

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.

У дисертації розвивається дифузійно-дрейфова теорія транспортних явищ у застосуванні до плазмоподібних середовищ з нерівноважними носіями заряду. **Актуальність теми дисертації** обумовлена нижчевикладеними обставинами.

Вивчення транспортних процесів в твердих тілах і плазмі газового розряду займає важливе місце в сучасній фізиці, а фізичні ефекти і явища, що виникають з їх участю, знайшли широке практичне застосування.

Вибір дифузійно-дрейфового наближення як основного теоретичного методу, що використовується і розвивається в проведених здобувачем дослідженнях, виправданий тим, що наразі це наближення (що витікає з більш загальної теорії яка базується на кінетичному рівнянні) широко застосовується завдяки його відносній простоті і, в той же час, для адекватного теоретичного вивчення фізичних об'єктів що розглянуто у дисертації.

Відомо що поява нерівноважних носіїв заряду істотно впливає на взаємодію електромагнітного поля з провідним середовищем і на фізичні ефекти, що при цьому виникають (відмічу, що також підтверджено і у представленій дисертації).

Запропонований автором дисертації розвиток дифузійно-дрейфової теорії, в основному, включає в себе два напрямки: а) формулювання нових граничних умов для компонент щільності токів, які враховують наявність нерівноважних носіїв заряду різного знаку, що забезпечують протікання струму через контакт; б) уточнення лінійні моделі міжзонної та каскадної рекомбінації електронів і дірок в напівпровідниках в довільному температурному полі. Обидва ці питання важливі, оскільки процеси переносу заряду на гетеропереходах та рекомбінаційні процеси представляють собою ключові механізми функціонування сучасних мікроелектронних пристроїв. Оскільки тенденція мініатюризації електронної бази забезпечує

Оскільки мініатюризація сучасної електронної бази вимушено створює умови для появи значних концентрацій нерівноважних носіїв і підвищення їх ролі в роботі приладу, дослідження, що проведено автором дисертації, є **актуальними**. Запропоноване здобувачем удосконалення дифузійно-дрейфової теорії транспортних процесів дозволило передбачити ряд нових фізичних

ефектів, що представляють інтерес як з наукової точки зору, так і мають потенціал для майбутнього **практичного застосування**.

Розігрів електронного газу, який може супроводжувати взаємодію НВЧ електромагнітного поля з провідним середовищем, як і генерація електрон-діркових пар в разі використання електромагнітного поля оптичного діапазону, являють собою фактори, що кардинально змінюють картину фізичних процесів плазмоподібних середовищах. Крім загально-фізичного інтересу, термоелектричні і фотоелектричні явища є важливими і для практичного застосування: в якості методів експериментального вивчення властивостей металів і напівпровідників, перетворювачів енергії, сенсорів, оптоелектронних елементів. Глибоке розуміння фізичних процесів, що протікають в цих пристроях, відкриває нові можливості для вдосконалення, отже такі дослідження є **затребуваними і актуальними**.

Актуальність теми дисертації підтверджується і тим фактом, що велика частина викладених досліджень було виконано І. М. Воловичевим як відповідальним виконавцем в рамках держбюджетних НДР «Електромагнітні та акустичні явища НВЧ-діапазону у твердотільних структурах» (номер держреєстрації 0196U006109), «Дослідження електромагнітних і акустичних явищ НВЧ діапазону в твердих тілах» (0100U006335), «Дослідження лінійних та нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених часток» (0106U011978), «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами» (0117U004038) та ін.

Характеристика роботи та новизна отриманих результатів. Основна частина дисертації складається з семи розділів. Перший розділ є оглядовим та не містить нових результатів.

У другому розділі наводяться основні рівняння теорії, що використовуються, а також формулюються граничні умови до них. Запропоновано нові граничні умови для опису транспорту нерівноважних носіїв у багатокомпонентних плазмоподібних середовищах, що коректно враховують поверхневу провідність та поверхневі рекомбінаційні процеси на межі розділу напівпровідника та металу.

Третій розділ присвячено аналізу стаціонарних транспортних процесів в біполярних напівпровідниках в довільних температурних полях. Запропоновано нову модель рекомбінаційних процесів для лінійної дифузійно-дрейфової теорії, що враховує просторову неоднорідність температури та різницю температур носіїв заряду різного типу.

У четвертому розділі розвинуто теорію процесів невривноважності у плазмоподібних середовищах та передбачено два нових фізичних ефекти у біполярних напівпровідниках, які пов'язані з існуванням енергетичної нерівноважності у плазмоподібному середовищі. Створено теорію нового механізму нелінійності у середовищі з гарячими носіями заряду за рахунок температурної залежності перетину розсіяння процесу рекомбінації та новий механізм генерації електрорушійної сили (ЕРС) за рахунок термічної генерації нерівноважних носіїв.

В п'ятому розділі наведено результати досліджень термоелектричних явищ. Запропоновано нову теорію термоелектричних явищ в обмежених біполярних напівпровідниках з нерівноважними носіями заряду. Передбачено поперечний динамічний термоелектричний ефект, який є принципово новим.

У шостому розділі автор розвиває теорію фотоакустичного ефекту в біполярних напівпровідниках з метою більш строгого врахування температурної залежності темпу рекомбінації за наявності термоелектричного поля в біполярних напівпровідниках з нерівноважними носіями заряду.

Сьомий розділ присвячено фотоелектричним явищам в однорідному плазмopodobному середовищі. Розроблено теорію чотирьох нових фотоелектричних ефектів. Вперше продемонстровано можливість генерації ЕРС за рахунок неоднорідності рухливості носіїв заряду при однорідній їх концентрації. Також розроблено теорію механізму генерації ЕРС в обмеженому монополярному багатодолинному напівпровіднику за рахунок міждолинних переходів, що не потребує збудження електрон-діркових пар. Вперше показано, що зміна зарядового стану домішки під дією світла в умовах квазінейтральності забезпечує можливість появи постійного фотоелектричного струму в умовах динамічного фотоелектричного ефекту.

Дисертація є суттєво теоретичним дослідженням, але низка отриманих результатів цікава не тільки з точки зору теорії напівпровідників, а має також **практичну цінність**. Так, одержані результати у подальшому можуть бути використано для створення нових методик експериментального вивчення властивостей напівпровідників та вимірювання їх параметрів. Деякі результати вбачаються суттєвими для проектування нових мікроелектронних приладів, термоперетворювачів, детекторів далекого інфрачервоного і терагерцового діапазонів.

Усі наукові результати, що наведено в дисертації, є новими, ретельно **обґрунтованими та строго доведеними**. **Достовірність результатів** та висновків забезпечено використанням відомих фізико-математичних методів, часткові випадки, де це можливо, порівняно з відомими результатами. Частина висновків підтверджено комп'ютерним моделюванням. Про достовірність результатів також свідчить апробація на міжнародних наукових конференціях та позитивні відгуки під час проходження рецензування при публікації статей.

Автореферат за змістом відповідає дисертації. Результати дисертації у повному обсязі **опубліковано** у 22 наукових статтях в реферованих міжнародних фахових журналах, та апробовано на багатьох міжнародних наукових конференціях.

Зауваження до дисертації.

1. Автор стверджує: «в роботі сформульовано єдиний методичний підхід до вивчення генераційно-рекомбінаційних процесів в плазмоподібних середовищах з нерівноважними носіями струму» і це дійсно


- так для електронних систем розглянутих в дисертації. Але це ствердження дає враження, що автор охопив усі відомі випадки генераційно-рекомбінаційних процесів у напівпровідниках, в той час як це не відповідає дійсності. Наприклад, генераційно-рекомбінаційні процеси в системах з ударною іонізацією, що у роботі не розглянуто.
2. У підрозділі 6.2.2 автором знайдено статичний розподіл температури в експериментах з фото-акустичного ефекту (ФАЕ), який обумовлено ненульовою середньою інтенсивністю модульованого світлового пучка. Однак, в лінійному наближенні, що використовується в дисертації, статичний температурний розподіл не впливає на ФАЕ (і автор ніде не наводить прикладу такого впливу). Вважаю, що потрібно додаткове пояснення, з якою метою наведено ці результати.
 3. На мій погляд, при обговоренні особливостей динамічних термоелектричних і особливо фотоелектричних ефектів було б доцільним основні функціональні залежності відобразити графічно.
 4. У розділі 4 наведено формулу для опору структури, що розглядається: (4.52), а її детальний вивід наведено, нажаль, лише у наступному розділі. В наслідок цієї переплутаності, читач може зробити висновок що по виду виразів (4.52) та (5.16) величини λ у виразі (4.52) і λ_0 у виразі (4.52) є ідентичним. Але чому використовуються різні позначення і який їхній фізичний зміст, незрозуміло і потребує пояснень.
 5. У списку літератури є виражений перекид в сторону зарубіжних джерел, та мало приведено посилань на вітчизняні роботи, зокрема на роботи К.Лукіна та П.Максимова, що присвячені вивчання впливу носіїв заряду що генеруються у результаті ударної іонізації у зворотно зміщених PN-переходів на режими посилення та генерації.
 6. Автор не витримує єдності стилю викладу. У деяких розділах (наприклад, Розділ 6) проміжні обчислення описуються досить докладно (а місцями, на мій погляд, і надмірно докладно), в той час як в Розділах 5 і 7 їм приділено мінімальну увагу.
 7. Рисунки 6.2 – 6.8 складено невдало. Відсутнє позначення одиниць вимірювання. Про те, що використовуються безрозмірні величини, стає зрозуміло тільки з тексту дисертації, а вибір нормування для графіків амплітудно-частотної характеристики ФАЕ не пояснюється взагалі.

Незважаючи на зазначені недоліки, які лише декілька ускладнюють сприйняття роботи, дисертація І. М. Воловічева є завершеним якісним науковим дослідженням, а зауваження, що наведено, не торкаються її принципових положень та не ставлять під сумнів достовірність та значущість отриманих результатів.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Воловічева І. М. «Транспорт нерівноважних носіїв заряду в багатокомпонентних плазмоподібних середовищах», що подається на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, вирішує важливу наукову проблему в галузі фізичної електроніки, задовольняє всім вимогам, що пред'являються до докторських дисертацій згідно «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – «фізична електроніка».

Офіційний опонент,
завідувач відділу нелінійної динаміки
електронних систем ІРЕ ім. О. Я. Усикова
НАН України,
доктор фіз.-мат. наук, професор



15.11.2018

К. О. Лукін

Підпис офіційного опонента завідувача відділу нелінійної динаміки
електронних систем ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України,
доктора фіз.-мат. наук, професора К. О. Лукіна засвідчую:

учений секретар ІРЕ ім. О. Я. Усикова
НАН України,
канд. фіз.-мат. наук



Є. Почаніна