

66-72-88/2
30.04.2021

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Могиляка 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.

Актуальність теми. При дії інтенсивного лазерного випромінювання на тверді тіла можуть формуватися на їх поверхні квазіперіодичні поверхневі структури різної форми та природи. Природа формування таких структур на поверхні напівпровідникових матеріалів може бути зумовлена, зокрема, виникненням періодично модульованого інтерференційного світлового поля в приповерхневому шарі. Однак, такі структури можуть формуватися також із-за реалізації у напівпровіднику флуктуацій носіїв заряду та виникненням відповідно додаткового поглинання випромінювання аж до локального плавлення поверхні. Формування таких структур є цікавим як з фізичної точки зору, так і практичного використання для створення структур функціональної мікро- наноелектроніки. З іншого боку, порівняльний аналіз показав, що ефективним способом модифікації матеріалів для використання в промисловій технології є метод лазерного легування, який базується, зокрема, на твердофазній дифузії домішок з поверхневого джерела у напівпровідник. Особливо ефективним при цьому є лазерне твердофазне легування, яке відбувається при дії лазерного випромінювання з довжиною хвилі, для якої напівпровідник є прозорим і поглинання енергії відбувається в основному в плівці матеріалу лігатури, нанесеної на поверхню зразків.

Усі ці обставини визначають актуальність теми дисертаційної роботи І.А. Могиляка, присвяченої встановленню фізико-технологічних закономірностей процесів плавлення, формування морфології поверхні та легування напівпровідникових матеріалів при дії імпульсних лазерних потоків для цілей мікро- наноелектроніки.

Дисертаційна робота І.А. Могиляка виконана в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача Національної академії наук України. В даній дисертаційній роботі узагальнені і систематизовані результати досліджень, проведених дисертантом в лабораторії відділу фізико-математичного моделювання низьковимірних систем Інституту прикладних

проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України у рамках держбюджетних науково-дослідних тем: «Математичне моделювання та експериментальні дослідження процесів модифікації структури і властивостей твердих тіл та формування функціональних шарів і покриттів під дією лазерних та іонних потоків» (2000-2004 рр., № держреєстрації 0100U000594), «Теоретико-експериментальні дослідження процесів формування та зміни фізико-механічного стану в об'ємних і плівкових твердотільних матеріалах під дією високоінтенсивного імпульсного нагріву та іонної імплантації» (2005-2008 рр., № держреєстрації 0105U000235) та інших.

Об'єктом дослідження були процеси формування морфології поверхні та електронних властивостей лазерноформованих мікро- наноструктур на основі Si, InP, GaAs, InGaAs, InGaAsP.

Метою даної дисертаційної роботи було встановлення фізико-технологічних закономірностей процесів плавлення, формування морфології поверхні та легування напівпровідникових матеріалів при дії імпульсних лазерних потоків для цілей мікро- та наноелектроніки.

Предметом дослідження були особливості морфології поверхні, структури та електронних характеристик лазерно-модифікованих напівпровідникових приповерхневих шарів.

Дисертаційна робота носить оригінальний та цілісний характер. В процесі її виконання використовувалися сучасні методи досліджень.

Серед низки нових оригінальних результатів, отриманих в даній дисертаційній роботі, хотілося б відзначити наступні:

1. Встановлені фізико-технологічні закономірності формування мікро- наноструктур на поверхні монокристалічного кремнію. Виявлено, що має місце формування цілого класу квазіперіодичних структур, зокрема, у вигляді прямих паралельних ліній, концентричних кіл, мікропірамід з квадратною і трикутною основами, мікрократерів, мікрористів тощо.
2. Виявлені і вивчені закономірності нерівноважної твердофазної дифузії домішок під дією лазерних імпульсів мілісекундного і секундного діапазонів. 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.

3. Експериментально одержані методами лазерної твердофазної дифузії леговані шари в Si і сполуках InP, GaAs. При цьому, максимальна концентрація носіїв заряду в легованих шарах InP:Zn складала $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а в шарах Si:B – 10^{20} см^{-3} , що перевищує граничну рівноважну концентрацію носіїв заряду в згаданих матеріалах при легуванні традиційним методом дифузії.

Практичне значення одержаних результатів.

В дисертаційній роботі 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.

Достовірність одержаних в дисертаційній роботі результатів гарантується широким використанням цілої низки сучасних теоретичних методик з врахуванням відповідних поправок та можливих експериментальних похибок, порівняння одержаних результатів з опублікованими даними для відповідних аналогів досліджуваних об'єктів, а також добрим узгодженням експериментальних результатів з теоретичними моделями.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях і семінарах. Зокрема, на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету «Львівська політехніка» (Львів, Україна, 2001, 2002, 2006), міжнародній науковій конференції «E-MRS 2006 Fall Meeting» (Варшава, Польща, 2006), міжнародній науковій конференції «International Conference on the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems ICPTTFN-XV» (Івано-Франківськ, Україна, 2015), конференція молодих вчених «Підстригачівські читання» (Львів, Україна, 2017, 2019, 2020) та інших.

Результати дисертаційної роботи викладені у 14 наукових публікаціях, серед яких 8 наукових статей, опублікованих у профільних наукових журналах, 3 з яких опубліковані у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами SCOPUS / Web of Science, 6 матеріалів і тез наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних літературних джерел. Рукопис роботи викладений на 142 сторінках друкованого тексту, містить 45 рисунків і 146 бібліографічних джерел.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні завдання дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність роботи. Розкрито зв'язок роботи з науковими програмами і планами, наводяться об'єкт і предмет досліджень, подана інформація щодо апробації і публікацій результатів досліджень та особистий вклад дисертанта в опубліковані роботи. Подається загальна характеристика роботи.

У першому розділі наведено огляд літературних джерел стосовно взаємодії потужного лазерного випромінювання з напівпровідниковими матеріалами. Розглядаються процеси поглинання світлової енергії електронною підсистемою напівпровідника, передачі енергії кристалічній ґратці і формування температурних полів. Проаналізовані особливості зміни структури і властивостей напівпровідників під дією випромінювання лазерів, які працюють в різних часових, енергетичних і спектральних режимах.

Другий розділ «Методика і техніка експерименту» присвячений опису технології лазерної обробки напівпровідникових матеріалів, а також методики дослідження структури, морфології приповерхневих шарів напівпровідникових матеріалів та електрофізичних властивостей сформованих структур. Наведена схема лабораторних технологічних установок імпульсного лазерного впливу на напівпровідники, змонтованих на базі вакуумного універсального поста ВУП-5 з використанням таких оптичних квантових генераторів: імпульсного рубінового лазера типу ГОР-300 ($\lambda=0,69$ мкм, $\tau_i=5$ мс, $E_{\max}=300$ Дж, $d = 3$ см); імпульсного YAG:Nd³⁺ лазера типу ЛТИ-205-1 ($\lambda=1,06$ мкм), який працював у режимі модульованої добротності ($\tau_i=10 - 15$ нс, $E=0,1 - 0,4$ Дж/см²) чи вільної генерації ($\tau_i = 1$ мс, $E_{\max}=30$ Дж/см²); неперервного лазера на СО₂ ($\lambda = 10,6$ мкм, $W_{\max} = 1$ кВт, $d = 3$ см).

Третій розділ «Формування морфології поверхні напівпровідникових матеріалів при дії імпульсного лазерного випромінювання» присвячений опису процесів утворення у напівпровідниках лазер-індукованих поверхневих квазіперіодичних структур. Наведені експериментальні результати механізмів плавлення і кристалізації напівпровідників при дії лазерних імпульсів

рубінового, неодимового і CO₂ лазерів при різних часових і енергетичних параметрах випромінювання. Встановлено, що незалежно від довжини хвилі лазерного випромінювання плавлення матеріалу на початковій стадії процесу носить локальний характер і відбувається в окремих дискретних областях пластини, в яких знаходяться максимуми температурного поля.

В четвертому розділі «Процеси лазерного легування приповерхневих шарів напівпровідникових матеріалів» розглядаються результати теоретико-експериментальних досліджень формування субмікронних легуваних шарів при дії неперервного випромінювання CO₂ лазера. Суть методу полягала в тому, що при дії лазерного випромінювання з довжиною хвилі, для якої напівпровідник є прозорим, поглинання світлової енергії проходить в основному в плівці матеріалу лігатури, нанесеній на поверхню зразків. При цьому плівка домішкових елементів розігрівається і реалізується процес «холодної» дифузії в напівпровідник або дифузії при градієнті температур. Проаналізовані і обґрунтовані оптимальні умови лазерної дії з метою одержання досконалих субмікронних легуваних шарів з відтворюваними параметрами. в процесі лазерного твердофазного легування напівпровідників розчинність домішок перевищує граничне значення їх розчинності в рівноважних умовах. При цьому домішки проявляють електричну активність і немає необхідності їхньої активації, як, наприклад, під час іонної імплантації.

В той же час, до дисертації є низка **зауважень**.

1. В дисертаційній роботі мало приділено уваги формуванню лазер-індукованих періодичних поверхневих структур за допомогою інтерференційної картини від кількох лазерних пучків. А такі структури є досить цікавими і важливими об'єктами, які викликають як чисто науковий інтерес, так і можуть мати практичне значення.
2. Другий розділ дисертаційної роботи, який називається «Методика і техніка експериментальних досліджень», як на мій погляд, є досить коротким (всього 9 сторінок). У цьому розділі варто було б більш детально описати характеристики лазерних установок, які використовуються при проведенні експериментальних робіт, зокрема навести розподіл інтенсивності лазерного випромінювання в пучку.

3. В третьому розділі дисертаційної роботи експериментально вивчалися процеси формування мікро та наноструктур на поверхні напівпровідникових матеріалів. Проте більш-менш детального теоретичного обґрунтування отриманих результатів не було наведено.

В роботі трапляються окремі граматичні помилки та описки.

Наведені недоліки не стосуються основних результатів і висновків роботи та не впливають на її загальну позитивну оцінку.

Таким чином, дисертаційна робота І.А. Могиляка є закінченою науковою роботою, яка містить великий обсяг досліджень, проведених автором. Всі результати дисертації вчасно опубліковані у фахових журналах та доповідались на багатьох міжнародних та всеукраїнських конференціях. Автореферат дисертації повністю відповідає і висвітлює положення та зміст дисертаційної роботи.

На мій погляд, за своєю актуальністю, новизною отриманих результатів та практичною значимістю робота І.А. Могиляка повністю відповідає вимогам МОН України до дисертаційних робіт (п. 9, 11, 12, 13 постанови КМ України про «Порядок присудження наукових ступенів» № 567 від 24.07.2013 р. (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 Могиляк Іван Адрианович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06. – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Офіційний опонент,

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу фізики і хімії поверхні наносистем Інституту хімії поверхні ім О.О. Чуйка НАН України,

О.Ю.Семчук

Підпис доктора фіз.-мат. наук О.Ю. Семчука

Вчений секретар ІХП НАН України

канд. хім. наук



А.М. Дацюк