Іляш Святослав Андрійович, тимчасово не працює: &laquo;Кінетика фотопровідності та механізми рекомбіна&shy;ції нерівноважних носіїв заряду в бар&rsquo;єрних структурах InGaAs/GaAs та Ge/Si&raquo; (01.04.05 - оптика, лазерна фізи&shy;ка). Спецрада Д 26.001.23 у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

ІЛЯШ СВЯТОСЛАВ АНДРІЙОВИЧ

УДК 535.215. 53.096, 535.37,535.016

КІНЕТИКА ФОТОПРОВІДНОСТІ ТА МЕХАНІЗМИ РЕКОМБІНАЦІЇ

НЕРІВНОВАЖНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В БАР‟ЄРНИХ СТРУКТУРАХ

InGaAs/GaAs ТА Ge/Si

01.04.05 – Оптика, лазерна фізика

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник

Кондратенко Сергій Вікторович

доктор. фіз.-мат. наук, проф.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА СИМВОЛІВ....................................9

ВСТУП..........................................................................................................................................10

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ..............................................................................................19

1.1.Електронний спектр та фотоелектричні властивості напівпровідникових

гетероструктур із нанооб‟єктами ...........................................................................................19

1.1.1.Напівпровідникові гетеропереходи ..............................................................................19

1.1.2. Зонні моделі ...................................................................................................................22

1.1.3. Ефекти розмірного квантування у напівпровідникових нанооб‟єктах ....................26

1.1.4. Релаксація фотопровідності в неоднорідних (аморфних) напівпровідниках ..........28

1.1.5. Стрибкова провідність ..................................................................................................32

1.2. Сонячні елементи з нанорозмірними об‟єктами ...........................................................34

1.2.1. Напівпровідникові сонячні елементи з квантовими точками ...................................36

1.2.2. Сонячні елементи з проміжними квантовими станами .............................................39

1.2.3. Сонячні елементи з квантовими нитками ..................................................................41

Основні результати та висновки до Розділу 1 ......................................................................43

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.......................................................45

2.1. Експериментальна установка та методи дослідження спектральних залежностей

фотопровідності.......................................................................................................................46

2.2. Методика дослідження кінетики фотопровідності .......................................................46

2.3. Опис та процес виготовлення зразків структур Si/Ge ..................................................47

2.4. Методика електросилової мікроскопії ...........................................................................48

2.5. Дослідження енергетичних пасток у структурах Si/Ge методом зонда Кельвіна......50

2.6. Опис та дослідження зразків структур ІТО‒Si-Ge........................................................52

2.7. Процес виготовлення та дослідження зразків InGaAs/GaAs з модуляцією легування53

2.8. Опис та процес виготовлення зразків InGaAs/GaAs з ланцюгами квантових точок .56

2.9. Дослідження та процес виготовлення зразків структур сонячних елементів

InAs/GaAs з КТ ........................................................................................................................56

РОЗДІЛ 3. ВАРІАЦІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТА РЕЛАКСАЦІЯ

ФОТОЗБУДЖЕННЯ У БАР‟ЄРНИХ СТРУКТУРАХ Ge/Si З НАНОКЛАСТЕРАМИОшибка! Закла3.1. Варіації електростатичного потенціалу у структурах Ge/Si[60]Ошибка! Закладка не опреде3.2. Оптичні властивості наноплівки Ge вирощеної на кремнієвій підкладціОшибка! Закладка н

8

3.3. Релаксація фотопровідності у бар‟єрних структурах ІТО-Ge-Si з германієвими

нанокластерами[89].......................................................Ошибка! Закладка не определена.

Основні результати та висновки до Розділу 3 ............Ошибка! Закладка не определена.

РОЗДІЛ 4. МЕХАНІЗМИ РЕЛАКСАЦІЇ ФОТОЗБУДЖЕННЯ В InGaAs/GaAs

ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ З НАНОРОЗМІРНИМИ ОБ‟ЄКТАМИ............................................89

4.1. Термостимульована провідність у гетероструктурах InGaAs/GaAs з КН[93]............89

4.2. Релаксація фотопровідності у гетероструктурах InGaAs/GaAs з ланцюгами

квантових точок[97] ................................................................................................................96

4.2.1. Спектроскопія фотопровідності та фотолюмінесценції ............................................96

4.2.2. Кінетика фотопровідності гетероструктур InGaAs з КН та КТ ................................97

4.3. Релаксація носіїв заряду в гетероструктурах InGaAs/GaAs з КН[110] .....................104

4.3.1. Спектроскопія фотолюмінесценції та фотоструму ..................................................104

4.3.2. Релаксація фотопровідності........................................................................................105

4.3.3. Релаксація фотолюмінесценції...................................................................................109

4.3.4. Енергетична зонна структура .....................................................................................111

4.3.5. Механізми рекомбінації нерівноважних носіїв заряду у структурах InGaAs/GaAs113

Основні результати та висновки до Розділу 4 ....................................................................121

РОЗДІЛ 5. ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ

GaAs НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР ............................................................................................123

5.1. Фотоелектричні властивості сонячних елементів на основі GaAs

наногетероструктур[118] ......................................................................................................124

Основні результати та висновки до Розділу 5 ....................................................................141

ВИСНОВКИ...............................................................................................................................143

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .................................................................................146

9

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА СИМВОЛІВ

АСМ атомно-силова мікроскопія

ВАХ вольт-амперна характеристика

фотоЕРС фото електрорушійна сила

ЗШ змочувальний шар

КРС комбінаційне розсіяння світла

КТ квантова точка

КН квантова нитка

КЯ квантова яма

МПЕ молекулярно-пучкова епітаксія

МШ моношар

ННЗ нерівноважні носії заряду

СЕ сонячний елемент

ФЛ фотолюмінесценція

ФП фотопровідність

c-Si монокристалічний кремній

υ частота фотона

Ec енергія дна зони провідності напівпровідника

Ev валентна зона напівпровідника

EF рівень Фермі

Eg заборонена зона напівпровідника

ІЧ інфрачервона область спектру

x стехіометричний індекс

НК нанокластери

КРП контактна різниця потенціалів

10

ВСТУП

Актуальність теми

Гетероструктури на основі напівпровідникових наноструктур (квантові

ями(КЯ), точки, нитки) є привабливими з точки зору фундаментальної фізики

та їхнього практичного застосування у наноелектроніці та оптоелектроніці.

Електронний спектр, оптичні та фотоелектричні властивості таких

гетеросистем головним чином визначаються морфологією та розміром

нанорозмірних об‟єктів, композиційним профілем, просторовим розподілом

деформацій та присутністю дефектів поблизу інтерфейсу нанооб‟єктів.

Останнім часом об‟єктом інтенсивних досліджень є квантові точки(КТ) та

квантові нитки(КН) на основі сполук AIIIBV, зокрема InGaAs. Значна

кількість публікацій була присвячена вивченню їх оптичних та електричних

властивостей, зокрема спектрів інфрачервоного поглинання внаслідок зонозонних та внутрішньозонних переходів, фотопровідності та

фотолюмінесценції. Показано перспективність їх впровадження в область

просторового заряду бар‟єрних структур з метою керування властивостями і

характеристиками оптоелектронних пристроїв: сонячних елементів(СЕ),

інфрачервоних фотодетекторів та напівпровідникових лазерів. Наприклад,

розроблено фотодетектори з InGaAs КТ, які фоточутливі в середньому та

дальньому інфрачервоному діапазоні, в основу роботи яких покладено

внутрішньозонні переходи за участю квантово-розмірних станів нанооб‟єктів

InAs.

Напівпровідникові гетерострутури з нанорозмірними об‟єктами,

виготовлені методом молекулярно-променевої епітаксії, вирізняють,

насамперед, неоднорідні поля механічних напружень, неоднорідності

компонентного складу та розміру нанооб‟єктів, що призводять до появи

сильних локальних електричних полів, які помітно впливають на

електропровідність, оптичні та фотоелектричні властивості. До теперішнього

часу залишається багато невирішених питань, які стосуються фізичних

11

механізмів впливу локалізованих станів оточення та інтерфейсів

наноструктур на ФП та випромінювальну рекомбінацію бар‟єрних структур

на основі гетеропереходу InGaAs/GaAs та Ge/Si. Зокрема відсутні кількісні

дані щодо їх впливу на процеси рекомбінації та захоплення фотозбуджених

носіїв заряду за участю квантово-розмірних станів та рівнів дефектів.

Розробка новітніх електронних та оптоелектронних пристроїв, зокрема

фоточутливих пристроїв з наноструктурами, вимагає інформації щодо

механізмів електропровідності та фотопровідності, механізмів рекомбінації

носіїв заряду за участю квантово-розмірних станів та глибоких рівнів

інтерфейсів InGaAs/GaAs з урахуванням характерного для таких систем

енергетичного розупорядкування, зумовленого варіаціями розмірів та

компонентного складу нанооб‟єктів. Провідну роль у визначенні фізичних

властивостей бар‟єрних гетероструктур з нанооб‟єктами відіграють дефекти з

глибокими рівнями, що локалізовані у найближчому оточенні нанооб‟єктів.

Зокрема, заряд, захоплений на пастках поблизу інтерфейсу InGaAs/GaAs

формує вбудоване електричне поле навколо нанооб‟єктів, яке суттєво

впливає на обмін носіями заряду між станами наноструктур та станами

змочувального шару, потенціал локалізації носіїв заряду, а отже, і на оптичні,

електричні та фотоелектричні властивості бар‟єрних структур на основі

гетеропереходу InGaAs/GaAs та Ge/Si. У зв‟язку з цим необхідна розробка

методів, що дозволяють інтерпретувати оптичні та фотоелектричні спектри,

описувати процеси рекомбінації і транспорту носіїв заряду в

гетероструктурах з урахуванням співіснування інтерфейсних енергетичних

рівнів та енергетичного спектра квантово-розмірних станів. Важливою

проблемою, на розв‟язання якої планується спрямувати дану дисертаційну

роботу, є те, яким саме чином наявність квантово-розмірних станів та

інтерфейсних станів впливає на механізми релаксації фотозбуджень, зокрема

яким чином присутність неоднорідних полів механічних напружень та

12

інтерфейсних пасток впливає на кінетику ФП та час життя нерівноважних

носіїв заряду.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась в рамках наукових тем №11БФ051-

01 “Фундаментальні дослідження в галузі фізики конденсованого стану і

елементарних частинок, астрономії і матеріалознавства для створення основ

новітніх технологій”, номер державної реєстрації 0111U004954 та

№16БФ051-01 “Формування та фізичні властивості наноструктурованих

композитних матеріалів та функціональних поверхневих шарів на основі

карбону, напівпровідникових та діелектричних складових”, номер державної

реєстрації 0116U004781.

Мета роботи і завдання дослідженнь

Встановити механізми фотопровідності та природу релаксації

фотозбудження у бар‟єрних структурах з нанорозмірними об‟єктами InGaAs

та Ge/Si.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання: 1) вивчення

можливих механізмів релаксації фотозбудження, з‟ясування впливу

енергетичного розупорядкування та присутності пасток у оточенні

нанорозмірних об‟єктів на час життя нерівноважних носіїв заряду в

бар‟єрних структурах InGaAs та Ge/Si з нанорозмірними об‟єктами; 2)

з‟ясування впливу локалізованих станів у оточенні наноструктур на

температурні залежності релаксації фотопровідності, фотоЕРС і

фотолюмінесценції гетероструктур з нанорозмірними об‟єктами InGaAs та

Ge/Si різної морфології і топології; 3) встановлення механізмів транспорту

фотогенерованих носіїв вздовж бар‟єрних шарів InGaAs з квантовими

нитками, квантовими точками та ланцюгами квантових точок; 4)

дослідження впливу варіацій електростатичного потенціалу і глибоких

дефектних станів на фотопровідність та фотоЕРС сонячних елементів на

основі бар‟єрних структур з нанооб‟єктами InGaAs.

13

Для виконання поставлених завдань було заплановано:

− провести експериментальні дослідження спектральних залежностей

фотопровідності, фотоЕРС та фотолюмінесценції гетероструктур з

нанорозмірними об‟єктами InGaAs/GaAs та Ge/Si різної морфології;

− дослідити часові залежності релаксації фотопровідності та

фотолюмінесценції гетероструктур при низьких температурах за умов

збудження квантами світла з різною енергією;

− провести температурні дослідження темнового струму та

фотопровідності сонячних елементів на основі гетеропереходу

InGaAs/GaAs з різними параметрами та зробити висновки щодо впливу

рекомбінації за участю станів нанооб‟єктів і механізму

електропровідності у p-i-n структурах;

− розрахувати просторовий розподіл механічних напружень в оточенні

нанооб‟єктів InGaAs та Ge, оцінити його внесок у варіації

електростатичного потенціалу;

− провести експериментальні дослідження кінетики фотопровідності та

термостимульованої провідності багатошарових гетероструктур

InGaAs/GaAs, отримати теоретичну модель кінетики фотопровідності із

урахуванням енергетичного розупорядкування та обміну електронами

між центрами прилипання та квантово-розмірними станами

нанооб‟єктів;

− з‟ясувати вплив нанооб‟єктів InGaAs, розташованих в області

просторового заряду p-i-n діодів на основі GaAs, на час життя

фотогенерованих носіїв заряду та темп рекомбінації носіїв заряду.

Об’єкт дослідження – взаємодія оптичного випромінювання із

напівпровідниковими бар‟єрними структурами з нанорозмірними об‟єктами

InGaAs та Ge/Si.

14

Предмет дослідження – процеси рекомбінації та механізм релаксації

фотозбудження у бар‟єрних структурах на основі гетеропереходів

InGaAs/GaAs та Ge/Si з нанорозмірними об‟єктами.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше показано, що релаксація фотопровідності в бар‟єрних

структурах InGaAs/GaAs з квантовими ямами, нитками та точками InGaAs

описується розтягненою експоненціальною залежністю внаслідок

просторового розділення електрон-діркових пар локальними електричними

полями в оточенні нанооб‟єктів.

2. Встановлено фізичні механізми, які визначають температурну

залежність часів релаксації фотопровідності в модульовано-легованих

гетероструктурах InGaAs/GaAs з нанооб‟єктами InGaAs.

3. Показано, що в бар‟єрних структурах на основі гетеропереходу

Ge/Si нанокластери Ge здатні втримувати нерівноважні дірки протягом

тривалого (~годин) часу, а величина їх заряду визначає амплітуду варіацій

поверхневого потенціалу.

4. Вперше показано, що нанокластери Ge здатні втримувати

надлишкові дірки протягом тривалого часу і, загалом, визначають темп

рекомбінації електронів та дірок в бар‟єрних структурах на основі

гетеропереходу ITO-p-Si.

5. Вперше було виконано теоретичні розрахунки просторових

розподілів механічних напружень та зонних діаграм p-i-n діодів на основі

GaAs з InGaAs квантовими точками в області просторового заряду. Показано,

що наявність механічних напружень та легування КТ кремнієм призводить до

появи локальних електричних полів в найближчому оточенні InGaAs КТ.

6. Вперше показано, що легування кремнієм InGaAs квантових точок

у області просторового заряду p-i-n діода збільшує час життя нерівноважних

15

носіїв заряду за рахунок звуження області просторового заряду та збільшення

бар‟єрної ємності.

7. Показано, що легування КТ InGaAs домішками Si дозволяє

керовано регулювати величину фоточутливості сонячних елементів на основі

GaAs в ІЧ області шляхом зміни заповнення квантово-розмірних станів

InGaAs електронами.

Практичне значення одержаних результатів

1. Спектральні дослідження фотопровідності та фотолюмінесценції в

гетероструктурах InGaAs та Ge/Si з нанорозмірними об‟єктами у поєднанні з

вимірюваннями часових залежностей релаксації фотоЕРС, фотопровідності

та фотолюмінесценції вказують на принципову можливість створення

інфрачервоних фотоприймачів зі спектральним діапазоном фоточутливості,

керованим за рахунок зміни компонентного складу та морфології

наноструктур.

2. Результати дослідження процесів релаксації фотопровідності в

бар‟єрних гетероструктурах InGaAs/GaAs та Ge/Si можуть застосовуватись

для розробки інфрачервоних фоторезисторів з квантовими точками. При

розробці таких фотоприймачів слід враховувати вплив локальних полів та

варіацій електростатичного потенціалу в оточенні наноструктур на час життя

нерівноважних носіїв заряду.

3. Обгрунтовано перспективу розробки сонячних елементів на основі

гетеропереходу InGaAs/GaAs з квантовими точками InGaAs в області

просторового заряду бар‟єрних структур. Запропоновано здійснювати

легування квантових точок домішками кремнію для збільшення часу життя

нерівноважних носіїв заряду.

4. Запропоновано метод дослідження термостимульованої провідності

шляхом періодичного фотозбудження багатошарових гетероструктур з

нанооб‟єктами квантами світла різних енергій.

16

Особистий внесок здобувача полягає у приготуванні зразків до

проведення вимірів; проведенні експериментальних вимірів фотопровідності,

спектральних досліджень зразків; проведенні АСМ досліджень та обробки

отриманих зображень; отримання вольт‒амперних характеристик(ВАХ) та

часових залежностей фотопровідності зразків гетероструктур SiGe/Si та

InGaAs/GaAs; розробці теоретичних моделей механізмів переносу заряду в

напівпровідникових гетероструктурах; обробці експериментальних даних;

підготовленні матеріалів виступів на міжнародних конференціях; підготовці

матеріалу та написанні наукових статей у провідних світових виданнях.

Апробація результатів дисертації

За матеріалами дисертаційної роботи були зроблені доповіді на

міжнародних конференціях та семінарах:

«NATO Advanced Research Workshop, Functional Nanomaterials and

Devices for Electronics, Sensors, Energy Harvesting» (Львів, 13‒16 квітня,

2015 р.);

«XXII Galyna Puchkovska International School-Seminar, Spectroscopy of

Molecules and Crystals» (Чинадієво, 27 вересня – 4 жовтня, 2015р.);

«VII International Conference for Yong Scientists, Low Temperature

Phisics»(Харків, 6‒10 червня 2016р.);

«Nanotechnology and Nanomaterials» (Львів, 24–27 серпня 2016р.);

«Nanotechnology and Nanomaterials» (Чернівці, 23–26 серпня 2017р.);

«XXIIІ Galyna Puchkovska International School-Seminar, Spectroscopy of

Molecules and Crystals» (Київ, 20–25 вересня, 2017р.).

Публікації

За матеріалами дисертації опубліковано 13 наукових робіт, у тому

числі 7 статей та 6 тез для доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи

Дисертація складається зі вступу, п‟яти розділів, висновків та списку

використаних джерел. Вона викладена на 160 сторінках та включає у себе 64

17

рисунка загальним обсягом 30 сторінок, 3 таблиці обсягом 1 сторінка і

списку використаних джерел кількістю 125 найменувань на 14 сторінках.

У вступі обґрунтовується актуальність теми, загальні положення,

розглядаються новітні технології та методи дослідження нанорозмірних

напівпровідникових гетероструктур. Ставиться мета і формулюються задачі

для її досягнення, наводиться наукова новизна та практичне значення

результатів проведених досліджень.

Перший розділ присвячено огляду літературних джерел, який включає

в себе, як фундаментальні положення явищ переносу носіїв заряду,

рекомбінації фотопровідності та зонної структури класичних

напівпровідників, так і новітні методи дослідження опто‒електронних

властивостей гетероструктур та технології виготовлення нових структур.

Опис розвитку технологій сонячних елементів та розгляд варіантів їхнього

виготовлення, перспективи вдосконалення ефективності перетворення

сонячної енергії.

У другому розділі надано розгорнутий опис експериментальних

установок та досліджуваних гетероструктур, у тому числі сонячного

елементу на основі p‒i‒n діода. Обгрунтовано вибір методів досліджень та

описано методики отримання спектральних залежностей фотопровідності,

фотолюмінесценції, дослідження ВАХ напівпровідникових гетероструктур та

моделювання зонного енергетичного розподілу. Також описано методику

електросилової мікроскопії, а саме методу зонда Кельвіна.

У третьому розділі експериментально досліджені кремній‒германієві

гетероструктури з наноострівцями та нанокластерами. Методами АСМ та

мікроскопією зонда Кельвіна досліджено локальні пастки, утворені

нанооб‟єктами Ge на кремнієвій підкладці, показано, що керуючи напругою

зміщення, прикладеною латерально, можна керувати густиною захоплених

пастками носіїв заряду. Також наведені результати дослідження оптичних

властивостей тонкої германієвої плівки, а саме визначення шорсткості,

18

рентгенівська рефлектометрія, визначення еліпсометричних параметрів та

спектроскопія комбінаційного розсіювання. Досліджено релаксацію

фотопровідності у зразках ІТО‒Ge‒Si.

Четвертий розділ присвячено дослідженню механізмів релаксації

фотозбудження у InGaAs/GaAs гетероструктурах з квантовими нитками,

квантовими точками та ланцюгами квантових точок. Експериментально

отримані спектральні залежності фотопровідності та фотолюмінесценції, у

структурах з КН досліджено явище термостимульованої провідності при

оптичному збудженні різними довжинами хвиль. Теоретично розраховані

енергії активації збудження квантових станів для об‟ємної структури та

квантоворозмірних об‟єктів. За допомогою програмного забезпечення

розрахована модель енергетичної структури досліджуваних зразків.

У п’ятому розділі приведені дослідження фотоелектричних

властивостей сонячних елементів на основі GaAs наногетероструктур.

Досліджений сонячний елемент являє собою p‒i‒n діод із додаванням

квантоворозмірних острівців. Виміряні вольт-амперні характеристики зразка

при різних температурах та рівнях легування. Отримано температурні

залежності при поданні різних напруг зміщення, виміряні спектральні

залежності фотолюмінесценції та фотопровідності. Досліджені часові

залежності ФП за умов різних температур та збудження імпульсами різної

інтенсивності. Теоретично розрахована модель зонної структури та карти

деформації в оточенні нанорозмірних об‟єктів. Підтверджено, що негативний

вбудований точковий заряд впливає на поглинання інфрачервоного

випромінювання у забороненій зоні GaAs, та виявлено, що застосування

домішок Si до КТ знижує втрати рекомбінації зменшуючи темновий струм у

зворотному напрямку та подовжує релаксацію ФП

ВИСНОВКИ

Показанощоваріаціїповерхневогопотенціалугетероструктур

обумовленізарядомдірокзахопленихквантоворозмірнимистанами

наноострівцівтаінтерфейсуВиявилосьщогерманієвінанокластери

здатніутримуватинерівноважнідіркипротягомтривалогочасугодиниУ

тойсамийчасстанизмочувальногошарувиявилисьбільшефективними

центрамирекомбінаціїШоклі‒РідаХоллаупорівняннізнанокластерами

Показанощонанокластеривбар‟єрнихструктурах

визначаютьтемпрекомбінаціїфотозбудженихносіївзарядуЗаналізу

температурнихзалежностейсталоїспадуфотопровідностівизначено

механізмрекомбінаціїносіївзарядузаякимнанокластериєцентрами

прилипаннядлянерівноважнихдірокапереносфотозбудженихелектронівв

напрямкунанокластеріввизначаєтьсястрибкамиміжлокалізованими

станами

Проаналізованотермостимульованупровідністьгетероструктур

зквантовиминиткамивимірянукласичнимметодомі

динамічнимзперіодичнимосвітленнямзразкаПоказанощодовготривала

релаксаціяфотопровідностітатермостимульованапровідністьудіапазоні

температурвіддоКзумовленаелектроннимипасткамизенергіями

заляганнярівніввідноснодназонипровідностіімеВ

Уструктурахкінетикаспадуфотопровідності

описуєтьсярозтягнутоюекспоненціальноюзалежністюхарактерноюдля

системзвипадковимрозподіломенергійпастоківідстанейміж

локалізованимистанамиПоказанощопризоназонномузбуджені

часовазалежністьфотопровідностіописуєтьсякінетичним

рівняннямякевраховуєлінійнурекомбінаціюзаучастюцентрівШокліРіда

воточеннітабімолекулярнурекомбінаціючерезквантовістаниКН





Результатирозрахункудіаграмиенергетичнихзонмодуляційно

легованихнизькорозмірнихструктурахзквантовиминитками

показалищопідзониелектронногогазутаКН

перекриваютьсяутворюючиквазізониякідаютьможливістьрезонансного

тунелюванняелектронівзоднієїпідсистемидоіншоїаотжесуттєво

впливаютьнапровідністьтачасжиттянерівноважнихносіївзаряду

ПоказанощокінетиказагасанняФПумодуляційнолегованих

низькорозмірнихструктурахзквантовиминиткамидобре

описуєтьсярозтягнутоюекспоненціальноюфункцієюАналізтемпературної

залежностісталоїспадувиявивщовзалежностівідморфологіїшару

ітемпературногодіапазонудомінуюєпевниймеханізмрекомбінаціїносіїв

зарядуАсамеудіапазонітемператур–Кстрибковиймеханізм

провідностізаякимелектронитунелюютьміженергетичнимирівнямизони

локалізованихстанівспричинюєтемпературнонезалежнурелаксаціюФП

ПринизькихтемпературахТбагаторазовіпроцесизахопленнявивільненнянерівноважнихелектронівстанамиКНпідзонами

модуляційнолегованихпроміжнихшаріватакождефектнихстаніву

обмежуютьтемпрелаксаціїфотозбудження

ЗаналізуспектральнихзалежностейфотострумуфотоЕРСта

фотолюмінесценціївизначеноенергіїміжзоннихпереходівяківизначають

спектральнучутливістьсонячнихелементівПоказанощовпровадженняКТ

призводитьдорозширенняспектральногодіапазонувІЧобласть

Встановленощоуструктурахквантовіточкиє

додатковимицентрамирекомбінаціїаїхлегуваннякремніємзнижуєтемп

рекомбінаціїзаучастюквантоворозмірнихстанівтаподовжує

релаксаціюфотопровідностійфотоЕРСПоказанощозбільшеннячасів

релаксаціїфотозбудженнятазбільшеннябар‟єрноїємностіприлегуванні

відбуваєтьсявнаслідокзменшенняширинишарузбідненнятаприсутності

додатньогозарядуіонізованихдонорівуобластіщосприяєбільш



ефективномупросторовомурозділеннюнерівноважнихносіївзаряду

локальнимиполямипоблизуКТ