

РІШЕННЯ
разової спеціалізованої вченої ради
про присудження ступеня доктора філософії

Разова спеціалізована вчена рада Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії галузі знань 10 – Природничі науки на підставі прилюдного захисту дисертації «Активні напівпровідникові планарні елементи субміліметрового та терагерцового діапазонів» за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали "22" лютого 2024 року.

Зозуля Валерій Олександрович 1995 року народження, громадянин України освіта вища: закінчив у 2018 році Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна за спеціальністю 153 – Мікро- та наносистемна техніка.

Працює науковим співробітником в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна з 2022 р. до цього часу.

Дисертацію виконано у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна, м. Харків. Науковий керівник Боцула Олег Вікторович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізичної і біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Здобувач має 5 наукових статей за темою дисертації, з них 1 стаття у наукових фахових виданнях України, 4 статті в зарубіжних виданнях:

1. Botsula O. V., Prykhodko K. H., Zozulia V. A. InGaAs-based graded gap active elements with static cathode domain for terahertz range. *Journal of nano- and electronic physics*. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 01006–1–01006–5. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(1\).01006](https://doi.org/10.21272/jnep.11(1).01006)

2. Botsula O. V., Zozulia V. O. Generation of THz oscillations by diodes with resonant tunneling boundaries. *Journal of nano- and electronic physics*. 2020. Vol. 12, no. 6. P. 06037–1–06037–4. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(6\).06037](https://doi.org/10.21272/jnep.12(6).06037)

3. Botsula O. V., Zozulia V. O. Energy and Frequency Properties of Planar n+-n-n+ Diodes with Active Side Boundary. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2021. Vol. 13, no. 6. P. 06028–1–06028–4. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(6\).06028](https://doi.org/10.21272/jnep.13(6).06028)

4. Приходько К.Г., Боцула О.В., Зозуля В.О. Особливості розвитку ударної іонізації в напівпровідникових сполуках InGaN та InAlN. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2021. № 34. С. 19-28. URL: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-03>

5. Botsula O. V., Zozulia V. O., Prykhodko K. H. Planar n+-n-n+ diode with active side boundary on InP substrate. *Journal of nano- and electronic physics*. 2023. Vol. 15, no. 1. P. 01011–1–01011–4. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(1\).01011](https://doi.org/10.21272/jnep.15(1).01011)

У дискусії взяли участь голова і члени разової спеціалізованої вченої ради та присутні на захисті

У дискусії взяли участь голова і члени разової спеціалізованої вченої ради та присутні на захисті фахівці

1. Шульга С. М., доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, декан факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем.

2. Маслов В. О., доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри квантової радіофізики факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

1. Автор допускає деяку неточність у назві роботи, а саме вказує «терагерцовий» діапазон частот та «субміліметровий» діапазон довжин хвиль, що є не зовсім коректним з точки зору термінології. Оскільки, згідно загальноприйнятою в науковій літературі термінології терагерцовий діапазон стосується хвиль з частотою від 0,1 ТГц до 10 ТГц, а субміліметровий діапазон хвиль стосується довжин хвиль від 0,1 мм до 1 мм, що відповідає частотному діапазону від 0,3 ТГц до 3 ТГц. Тобто, з огляду на вказану класифікацію має повторення.

2. У Розділі 2 було б доцільно провести порівняння з іншими математичними моделями для моделювання напівпровідникових пристроїв з огляду на визначення ефективності і адекватності моделі, що використовується у дисертації.

3. Доцільно провести верифікацію моделі не тільки на прикладі розрахунку кінетичних характеристик матеріалів, що використовуються у роботі, а й на прикладі основних характеристик подібних до розглянутих у роботі пристроїв, які було отримано експериментально та описано у науковій літературі.

4. На с. 91, рис. 3.5 допущена помилка у підписі до рисунків (а) та (б), а саме вказано, що отримані залежності відповідають однаковій товщині бічної границі. Однак с подальшого тексту дисертації слідує, що для цих залежностей товщині різні – 0,16 та 0,32 мкм.

5. Дисертанту потрібно було звернути увагу на однотипність назв, що застосовуються до одних і тих же об'єктів. У роботі зустрічається два типи написання сполуки GaInAs та сполуки AlGaAs. Наприклад, зустрічаються $Ga_xIn_{1-x}As$ та $In_zGa_{1-z}As$ (на с. 128), у розділі 5 зустрічається $Al_zGa_{1-z}As$ та $Al_xGa_{1-x}As$ (с. 145, с. 146, с.149).

6. Зустрічаються граматичні та технічні помилки.

3. Дегтярьов А. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри квантової радіофізики факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

1. У роботі зустрічається два різновиди написання сполуки, а саме InGaAs (с. 5, с 11) та GaInAs (с. 35, с. 38). Ті ж зауваження щодо написання сполук $Ga_xIn_{1-x}As$ та $In_zGa_{1-z}As$ (с. 123, с. 124 та с. 128).

2. На рис. 1.2 доцільно використати більш ніж одне джерело для демонстрації залежності максимальної температури від частоти для квантово-каскадних лазерів.

3. При верифікації математичної моделі у Розділі 2, а саме розрахунку кінетичних характеристик ряду сполук, таких як GaAs, GaInAs, InP, використовуються дещо застарілі дані,

особливо це стосується залежності GaAs за посиланням [170]. Рік публікації [170] – 1980.

4. С. 89, рис. 3.5. До допису цього рисунку допущено неточність, а саме вказано що рис.3.5 а та рис.3.5 б мають одну й ту ж товщину активного бічного елемента, хоча із подальшого тексту слідує, що це не так і ці елементи мають різну товщину – 0,16 та 0,32 мкм відповідно.

5. С. 118, на рис.4.8. можливо більш доцільно було використати логарифмічний масштаб для концентрацій носіїв заряду.

6. С. 153, на рис 5.8 в та на рис. 5.9 б відображена різна товщина потенційних бар'єрів у зоні провідності, хоча мова йде про одну й ту ж структуру при однаковій напрузі зміщення 0,2 В.

7. Зустрічаються граматичні та технічні помилки.

4. Стороженко І. П., доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри фізики та математики Державного біотехнологічного університету.

1. Слово «призводить» здобувач іноді використовує в реченнях з позитивним змістом. Наприклад, сторінка 6 «...призводить до розширення діапазону частот діода в бік високих частот...», сторінка 41 «...призводить до ефективнішого використання площі...», сторінка 101 «...призводить до збільшення ефективності...».

2. Застосування терміну «терагерцового діапазону» в назві є дискусійним. Генерації на частоті 1 ТГц і більше в дисертації не отримано.

3. У практичних значеннях отриманих результатів на сторінці 28 зазначено: «...можна створити ефективні генератори електромагнітних коливань у терагерцовому та субтерагерцовому діапазонах...». Тут присутнє протиріччя з науковою новизною отриманих результатів п. 1 – 5 на сторінці 25, в яких говориться про генерацію на частотах 300...500 ГГц. Генерація на частотах 300...500 ГГц ще не є генерацією у терагерцовому діапазоні.

4. В об'єкті дослідження на сторінці 24 присутня змістовна невизначеність: «процес генерації електромагнітних коливань з використанням напівпровідникових структур з активними бічними границями». Не зрозуміло за рахунок чого відбувається генерація, до чого саме застосовується напівпровідникові структури і, яка у структур бічна границя?

5. У предметах досліджень на сторінці 24, на мій погляд, слід було б додати залежність густини електричного струму приладів від часу та напруги, яка безумовно досліджується, але не зазначена.

6. В огляді дуже мало приділено уваги досягненням швидкодіючих транзисторів. Зовсім не згадано про джерела на основі плазмон-поляритонів, спінтроніки, від'ємної ефективної маси носіїв заряду, балістичного транспорту в коротких приладах. Було б природно й корисно зупинитися на інших принципах отримання надвисокочастотного випромінювання.

7. На сторінці 35 зазначено, що «Діоди Ганна є традиційними і найпоширенішими джерелами субтерагерцових коливань.» На мій погляд, ця фраза є некоректною по суті й протирічить проведеному здобувачем огляду приладів. Діод Ганна є одним з приладів, який здатний генерувати коливання електричного струму в субміліметровому діапазоні.

8. На сторінках 80 – 82, рис. 2.8. – 2.10. показані результати верифікації математичної моделі. Модель перевіряється на необмежених однорідних напівпровідниках в стаціонарному режиму. Це загально відома практика. Але, досліджувати здобувач планує швидкодіючі процеси. Те що модель адекватно відтворює відомі залежності дрейфової швидкості електронів від електричного поля не означає, що вона також гарно узгоджується з динамічними характеристиками. На рис. 2.8. – 2.10. приведено багато кривих. Серед цих них одна крива

отримана здобувачем при моделюванні. Інші криві взяті з різних статей. Але незрозуміло, чим ці криві відрізняються одна від одної. Що змінюється у параметрах? Треба було б додати більше інформації про криві, на які посилається здобувач як на еталон.

9. На сторінках 56, 57 і 72 обумовлюються критерії застосування математичної моделі по розбиттю за часом та координатами. Все правильно, але конкретні числа сітки часу та координат не приведено. Також не приведена будь-яка оптимізація по такому розбиттю. Залишається тільки сподіватися, що оптимізація по кроку інтегрування та перевірка збігу моделі проводилася.

10. Не вказано який само електричний струм вважався струмом через прилад при обчислюванні потужності коливань. Усереднений струм в приладі або струм на анодному контакті?

11. Застосовується грубий підхід у моделювання роботи резонатора у вигляді гармонічної напруги, яка подається на прилад. Єднання досить точної моделі приладу з дуже неточною моделлю резонатора виглядає дивним. Використання найпростішої моделі резонатора для визначення частотних характеристик і ККД діода не є оптимальним для серйозних прогнозів просування у високочастотну область. 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 сантиметровій області. Ряд пропозицій і відповідних технологій утворення резонаторів в цьому високочастотному діапазоні реалізовані й опубліковані в науковій літературі. Ці роботи, на жаль, не привернули уваги здобувача

12. Невказані деякі початкові та граничні данні для моделювання. Наприклад, невказана температура кристалічної решітки, при якій зроблені числові експерименти. Не обґрунтовано вибір концентрації донорів в активній області приладу, геометричні розміри приладу.

13. Аналіз фізики процесу генерації проведено недостатньо повно. Не до кінця з'ясовані причини утворення вихідних характеристик. З результатів, отриманих здобувачем, нам відомо, що така конструкція приладу приводить до розширення частотного діапазону або підвищення вихідної потужності. Однак, які само внутрішні процеси відповідальні за це залишається невизначеним.

14. Відсутнє порівняння отриманих результатів з експериментальними даними по генерації навіть в тих випадках, коли таке порівняння можна було б зробити. Наприклад, експериментальна генерація за допомогою планарних GaAs- та InP-приладів [140 – 145], які взагалі підтверджують отримані здобувачем результати, згадуються ним тільки в огляді, розділу 2.

15. Недостатньо порівнюються результати розділів 3 – 5 між собою. Складається враження, що приладі, які розглянути в різних розділах, не як не пов'язані загальною темою. На мій погляд, проводити порівняння між приладами на основі GaAs і GaAs з InGaAs варізонним шаром у низькочастотній частині їх частотного діапазону роботи не коректно, так як вихідна характеристика GaAs-приладу штучно обмежена напругою (сторінка 87 « $U_0 + U_1 < 2,5 \text{ В}$ »).

16. На сторінці 162 є смислова помилка, яка вводить читача в оману «...отримання генерації на частотах вищих 500 ГГц з максимальною ефективністю до 10%...». Генерація з ефективністю 10 % отримана на частоті 110 ГГц (сторінка 160, п. 3). Однак, верхня границя частотного діапазону, дійсно приблизно 500 ГГц.

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

5. Кузьмичов І. К., доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника, завідувача відділу вакуумної електроніки Інституту радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова Національної академії наук України.

1. У назві дисертаційної роботи присутні дві пов'язані між собою неточності: 1) дисертант вказує терагерцовий і субміліметровий діапазони, хоча згідно прийнятої у науковій спільноті класифікації мова йде про один і той же діапазон – терагерцовий; 2) недоцільно поєднувати одночасно назву, яка стосується довжини хвилі (субміліметровий) та частоти (терагерцовий). Правильніше було б у назві дисертації замість слова «субміліметровий» вставити слово «субтерагерцовий». Тим більше, майже в усьому тексті розглядаються частоти генерації, що лежать в цьому діапазоні (100÷300) ГГц.

2. На стор. 83 у підписі до рис. 2.9 немає опису кривих, які позначені не зафарбованими кружками та трикутниками.

3. На стор. 91 у підпису до рис. 3.5 вказано, що рис. а) та б) відповідають одній і тій самій товщині бічного активного елемента, хоча з тексту дисертації (стор. 90) слідує, що мова йде про дві різні товщини 0,16 мкм та 0,32 мкм.

4. На стор. 128, рис 4.16 а) та в) продемонстровані великі значення E_x складової електричного поля поблизу анодного контакту планарної частини діода. У тексті дисертації доцільно було б навести пояснення щодо цього.

5. У розділі 4 доцільно було б пояснити фізичні процеси, що призводять до незначного підвищення частоти генерації на частотах вище 200 ГГц, що продемонстровано на рис. 4.20 (стор. 131) та рис. 4.21 (стор. 133).

6. В роботі, особливо у розділі 4 (як приклад, на стор. 123, стор. 125 та стор. 129, стор. 130), зустрічається два різних написання сполук ($Ga_zIn_{1-z}As$ та $Ga_xIn_{1-x}As$). Теж саме стосується використання двох назв сполуки $Al_xGa_{1-x}As$ та $Al_zGa_{1-z}As$ (прикладі на стор. 147, стор. 151) у розділі 5.

7. Зустрічаються граматичні помилки. Наприклад, на стор. 25 «...бічними границя на основі ...», а повинно бути «...бічними границями на основі ...»; на стор. 74 «... пов'язана із залежності складу...», а повинно бути «...пов'язана із залежністю складу...».

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку результатів дисертаційної роботи та обґрунтованість наведених здобувачем висновків.

Результати відкритого голосування:

"За" 5 членів ради,

"Проти" 0 членів ради,

"Утримались" 0 членів ради

На підставі результатів відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада присуджує Зозулі Валерію Олександровичу ступінь доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Голова разової спеціалізованої вченої
ради



Сергій ШУЛЬГА