке враховує різну товщину та різні закони дисперсії параметрів напівпровідників в цих шарах, а також критерій можливості описання рекомбінації в порушеному шарі параметром “ефективна швидкість поверхневої рекомбінації”.

4. Наближений теоретичний аналіз та чисельні розрахунки величини і знаку фотомагнітного ефекту в напівпровідниках з довжинами дифузії L_d близькими або значно меншими товщини ОПЗ w , а також висновок про неможливість реалізації аномального ФМЕ в останньому випадку.

5. Теорія затухання нелінійного сигналу локальної поверхневої фотоерс в напівпровідниках з інверсійними бар'єрами, яка побудована для дрейфового та дифузійного механізмів розтікання генерованих світлом електронно — діркових пар вздовж поверхні.

6. Нова послідовна теорія збирання фотоструму в ICE з контактною сіткою, яка виходить з двовимірного рівняння неперервності для неосновних носіїв і вводить характерну довжину збирання L_c та визначає її залежність від параметрів напівпровідника та інтенсивності освітлення.

Наукова цінність роботи визначається тим, що в ній встановлено нові фізичні механізми і закономірності явищ, які відбуваються в поверхнево — бар'єрних структурах при збудженні в них світлом електронно — діркових пар, та побудована теорія цих явищ. Отримані в дисертації результати дозволили пояснити ряд експериментальних даних, які раніше не мали обґрунтування, а також можуть бути використані надалі для розширення можливостей наявних і створення нових методів дослідження властивостей напівпровідників.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що а) виконані в ній розрахунки характеру затухання нелінійної фотоерс в неосвітлену область при локальному фотозбудженні дозволяють обґрунтувати скануючу методику експресного контролю однорідності параметрів напівпровідникових пластин, визначити чутливість і гранич-

не розділення цієї методики; б) на основі отриманого виразу для фотоструму ICE з контактною сіткою може бути виконана оптимізація структури за густиною та шириною ліній контактної сітки.

Ступінь достовірності. Достовірність та обгрунтованість отриманих в дисертації результатів забезпечується достовірністю фізичних моделей, обгрунтованістю використаних наближень та надійністю математичних методів, а також тим, що більшість отриманих у роботі результатів підтверджується співставленням з експериментальними даними та теоретичними розрахунками інших авторів.

Апробація роботи. Результати роботи доповідались і обговорювались на XII Всесоюзній конференції з фізики напівпровідників (м. Київ, 1990) та на VI Республіканській науково — технічній конференції “Фізичні проблеми МДН — інтегральної електроніки” (м. Севастополь, 1990), а також на наукових семінарах з фізики поверхневих та контактних явищ ІФН НАН України.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 8 друкованих робіт, список яких наведено у кінці реферату.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, двох розділів, післямови та списку літератури з 105 найменувань. Кожен із розділів поділений на глави; перший розділ складається з п'яти глав, другий — з двох. Дисертація викладена на 140 сторінках, які містять друкований текст та 23 малюнки.

Особистий внесок дисертанта. Автором дисертації безпосередньо виконано теоретичні розрахунки, описані в роботі, та в творчій співдружності з співавторами відповідних наукових робіт проведено фізичну інтерпретацію отриманих результатів. Тому внесок дисертанта є рівним внеску співавторів робіт.

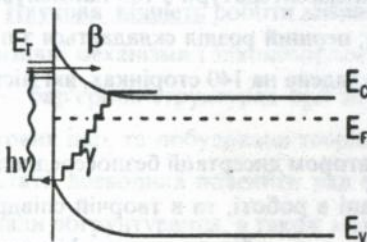
КОРОТКИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі дана загальна характеристика роботи: обгрунтована актуальність теми, визначені мета та основні завдання роботи, новизна, нау-

кова та практична цінність результатів, особистий внесок автора дисертації, сформульовані основні положення, які виносяться на захист, наведені дані, що стосуються апробації роботи і опублікування її основних матеріалів. В кінці вступу описана структура дисертації.

Розділ I. Вплив поверхні на фотоелектричні ефекти в напівпровідниках і в структурах напівпровідник — діелектрик — провідник.

У першій главі запропонована модель і виконані розрахунки релаксації поверхневої фотоерс (фотонапруги) аномального знаку, яка може виникати при домішковому поглинанні світла в напівпровідниках та структурах напівпровідник — діелектрик — провідник при низьких температурах, що спостерігалось експериментально. Аномалія фотоерс полягає в тому, що при освітленні напівпровідника поверхневий вигин зон в ньому не зменшується, а збільшується. В дисертації показано, що аномальний знак фотоерс може мати в напівпровідниках з значною багатоступінчатою тунельною рекомбінацією електронно — діркових пар, розділених полем ОПЗ. Модель, що пояснює аномальний знак поверхневої фотоерс, ілюструє малюнок. Електрони заповненої зони поглинають світло з енергією $h\nu$, меншою ширини забороне-



ної зони E_g , і переходять на поверхневі центри, причому ймовірність подальшого тунелювання електронів β з цих центрів в об'єм через бар'єр ОПЗ мала. Вільні дірки, що створені світлом біля поверхні, тунельно рекомбінують з електронами об'єму через пересаджувальні центри в ОПЗ. Якщо ймовірність тунельної рекомбінації $\gamma > \beta$, тоді ясно, що вигин зон при поглинанні світла буде збільшуватися, а фотоерс, відповідно, матиме аномальний знак.

В роботі розглянуто і більш складні системи напівпровідник — тунельний діелектрик — провідник, де, крім названих вище процесів, мож-

ливе тунелювання електронів і дірок через діелектрик. Всі ці процеси при певних співвідношеннях між їх ймовірностями (залежності ймовірностей тунелювання від прикладеної до структури напруги аналізуються) можуть приводити до аномального знаку фотоерс та фотонапруги, відповідно, в режимах розімкненого кола та протікання фотоструму.

В дисертації виконано співставлення теоретичних кривих з літературними експериментальними даними, які було отримано для CdTe при $T=100$ К та GaAs при $T < 200$ К. Співставлення показало, що побудована теорія добре описує всі особливості експериментальних кривих.

Друга глава поділяється на дві частини.

В першій частині теоретично досліджується вплив поверхневих станів на кінетику встановлення фотоструму в поверхнево — бар'єрних структурах з тунельним діелектриком. Інтерес до такої задачі викликаний тим, що в багатьох експериментах не було виявлено цього впливу, хоча концентрація поверхневих станів змінювалась в широких межах.

В дисертації розраховано залежності фотоструму від часу і показано, що вони мають різний вигляд при різному співвідношенні між ефективними швидкостями поверхневої рекомбінації S_w та вносу неосновних носіїв в контакт V_E . Так, у випадку ефективної роботи фотоперетворювача, коли $V_E \gg S_w$, фотострум встановлюється з часом перезарядки ємності ОПЗ τ_{RC} (у нашому розгляді цей час найменший серед усіх характерних часів $\tau_{RC} \rightarrow 0$) і далі не релаксує. Саме цей випадок і реалізувався в згаданих вище експериментах. Якщо ж $V_E \lesssim S_w$, фотострум спочатку наростає за час τ_{RC} , а далі релаксує до стаціонарного значення, яке тим менше, чим більша S_w . Час встановлення стаціонарного значення також залежить від співвідношення між S_w та V_E .

У другій частині п'ятої глави теоретично проаналізовано закономірності релаксації з часом ємності області просторового заряду МДН — структури при її освітленні або прикладанні до неї імпульсу напруги. По-

казано, що релаксація нерівноважного стану в бік зменшення ємності відбувається з сповільненням темпу в процесі релаксації. Це має місце завдяки перезарядці поверхневих станів і появі бар'єру, що розводить рекомбінуючі електрони і дірки, та його збільшенню в процесі релаксації.

У третій главі вивчаються поверхнево — чутливі фотоелектричні ефекти в напівпровідниках з порушеними приповерхневими шарами. Ці шари можуть мати різну товщину і описуються дисперсією часу життя $\tau_p(x)$ та коефіцієнта дифузії $D_p(x)$ неосновних носіїв заряду.

В результаті досліджень показано, що вплив порушеного шару на фотоефекти можна описати параметром “ефективна швидкість поверхневої рекомбінації” тільки тоді, коли його товщина d_0 значно менша за довжину дифузії неравноважних носіїв L_{d0} в ньому. Експериментальним критерієм цього випадку є однакова спектральна залежність поверхневої фотоерс та струму короткого замикання фотемагнітного ефекту.

Для більш товстих порушених шарів, коли $d_0 \gtrsim L_{d0}$ спершу розглянуто двошарова модель. В цій моделі величина поверхневої фотоерс визначається єдиним параметром — L_{d0} і має просту спектральну залежність. В той же час фотопровідність та струм короткого замикання ФМЕ залежать як від параметрів порушеного шару d_0, L_{d0} , так і від параметрів об'єму d, L_d , завдяки чому спектральні залежності цих величин значно ускладнюються, особливо в короткохвильовій області. Важливо також те, що спектральні залежності всіх трьох величин у цьому випадку різні. Далі чисельними методами отримані спектральні залежності фотопровідності для двох випадків зміни $\tau_p(x)$ в порушеному шарі. Ці спектральні залежності мають такі ж особливості, що і у двошаровій моделі.

Експериментально спостерігався короткохвильовий спад фотопровідності та струму ФМЕ, що описано в літературі, наприклад, для кристалів $Cd_xHg_{1-x}Te$, одна з поверхонь яких “псувалась” різними способами. Ці експериментальні дані пояснено в дисертації значною товщиною

($d_0 > L_{до}$) порушеного шару та зменшенням в ньому довжини дифузії неосновних носіїв заряду.

У четвертій главі проведено теоретичний аналіз можливості реалізації аномального фотомагнітного ефекту в напівпровідниках з довжинами дифузії L_d , близькими або меншими за товщину ОПЗ w . Теоретичні розрахунки фотомагнітного ефекту для цього випадку значно складніші, ніж при $L_d \gg w$, але цікаві і необхідні, тому, що більшість широкозонних напівпровідників мають багато глибоких центрів і, відповідно, малі довжини дифузії, так що в них може бути виконана навіть умова $L_d < w$, яка, на перший погляд, сприяє реалізації аномального знаку ФМЕ.

В дисертації проведено наближений аналіз фотомагнітного ефекту при виконанні умов $L_d \gtrsim w$ або $L_d \ll w$, і зроблені чисельні розрахунки загального випадку. В результаті досліджень показано, що в напівпровідниках з $L_d \gtrsim w$ струм аномального знаку зменшується, а в напівпровідниках з $L_d \ll w$ знак струму ФМЕ завжди додатній. Теоретичні розрахунки пояснили нормальний знак ФМЕ для GaAs поряд з різким зменшенням величини струму ФМЕ в короткохвильовій області поглинання.

У п'ятій главі досліджується формування сигналу нелінійної поверхневої фотоерс і затухання фотоструму при локальному фотозбудженні вузькою смугою або круглою плямою освітлення в напівпровідниках з інверсійними вигинами зон біля поверхні. На основі отриманих виразів сформульовано критерії використання скануючої методики визначення неоднорідності параметрів по площі напівпровідникового зразка.

Аналізується двовимірне рівняння неперервності, яке далі інтегрується по поперечній координаті. Показано, що вздовж поверхні розтікання генерованих електронно — діркових пар контролюється як при менших інтенсивностях світла тільки дрейфом неосновних носіїв, а при більших інтенсивностях: в близькому околі локального збудження — дифузією, а в подальшому околі — дрейфом. Сигнал фотоерс в неосвітлену область спадає повільно: в області, яка контролюється дифузією — за лінійним

законом, а в області, що контролюється дрейфом — логарифмічно. Така особливість затухання сигналу обумовлена наявністю вигину зон біля поверхні напівпровідника, який утруднює рекомбінацію електронно — діркових пар.

Скануюча методика вимірювання поверхневої фотоерс може бути використана для контролю однорідності параметрів напівпровідника вздовж поверхні зразка, якщо характерна довжина затухання сигналу в неосвітлену область L_3 , що введена в дисертації і залежить від інтенсивності освітлення, розмірів освітленої області та довжини рекомбінації, значно менша за розміри неоднорідності. Для зменшення довжини L_3 необхідно зменшити бар'єр, який розділяє електрони і дірки, тобто використовувати значні інтенсивності освітлення. В дисертації отримані співвідношення, які показують, що скануюча методика може бути реалізована в області тим менших інтенсивностей світла, чим менша поверхнева рухливість неосновних носіїв, їх поверхневий надлишок і об'ємний рівень легування, а також чим більші швидкості рекомбінації в об'ємі та ОПЗ.

Розділ II. Деякі особливості роботи сонячних елементів.

У шостій главі досліджується процес збирання струму в інверсійних сонячних елементах з лицьовим контактом, який виготовлений у вигляді контактної сітки. Ця проблема вивчалася багатьма авторами з використанням різних напівемпіричних моделей, найбільш відомими серед яких є моделі "однієї" та "двох експонент". В дисертації аналіз процесу збирання ведеться, виходячи з двовимірного рівняння неперервності, що з точки зору теорії є найбільш послідовним підходом.

Розглядається дрейфовий режим збирання струму, який має місце в ІСЕ навіть тоді, коли інтенсивність освітлення значно більша за сонячну. Важливим параметром теорії є характерна довжина збирання струму L_C . Ця довжина визначає відстань між елементами контактної сітки, яку не можна перевищувати для ефективної роботи сонячного елемента (оптимізований сонячний елемент). Залежність L_C від параметрів напівпро-

відника, інтенсивності освітлення та вигину зон під контактом отримана в роботі в аналітичному вигляді. Таким чином, знайдено прості критерії для оцінки ефективності роботи сонячного елемента.

В результаті досліджень показано також, що емпірична модель "двох експонент", яка використовується найбільш широко, описує тільки оптимізовані сонячні елементи. При відстані між елементами контактної сітки, більшій за L_C , ефективність фотоперетворення різко зменшується, а вольт — амперна характеристика сонячного елемента значно ускладнюється. Окремо вивчається в цій главі роль послідовного опору сонячного елемента R_{II} . Показано, що R_{II} негативно впливає на ефективність фотоперетворення не тільки через падіння напруги на ньому, але й тому, що це падіння приводить до зменшення довжини збирання L_C .

У сьомій главі аналізується вплив стану області просторового заряду біля тилового контакту на фотоерс сонячного елемента або фотоелемента при різних інтенсивностях освітлення. В роботі вважається, що стан ОПЗ може змінюватися в широких межах: від сильного збагачення до глибокої інверсії, а також враховане те, що ефективна швидкість поверхневої рекомбінації S_w нелінійно залежить від інтенсивності освітлення I , тобто задача вирішується самоузгоджено.

В результаті проведених досліджень показано, що сонячні елементи мають найбільшу фотоерс при збагачуючих та незначних збіднюючих вигинах зон біля тилового контакту. Фотоерс зменшується при значних збіднюючих та інверсійних вигинах зон. В цих випадках її залежність від інтенсивності освітлення I стає немонотонною (криві з максимумом). Відбувається це через модуляцію $S_w(I)$. Зменшення фотоерс і немонотонний характер залежності від I мають місце навіть в фотоелементах з товстою базою $d \lesssim 10L_D$, але особливо сильно відчувається це в фотоелементах з тонкою базою $d \lesssim L_D$. Немонотонні залежності фотоерс від інтенсивності освітлення спостерігалися експериментально в кремнієвих фотоелементах. Теоретичні розрахунки пояснюють ці експерименти.

Теоретичні дослідження виявили також цікавий факт незалежності фотоерс від інтенсивності освітлення в широкому діапазоні зміни $I \approx 10^{15} + 10^{18}$ квант-см⁻²-с⁻¹ при значних інверсійних вигинах зон на тило-вому контакті. Цей факт може бути використано при розробці нових приладів.

Дисертація має підсумок, в якій коротко перераховані основні результати роботи.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.

1. Теоретично розглянуто релаксацію аномальної поверхневої фотоерс (збільшення приповерхневого вигину зон в напівпровіднику при освітленні) та аномальної фотонапруги (зміна знаку фотоструму), які можуть виникати в напівпровідниках і структурах напівпровідник—діелектрик—провідник при домішковому поглинанні світла і низьких температурах. Показано, що такий знак вказані величини можуть мати тоді, коли має місце значна багатоступінчата тунельна рекомбінація електронно — діркових пар, розділених полем ОПЗ напівпровідника або розділених тунельно тонким діелектриком. Теорія добре описує всі особливості опублікованих експериментальних результатів, наприклад, для CdTe, GaAs.

2. Теоретично проаналізовано вплив перезарядки поверхневих станів на кінетику встановлення фотоструму в поверхнево — бар'єрних структурах з тунельно — тонким діелектриком. Показано, що такий вплив відсутній при умові ефективної роботи фотоперетворювача, коли ефективна швидкість виносу неосновних носіїв в контакт V_E значно перевищує ефективну швидкість поверхневої рекомбінації S_w . В протилежному випадку, коли $V_E \lesssim S_w$, перезарядка поверхневих станів суттєво впливає як на стаціонарне значення, так і на час встановлення фотоструму. Ці результати змогли пояснити експериментальні дані про незалежність кінетики фотоструму від параметрів поверхневих станів в кремнієвих МДН—структурах тим, що в них виконувалась умова $V_E \gg S_w$.

3. В різних моделях порушеного шару проведено теоретичний аналіз спектральних залежностей фотопровідності, поверхневої фотоерс та фотомагнітного ефекту для напівпровідників з порушеними приповерхневими шарами. Показано, що вплив порушеного шару на вказані фото ефекти можна описати параметром “ефективна швидкість поверхневої рекомбінації” лише тоді, коли товщина шару значно менша за довжину дифузії неосновних носіїв в ньому. Експериментальним критерієм цього випадку є однакова спектральна залежність малосигнальної поверхневої фотоерс та струму фотомагнітного ефекту. При більш товстих порушених шарах спектральні залежності фото ефектів значно ускладнюються, особливо в короткохвильовій області, і, що важливо, всі мають різний вигляд.

4. Проведено наближений теоретичний аналіз та чисельні розрахунки величини і знаку ФМЕ в напівпровідниках з довжинами дифузії більшими, близькими або значно меншими товщини ОПЗ. Зроблено висновок про неможливість існування аномального ФМЕ в останньому випадку.

5. При локальному фотозбудженні досліджено механізми формування нелінійної поверхневої фотоерс (значні інтенсивності освітлення) в напівпровідниках з інверсійними вигинами зон. Показано, що внаслідок існування значного приповерхневого бар'єру, який розводить рекомбінуючі електронно — діркові пари, затухання сигналу фотоерс в неосвітлену область відбувається повільно: за логарифмічним законом, якщо розтікання генерованих пар вздовж поверхні контролюється дрейфом, і за лінійним — при перевазі дифузії. Виходячи з отриманих співвідношень, сформульовано умови застосування скануючої методики визначення неоднорідності параметрів по площі напівпровідникового зразка.

6. Проведено аналіз процесу збирання струму в сонячних елементах інверсійного типу з контактною сіткою, виходячи з двовимірного рівняння неперервності, що з погляду теорії є найбільш послідовним підходом. Запропонований метод дозволив записати в аналітичному вигляді прості критерії оцінки ефективності збирання, а також — більш точно проаналізувати вольт — амперну характеристику сонячного елемента.

7. Теоретично досліджено фотоерс сонячних елементів та фотоелементів з неомічним тилловим контактом в залежності від інтенсивності освітлення. Показано, що фотоерс зменшується при збіднюючих та інверсійних вигинах зон біля тилового контакту, а її залежність від інтенсивності освітлення стає немонотонною (криві з максимумом), що пояснює експериментальні залежності. Теоретичні дослідження виявили також цікавий факт незалежності фотоерс від інтенсивності освітлення в широкому діапазоні зміни $I \approx 10^{15} + 10^{18}$ квант·см⁻²·с⁻¹ при інверсійних вигинах зон на тилловому контакті.

Основні результати дисертації опубліковано в роботах:

1. Саченко А. В., Паничевская Т. В. Нелинейная поверхностная фото—эрс в структурах диэлектрик — полупроводник с инверсионными барьерами при локальном фотовозбуждении // УФЖ. - 1991. - т. 36. - № 9. - С. 1384—1389.
2. Саченко А. В., Паничевская Т. В. О влиянии поверхностных состояний на кинетику фототока в поверхностно — барьерных структурах с туннельным диэлектриком // УФЖ. - 1993. - т. 38. - № 8. - С. 1269—1273.
3. Саченко А. В., Зуев В. О., Панічевська Т. В. Моделивання фотоерс ефектів при наявності порушених приповерхневих шарів // УФЖ. - 1995. - т. 40. - № 8. - С. 862—866.
4. Новомінський Б. А., Панічевська Т. В., Саченко А. В. Фотомагнітний ефект в напівпровідниках з малими довжинами дифузії // УФЖ. - 1995. - т. 40. - № 10. - С. 1106—1108.
5. Саченко А. В., Шкретий А. И., Паничевская Т. В. Теоретическая модель солнечного элемента с контактной сеткой // Оптоэлектр. и полупр. техн. - 1991. - вып. 21. - С. 63—70.
6. Саченко А. В., Паничевская Т. В. Аномальные поверхностная фото—эрс и фотонапряжение в полупроводниках и в структурах проводник—диэлектрик—полупроводник // Препринт № 9—89. Институт полупроводников АН УССР. - Киев. - 1989 г. - 20 с.

7. Гусев В. А., Паничевская Т. В., Саченко А. В., Турчаников В. И. Релаксационные методы определения электрофизических параметров поверхности — барьерных структур // Препринт № 9—91 г. Институт полупроводников АН УССР. - 1991. - 30 с.

8. Саченко А. В., Шкретий А. И., Паничевская Т. В. Теоретический анализ эффективности фотопреобразования в солнечных элементах инверсионного типа // Тезисы докладов 6—ой Республиканской конференции "Физические проблемы МДП — интегральной электроники". - Севастополь. - июнь, 1990. - С. 156.

SUMMARY

Panichevskaya T.V. The formation and relaxation features for nonequilibrium photoelectric effects in the surface-barrier semiconductor structures.

The physics and mathematics candidate thesis on speciality 01.04.07 — Solid State Physics (typescript). Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1997.

Eight scientific papers are defended. They contain the results of theoretical investigations of the nonequilibrium photoelectric effects in the surface-barrier semiconductor structures. In the thesis: a) a model is proposed for formation of the surface photovoltage of anomalous sign under the impurity light absorption; b) the reasons are given for the fact that kinetics of photocurrent establishment in the tunnel insulator structures is independent of the surface states parameters at efficient photoconversion; c) an analysis is given for the spectral dependencies of photoconductivity, surface photovoltage and photomagnetic effect in semiconductors with damaged near-surface layers; d) the criteria are formulated for the anomalous photomagnetic effect occurrence in semiconductors with small diffusion lengths; e) for semiconductors with inversion layers the mechanisms of the nonlinear surface photovoltage response formation under local photoexcitation are investigated; f) a novel consistent theory of the photocurrent collection is developed for solar cells with a collector grid.

АННОТАЦІЯ

Паничевская Т. В. Особенности формирования и релаксации неравновесных фотоэлектрических эффектов в поверхностно — барьерных полупроводниковых структурах.

Диссертация (рукопись) на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика твёрдого тела, Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, 1997.

Защищается 8 научных работ, которые содержат результаты исследований теоретическими методами неравновесных фотоэлектрических эффектов в поверхностно — барьерных полупроводниковых структурах. В диссертации а) предложена модель формирования поверхностной фотоэдс (фотонапряжения) аномального знака в условиях примесного поглощения света; б) обоснована независимость от параметров поверхностных состояний кинетики установления фототока в структурах с туннельным диэлектриком при эффективной работе фотопреобразователя; в) проанализированы спектральные зависимости фотопроводимости, поверхностной фотоэдс и фотемагнитного эффекта для полупроводников с нарушенными приповерхностными слоями; г) записаны критерии существования аномального фотемагнитного эффекта в полупроводниках с малыми длинами диффузии; д) исследованы механизмы формирования сигнала нелинейной поверхностной фотоэдс при локальном фотовозбуждении в полупроводниках с инверсионными барьерами; е) построена новая последовательная теория собирания фототока в солнечных элементах с контактной сеткой.

Ключові слова: довжина дифузії, неосновні носії заряду, область просторового заряду, поверхневі стани, поверхнева фотоерс, поверхнево—бар'єрна структура, порушені шари, сонячний елемент, тунельна рекомбінація, фотемагнітний ефект, швидкість поверхневої рекомбінації.

Подл. к печати *11.0.98* Формат *60x84* Бумага офс.
Усл. печ. л. *253* Уч.-изд. л. *88* Тираж *100* Зак. *1905*.

ОАО «Книжная типография научной книги»
252030, Киев-30, ул. Б. Хмельницького, 19.

6.25-260

AB 37.392

AB 37.392