

КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

ВЕРХОВОДОВ МАКСИМ ПЕТРОВИЧ

НЕРІВНОВАЖНІ ПРОЦЕСИ В ПЛАВНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ
В РІЗНОДОЛИННИМ ПЕРЕХОДОМ ТА ГРАДІЄНТНИМ ЛЕГУВАННЯМ

01.04.10 - фізика напівпровідників та діелектриків

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1993

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Київському університеті імені Тараса Шевченка.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
ПЕКА Генрієтта Павлівна.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
ВОРОБИЙОВ Дрiй Васильович,
доктор фізико-математичних наук, професор
КОМАШЕНКО Валерiй Миколайович.

Провідна організація: Інститут фізики АН України, Київ.

Захист відбудеться "21" Березня 1994 р. о 15 год. в ауд. 46
на засіданні спеціалізованої вченої ради К 068.18.01 в Київському
університеті ім. Тараса Шевченка (252127, м. Київ, вул. Ковалевської, 1, радіофізичний факультет).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського університету ім. Тараса Шевченка (252017, Київ, вул. Володимирська 62).

Автореферат розісланий "18" лютого 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Шкавро А. Г.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00756691 (Y)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перспективним шляхом створення приладів з унікальними можливостями на основі нових фізичних ефектів є дослідження матеріалів, властивості яких плавно змінюється уздовж одного чи декількох напрямків. Серед таких матеріалів провідне місце займають гетероструктури з плавною координатною залежністю складу твердого розчину (варизонні напівпровідники). До цього часу основна увага приділялась однорідно легованим однодолинним варизонним структурам, в яких особливості прояву фізичних явищ та поява нових ефектів, що не властиві гомозонним структурам, зумовлені наявністю квазіелектричних полів, які дозволяють ефективно впливати на перенос нерівноважних неосновних носіїв заряду, а також ефектом широкозонного "вікна", що надає цим матеріалам унікальні оптичні властивості.

На сучасному етапі привертать увагу гетероструктури, в яких поряд з градієнтом ширини забороненої зони створюється градієнт провідності. Так створено унікальні фотоприймачі з керованими спектральними характеристиками на основі варизонних інжекційних фотодіодів, в яких провідність однорідно легованої бази модулюється завдяки інжекції нерівноважних носіїв.

Перспективним при розробці нових фотоелектричних приладів з розширеними функціональними можливостями є використання плавних гетероструктур з неоднорідним легуванням, зокрема з градієнтом компенсації. Це робить актуальним дослідження інжекційних явищ в варизонних діодних структурах з градієнтно легованою базою в умовах фотозбудження.

Градієнт провідності в рівноважному стані реалізується також в однорідно легованих плавних гетероструктурах з різнодолинним переходом, в околі якого рухливість електронів і глибина залітання донорного рівня різко змінюється. В таких структурах очікується поява принципово нових особливостей в протіканні нерівноважних процесів, що зумовлені перерозподілом електронів між нееквівалентними долинами та змінов енергетичного спектру домішкових рівнів. Отже необхідно розробити новий підхід до аналізу нерівноважних процесів в багатодолинних твердих розчинах з урахуванням цих особливостей.

Ключовим проявом зміни енергетичного спектру донорних рів-

нів в околі різнодолинного переходу є те, що електричні властивості матеріалу визначаються глибоким рівнем, енергія іонізації якого суттєво залежить від складу твердого розчину і досягає сотен мев поблизу різнодолинного переходу. Традиційні моделі, на яких базуються ємнісні методи дослідження глибоких рівнів, виявляються непридатними для визначення енергетичного спектру донорних рівнів в області різнодолинного переходу, оскільки ці рівні одночасно є легувчими. Тому актуальною задачею є розробка моделі ємнісних властивостей бар'єрних структур на основі твердих розчинів з різнодолинним переходом та створення відповідних методик дослідження донорних центрів в області різнодолинного переходу.

Мета роботи полягала в дослідженні переносу нерівноважних носіїв заряду (ННЗ) в градієнтно легованих варизонних структурах в умовах фотозбудження; у вивченні природи та умов існування вбудованих полів в плавних гетероструктурах з різнодолинним переходом та впливу їх на процеси переносу; а також в дослідженні ємнісних характеристик бар'єрних структур зі складом близьким до різнодолинного переходу.

Основні задачі.

1. Дослідити вплив градієнтної компенсації варизонної бази інжекційних фотодіодів (ІФД) на інжекційні явища в умовах фотозбудження. Розрахувати спектри вольтової fotocутливості таких фотодіодів при різних рівнях інжекції та проаналізувати можливість керування формою спектральних характеристик при зміні величини струму.

2. Розрахувати координатну залежність вбудованих полів для електронів і дірок в плавних гетероструктурах з різнодолинним переходом з урахуванням перерозподілу електронів між долинами та координатної залежності енергетичного спектру рівнів донорної домішки. Проаналізувати залежність цих полів від температури та ступеня компенсації. Розробити загальну систему рівнянь переносу та рекомбінації ННЗ в структурах з різнодолинним переходом.

3. З'ясувати причину принципових особливостей ємнісних характеристик бар'єрних структур при виморожуванні легувчих центрів. Розрахувати температурну залежність бар'єрної ємності різких та плавних р-п-переходів зі складом близьким до різнодолинного переходу.

4. Розробити ємносні методи визначення параметрів легуваних домішок в області різнодолиного переходу твердих розчинів. Застосувати розроблені методи для визначення енергії іонізації донорів в $Al_xGa_{1-x}As$ ($0.2 < x < 0.7$).

Наукова новизна результатів, які отримані в роботі.

1. Вперше показано, що особливості фотозбудження та переносу НІЗ в градієнтно компенсованих варизонних структурах дають можливість реалізувати екстремально селективні спектри fotocутливості ІФД на основі таких структур.

2. Теоретично передбачено та підтверджено експериментально існування оптимальних ступенів градієнтної компенсації fotocутливої бази варизонних ІФД, при яких реалізується керування спектральними характеристиками інжекційним струмом від селективних до широкосмугових.

3. Вперше показано, що для опису переносу НІЗ в плавних гетероструктурах з різнодолиним переходом необхідно вводити вбудоване поле для основних носіїв, яке визначається градієнтом глибини залігання легувачого донора. Виявлено, що це поле локалізовано в області різнодолиного переходу і суттєво залежить від температури: при низьких температурах порівняє за величиною до квазіелектричних полів для неосновних носіїв, а при високих зменшується до нуля.

4. Вперше показано, що зменшення високочастотної ємності бар'єрних структур на основі твердих розчинів при виморожуванні легуваних донорів в області різнодолиного переходу зумовлено зростанням Дебаєвської довжини екранування при низьких температурах і її внеском в ємність.

5. Вперше запропоновано метод визначення енергії іонізації легуваних донорів в області різнодолиного переходу, який ґрунтується на вимірюванні температурної залежності стаціонарної ємності при різних прикладених напругах.

Практична цінність роботи

1. Проведені дослідження дозволили запропонувати інжекційні фотодіоди з градієнтно легуваною варизонною базою на основі $Al_xGa_{1-x}As$, в яких реалізується:

а) рекордна селективність спектральних характеристик - напівширина області спектральної чутливості 20-30 меВ;

б) висока абсолютна струмова фоточутливість 10^2-10^3 А/Вт при $T=300$ К;

2. Знайдено умови оптимальної компенсації варизонної бази інжекційних фотодіодів, при яких реалізується висока ефективність керування областю спектральної чутливості при зміні струму. Напівширина спектральних характеристик змінюється більш як в 20 разів від 30 меВ при низькому рівні інжекції до 700 меВ при високому.

3. Запропоновано метод визначення глибини залігання донорного рівня в твердих розчинах зі складом близьким до різнодолинного переходу.

Положення, які виносяться на захист

1. В плавних гетероструктурах n-типу з різнодолинним переходом існує залежне від температури вбудоване поле для основних носіїв, яке зумовлене градієнтом глибини залігання легувчого донора.

2. В плавних гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}As$ вбудоване поле для електронів змінює знак в області різнодолинного переходу, якщо в заборонену зону виходять всі енергетичні рівні донора, пов'язані з трьома долинами, на відміну від випадку дворівневого спектру донору в забороненій зоні.

3. В області різнодолинного переходу в результаті виходу в заборонену зону глибокого рівня, який утворений DX-центром і пов'язаний з верхньою L-долиною, змінюється роль цього центру в формуванні бар'єрної смістості, оскільки він одночасно є глибоким і легувчим. Це зумовлює такі аномалії смістості властивостей бар'єрних структур на основі $Al_xGa_{1-x}As$ зі складом близьким до різнодолинного переходу: сильну температурну залежність стаціонарної смістості та відсутність залежності смістості від прикладеної напруги при низьких температурах.

4. Енергія іонізації DX-центру, яка визначає температурну залежність стаціонарної смістості бар'єрних структур на основі $Al_xGa_{1-x}As$, може бути визначена з вимірювання стаціонарних C-V-характеристик в широкому температурному інтервалі.

5. В варизонних інжекційних фотодіодах з плавним р-п-переходом та градієнтно легованов базов формуються селективні, широкосмугові або керовані струмом спектральні характеристики в залежності від ступеня компенсації варизонного шару.

6. Висока селективність спектральних характеристик варизонних інжекційних фотодіодів з плавним р-п-переходом забезпечується значним градієнтом провідності в базі, локальністю фотогенерації нерівноважних носіїв та гальмуючов дією вбудованого поля, зумовленого градієнтним легуванням.

Апробація роботи. Результати роботи були представлені на II Всесоюзній конференції "Фотоелектричні явища в напівпровідниках" (Ашгабат, 1991), науково-технічній конференції "Фізичні основи надійності та деградації напівпровідників" (Н.Новгород-Астрахань, 1992) та на IV Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993).

Публікації. За матеріалами роботи опубліковано 6 статей.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох оригінальних глав, двох додатків та списку цитованої літератури. Об'єм дисертації складає 133 сторінки друкованого тексту, включаючи 32 рисунки, 2 таблиці і бібліографів із 107 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність теми, поставлено мету роботи та основні задачі, сформульовано положення, які виносять ся на захист, наукова новизна та практична цінність роботи.

В першій главі досліджено особливості процесів переносу $\text{H}\beta$ в плавних гетероструктурах з градієнтно легованов варизоннов базов в умовах фотозбудження.

Для створення фотоприймачів з спектральними характеристиками спеціального типу запропоновано застосовувати варизонні діодні структури з неоднорідно легованов базов. Це обгрунтовано аналізом особливостей формування спектрів fotocутливості варизонних ІФД, які полягають в тому, що фотосигнал формується за рахунок зміни опору бази, а фотозбудження варизонної структури монохро-

матичним світлом відбувається локально в околі точки, в якій енергія фотонів дорівнює ширині забороненої зони. Отже створюючи області з підвищеним (пониженим) опором в базі ІФД можна формувати спектральні характеристики з максимумами (мінімумами) для заданих енергій збуджувачого світла.

Аналіз проводиться для типових структур варізонних інжекційних фотодіодів з плавним р-п-переходом (Рис.1). В цих структурах градієнт легування утворюється в квазінейтральній області (КНО) на границі з областю просторового заряду. Оцінки показали, що відношення темнових опорів на границі КНО і в глибині, яке визначається відношенням концентрацій $n_0(-)/n_{опз}$, може досягати декількох порядків при типових значеннях параметрів, характерних для р-п-структур на основі $Al_xGa_{1-x}As$.

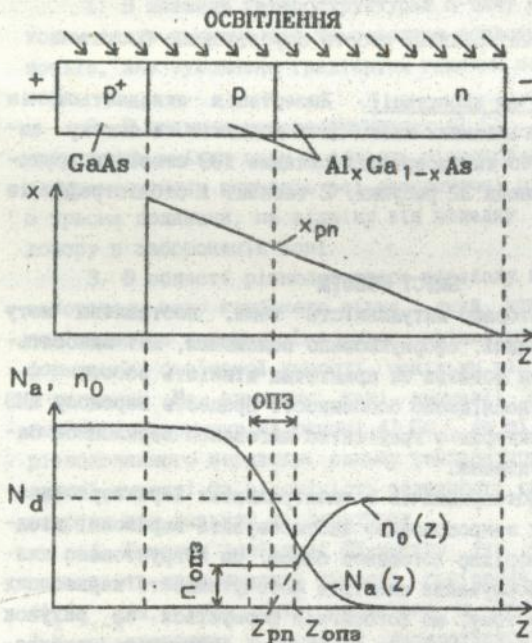


Рис. 1.
Схематичне зображення структури.

Проаналізовано трансформацію характеристик градієнтно компенсованої області при введенні в структуру додаткових компенсуючих акценторів (наприклад, шляхом радіаційного опромінення). З'ясовано, що поряд з позитивним впливом, який полягає в підвищенні величини фоточутливості внаслідок збільшення опору бази ІФД, додаткова компенсація призводить до зменшення градієнту опору в базі і навіть до зникнення неоднорідності опору при високих ступенях компенсації. Таким чином додаткова компенсація дозволяє ефективно змінювати тип спектральних характеристик ІФД від селективних до широкосмугових.

Розраховано координатний розподіл темної концентрації нерівноважних носіїв в n-області фотодіоду при різних струмах інжекції і досліджено вплив на характеристики цього розподілу вбудованого поля $\xi_n = -kT/q \cdot v \ln(N_d - N_n)$, яке зумовлено градієнтом компенсації. Показано, що вплив поля ξ_n залежить від величини струму інжекції, і знайдено діапазон струмів, при яких гальмує дія поля ξ_n є визначальною в переносі ННЗ.

При низьких величинах струму через ІФД, коли істотна гальмує дія поля ξ_n , інжекція ННЗ не призводить до суттєвих змін темного розподілу опору бази і формуються селективні спектральні характеристики. При високих струмах, коли поле ξ_n вже не перешкоджає просуванню фронту високого рівня інжекції вглиб структури, відбувається вирівнювання темного опору бази і формуються широкосмугові спектральні характеристики. Отже, при зміні струму реалізується оборотне керування областю спектральної чутливості.

Для проведення коректних розрахунків спектрів фоточутливості досліджуваних структур проведено аналіз функції оптичної генерації ННЗ при освітленні через бокову поверхню під довільним кутом до напрямку градієнту ширини забороненої зони. Визначено інтервал кутів освітлення, при яких функцію генерації можна вважати одновимірною і локалізованою в об'ємі структури. Встановлено, що для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ цей інтервал становить $0^\circ - 80^\circ$.

Проведено розрахунки селективних спектрів вольтової фоточутливості і співставлення їх з експериментальними спектрами ІФД, які для підвищення абсолютного значення фоточутливості було піддано радіаційному опроміненню електронами з енергією 4.5 MeV в інтервалі доз $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$ і нейтронами з енергією 2.0 MeV в

інтервали доз 10^{13} - 10^{15} см⁻². Теоретичні спектральні залежності при значеннях параметрів (градієнту ширини забороненої зони, дифузійної довжини зміщення НІЗ та параметру Урбаха), які було визначено із незалежних вимірювань, добре описують усі експериментально спостережувані особливості вузькосмугових спектральних характеристик, напівширина яких складала 20-30 меВ.

При оптимальній дозі опромінення електронами $3 \cdot 10^{16}$ см⁻² було отримано керовані струмом спектри fotocутливості, напівширина яких змінювалась більш як в 20 разів від ≈ 30 меВ при низькому струмі до ≈ 700 меВ при високому. При великих дозах опромінення (більше $6 \cdot 10^{16}$ см⁻²) спостерігались лише широкосмугові спектральні характеристики, які не залежали від струму через ІФД. Проведено узгоджене пояснення цих результатів.

Друга глава присвячена теоретичному дослідженню особливостей процесів переносу НІЗ в плавних гетероструктурах з різнодолинним переходом.

Проведено аналіз зонної діаграми однорідно легованої і однорідно компенсованої градієнтної структури n-типу на основі твердого розчину з різнодолинним переходом з урахуванням перерозподілу електронів між трьома нееквівалентними долинами зони провідності (Г, X та L долинами) та специфіки заповнення донорних центрів, яка зумовлена зміною енергетичного спектру донорних рівнів в області різнодолинного переходу (Рис.2).

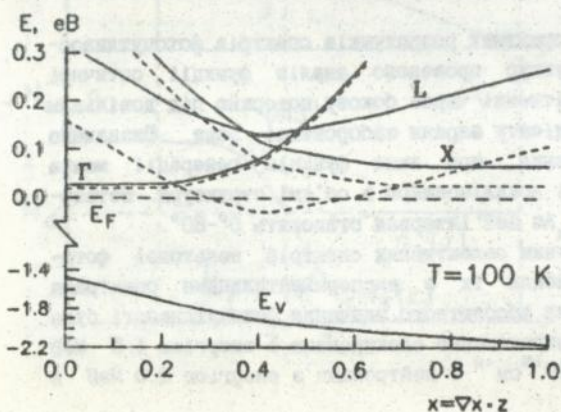


Рис. 2.
Зонна діаграма плавної гетероструктури на основі $Al_xGa_{1-x}As$.
 $T = 100$ K.
 $N_d = 10^{16}$ см⁻³.

Показано, що в багатодолинних варизонних структурах існують окремо для кожної із долин вбудовані поля $\delta_{n_i}^* = -kT/q \cdot \ln[n_{0_i}]$ ($i = \Gamma, L, X$), які визначається градієнтом рівноважної концентрації електронів у відповідній долині.

При аналізі нерівноважних процесів кожне вбудоване поле $\delta_{n_i}^*$ необхідно враховувати у відповідному рівнянні, яке пов'язує густину струму в i -ій долині та концентрацію нерівноважних електронів в цій долині. Розраховано сумарну густину струму електронів у всіх долинах і виявлено, що для характеристики особливостей переносу ННЗ в структурах з різнодолинним переходом необхідно вводити результуюче вбудоване поле $\delta_n^* = \sum f_i \cdot \delta_{n_i}^*$, де f_i - функції заповнення долин, а сума береться по всім долинам. Результуюче поле δ_n^* включає в себе вклади від усіх полів $\delta_{n_i}^*$ у відповідності до ступеня заповненості долин і може бути переписаним у вигляді $\delta_n^* = -kT/q \cdot \ln[n_0]$.

Розраховано вбудоване поле для дірок і показано, що воно суттєво змінюється при появі поля δ_n^* .

Записана загальна система рівнянь для розрахунку нерівноважних процесів в багатодолинних варизонних структурах, яка враховує особливості переносу ННЗ в області різнодолинного переходу, причому у кінцеві вирази входить повна концентрація електронів в зоні провідності.

Проведено дослідження координатної і температурної залежності результуючого поля δ_n^* . Встановлено, що в тридолинній моделі (яка справедлива для багатьох твердих розчинів A^3B^5) поле δ_n^* локалізовано поблизу різнодолинного переходу і по різні боки від переходу має різні знаки.

Найбільші значення поля δ_n^* реалізуються при низьких температурах, коли донорні центри практично повністю заповнені електронами. Причому в структурах з високою компенсацією величина поля δ_n^* вдвічі більша ніж у випадку некомпенсованих структур. Встановлено, що максимальні величини поля δ_n^* порівняні з величиною поля для дірок і досягають 40-60 В/см в $Al_xGa_{1-x}As$ при типовому значенні $x=100 \text{ мкм}^{-1}$. Такі великі значення поля для основних носіїв в однорідно легованих структурах можна досягти лише в багатодолинних твердих розчинах. При високих температурах, коли донори повністю іонізовані поле δ_n^* зникає (відбувається взаємна компенсація полів $\delta_{n_i}^*$), хоча край зони провідності суттєво зале-

жить від координати створюючи ілюзію наявності вбудованого поля.

Досліджено особливості вбудованих полів в дводинних твердих розчинах (наприклад, Ge_xSi_{1-x}) і виявлено, що вбудоване поле \mathcal{E}_n^0 у всій структурі має постійний знак.

В третій главі теоретично досліджуються аномалії ємносних властивостей багатодинних твердих розчинів.

Показано, що аномальні ємносні властивості бар'єрних структур на основі твердих розчинів зі складом близьким до різнодинного переходу не пояснюються традиційною моделлю, яка розроблена в наближенні повної іонізації легуючих домішок, оскільки внаслідок специфіки енергетичного спектру донорних рівнів в околі різнодинного переходу в цих матеріалах відбувається виморожування вільних носіїв на домішкові центри вже при температурах нижче 250 К.

Для визначення принципових особливостей бар'єрних структур на основі твердих розчинів, розглянуто спрощену модель різкого асиметричного p^+-n -переходу в наближенні різкої границі між ОПЗ та КНУ (Рис. 3. а).

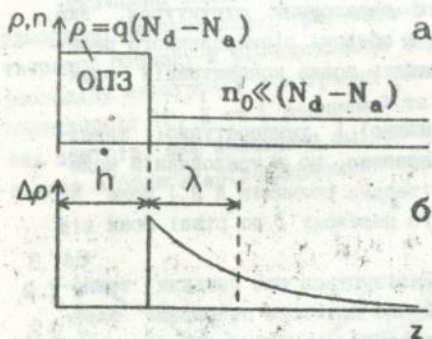


Рис. 3. Модуляція об'ємного заряду вільних електронів.

При прикладенні малого змінного сигналу високої частоти модуляція об'ємного заряду в структурі відбувається лише за рахунок зміни заряду вільних носіїв в КНУ. На основі розв'язку рівняння Пуассона показано, що профіль зміни об'ємного заряду має форму Дебайєвського "хвоста" (Рис. 3. б): $\Delta\rho \sim \exp(-z/\lambda)$, параметр

спаду якого $\lambda = \sqrt{\epsilon\epsilon_0 kT/q^2 n_0}$ суттєво залежить від температури і при низьких температурах може значно переви-

щувати товщину ОПЗ $h = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 (-V_a + V_b)/q(N_d - N_a)}$, яка визначається прикладеною напругою V_a , контактних різниці потенціалів V_b та повними концентраціями донорів N_d і акцепторів N_a .

На основі розрахунку високочастотної ємності сформульовано такі аномальні особливості ємності бар'єрних структур на основі твердих розчинів, в яких в області різнодолинного переходу реалізується неповна іонізація донорних центрів:

а) на відміну від випадку повної іонізації донорних центрів, ємність визначається не товщиною ОПЗ, а ефективною довжиною, яка є сумою товщини ОПЗ h та Дебаєвської довжини екранування λ : $C = \epsilon \epsilon_0 S / (h + \lambda)$, де S - площа бар'єру;

б) ємність залежить від температури внаслідок збільшення λ при виморожуванні вільних носіїв;

в) при низьких температурах, коли $h < \lambda$, ємність практично не залежить від прикладеної напруги, не дивлячись на те, що товщина ОПЗ сильно залежить від V_a .

Наведені вище властивості, які витікали із спрощеного аналізу, повністю підтверджено точними розрахунками ємності бар'єрних структур з різкими і плавними р-п-переходами з урахуванням особливостей розподілу об'ємного заряду та концентрації електронів при виморожуванні легуваних донорів.

Знайдено, що в частинному випадку некомпенсованих різких р⁺-п-переходів додатковим фактором, який викликає температурну залежність ємності є збільшення товщини ОПЗ в умовах виморожування донорів.

Встановлено, що в бар'єрних структурах на основі плавних гетеропереходів з різнодолинним переходом обмеження ємності при пониженні температури зумовлено зменшенням глибини донорного рівня в об'ємі, тоді як для гомозонних структур обмеження ємності пов'язано з розмірними ефектами.

В четвертій главі досліджено ємнісні характеристики плавних р-п-переходів на основі $Al_x Ga_{1-x} As$ зі складом близьким до різнодолинного переходу.

Виявлено, що в широкому інтервалі складів ($0.2 < x < 0.7$) стаціонарні ємнісні характеристики досліджуваних р-п-переходів підкоряються таким закономірностям: при пониженні температури від кімнатної до азотної відбувається аномальне падіння ємності в 5-10 разів, також при пониженні температури спостерігається суттєве ослаблення залежності ємності від прикладеної напруги, аж до зникнення цієї залежності при низьких температурах.

Спостережувані особливості узгоджено пояснено виморожуванням вільних носіїв на донорний рівень, який має аномально велику енергію іонізації в області різнодолинного переходу. Показано, що на користь приведеного пояснення свідчать такі експериментальні факти: аномальна немонотонна температурна залежність амплітуди релаксації смістості при зміні зворотної напруги, а також відсутність температурної залежності смістості в інтервалі 80-300К при складах $x < 0.2$, коли енергія іонізації легуючого донора мала.

За результатами вимірів стаціонарних $C-V$ -характеристик при різних температурах визначено профілі концентрації електронів в КНО в умовах виморожування легуючих центрів. Знайдено, що при всіх температурах в досліджуваних зразках профілі концентрації електронів залишались лінійними функціями координати, а зменшення кута нахилу цих залежностей при пониженні температури відповідало зменшенню ступеня іонізації донорів. Це свідчить про справедливність базових припущень, зроблених в третій главі при розрахунку смістості плавних $p-n$ -переходів.

Розроблено метод визначення температурної залежності ступеня іонізації донорних центрів за даними вимірів температурної залежності смістості при різних зворотніх напругах. З температурної залежності ступеня іонізації донорів визначена їх енергія термічної іонізації.

Визначена запропонованим методом величина енергії іонізації донору (Si) немонотонним чином залежить від складу $Al_x Ga_{1-x} As$, набуваючи максимальних значень (160 мев) при складах близьких до різнодолинного переходу. Така залежність співпадає з літературними даними, отриманими Холлівськими методами.

Визначена енергія зв'язку глибокого донорного рівня з відповідних L-долинов, яка для всіх досліджуваних складів ($0.2 < x < 0.7$) була практично однаковою і становила 160 ± 10 мев.

Основні результати і висновки.

1. Розрахунок спектрів вольтової чутливості інжекційних фотодіодів з градієнтно компенсованих базов показав, що в таких структурах формуються високоселективні спектральні характеристики, положення максимуму яких визначається складом твердого розчину на $p-n$ -переході.

2. Теоретично передбачено та підтверджено експериментально, що в варіантних інжекційних фотодіодах з плавним р-п-переходом формуються різні типи спектральних характеристик в залежності від ступеня компенсації. При низьких ступенях компенсації спектри селективні, а при високих - ширококутові.

3. Розвинуто теорію нерівноважних процесів в однорідно легуваних плавних гетероструктурах з різнодолинним переходом. Встановлено, що особливість протікання цих процесів зумовлена існуванням нового типу вбудованого поля для електронів внаслідок градієнта глибини залігання донорного рівня.

4. Дослідження умов існування вбудованих полів для електронів показало, що вони локалізовані в області різнодолинного переходу і максимальні величини цих полів досягаються при низьких температурах і високій компенсації.

5. Створено модель смислових властивостей бар'єрних структур на основі твердих розчинів A^3B^5 зі складом близьким до різнодолинного переходу. Показано, що особливості цих властивостей зумовлені збільшенням розміру області модуляції об'ємного заряду малим сигналом в умовах виморожування легуваних центрів. Це пояснює спостережувані при пониженні температури зменшення смислі і ослаблення залежності смислі від прикладеної напруги.

6. Сформульовано правило, згідно якого високочастотна смисль визначається сумою товщини області збідненої вільними носіями та ефективною довжини екранування вільних носіїв в квазинейтральній області.

7. Показано, що аномальні характеристики стаціонарної смислі бар'єрних структур на основі твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ зі складами $0.2 < x < 0.7$ в широкому температурному інтервалі (80-300K) зумовлені виморожуванням вільних носіїв на легуваний донорний рівень, який прив'язаний до L-долини і має аномально велику глибину залігання в області різнодолинного переходу.

8. Запропоновано новий метод визначення глибини залігання легувачого рівня в області різнодолинного переходу, який базується на вимірах температурної залежності стаціонарної смислі при різних прикладених напругах. Енергії іонізації донора визначені цим методом для різних складів $Al_xGa_{1-x}As$ добре узгоджуються з даними, отриманими іншими методами.

Публікації

1. Верховодов М. П., Пека Г. П., Пулеметов Д. А. Формирование спектров фоточувствительности варизонных инжекционных фотодиодов на основе облученного AlGaAs // УфЖ. 1992. Т. 37. N. 11. С. 1737-1744.
2. Верховодов М. П., Пека Г. П., Пулеметов Д. А. Квазиэлектрические поля в многодолинных варизонных полупроводниках // УфЖ. 1993. Т. 38. N. 4. С. 562-568.
3. Peka H. P., Pulemyotov D. A., Verkhovodov M. P. Noteworthy features of capacitance transients in $Al_xGa_{1-x}As$ with the composition close to the intervalley crossover // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. N. 5. P. 739-741.
4. Peka H. P., Pulemyotov D. A., Verkhovodov M. P. Compositionally graded semiconductors with intervalley crossover // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. N. 8. P. 1517-1522.
5. Verkhovodov M. P., Peka H. P., Pulemyotov D. A. Capacitance behaviour of junctions with frozen dopant levels // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. N. 10. P. 1842-1847.
6. Верховодов М. П., Пека Г. П., Пулеметов Д. А. Функция оптической генерации в варизонных полупроводниках // УфЖ. 1992. Т. 37. N. 9. С. 1342-1346.
7. Пека Г. П., Пулеметов Д. А., Верховодов М. П. Высокая фоточувствительность и новый механизм формирования спектров варизонных инжекционных фотодиодов // II Всесоюз. конф. "Фотоэлектрич. явления в полупроводн." - Ашхабат, 1991. С. 275.
8. Пека Г. П., Пулеметов Д. А., Верховодов М. П. Формирование спектральных характеристик варизонных инжекционных фотодиодов при радиационной компенсации // Научно-технич. конф. "Физические основы надежности и деградации полупроводников" - Н. Новгород-Астрахань, 1992. С. 13.
9. Peka H. P., Pulemyotov D. A., Verkhovodov M. P. Injection photodiodes with high response and record selectivity on the basis of graded epitaxial films AlGaAs/Mater. IV Міжнар. конф. з фізики і техн. тонких плівок, Ч. 2. - Івано-Франківськ, 1993. С. 327.
10. Izpura I., Peka H. P., Pulemyotov D. A., Verkhovodov M. P. Capacitance properties in n-type AlGaAs epitaxial films governed by DX centers // Mater. IV Міжнар. конф. з фізики і техн. тонких плівок, Ч. 1. - Івано-Франківськ, 1993. С. 121.

11. Река Н.Р., Пулемюлов Д.А., Verkhovodov M.P. Noteworthy features of capacitance transients in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ with composition close to the intervalley crossover // Матер. IV Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок, Ч.2. - Івано-Франківськ, 1993. С.328.

1. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

2. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

3. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

4. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

5. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

6. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

7. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

8. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

9. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

10. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

11. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

12. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

13. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

14. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

15. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

16. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

17. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

18. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

19. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

20. P. A. Plesch, *Chemical Reactions in the Gas Phase*, Butterworths, London, 1958, p. 177-178.

195.058

THE UNIVERSITY

IN THE CITY OF

THE UNIVERSITY OF

THE UNIVERSITY OF

THE UNIVERSITY OF

THE UNIVERSITY OF

THE UNIVERSITY OF

THE UNIVERSITY OF

1961 - 1962

THE UNIVERSITY OF

THE UNIVERSITY OF

1.604.73

АВ 29.219

Повільнено к печати 16.02.94 Формат 60x84, 1/10
Объем 1 я. печ. лист. Заказ № 23 Тираж 100

ОНТИИД УкрНПО