

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.

Вивчення транспортних процесів займає центральне місце в багатьох областях фізики: в теоретичній фізиці, в фізиці твердого тіла, фізиці напівпровідників, фізиці плазми, фізичній електроніці та в ін. Це обумовлено як тим фактом, що саме транспортні процеси лежать в основі багатьох важливих фізичних явищ, так і їх широким застосуванням у промисловості і повсякденному житті.

Велика розмаїтість кінетичних явищ, умов і систем, в яких вони проявляються, визначає значне число теоретичних методів їх вивчення. Одним з таких методів є дифузійно-дрейфова теорія транспортних процесів, яка знайшла широке застосування при дослідженні провідних середовищ, зокрема, напівпровідників, напівпровідникових структур і мікроелектронних приладів на їх основі. На дифузійно-дрейфовій теорії також засновано багато алгоритмів комерційних систем проектування електронних пристроїв, що використовуються при створенні нових твердотільних елементів сучасної мікроелектроніки.

Постійне зменшення технологічних норм виробництва інтегральних схем призводить до того, що, з фізичної точки зору, кінетичні процеси відбуваються в ситуаціях, коли в плазмоподібних середовищах виникають значні градієнти електричного і температурного полів, а системи носіїв заряду знаходяться далеко від стану термодинамічної рівноваги. Для коректного опису такої фізичної задачі, а також можливості комп'ютерного моделювання мікроелектронного пристрою, який функціонує в зазначеному режимі, вкрай актуальною стає задача про фізичну адекватність моделей фізичних процесів, що використовуються. Зокрема, про коректність опису процесів рекомбінації нерівноважних носіїв в об'ємі зразка та на контакті, процесів емісії електронів і механізмів переносу заряду через поверхню розділу двох провідних середовищ різної природи.

Зазначені вище фактори також сприяють появі в напівпровідниковому приладі нерівноважних носіїв заряду, приводячи до істотної зміни протікання транспортних процесів та режиму роботи приладу. Роль нерівноважності в кінетичних процесах широко висвітлюється в літературі, проте, як і раніше, залишається багато невирішених питань. Зокрема, немає глибокого розуміння особливостей фізичного механізму формування електрорушійної сили (ЕРС) в провідному середовищі з носіями заряду різних типів. Тому дослідження термоелектричних і фотоелектричних явищ в умовах розвиненої нерівноважності становить значний інтерес і є актуальним завданням.

Окремої згадки заслуговує тема вивчення фотоакустичного ефекту в складних системах. Актуальність розвитку фотоакустичної спектроскопії як наукового напрямку пов'язана, з одного боку, з її широким і перспективним застосуванням в експериментальній фізиці, при розробці приладів і пристроїв для дослідження оптичних характеристик речовин, фотоакустичній мікроскопії оптичних і теплових неоднорідностей, в промисловості, в біології, в медицині і в багатьох інших областях.

Методи фотоакустичної спектроскопії є безконтактним і надійним способом вимірювання теплофізичних і оптичних параметрів в широкому діапазоні їх зміни, придатним для дослідження конденсованих середовищ в різних формах їх фазового стану. З точки зору теоретичної фізики, збудження фотоакустичних сигналів є комплексним процесом взаємодії фізичних полів різної природи (акустичного, оптичного і теплового), що робить це коло явищ досить великою і цікавою областю для різноманітних фізичних досліджень. Зазначені чинники роблять фотоакустичну спектроскопію актуальним напрямком сучасної фізики, важливим як для практичних застосувань, так і для розвитку фундаментальних наукових знань.

Зазначені вище обставини свідчать про актуальність теми представленої дисертаційної роботи. Актуальність проведених І. М. Воловичевим досліджень також підтверджується тим, що вони проводилися в рамках декількох великих держбюджетних науково-дослідних робіт, що виконувалися в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України.

Характеристика роботи та новизна отриманих результатів.

Дисертація складається з вступу та семи розділів. В першому розділі автор надає короткий опис історії розвитку досліджень термоелектричних, фотоелектричних і фототермічних явищ, а також формулює основні невирішені проблеми в цій галузі.

У другому розділі наводиться математична постановка задачі, формулюються граничні умови і основні наближення, що використовуються. Проведено класифікацію та систематизацію граничних умов транспортної задачі для багатокомпонентних плазмоподібних середовищ, запропоновано граничні умови, які позбавлені зазначених в дисертації недоліків і протиріч.

У третьому розділі запропоновано нову фізичну модель для опису рекомбінаційних стаціонарних транспортних процесів в біполярних напівпровідниках в довільних температурних полях. Автор всебічно аналізує її зв'язок з існуючими наближеннями і вивчає граничні переходи до відомих окремих випадків, що підкреслює **достовірність** отриманих результатів.

У четвертому розділі дано класифікацію механізмів нерівноважності і виявлено два нових фізичних механізми: новий рекомбінаційний механізм нелінійності в теорії гарячих електронів і механізм генерації ЕРС за рахунок термічної генерації нерівноважних носіїв.

У п'ятому розділі розвивається теорія термоелектричних явищ у біполярному середовищі (на прикладі напівпровідника) з нерівноважними

носіями заряду, а також передбачено принципово новий термоелектричний ефект в однорідному плазмopodobному середовищі – поперечний динамічний термоелектричний ефект.

Шостий розділ присвячено розвитку теорії фотоакустичного ефекту в біполярних напівпровідниках. Проведено уточнення існуючої теорії для врахування особливостей рекомбінаційних процесів і термоелектричних полів в біполярних напівпровідниках з нерівноважними носіями струму.

У сьомому розділі розглядаються фотоелектричні явища в однорідних середовищах. Передбачено чотири нових фотоелектричних ефекти. Два з них пов'язано з існуванням (або виникненням під дією неоднорідного освітлення) неоднорідності рухливості носіїв струму при збереженні однорідності їх концентрації. Третій ефект – показано принципову можливість генерації ЕРС за механізмом Дембера в монополярному багатодолинному напівпровіднику за рахунок міждолинних переходів без зовнішньої генерації електрон-діркових пар. Також в розділі приведено розвиток теорії динамічного фотоелектричного ефекту і показано, що зміна зарядового стану домішки під дією світла в умовах квазінейтральності забезпечує можливість появи постійного фотоелектричного струму.

Таким чином, результати дисертаційної роботи розширюють можливість застосування існуючих теорій на випадок нерівноважних носіїв. Також передбачено цілу низку нових фізичних явищ, вперше побудовано їх теорію.

Практична цінність одержаних результатів полягає в можливості їх подальшого використання для створення нових експериментальних методик дослідження та неруйнівного контролю характеристик напівпровідникових середовищ, при проектуванні мікроелектронних приладів, зокрема, детекторів далекого інфрачервоного і терагерцового діапазонів. Практичний інтерес має і передбачена можливість підвищення ефективності термоелектричних перетворювачів енергії при їх роботі у динамічному режимі.

Дисертація є завершеним науковим дослідженням. Усі результати роботи є новими, положення і висновки ретельно **обґрунтовано та доведено** з достатньою повнотою. Результати отримано з використанням відомих фізико-математичних методів, верифіковано порівнянням з результатами обчислюваних експериментів та частковими випадками існуючих теорій. Усі результати дисертації узгоджуються з базовими фізичними принципами, не суперечать існуючим теоріям та їх **достовірність** не викликає сумнівів.

Автореферат за змістом відповідає дисертації. Всі результати дисертації **опубліковано** у 34 наукових працях, з яких 22 є статтями в реферованих міжнародних фахових журналах. Пройдено апробацію на багатьох міжнародних наукових конференціях.

Зауваження. Дисертація містить певні недоліки:

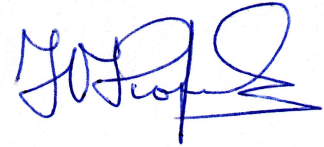
1. Автор використовує нестандартні позначення фізичних величин (u – для рухливості носіїв, замість загальноприйнятого позначення μ).
2. При оцінці величини ефектів, що передбачаються, автор оперує значеннями параметрів в різних одиницях вимірювання (СГС і СІ), що створює певні незручності.
3. У дисертації за допомогою j позначена як щільність струму, так і повний струм в ланцюзі. Автор не завжди чітко розрізняє ці два поняття, не обумовлює чітко, наприклад, що в даній моделі він вважає площу поперечного перерізу зразка одиничною.
4. Теорія поперечного динамічного термоелектричного ефекту, що побудовано, не враховує фізичних механізмів відбору теплової енергії, що робить неможливим дослідження ефективності роботи запропонованого приладу в якості термоперетворювача.
5. При оцінці величини термоелектричного струму в якості амплітуди теплової хвилі обрана величина $\delta T_0 = 1\text{K}$. Однак, з огляду на субміліметровий просторовий період теплової хвилі, це передбачає існування в структурі гігантського градієнта температури. Чи справді такий градієнт можна створити в умовах реального експерименту зовнішнім збудженням?
6. З експериментальної точки зору модель фотоефекту, що обумовлений зміною зарядового стану домішок під дією освітлення, коли домішки контролюють рухливість носіїв, а міжзонного фотогенерація – їх концентрацію, важко реалізувати, оскільки, якщо енергії фотона досить для генерації електрон-діркової пари, її завідомо вистачить і для іонізації домішкового центра в забороненій зоні напівпровідника.
7. У виразі (5.54) струм в електричному колі $j = j(t)$ представлено як функцію часу, тоді як по фізичному змісту і логіці викладу заздалегідь зрозуміло, що це є константа: $\partial j / \partial t \equiv 0$.
8. Автор заявляє про можливість застосування теорії, що запропоновано, як до твердотільної плазми, так і до плазми газового розряду. Однак усі приклади і модельні задачі виконано стосовно до плазми напівпровідників, немає прикладів газорозрядної плазми, не обговорюються її особливості.

В цілому зауваження, що наведено, не торкаються принципів положень дисертації, не відбиваються на достовірності отриманих результатів та не зменшують їх значущість.

Висновок. Дисертаційна робота Воловічева І. М. «Транспорт нерівноважних носіїв заряду в багатокомпонентних плазмоподібних середовищах», яку подано 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, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 «фізична електроніка».

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук, професор
завідувач відділу транспортних властивостей
провідних та надпровідних систем,
Фізико-технічний інститут низьких температур
ім. Б.І. Веркіна НАН України



Ю. О. Колесніченко



Колесніченко Ю.О.

Колесніченко Ю.О.