ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Воловічева Ігоря Миколайовича «Транспорт нерівноважних носіїв заряду в багатокомпонентних плазмоподібних середовищах», яку подано на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Актуальність теми дисертації. Дисертацію присвячено вивченню взаємодії електромагнітного поля з нерівноважними носіями заряду в обмежених плазмоподібних середовищах, наприклад, напівпровідниках. Основним теоретичним методом досліджень, що використовується і розвивається в дисертації, є дифузійно-дрейфове наближення кінетичної теорії переносу. Об'єкт і методи дослідження найтіснішим чином пов'язані з розвитком фізичної електроніки, проектуванням нових твердотільних мікроелектронних приладів і вдосконаленням існуючої елементної бази. Тобто, вони є затребуваними і актуальними з наукової та практичної точок зору.

Для вирішення проблеми підвищення швидкодії мікроелектронних приладів необхідно досконально дослідити особливості перебігу фізичних процесів в суттєво нестаціонарних, нерівноважних умовах.

У дисертації якраз продемонстровано ряд ситуацій, коли вплив нерівноважності стає визначальним. Розглядається три групи фізичних явищ (термоелектричні, фотоелектричні і фототермічні), що виникають як колективний відгук плазмоподібного середовища на електромагнітне поле, які активно вивчаються у всьому світі і знаходять широке практичне застосування.

Динамічні температурні поля, що виникають в інтегральній схемі при її роботі, безпосередньо впливають на час перемикання логічних елементів і ресурс роботи приладу. Для підвищення надійності та швидкодії проектованих оптоелектронних і високочастотних пристроїв принципово важливим є встановлення фізичних механізмів і джерел шумів для їх подальшої мінімізації. Все це вимагає чіткого і глибокого розуміння фізичних процесів, що протікають в електронному приладі, існування їх адекватної математичної моделі.

Вирішенню зазначених завдань багато в чому сприяє представлена дисертаційна робота, чим і пояснюється її актуальність. Необхідно також відзначити, що викладені в дисертації результати були отримані в результаті виконання ряду держбюджетних науково-дослідних робіт згідно тематичному плану Інституту радіофізики та електроніки ім.. О. Я. Усикова НАН України, зокрема «Електромагнітні та акустичні явища НВЧ-діапазону у твердотільних структурах» (номер держреєстрації 0196U006109), «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та мета матеріалами» (0117U004038) та ін.

Наукова новизна одержаних результатів. За своєю структурою дисертація складається з наступних частин. В першому розділі автор дає опис поточного розвитку теорії транспортних явищ в плазмоподібних середовищах, вказує недоліки та невирішені проблеми в цій галузі. В другому розділі сформульовано математичну постановку задачі.

В третьому та четвертому розділах запропоновано та проаналізовано нові моделі і формулювання, що доповнюють і вдосконалюють дифузійно-дрейфову теорію транспортних явищ в багатокомпонентних плазмоподібних середовищах з нерівноважними носіями заряду. Нарешті, в останніх трьох розділах на основі розробленого формалізму проаналізовано ряд конкретних проблем: термоелектричні, фотоелектричні і фотоакустичні явища в біполярних напівпровідниках.

У дисертації вперше отримано важливі результати, серед яких можна виділити наступні:

Розвинено дифузійно-дрейфову теорію транспортних процесів у плазмоподібних середовищах, зокрема отримано нові граничні умови, які коректно враховують рекомбінацію і перенесення заряду на контакті біполярного напівпровідника з металом. Запропоновано нову модель лінійної стаціонарної рекомбінації, вперше вивчено вплив температури на лінійний стаціонарний біполярний транспорт нерівноважних носіїв струму.

Передбачено нові прояви енергетичної нерівноважності у вигляді нелінійності вольтамперної характеристики однорідного напівпровідника з гарячими електронами і появі електрорушійної сили за рахунок теплової генерації носіїв заряду.

Вперше продемонстровано, що величина термоелектрорушійної сили може не залежати від коефіцієнта Зеєбека напівпровідника.

Розширено теорію термоелектричних явищ для середовища з нерівноважними зарядами та доведено, що існуюча теорія термоелектрики у біполярному напівпровіднику є її граничним випадком при нескінченно сильній рекомбінації.

Розвинено теорію фото акустичних вимірювань, з урахуванням температурної залежності темпу рекомбінації і ступеня електрон-фононної взаємодії.

Передбачено низку нових термоелектричних та фотоелектричних ефектів (зокрема, поперечний динамічний термоелектричний ефект, нелінійний самоіндукований фотоефект, фотоефект Дембера у монополярному багатодолинному напівпровіднику, тощо).

Доповнено теорію фотоелектричних вимірювань методом рухомої грати фотоносіїв та вперше показано можливість появи постійного електричного струму в цих експериментальних умовах.

Незважаючи на теоретичний характер, робота може знайти **практичне використання** для створення нових експериментальних методів дослідження теплофізичних і електрофізичних властивостей напівпровідників, зокрема, для вимірювання та контролю параметрів напівпровідникових електронних

приладів, а також для оптимізації параметрів і підвищення швидкодії мікроелектронних приладів, що проектуються. Результати, що отримано, мають значне науково-практичне значення з точки зору теоретичної фізики.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень та висновків, сформульованих у дисертації. Обґрунтованість та достовірність результатів, що отримані, зумовлено строгим математичним формулюванням задач, базуванням на фундаментальних фізичних принципах, використанням строгих методів їх розв'язання, порівнянням граничних випадків з відомими результатами існуючих теорій.

Всі результати дисертації пройшли апробацію на міжнародних наукових конференціях та рецензування в відомих фахових наукових виданнях, що також підтверджує їх достовірність.

Повнота викладу положень та висновків дисертації в опублікованих працях. Основні результати дисертації в повному об'ємі викладено в 22 статтях у міжнародних фахових наукових журналах та в 12 тезах доповідей та матеріалах міжнародних конференцій. Автореферат повністю відображає зміст дисертації.

До дисертації є наступні **зауваження**.

1. Не зовсім зручно те, що на початку кожного розділу не вказано явно в яких з праць здобувача викладено відповідний матеріал.
2. Було показано, що у разі динамічного термоелектричного ефекту виникає постійний струм, що за малих частот пропорційний частоті. Цей цікавий факт не було проаналізовано у достатній мірі. Зокрема, той факт, що струм пропорційний частоті, квадрату амплітуди та існує тільки за наявності відповідного зсуву по фазі робить цей ефект математично схожим з ефектом квантового насосу, який є геометричним за природою. Якщо така аналогія вірна, то отримані результати можуть бути тривіально узагальнені на випадок нелінійної задачі.
3. Рівняння балансу енергії та частинок не наведено при формулюванні загального математичного апарату в розділі 2.1, а вводяться тільки при розгляді окремих задач.
4. На малюнках, які ілюструють частотні характеристики фотоакустичного ефекту, було б корисним нормувати частоту на деяку характерну частоту та пояснити її фізичний зміст.
5. Висновок про неможливість існування змінної складової термоелектричного струму в умовах квазінейтральності в розділі 5.4.3 математично строго обґрунтовано тільки для одновимірної задачі. Перенесення цього висновку на ситуацію з вищою розмірністю, взагалі кажучи, вимагає додаткового обґрунтування.
6. Залежність величини фотоелектрорушійної сили і струму короткого замикання в динамічному фотоелектричному ефекті отримано для випадку збудження системи однією інтерференційною смугою, а не їх ансамблем, як це має місце в експерименті, на який посилається автор дисертації. Тому висновки про залежність цих величин від розмірів

зразка для зіставлення з експериментальними результатами необхідно переформулювати в термінах просторового періоду хвилі модуляції інтенсивності падаючого світла.

Вказані недоліки не впливають на загальне позитивне враження від представленої роботи.

Дисертаційна робота І. М. Воловічева є завершеним науковим дослідженням, що вирішує актуальну наукову проблему фізичної електроніки – розробки способу теоретичного вивчення транспорту нерівноважних носіїв заряду у багатокомпонентних плазмоподібних середовищах у дифузійно-дрейфовому наближенні. Вона задовольняє вимогам Порядку присудження наукових ступенів, а її автор, Воловічев Ігор Миколайович заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
кафедри фізики металів і напівпровідників
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут» М. В. Москалець

Підпис Москальця М.В.
ЗАСВІДЧУЮ:
ЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
АЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
Заковоротний О.Ю.
"28" 10 2018 р.