

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Людвіченка Олексія Петровича «Вплив умов резистивного нагрівання комірки високого тиску на кристалізацію GaN із розчин-розпавної системи Fe–Ga–N» на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

Дисертація Людвіченка Олексія Петровича присвячена визначенню впливу резистивного нагрівання комірок високого тиску апаратів типів «тороїд-30» і «тороїд-40» на розчинність нітриду галію у армко-залізі і кристалізацію GaN із розчин-розпавної системи Fe–Ga–N.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Роботу виконано в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України в рамках науково-дослідної теми «Побудова діаграми стану системи Fe–Ga–N при тиску 6 ГПа та кристалізація в цій системі нітриду галію», № держреєстрації 0119U100566.

Актуальність теми. Отримання кристалів GaN в апараті високого тиску (АВТ) НРНТ-обробкою ростового середовища з використанням методу температурного градієнта є новою перспективною технологією. Проведення відповідних експериментальних досліджень передбачає конструювання резистивних ланцюгів, здатних забезпечити необхідне температурне поле в комірці АВТ для отримання кристалів методом температурного градієнта. Отже, попереднє визначення теплового стану комірки є актуальною науково-технічною задачею, яку, зважаючи на складність геометричних і фізичних параметрів, можливо вирішити за допомогою комп'ютерного моделювання.

Основні науково-технічні завдання, які успішно вирішені, чим продемонстровано оволодіння здобувачем методології наукової діяльності:

1. Розроблено методику комп'ютерного моделювання (з використанням методу скінченних елементів) процесу резистивного нагрівання комірок високого тиску для дослідження розчинності GaN у Fe та кристалізації GaN із розчин-розпавної системи Fe–Ga–N.

2. Проведено комп'ютерний аналіз і встановлені конфігурації, склади резистивних елементів комірки, що забезпечують необхідні розподіли температури для дослідження розчинності GaN у Fe та НРНТ-кристалізації GaN.

3. Встановлено закономірні залежності між геометричними параметрами, складом композиційних елементів АВТ і розподілом температури в реакційному і кристалізаційному об'ємах комірок.

4. Змодельовані закономірності зміни теплового стану комірки високого тиску в процесі зростання зони кристалізації GaN.

5. Проведена експериментальна перевірка розробленої на основі проведених розрахунків комірки високого тиску щодо можливості кристалізації GaN.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 5 розділів, загальних висновків, 213 літературних посилань. Загальний обсяг роботи складає 161 сторінку, містить 70 рисунків, 1 таблицю.

Публікації за матеріалами роботи. Ключові положення дисертації відображені у наукових публікаціях, доповідались на науково-технічних конференціях. Опубліковані результати за обсягом і змістом підтверджують

обґрунтованість та практичну цінність роботи. Загалом здобувачем із співавторами опубліковано 13 наукових праць, серед яких 1 стаття у виданні, що належить до наукометричних баз, 4 статті у фахових виданнях, 8 публікацій за матеріалами конференцій. Таким чином, загальна кількість публікацій відповідає вимогам п. 8 постанови Кабінету Міністрів України про «Присудження та скасування рішення про присудження ступеня доктора філософії» від 12 січня 2022 р. Статті належно відображають результати дослідження.

Наукова новизна результатів дослідження, одержаних дисертантом особисто, полягає у наступному:

1. Вперше встановлено, що при значеннях градієнта температури ~ 13 °C/мм має місце агрегатний хаотичний ріст кристалів GaN; при зменшенні градієнта температури до значень ~ 8 °C/мм утворюється текстурований квазімонокристал GaN; при подальшому зменшенні градієнта температури до $1,5$ °C/мм спостерігається нестиснений ріст монокристалів GaN пелюсткової форми розміром до 3 мм, які об'єднуються в куцоподібні друзи. Оптимізовано схеми резистивного нагрівання комірки АВТ типу «тороїд-40», які забезпечують зменшення величини градієнта температури і приводять до покращення структурної досконалості кристалів GaN.

2. Вперше показано, що для забезпечення росту монокристалів GaN пелюсткової форми із системи Fe–Ga–N у температурному градієнті оптимальною є схема нагрівання комірки АВТ типу «тороїд-40» з використанням комбінованих торцевих нагрівачів з діаметром графітового диска у 10 мм. Усереднене значення осьового градієнта температури при цьому становить $1,5$ °C/мм, ізолінії температури мають горизонтальну орієнтацію.

3. Вперше показано, що в процесі зростання зони кристалізації GaN температура в кристалізаційному об'ємі зменшується незначно (максимально на 5 °C), що не потребує додаткового коригування теплового стану комірки при довготривалих режимах кристалізації GaN у температурному градієнті.

4. Вперше встановлено, що для проведення експериментів з вивчення розчинності нітриду галію у залізі в АВТ типу «тороїд-30» оптимальною є схема нагрівання комірки, що відповідає 60 %-вій концентрації ZrO_2 в осьових нагрівачах, товщині стінки трубчастого нагрівача у 1,5 мм, за яких температура у зразку змінюється в інтервалі 1805 – 1842 °C. Разом з тим, варіювання товщини стінки трубчастого нагрівача від 1,0 до 2,1 мм веде до незначного (~ 2 °C) збільшення максимального перепаду температури у зразку GaN+Fe за одночасної лінійної зміни температури в центрі зразка від 1580 до 2059 °C, що забезпечує можливість його дослідження в широкому температурному інтервалі без зміни ступеня однорідності теплового стану.

Практична цінність отриманих результатів. Використання розрахованих даних з теплового стану АВТ дозволило на етапі конструювання і модернізації резистивних ланцюгів нагрівання комірок високого тиску отримати в них бажані розподіли температури. Спроектовані з допомогою комп'ютерного моделювання комірки засвідчили свою ефективність при дослідженнях процесів розчинення і кристалізації GaN.

Висновки щодо дисертаційної роботи. Дисертаційна робота Людвіченка Олексія Петровича «Вплив умов резистивного нагрівання комірки високого тиску на кристалізацію GaN із розчин-розплавної системи Fe–Ga–N», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство, є завершеною науковою працею, що виконана на належному науково-технічному рівні.

В роботі реалізовано новий підхід до кристалізації GaN з використанням техніки високих тисків і температур, розроблено методику моделювання процесу резистивного нагрівання АВТ, що дає можливість аналізувати тепловий стан комірок для вивчення розчинності нітриду галію у залізі і вирощування кристалів нітриду галію, визначено вплив умов і рекомендовано схеми нагрівання комірки, що покращують якість вирощених кристалів GaN.

Дисертація Людвіченка О.П. відповідає «Вимогам до оформлення дисертацій», затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40, а також постанові про «Присудження та скасування рішення про присудження ступеня доктора філософії», затвердженої Кабінетом Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами.

Рецензент не має суттєвих зауважень до роботи, в цілому позитивно її оцінює та рекомендує до захисту з присудженням ступеня доктора філософії здобувачу Людвіченку Олексію Петровичу.

Рецензент:

заступник завідувача відділу № 1 створення надтвердих матеріалів при високих тисках ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України,

18.01.2024

к.т.н., с.н.с.



Олександр СОКОЛОВ

Підпис к.т.н., с.н.с. Соколова Олександра Миколайовича засвідчую.

Вчений секретар
ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України

к.т.н., с.д.



Володимир СМОКВИНА