

Дослідження динамічних властивостей новітніх напівпровідникових наноматеріалів і наноконпонентів

Исследование динамических свойств новейших полупроводниковых наноматериалов и наноконпонентов

Investigation of the dynamic properties of the newest semiconductor nanomaterials and nanocomponents

1. **Номер державної реєстрації теми - № 0113U000389, НГУУ «КПБ» - 2630-п.**
2. **Науковий керівник -** д.т.н., проф. Тимофєєв В.І., Тимофеев В.И., Timofeyev Volodymyr I.
3. **Суть розробки, основні результати.**

(укр.)

Робота пов'язана з дослідженням наноматеріалів і наноструктур для створення надшвидкодійних і надвисокочастотних компонентів мікро- і наноелектроніки. Використання широкозонних матеріалів нітридної групи відкриває нові можливості щодо створення на їх основі напівпровідникових структур з низькорозмірними елементами, які поєднують можливості отримання як більш швидкодіючих, так і більш потужних електронних приладів у порівнянні з існуючими приладами на сполуках A^3B^5 .

Досліджено динамічні властивості напівпровідникових сполук як реакцію дрейфових процесів на імпульсне електричне поле для сполук InN, GaN та AlN з кубічною та гексагональною структурою. Визначено довжини балістичного пробігу за різних амплітуд та тривалостях переднього фронту імпульсу. Встановлено, що гранична частота, яка визначається інерційністю процесів розсіювання імпульсу та міждолинних переходів, але здебільшого часом релаксації енергії, має значення порядку сотень і навіть тисяч гігагерців, зменшуючись із зростанням напруженості електричного поля.

Створено математичні моделі низки компонентів з поперечним та поздовжнім квантовим транспортом, а також досліджено квантоворозмірні ефекти, які виникають у компонентах наноелектроніки. Розроблено математичні моделі, за допомогою яких на основі енергетичних, польових і ін. залежностей носіїв заряду проведено аналіз пошвидкісних характеристик гетеротранзисторів з двома квантовими ямами і системами квантових точок (КТ) Розроблена методика і алгоритм врахування впливу КТ на подовжній транспорт носіїв заряду в гетеротранзисторі. Показано, що вбудовування системи КТ в гетероперехід призводить до зростання швидкодії гетеротранзистора.

Розроблено і верифіковано моделі сучасних резонансно-тунельних діодів, включаючи динамічні характеристики. Розроблено модель одноелектронного транзистора, побудованого на молекулі фенілдитіолу, яка дозволяє досліджувати фізичні процеси і режими функціонування транзистора в умовах кулонівської блокади та самоузгодженого електричного поля. Розроблено методику і проведено розрахунки характеристик світлодіодів на гетероструктурах. Розроблено математичну модель квантового каскадного лазера та досліджено надграткову структуру напівпровідникового лазера з довжиною хвилі 5 мкм.

Розроблені математичні моделі придатні для аналізу і подальшої оптимізації зазначених вище активних наноконпонентів виходячи з властивостей матеріалів, топології структур, параметрів гетеропереходів і надграток, квантових точок, тунельних бар'єрів, характеристик нанорозмірних областей структур, рівнів легування.

(рос.)

Работа связана с исследованием наноматериалов и наноструктур для создания сверхбыстродействующих и сверхвысокочастотных компонентов микро- и наноэлектроники. Использование широкозонных материалов нитридной группы открывает новые возможности по созданию на их основе полупроводниковых структур с низкоразмерными элементами, которые совмещают возможности получения как более

быстродействующих, так и более мощных электронных приборов в сравнении с существующими приборами на соединениях A^3B^5 .

Исследованы динамические свойства полупроводниковых соединений как реакция дрейфовых процессов на импульсное электрическое поле для соединений InN, GaN и AlN с кубической и гексагональной структурой. Определены длины баллистического пробега при разных амплитудах и длительностях переднего фронта импульса. Установлено, что предельная частота, которая определяется инерционностью процессов рассеивания импульса и междолинных переходов, но по большей части временами релаксации энергии, имеет значение порядка сотен и тысяч гигагерц, уменьшаясь с ростом напряженности электрического поля.

Созданы математические модели ряда компонентов с поперечным и продольным квантовым транспортом, а также исследованы квантоворазмерные эффекты, которые возникают в компонентах нанoeлектроники. Разработаны математические модели, с помощью которых на основе энергетических, полевых и др. зависимостей носителей заряда проведен анализ поле-скоростных характеристик гетеротранзисторов с двумя квантовыми ямами и системами квантовых точек (КТ). Разработана методика и алгоритм учета влияния КТ на продольный транспорт носителей заряда в гетеротранзисторе. Показано, что встраивание системы КТ в гетеропереход приводит к росту быстродействия гетеротранзистора.

Разработаны и верифицированы модели современных резонансно-туннельных диодов, включая динамические характеристики. Разработана модель одноэлектронного транзистора, основанного на молекуле фенилдитиола, которая позволяет исследовать физические процессы и режимы функционирования транзистора в условиях кулоновской блокады и самосогласованного электрического поля. Разработана методика и проведены расчеты характеристик светодиодов на гетероструктурах. Разработана математическая модель квантового каскадного лазера и исследовано сверхрешеточную структуру полупроводникового лазера с длиной волны 5 мкм.

Разработанные математические модели пригодны для анализа и последующей оптимизации отмеченных выше активных наноконструкций исходя из свойств материалов, топологии структур, параметров гетеропереходов и сверхрешеток, квантовых точек, туннельных барьеров, характеристик наноразмерных областей структур, уровней легирования.

(англ.)

This work is devoted to research of nanomaterials and nanostructures for creation of super-high speed and THz micro- and nanoelectronics components. Using of III-nitride wide gap materials opens new possibilities for creation on their basis low-dimensional semiconductor structures, which combine possibilities to get more fast-acting and more powerful electronic devices in comparison with existent A^3B^5 devices.

The dynamic properties of semiconductor materials as reaction of drift processes on the impulsive electric field are investigated for InN, GaN and AlN with a cube and hexagonal structure. Lengths of ballistic motion are determined for different amplitudes and impulse durations. It is defined that maximum frequency which is determined the processes of impulse dispersion and intervalley transitions (but mostly by relaxation energy time) may be estimated how hundreds and thousands GHz, diminishing with growth of electric-field tension.

The mathematical models of components with a transversal and longitudinal quantum transport are created and quantum dimension effects which arise up in the components of nano electronics are investigated. Mathematical models based on power, electric field and transport of charge dependences are developed and the analysis of field-velocity characteristics of heterotransistor with two quantum wells and systems of quantum dots (QD) are fulfilled. The technique to consider the quantum dots influence on longitudinal charge carriers' transport in heterotransistor has been. It is shown that embedding of the system of QD in heterojunction results in growth of fast-acting of heterotransistor.

The model of modern resonance-tunnel diodes is developed and verificated, including dynamic characteristics. The model of single-electron transistor, based on the molecule of

fenildutiol is described and it allows to investigate physical processes and functioning regimes of transistor in the conditions of coulomb blockade and self-congruent electric-field. A method the analysis of light-emitting diodes characteristics is developed and their heterostructures are calculated. The mathematical model of quantum cascade laser is developed and it is investigational super lattice structure of semiconductor laser with a wave-length 5 micron.

The developed mathematical models are suitable for analysis and subsequent optimization of the active nanocomponents including properties of materials, topology of structures, parameters of heterojunctions and superlattices, quantum dots, tunnel barriers, nano size areas of structures, doping levels.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Робота відповідає світовому рівню. Одержані результати досліджень показують можливість використання тринітридів для формування пікосекундних імпульсів. Встановлено, що довжина балістичного пробігу може сягати сотень нанометрів. Показано перспективи реалізації нанокомпонентів у терагерцовому діапазоні на основі нітриду індію (оціночне значення граничних частот для гексагональної та кубічної кристалічної ґратки відповідно 1000 та 1300 ГГц) та фосфіду індію. Розроблена методика і алгоритм врахування впливу квантових точок (КТ) на подовжній транспорт носіїв заряду в гетеротранзисторі. Показано, що вбудовування системи КТ в гетероперехід призводить до зростання швидкодії та крутизни гетеротранзистора.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Використання розробленого інформаційного забезпечення дозволить забезпечити розроблення топології, конструкцій і технологічну підготовку процесу виготовлення новітніх нанокомпонентів, а також прискорити випуск конструкторсько-технологічної документації.

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).

Розроблені методики, математичні моделі, алгоритми і програмні засоби використовуються спільно на ПАТ НВП "Сатурн" та НДІ «Мікроприлад» при проектуванні мікро- і нанокомпонентів.

Результати роботи можуть бути використані у рамках договорів на виконання ДКР з виробничими підприємствами і науковими установами для створення надшвидкодійних і потужних структур і приладів мікро- і наноелектроніки. Досліджені наноматеріали, а також топології і конструкції наноприладів можуть бути використані для створення перспективних тестових і серійних приладів наноелектроніки.

8. Стан готовності розробки.

Розроблені методики моделювання, математичні моделі, алгоритми і програми готові для використання і для проведення аналізу характеристик нових матеріалів й розроблення перспективних напівпровідникових нанометрових приладів для надшвидкодійних інтегральних схем гіга- і терагерцового діапазону та технологій їх виготовлення.

9. Існуючі результати впровадження.

Розроблені математичні моделі використовуються для аналізу зародкоутворення дислокацій у наногетероструктурах, отриманих темплетним методом вирощення в НДІ «Мікроприлад» при проектуванні мікро- і нанокомпонентів.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі НТУУ «КПІ»: при викладанні дисципліни «Фізика електронних процесів» (новий розділ «Фізичні процеси у багаточарових низькорозмірних системах»); дисципліни «Мікрохвильова техніка» (новий розділ «Субмікронні нанокомпоненти КВЧ»); дисципліни «Основи наноелектроніки» (новий розділ «Динамічні властивості низькорозмірних транзисторних структур»); видано навчальний посібник з грифом МОН України «Надшвидкодійні прилади електроніки» та

монографія ч.1 і ч.2 «Быстродействующие приборы электроники» у видавництві LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING (Німеччина); оновлено зміст дисципліни «Мікро- та наносистеми» для підготовки магістрів за напрямком «Мікро- і наноелектроніка». Захищено 1 кандидатську дисертацію, результати якої впроваджено в НДІ «Оріон».

10. Назва організації, телефон, E-mail

НТУУ "КПІ", факультет електроніки, кафедра фізичної та біомедичної електроніки, 454-90-64, v.timofeyev@kpi.ua

11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. *V.Timofeyev, E. Faleyeva / Two-channel heterotransistors with quantum dots systems // 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kiev, Ukraine. - April 16-19, 2013. - С. 172 - 176.*
2. *V.Timofeyev, H. Semenovskaya / Thermal Resistance Of Power Submicron Heterojunction Field-Effect Transistors // 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kiev, Ukraine. - April 16-19, 2013. - С. 47 - 50.*
3. *Bol K., Moskaliuk V. Modeling of velocity „overshoot” in the multivalley semiconductors, Proc. IEEE XXXIII International Scientific Conference ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY 2013 Kyiv, Ukraine p. 123-125.*
4. *Fedai A., Moskaliuk V. Modeling of resonant-tunneling diodes with uniform and graded emitter. Proc. IEEE XXXIII International Scientific Conference ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY 2013 Kyiv, Ukraine, p. 107-111.*
5. *Тимофєєв В.І. Навчальний посібник з грифом університету «Електронні кола надвисоких частот» . С.176 протокол метод. ради № 10 ; дата 20.06.2013*
6. *Bol K., Moskaliuk V. Ballistic Transport in Treennitrids. Proc. IEEE XXXIV International Scientific Conference ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY 2014 Kyiv, Ukraine, p. 168-170.*
7. *Москалюк В.О., Тимофєєв В.І., Федяй А.В. «Надшвидкодючі прилади електроніки», навч. пос. з грифом МОНУ, вид. «Політехніка», Київ, 2014, С.528.*
8. *Москалюк В.А., Тимофєєв В.І., Федяй А.В. Быстродействующие приборы электроники, часть 1, монография, изд. LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING, 2014, С.232.*
9. *Москалюк В.А., Тимофєєв В.І., Федяй А.В. Быстродействующие приборы электроники, часть 2, монография, изд. LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING, 2014, С.210.*
10. *Vladimir Timofeyev, Elena Faleyeva Relaxation processes analysis in heterotransistors with systems of quantum wells and quantum dots // 2014 IEEE 34th International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kiev, Ukraine. - April 15-18, 2014. - С. 115 - 118.*
11. *Vladimir Timofeyev, Elena Faleyeva, Elena Semenovskaya et al. Simulation of Influence of Template Size on Misfit Dislocation in Nanostructures // 2014 IEEE 34th International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kiev, Ukraine. - April 15-18, 2014. - С. 191 - 193.*

У 2013 році захищено кандидатську дисертацію ст.викл. Сауровою Тетяною Асадівною «Підсилювачі НВЧ О-типу з захватом електронних згустків полем електромагнітної хвилі» 05.27.02 „Вакуумна, плазмова та квантова електроніка”.