

В І Д Г У К

офіційного опонента на дисертаційну роботу Приходька Кирила Геннадійовича “Активні напівпровідникові елементи для генерації в терагерцовому діапазоні”, подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Дисертаційна робота Приходька К. Г. присвячена дослідженню сильнополевих і надвисокочастотних електронних процесів переносу в приладах, що працюють на ефекті міждолинного переносу електронів з урахуванням ударної іонізації на основі варизонних напівпровідників. Досліджено процес генерації електромагнітних коливань з метою визначення шляхів поліпшення високочастотних характеристик приладів, що працюють на ефекті міждолинного переносу електронів, зокрема, підвищення граничних робочих частот, ефективності та спектральної густини потужності.

Проблема збільшення частотного діапазону роботи напівпровідникових приладів залишається однією з основних для твердотільної надвисокочастотної електроніки. Пошуки нових явищ, приладових ідей та структур для терагерцової електроніки ведуться широким фронтом. В якості прикладів можна вказати квантові каскадні лазери, різноманітні прольотні прилади з ударною іонізацією або з тунельною інжекцією, резонансно-тунельні діоди, різноманітні електровакуумні прилади, ідеї засновані на від’ємній ефективній масі носіїв, на балістичному транспорті в коротких структурах та інші.

В аспекті цієї проблеми проводилися дослідження і в рецензованій дисертації, де увага зосереджена на дослідженні ефектів міждолинного переносу електронів і ударної іонізації у варизонних напівпровідниках та приладах на їх основі. Ці ефекти і прилади, які працюють на них, залишаються, безсумнівно, актуальними і вимагають подальшого аналізу для просування у високочастотну область.

В рамках даного напрямку автором аналізується взаємодія міждолинного переносу електронів та ударної іонізації для двох випадків розміщення шару варизонних (тобто початково неоднорідних) напівпровідників GaInAs, GaInN і AlInN, а саме біля катодного та анодного контактів. При розміщенні шару варизонного напівпровідника біля $n^+ - n^- - n$ катодного контакту, склад напівпровідникової сполуки змінюється з координатою так, що ширина заборонної зони збільшувалась в напрямку від катода до анода. Тут вивчаються спектри густини потужності шуму та процес генерації електромагнітних коливань при розміщенні приладу в одноконтурному резонаторі. Якщо варизонний шар розміщувався біля анодного контакту, то склад змінювався так, щоб ширина забороненої зони, навпаки, зменшувалась у бік анода. В цьому випадку досліджується тільки процес генерації електромагнітних коливань. Також запропоновано прилад, який працює на ефекті міждолинного переносу електронів та завдяки конструкційним особливостям

повинен мати більшу ширину частотного діапазону, ніж існуючі діоди Ганна. Тут теж досліджується процес генерації електромагнітних коливань.

Автором дисертації проведено великий обсяг досліджень по оптимізації зазначених приладів та аналізу фізичних процесів, які пов'язані з генерацією електромагнітних коливань, показані перспективи їх використання для збільшення частоти генерації приладів, які працюють на ефекті міждолинного переносу електронів.

Результати, що викладені в дисертації, були отримані автором в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна на кафедрі фізичної і біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій при виконанні 3 науково-дослідних робіт НАН України, які фінансувались за рахунок бюджету України.

Наукова новизна результатів і висновків дисертації полягає в урахуванні ударної іонізації при аналізі процесу генерації електромагнітних коливань діодами Ганна на основі варизонних напівпровідників. Автор показав можливість генерації діодами Ганна при такому складі напівпровідників, при якому раніше вважалося, що процес генерації є неможливим із-за ударної генерації.

Достовірність результатів забезпечується використанням адекватних математичних моделей, застосуванням апробованих методів досліджування, ясною фізичною інтерпретацією спостережуваних ефектів.

Структура дисертації відповідає встановленим вимогам. Рукопис складається зі вступу, п'яти розділів з рисунками та таблицями, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг – 157 сторінок.

У вступі досить повно розкрито суть наукової проблеми, її значення і обґрунтовано необхідність досліджень. Об'єктом дослідження обрані електронні процеси в напівпровідникових гетероструктурах і варизонних структурах з ударною іонізацією та міждолинним переносом електронів. Сформульовані мета та основні завдання дослідження та інше.

Оглядова частина дисертації викладена в першому розділі, де критично представлені деякі існуючі твердотільні джерела терагерцового діапазону, окреслюються проблеми з якими стикаються при просуванні діодів Ганна та лавино-прольотних діодів в субміліметровий діапазон довжин хвиль. Зосереджена увага на перспективних матеріалах для діодів Ганна, особливо на напівпровідникових нітридах. Огляд застосування різноманітних контактних явищ для коротких діодів Ганна та приладів на основі варизонних напівпровідників, на жаль, не представлено. Автор робить висновок, що ударна іонізація сприяє покращенню частотних характеристик активних джерел електромагнітних коливань терагерцового діапазону.

Для вирішення поставлених у вступі завдань автор використовує математичне моделювання методом Монте-Карло. Створення математичної моделі та її обґрунтування викладені в другому розділі. Пропонована модель в стані адекватно описати електронний транспорт у варизонних напівпровідникових структурах з урахуванням ударної іонізації при великих електричних зсувах, генерацію електромагнітних коливань міліметрового та субміліметрового діапазонів.

Третій розділ присвячений вивченню просторових та часових параметрів розвитку ударної іонізації в гомогенних та варизонних сполуках напівпровідників GaInAs, GaInN, AlInN. Тут автор визначив часи затримки, довжини пробігу електронів до початку ударної іонізації та напруженості електричного поля початку ударної іонізації для різних складів напівпровідників. Він встановив, що на час затримки та довжину пробігу електронів в варизонних напівпровідниках впливає градієнт зміни фракційного складу варизонного напівпровідника. Проведені дослідження дозволили автору зробити дві гіпотези. Про зменшення часу релаксації енергії електронів при ударній іонізації на початковій стадії та про застосування затримки часу при ударній іонізації для генерації коливань в прольотних діодах.

Четвертий розділ присвячено дослідженню спектральних шумових характеристик діодів зі статичним катодним доменом на основі варизонних напівпровідників InAs – GaAs, InN – GaN, InN – AlN, InAs – GaAs/InP та генерації електромагнітних коливань в режимі, коли на діод прикладена напруга з синусоїдальною складовою. Довжина активної області діода дорівнює 0,5 мкм. Автор аналізує переважаючі механізми розсіювання електронів вздовж діода та процес ударної іонізації. До істотних результатів, отриманих в цьому розділі належать спектральні густини потужності шуму, які свідчать, що шар варизонного напівпровідника розташований на ділянці пониженого рівня легування біля катода в коротких діодах збільшує рівень шуму в широкій смузі частот від 0,1 до 1 ТГц у порівнянні з однорідними за складом напівпровідниками. Автор також показує, що при розташуванні InAs – GaAs приладу в одноконтрному резонаторі генерація коливань відбувається в діапазоні 110 ... 180 ГГц.

В п'ятому розділі вивчається процес генерації електромагнітних коливань діодами з ділянкою пониженого рівня легування біля катода на основі варизонних напівпровідників GaAs – GaInAs. Показано, що незначна ударна іонізація в GaAs – Ga_{0,2}In_{0,8}As діодах біля аноду не перериває генерацію електромагнітних коливань та в одноконтрному резонаторі такий прилад може ефективно генерувати коливання на частотах до 380 ГГц. Збільшення граничної частоти приладу автор бачить в «односторонньому руху носіїв заряду різних знаків, що сприяє швидкій релаксації накопиченого в результаті ударної іонізації надлишкового об'ємного заряду». В цьому розділі запропоновано також пристрій, який працює на ефекті міждолинного

переносу електронів, та який за своєю конструкцією здатний генерувати електромагнітні коливання в широкій смузі частот від 100 до 300 ГГц

В цілому, дисертація Приходька К. Г. є закінченим науковим дослідженням в актуальній області сучасних високочастотних напівпровідникових приладів і містить в собі нові, обґрунтовані результати, висновки та рекомендації. Урахування ударної іонізації в математичній моделі, дозволило автору уточнити процес генерації електромагнітних коливань діодами Ганна на основі варизонних напівпровідників, на прикладі GaInAs, GaInN і AlInN. Істотним результатом, який заслуговує уваги, є генерація на частоті 380 ГГц основної гармоніки. Це один з найвищих показників для приладів з міждолинним переносом електронів.

У дисертації висвітлено особистий внесок автора в отриманні результатів. Результати в повній мірі опубліковані в наукових фахових виданнях. Основні публікації автора включають 8 статей в спеціалізованих фахових наукових виданнях, 2 авторських свідоцтва України на корисну модель. Результати дисертаційної роботи апробовано на 10 конференціях.

Положення автореферату ідентичні основними положеннями дисертації.

Майже всі отримані результати, положення, висновки і рекомендації науково обґрунтовані та з точки зору достовірності сумніву не викликають та мають необхідну новизну.

При великому обсязі виконаних досліджень і досить кваліфікованому поданні результатів дисертація має ряд недоліків, які заслуговують на обговорення.

1. Об'єктом дослідження заявлено «електронні процеси в напівпровідникових гетероструктурах і варизонних структурах з ударною іонізацією та міждолинним переносом електронів», що не відповідає темі, завданням та тексту дисертації. Об'єктом дослідження скоріше може бути процес генерації електромагнітних коливань та хвиль за допомогою зазначених структур.

2. Твердженню автора про «...можливість використання ударної іонізації у варизонному напівпровідниковому шарі у якості механізму релаксації електронів за енергією.», яке зазначено в положеннях, що виносяться на захист на сторінці 23, п. 1 не знайдено всебічного доведення в тексті дисертації. У висновках 3 розділу, п. 4 на сторінці 76 висловлюється гіпотеза та на сторінці 124 вона обґрунтовується.

3. Твердженню автора про те, що «...в такому елементі можна реалізувати режим одностороннього руху носіїв заряду різних знаків, що сприяє швидкій релаксації накопиченого в результаті ударної іонізації надлишкового об'ємного заряду.», яке зазначено в положеннях, що виносяться на захист на сторінці 23, п. 2 не знайдено всебічного доведення в тексті дисертації. На сторінці 110 висловлюється та обґрунтовується гіпотеза, яка виглядає, дійсно, правдоподібною.

4. У вступних розділах дисертації представлена основна мотивація дослідження – підвищення частотної границі генерації. Однак, огляд літератури обмежується аналізом лише діодами Ганна, лавінно- та тунельно-прольотними діодами, резонансно-тунельними діодами та квантово-каскадними лазерами. Тим часом, істотний прогрес у зазначеній проблемі досягнуто в інших напрямках, деякі з яких відзначені на початку цього відгуку. Було б природно і корисно зупинитися на інших принципах отримання надвисокочастотного випромінювання.

5. В дисертації вивчаються фізичні процеси, які відбуваються в діодах Ганна з довжиною активної області менше 1,2 мкм, зі специфічним $n^+ - n^- - n$ катодним контактом та на основі варизонних напівпровідників. Однак, аналізу контактних явищ, які використовуються для діодів Ганна та результатів досліджень діодів на основі варизонних напівпровідників та гетеропереходів автор не приводить зовсім як в оглядовій частині, так і при порівнянні отриманих результатів з відомими, які є. Дослідження діодів Ганна на основі варизонних GaInAs, GaInN та AlInN без урахування ударної іонізації були проведені, наприклад мною значно раніше. Автор не проводить порівняння результатів своїх досліджень ні з результатами моделювання інших авторів, ні з експериментальними даними, що було б дуже корисним.

6. Автор застосовує термін діод зі статичним катодним доменом, який, на мій погляд, не дуже доречний, так як не відповідає загальноприйнятому уявленню. Під діодом зі статичним катодом розуміють прилад з довжиною активної зони не менше 5...10 мкм та з $n^+ - n^- - n$ або запірним металевим катодом, в якому утворюється на катодному контакті статичний електричний домен. Але, за результатами дослідження підрозділу 4.1.3 та, як видно на рисунках 4.10 і 4.11, домен рухається у бік анода. В дисертації відсутній огляд результатів попередніх досліджень по діодам зі статичним доменом, хоча вони є (наприклад, Е. Д. Прохорова). Усі посилання на сторінці 77, на якій починається розгляд таких приладів, не відповідають темі. Наприклад, «Розглядаються діоди, в яких за певних умов утворюється катодний домен. В таких діодах, як показано [55], може виникнути ударна іонізація,...». Під посиланням зазначена відома в наукових колах стаття Yilmazoglu O., Pavlidis D. та інших «First observation of bias oscillations in GaN ...», яка зовсім про інше, а не про статичний домен.

7. Зміна складу напівпровідникової сполуки з координатою задається певною функціональною залежністю. Автор називає її «нормальним розподілом» (сторінки 4, 67, 69, 84, 94 та інші) або «гаусівським розподілом» (сторінки 73 та 118) та іноді посилається на формулу (4.8) на сторінці 94, відповідно якої повинно здійснюватися залежність фракційного складу сполуки від координати. Але усі рисунки (наприклад, 3.3, 4.1, 4.14, 4.17), на яких показана ця залежність, не відповідають ні

загально прийнятому в науковій літературі поняттю нормального розподілу або розподілу Гауса, ні формулі (4.8).

8. Використання найпростішої моделі резонатора для визначення частотних характеристик і ККД діода не є оптимальним для серйозних прогнозів просування в високочастотну область. Реально, область коливань вище 100 ГГц сусідить з квазіоптикою, де резонансне оточення генератора мікронних розмірів може бути реалізовано на принципах, відмінних від тих, які експлуатуються в міліметровій та сантиметрової області. Ряд пропозицій і відповідних технологій утворення резонаторів в цьому високочастотному діапазоні реалізовані і опубліковані в науковій літературі. Ці роботи, на жаль, не привернули уваги автора.

9. Дисертація містить граматичні, стилістичні та смислові помилки. В якості прикладів можна вказати лише деякі. На сторінці 4 «переви0,5 пс», на сторінці 70 «Рис. 3.4. Час... відповідно розподілу рис. 3.4», на сторінці 86 «Рис. 4.8. ...СГПШ від напругах на діоді...», на сторінці 101 «Рис. 4.22.... $\text{In}_2\text{Ga}_{1-x}\text{N}$...», на сторінці 106 «діод з врізопним», на сторінці 110 «з великими міждолинними енергіями», на сторінці 113 «яка заповнюється статичним доменом у бік анодного контакту», на сторінці 117 «швидкість іонізації електронів ... іонізації дірок». Постійно застосовується слово «негативна» замість «від'ємна», «позитивна» замість «додатна», «призводить» замість «приводить». Часто використовуються якісні, а не кількісні порівняння. Наприклад, на сторінці 23 «покращити частотні властивості», на сторінці 106 «Варізонна структура демонструє кращі спектральні характеристики», на сторінці 136 «GaInAs кращі показники за ефективністю»

Зазначені зауваження можуть бути враховані в подальших дослідженнях автора і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації і автореферату.

Вважаю, що дисертаційна робота Приходька Кирила Геннадійовича «Активні напівпровідникові елементи для генерації в терагерцовому діапазоні» і її автореферат відповідають вимогам МОН України, які пред'являються до кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

Офіційний опонент,
професор кафедри вищої математики
Харківського національного технічного
університету сільського господарства імені Петра Василенка
доктор фізико-математичних наук, професор

І. П. Стороженко

Відгук одержано 16 вересня 2011 р.
Вчений секретар спецради ФХНХ
Мірошнік Ігор Архипович



Підпис Стороженко І.П.
ЗАСВІДЧУЮ
Керівник відділу діловодства ХНТУСГ