

68-72-88/1  
30.04.2021

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук,  
начальника відділу напівпровідникових матеріалів і приладів на їх основі  
Науково-виробничого підприємства «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ» - дочірнього  
підприємства ПрАТ «Концерн-Електрон», Круковського Семена Івановича  
на дисертаційну роботу

**Могіляка Івана Адріановича**

**«Лазерне мікро- наноструктурування та легування приповерхневих шарів  
напівпровідникових матеріалів»**

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.27.06. – технологія, обладнання та виробництво електронної  
техніки.

### **1. Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Покращення параметрів мікроелектронних напівпровідникових структур та приладів вимагає застосування технології нових нерівноважних методів обробки матеріалів і розвитку принципово нових малоопераційних технологічних процесів. Використання потужних лазерів для локального модифікування властивостей напівпровідникових матеріалів здатне забезпечити низку технологічних можливостей таких як лазерне твердофазне легування, лазерне гетерування, формування поверхневих періодичних структур.

Тому, вивчення процесів утворення у напівпровідниках лазер-індукованих поверхневих періодичних структур, формування субмікронних легуваних шарів під дією неперервного випромінювання CO<sub>2</sub> лазера та аналіз ефективності застосування лазерної твердофазної дифузії для формування субмікронних легуваних шарів, що розглядаються в дисертаційній роботі є безперечно актуальним.

**2. Наукова новизна отриманих у дисертації результатів полягає у наступному:**

Встановлені фізико-технологічні закономірності формування мікро-наноструктур на поверхні монокристалічного кремнію. Виявлено, що має місце формування цілого класу періодичних структур, зокрема, таких як ЛППС у

вигляді прямих паралельних ліній, концентричні кола, мікропіраміди з квадратною і трикутною основою, мікрократери, мікроставупи тощо. Результати комп'ютерного моделювання динаміки формування поверхні проплаву на основі цієї математичної моделі добре узгоджуються з експериментальними даними і вказують на фрактальний характер формування поверхні проплаву.

Встановлено, що при густинах потужності лазера поблизу порогу плавлення реалізуються нестійкості в електронно-дірковій плазмі, які призводять до нерівномірного поглинання випромінювання та, відповідно, до локального анізотропного плавлення поверхні.

Виявлено, що в умовах мілісекундної лазерної дії на напівпровідники, при енергетичних параметрах випромінювання, достатніх для однорідного плавлення приповерхневих шарів, можлива сегрегація домішки з об'єму напівпровідника на поверхню з утворенням тонкої плівки легуючого елементу, де може мати місце часткове або повне її випаровування з поверхні матеріалу.

Встановлено, що при селективному нагріванні структур типу прозорий напівпровідник – непрозора тонка плівка легуючого елементу секундними імпульсами CO<sub>2</sub> лазера можлива реалізація процесу «холодної» твердофазної дифузії домішок. Виявлено, що процес лазерного твердофазного легування не супроводжується суттєвим підвищенням густини структурних дефектів.

Виявлено, що при лазерному твердофазному легуванні напівпровідників особливістю розподілу домішок по глибині є наявність концентраційного максимуму не на поверхні, а на деякій глибині, яка залежить від часу дії лазерного випромінювання. Цей ефект пояснено одночасною дією двох процесів збільшення часу дифузії домішок в глибину напівпровідника і експоненціальному збільшенні швидкості дифузії за рахунок підвищення температури та процесу випаровування домішок, які продифундували з поверхні в напівпровідник.

Запропонований в дисертаційній роботі метод лазерної твердофазної дифузії домішок на субмікронні глибини може бути в багатьох випадках альтернативним до іонної імплантації та ефективно використаний для формування мікро- оптоелектронних напівпровідникових структур.

**3. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі є високим й базується на аналізі літературних даних з розглянутих проблемних питань, грамотній постановці мети й задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, зіставленні й критичному аналізі отриманих результатів у**

порівнянні з результатами інших дослідників і формулюванні отриманих висновків за результатами експерименту. Отримані закономірності перевірені шляхом зіставлення з відомими в науковій літературі, що підтверджує обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі. Оцінку достовірності та інтерпретацію отриманих результатів проведено з використанням методів статистичного аналізу за допомогою відповідних програм.

Результати, отримані у дисертації опубліковані у 14 оригінальних наукових статтях у фахових та інших наукових виданнях, 3 із яких відносяться до реєстру міжнародної наукометричної бази Scopus / Web of Science. Результати роботи пройшли апробацію на 6 міжнародних та вітчизняних конференціях. Публікації, покладені в основу дисертаційної роботи є оригінальними і повністю висвітлюють результати й положення дисертації.

#### **4. Практична значимість отриманих результатів.**

Розроблені технологічні засади лазерного твердофазного легування напівпровідників, що дозволяє одержувати досконалі субмікронні леговані шари з відтворюваними параметрами, виготовляти омичні контакти, гомо- і гетеропереходи, а також формувати активні елементи напівпровідникових структур. Сформовані мікро- наноструктури на поверхні монокристалічного кремнію можуть бути ефективно використані у фотовольтаїці та мікро- наноелектроніці.

#### **5. Оцінка змісту та завершеності дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних бібліографічних джерел зі 146 найменувань, додатків.

**У вступі** сформульована проблема, вирішенню якої присвячена дисертація, обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульована мета і основні завдання досліджень, проаналізована наукова і прикладна значимість отриманих результатів, відзначено особистий внесок дисертанта і зв'язок з науковими програмами і темами.

**У першому розділі** наведені результати аналізу теоретичних та експериментальних робіт стосовно взаємодії потужного лазерного випромінювання з напівпровідниковими матеріалами. Розглядаються процеси кристалізації напівпровідникових шарів під дією лазерного випромінювання. Проаналізовані особливості мікро- та наноструктурування поверхні напівпровідникових матеріалів під дією випромінювання лазерів, які працюють в різних часових, енергетичних і спектральних режимах.

**У другому розділі** описано технології лазерної обробки напівпровідникових матеріалів, а також методики дослідження структури, морфології приповерхневих шарів напівпровідникових матеріалів та електрофізичних властивостей сформованих структур.

**У третьому розділі** викладено результати математичного моделювання динамічних процесів зміни морфології поверхні напівпровідників у зонах дії імпульсного лазерного випромінювання на напівпровідникові матеріали та приведені отримані експериментальні результати.

Описано характер впливу сил поверхневого натягу на морфологію поверхні та нестійкість плоского фронту кристалізації при лазерному плавленні і легуванні напівпровідникових матеріалів.

Приведені експериментальні результати по формуванню наноструктурованої поверхні напівпровідників для цілей мікро-наноелектроніки та фотовольтаїки.

**У четвертому розділі** розглядаються результати експериментальних досліджень процесів перерозподілу домішок при імпульсній лазерній дії. Запропонований метод формування субмікронних легованих шарів під дією неперервного випромінювання CO<sub>2</sub> лазера.

Проаналізовані і обґрунтовані оптимальні умови лазерної дії з метою одержання досконалих субмікронних легованих шарів з відтворюваними параметрами. Проаналізована ефективність застосування лазерної твердофазної дифузії для формування субмікронних легованих шарів. Розглянуті можливості використання методу лазерного твердофазного легування для формування елементів напівпровідникових структур. Досліджені електрофізичні властивості діодних структур, сформованих на основі кремнію. Наведені результати експериментальних досліджень діодних структур, сформованих на основі шарів InP, InGaAs, InGaAsP легованих домішкою Zn.

Робота завершується висновками, які узагальнюють результати виконання теоретичних та експериментальних досліджень.

Дисертація оформлена згідно існуючих вимог, здобувач послідовно та доступно викладає наукову інформацію, результати досліджень та висновки по роботі.

## **6. Зауваження по дисертаційній роботі.**

Проте, до дисертації є деякі зауваження:

1. У роботі не в повній мірі наведено та проаналізовано використання оптичних систем для вирівнювання інтенсивності випромінювання лазерів;
2. У роботі недостатньо обгрунтовано вплив довжини хвилі лазерного випромінювання на характер мікро- наноструктурування поверхні напівпровідників;
3. В дисертації недостатньо приведено інформації для порівняння параметрів одержаних автором приладових тестових структур методом лазерного нерівноважного твердофазного легування із приладами на основі цих же матеріалів, але виготовлених традиційними методами іонної імплантації;
4. При узагальненні результатів досліджень характеристик одержаних тестових структур та р-n переходів на основі InP, GaAs, Si не завжди наводяться статистичні дані про кількість і параметри досліджуваних зразків;
5. У роботі необгрунтовано можливості створення приладових структур на базі спостережених морфологічних змін поверхні монокристалічного кремнію під впливом лазерного випромінювання різної природи та інтенсивності;
6. У дисертаційній роботі зустрічаються окремі граматичні та стилістичні помилки, зокрема на с.73, с.112.

Зазначені зауваження не є принциповими, не знижують загальну високу оцінку роботи і не ставлять під сумнів наукову і практичну цінність результатів та висновків дисертації, а мають швидше рекомендаційний характер для подальших досліджень.

### **7. Загальна оцінка дисертації.**

У дисертації вирішено актуальну науково-практичну задачу по встановленню основних фізико-технологічних закономірностей формування морфології поверхні та легування напівпровідникових матеріалів під дією імпульсних лазерних потоків мілісекундного та секундного діапазонів для цілей мікро- наноелектроніки.



Подана до захисту дисертаційна робота **Могіляка І.А. «Лазерне мікро-наноструктурування та легування приповерхневих шарів напівпровідникових матеріалів»** є оригінальним і завершеним науковим дослідженням.

Результати роботи є новими та достатньо апробованими, зокрема доповідались на всеукраїнських та міжнародних конференціях. У статтях та матеріалах конференцій автором повністю викладені матеріали його дисертаційного дослідження. Автореферат адекватно відображає зміст роботи.

За актуальністю теми, рівнем та обсягом виконаних досліджень, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 05.27.06. – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки, а також вимогам, які висуваються до кандидатських дисертацій, зокрема п. 9, 11-14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами згідно з постановою КМ України № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р.), а її автор **Могіляк Іван Адріанович** заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06. – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

#### **Офіційний опонент:**

Начальник відділу напівпровідникових матеріалів і приладів на їх основі

Науково-виробничого підприємства «ЕЛЕКТРОН-КАРАТ» - дочірнього підприємства ПрАТ «Концерн-Електрон»,

доктор технічних наук,

старший науковий співробітник



С. І. Круковський

Підпис д.т.н., С. І. Круковського засвідчую:

Організатор діловодства



Т.К. Чумаченко