

О.П. Людвіченко, асп.; **О.О. Лещук**, д-р техн. наук; **С.О. Гордєєв**, канд. техн. наук;
І. А. Петруша, д-р техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2, 04074
м. Київ, e-mail: ludvial@ukr.net*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ КОМІРКИ АПАРАТА ВИСОКОГО ТИСКУ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМБІНОВАНИХ НАГРІВАЧІВ ПРИ ВИРОЩУВАННІ КРИСТАЛІВ НІТРИДУ ГАЛІЮ

З використанням методу скінченних елементів отримані поля температури, градієнта температури, густини джерел джоулевого тепла в апараті високого тиску «тороїд-40». Застосування цих даних дало можливість модернізувати комірку, призначену для проведення експериментальних досліджень з вирощування кристалів нітриду галію. Розглянуто характер впливу на тепловий стан ростового об'єму розміру торцевих нагрівачів, що входять до складу резистивного ланцюга апарата високого тиску. В результаті визначено розміри комбінованих торцевих нагрівачів, при використанні яких максимум температури знаходиться у верхній частині ростового об'єму і градієнти температури є мінімальними. Таким умовам відповідають значення радіусів верхнього і нижнього торцевих нагрівачів у 5 мм.

Ключові слова: нітрид галію, апарат високого тиску (АВТ), комірка високого тиску (КВТ), метод скінченних елементів (МСЕ).

Вступ

У зв'язку з обмеженістю енергетичних ресурсів зростають вимоги до напівпровідникових матеріалів, що слугують сировиною для виробництва електронних компонентів. Традиційні напівпровідникові матеріали (кремній, германій, арсенід галію) не задовольняють зростаючим запитам щодо енергоефективності. Тому ведеться пошук напівпровідників, здатних перевершити експлуатаційні характеристики широкозонних напівпровідникових матеріалів. Зокрема, нітрид галію – прямозонний напівпровідник з шириною забороненої зони 3,4 еВ, завдяки своїм властивостям дозволяє створювати пристрої, що мають суттєві переваги над традиційними матеріалами. Електроніка і оптоелектроніка на основі GaN-технологій потужніша, менша за розмірами, здатна працювати за температури до 300 °С, зберігає працездатність в умовах іонізуючого опромінення. Розроблення методу отримання високоякісних кристалів нітриду галію в теперішній час є актуальним питанням.

Пошукові роботи, проведені в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, засвідчили перспективність отримання кристалів GaN в умовах високого тиску і температури (НРНТ) з використанням методу температурного градієнта.

В [1] вивчено розчинність нітриду галію у залізі, поведінку системи Fe–GaN за тиску 6–8 ГПа і температури 1500–2000 °С, досліджено умови кристалізації GaN. Досліди проведено з використанням АВТ «тороїд-30». В [2] побудовано діаграму плавкості потрійної системи Fe–Ga–N і доведено можливість отримання кристалів GaN в умовах НРНТ, надано рекомендації щодо використання термодинамічних і кінетичних параметрів одержання кристалів GaN методом температурного градієнта.

Досвід, набутий в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, підтверджує ефективність методу регулювання теплового стану комірки за допомогою зміни електрорезистивних властивостей струмопровідного ланцюга. [3]

Проектування нових і модернізація існуючих комірок, що призначені для проведення дослідних робіт з використанням НРНТ методом температурного градієнта, значно полегшується за умови комп'ютерного моделювання розподілу температури і градієнтів температур. Причиною використання чисельних методів є неможливість отримання аналітичного розв'язку зв'язаної задачі електро-, теплопровідності для складної геометрії АВТ та значна вартість експериментальних досліджень. Для такої задачі раціональним є використання методу скінченних елементів (МСЕ), що дозволяє отримати дані по розподілу температури у всьому об'ємі АВТ з урахуванням складу і розмірів електрорезистивних і теплоізоляційних елементів. В роботах [4–12] наведені дані по розрахунку полів температури в різних типах АВТ з використанням МСЕ. Роботи [3, 13–14] присвячені комп'ютерному моделюванню теплового стану комірки АВТ «тороїд-30» при дослідженні розчинності джерела нітриду галію в залізі. Зокрема, в [3] досліджено вплив на температурне поле розмірів трубчастого нагрівача і концентрації графіту в осьових нагрівачах КВТ. В [14] розглянуто питання збіжності рішення та визначено оптимальну скінченно-елементну дискретизацію досліджуваної області. В [15] змодельовано з допомогою МСЕ тепловий стан спеціально сконструйованої для проведення дослідів по вирощуванню кристалів нітриду галію комірки АВТ «тороїд-40». Оцінено вплив зміни концентрації графіту у нижньому і верхньому нагрівачах та зростаючої зони кристалізації GaN.

Результати виконаних раніше досліджень з використанням розчин-розплавної системи Fe–Ga–N свідчать про певні складнощі в реалізації сталого росту монокристалічних шарів GaN, епітаксійно сполучених з поверхнею (0001) кристала затравки. Неконтрольована сокристалізація через значну швидкість гетерогенної нуклеації і росту індивідів в цій системі призводить до утворення агрегатів кристалів, груповий ріст яких контролюється мінералогічними законами геометричного відбору. Зокрема, за законом Браве грані окремих кристалів ростуть зі швидкостями, обернено пропорційними щільностям їх вузлових сіток (ретикулярна щільність). Ефекти переважних орієнтацій обумовлюють утворення в полікристалічній друзі досить великих (до 2,5 мм за розміром) монокристалів GaN (рис. 1) [15].

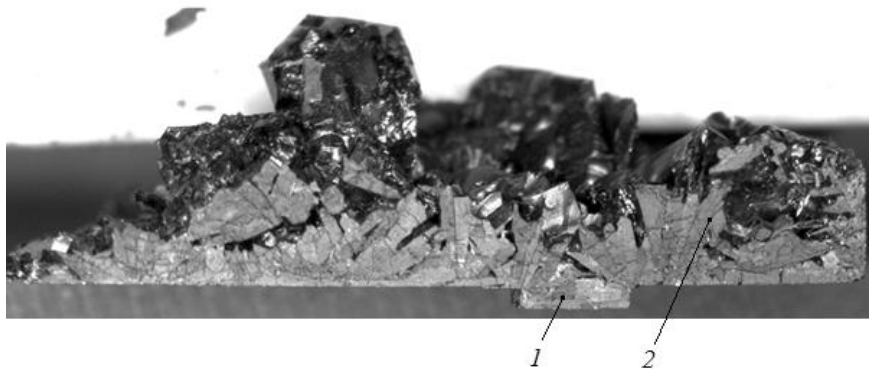


Рис. 1. Витравлений з металу-розчинника полікристалічний прошарок GaN: 1 – затравочний монокристал GaN; 2 – полікристалічний прошарок GaN

Як відомо, швидкість нуклеації при будь-якій температурі визначається як добуток термодинамічного та кінетичного факторів. При цьому як ймовірність зародження кристалів, так і швидкість їх росту безпосередньо залежать від того, наскільки система заглиблена в область пересичених розчинів. Безперечно, розчинність залежить від природи розчинника і термодинамічних умов розчинення, що в разі GaN продемонстровано, зокрема, в [1]. В умовах

нашого термобаричного експерименту з використанням температурного градієнта область пересиченого розчину, очевидно, складалася із зони метастабільного стійкого розчину зі сторони джерела (напрямок $\text{grad } T$), яка при більш низьких температурах переходить в розміту зону нестійких лабільних розчинів. На межі метастабільної і лабільної зон пересичений розчин розпадається спонтанно з утворенням кристалів GaN. Швидкість нуклеації в лабільній області збільшується від нуля до невизначено великих значень переважно в області більш низьких температур, де знаходиться затравочний кристал GaN. При цьому має місце не тільки гомогенна нуклеація, а й найбільш ймовірно гетерогенне зародкоутворення вздовж будь яких твердих поверхонь, що в загальних термінах пояснює формування агрегатів кристалів на відносно «холодному» дні капсули (див. рис. 1).

Передбачається, що зменшення температурного градієнта дозволить повністю перевести розплав заліза з розчинним GaN в область стійкого метастабільного розчину, в якому спонтанна нуклеація неможлива, а швидкість гетерогенної нуклеації буде суттєво зменшена, та ріст нітриду галію буде відбуватися епітаксійно переважно на вже існуючому зародку (затравці GaN). Зменшення $\text{grad } T$ до певних мінімальних значень, можливо до повного його виключення, можна реалізувати зміною конструкції нагрівачів.

Метою роботи є моделювання теплового стану комірки АВТ «тороїд-40», що забезпечує мінімальні градієнти температури в області росту кристалів.

Постановка задачі

Постановка задачі аналогічна до приведеної в [15]. В [3, 13–15] наведені дані, які використовували для визначення електро- і теплофізичних властивостей матеріалів складових частин АВТ, в [16] – значення теплопровідності пірофіліта під тиском 4 ГПа. Для вирішення задачі скористались розробкою авторів [6] і пакетом ANSYS.

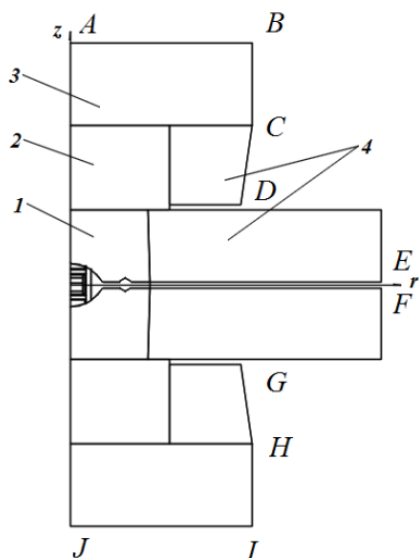


Рис. 2. Розрахункова схема АВТ «тороїд-40»: 1 – матриця (BK6); 2 – опорна плита (BK15); 3 – підкладна плита (35XGSA); 4 – скріплюючі кільця (35XGSA)

контейнер 5, 8 – для уникнення взаємодії між джерелом нітриду галію і хімічно активним графітом. Трубчастий нагрівач 9 – електрорезистивний елемент для досягнення робочих значень температури у ростовому об'ємі. 12 – теплоізоляційне кільце, зі змінним внутрішнім

Задачу електро-, теплопровідності вирішували в стаціонарній, осесиметричній постановці. На рис. 2, 3 наведено розрахункові схеми АВТ і КВТ у вигляді 1/2 частин їх осевого перерізу.

Розрахунки проведено за таких граничних умов (рис. 2): значення потенціалу електричного поля $\varphi_{AB} = 3,65$ В, $\varphi_{II} = 0$ В, експериментально визначена температура $T_{AB} = T_{II} = 40$ °С. На поверхнях BC, DE, FG, HI задавали умови конвективного теплообміну апарата з повітрям, на поверхнях CD, GH – з водою [3].

Функціонально елементи спорядження КВТ (див. рис. 3) призначені для наступного. Теплоізоляційний диск 1 – зменшення теплового навантаження на твердосплавну матрицю АВТ. Струмopровідні диски 2, 4 – забезпечення електричного контакту між струмопровідними елементами. Торцевий нагрівач 3 – електрорезистивний елемент, що за рахунок зміни радіуса впливає на градієнт температури і топологію ізотерм у ростовому об'ємі. Ізоляційний

радіусом у відповідності до зміни радіуса електрорезистивного елемента 3. Контейнер 13 – теплоізоляція центральної зони комірки. Заусенець 14 – ущільнення зони високого тиску.

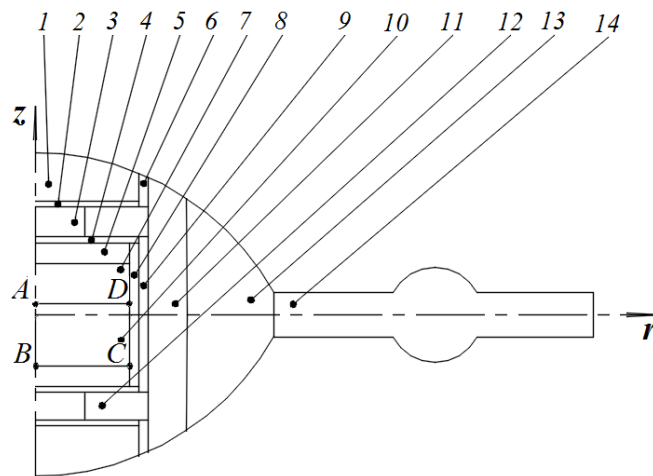


Рис. 3. КВТ для проведення експериментів з вирощування кристалів нітриду галію методом температурного градієнта: 1 – теплоізоляційний диск (хлорид цезію+графіт); 2, 4 – струмопровідні диски (терморозширений графіт); 3 – торцевий нагрівач (графіт); 5, 8 – елементи ізоляції (пірофіліт); 6 – струмопідвід (графіт); 7 – джерело нітриду галію; 9 – трубчастий нагрівач (графіт); 10 – ростовий об'єм (залізо+нітрид галію); 11 – зовнішній теплоізоляційний елемент (хлорид цезію+графіт); 12 – теплоізоляційне кільце (хлорид цезію+графіт); 13 – контейнер (літографський камінь); 14 – заусенець (пресований кальцит); A–D – характеристичні точки

Результати обчислень

При розрахунках змінювали радіус торцевого нагрівача 3 (див. рис. 3) від 4,0 до 6,0 мм. Покроковий приріст радіуса складає 0,2 мм з відповідним зменшенням внутрішнього радіуса теплоізоляційного кільця (розрахункова схема зміни розмірів елементів наведена на рис. 4).

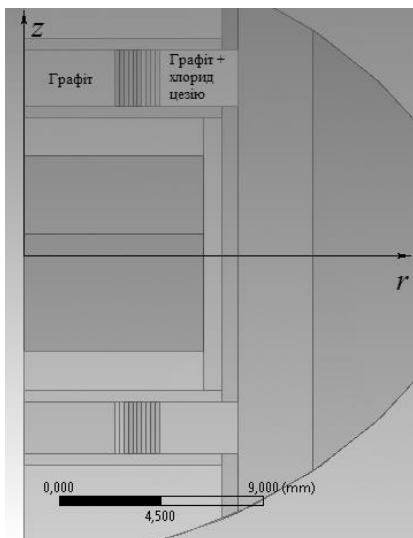


Рис. 4. Схема зміни розміру верхнього і нижнього торцевих нагрівачів і теплоізоляційних кілець

Температура 1600 °С в контрольній точці B (див. рис. 3) досягається за умови, коли радіус нижнього і верхнього торцевих нагрівачів однаковий і дорівнює 5,0 мм. При незмінній напрузі $U_{AB} = 3,65$ В отримано розрахункові значення температури в АВТ і ростовому об'ємі, скалярні і векторні показники градієнта температури в ростовому об'ємі, густини джерел джоулевого тепла в АВТ для одинадцяти значень радіуса торцевого нагрівача. На рис. 5–7 наведені результати для значень радіусу 4,0; 4,8; 5,0 і 6,0 мм. При значеннях радіусів нагрівачів в інтервалі 4,0–5,2 мм максимальна температура в АВТ (див. рис. 5, (a-в) знаходиться в струмопровідному диску 4 (див. рис. 3). При зростанні радіуса нагрівачів від 5,4 мм до 6,0 мм точка максимуму температури (див. рис. 5, г) зміщується до трубчастого нагрівача 9 (див. рис. 3).

В ростовому об'ємі точка максимуму температури переміщується наступним чином: при значеннях радіуса нагрівачів 4,0–4,8 мм вона знаходиться в зоні утворення нової фази (лінія *BC*, див. рис. 3), за радіусу нагрівачів від 5,0 до 6,0 мм – у верхній частині об'єму (див. рис. 6).

Мінімальне значення градієнтів температури в ростовому об'ємі досягається при радіусі нагрівачів в 5,0 мм (див. рис. 7, в). Оптимальними є значення радіуса нагрівачів у 5,0 мм, при яких досягаються мінімальні значення градієнтів температури в 0,01 °C/мм для переважної частини ростового об'єму, і максимум температури знаходиться у його верхній частині.

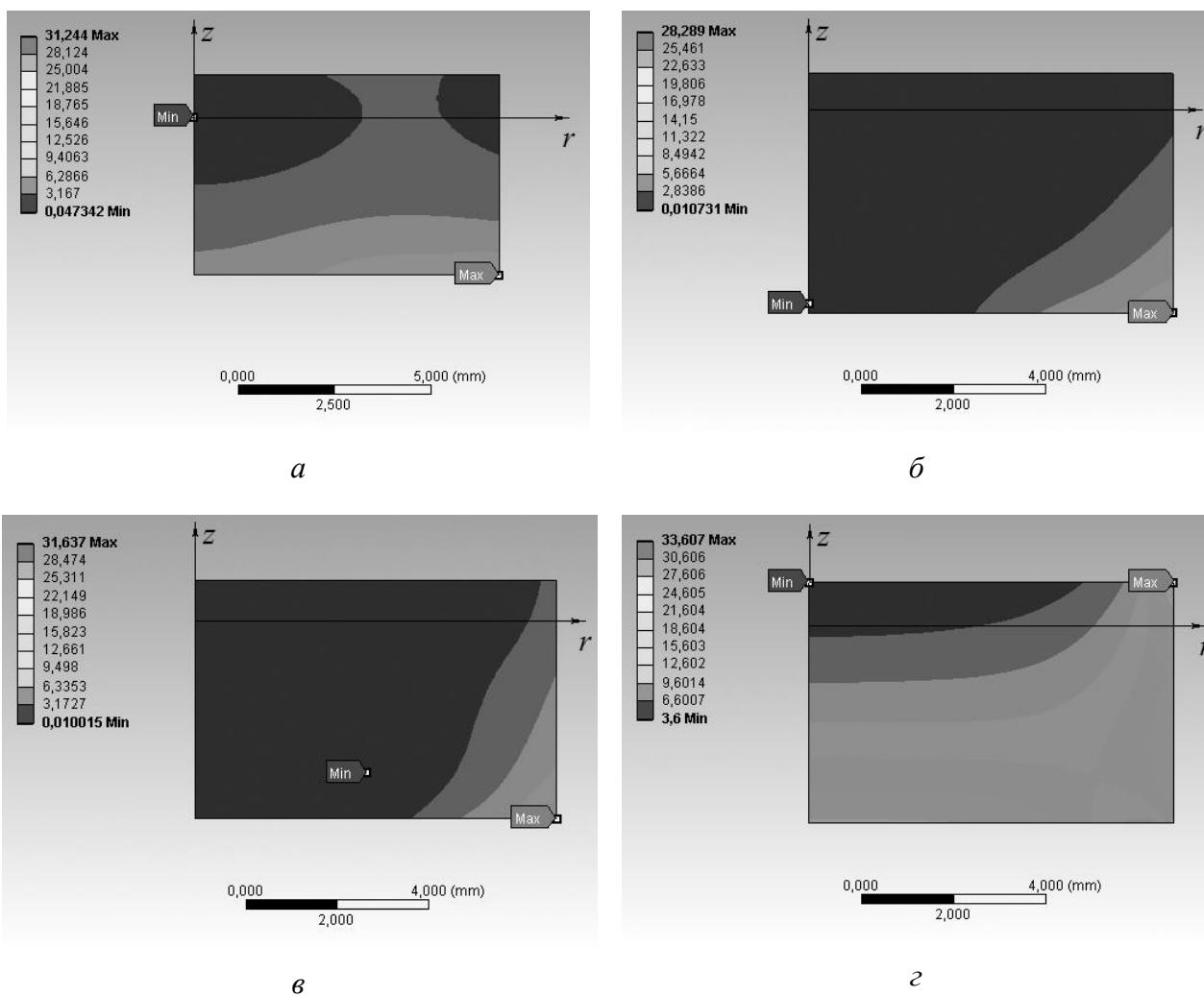


Рис. 7. Розрахункові значення градієнтів температури в ростовому об'ємі за значень радіуса торцевих нагрівачів в 4,0; 4,8; 5,0 і 6,0 мм (відповідно а, б, в, г)

На рис. 8 наведено векторне поле градієнта температури в ростовому об'ємі і поле густини джерел джоулевого тепла в комірці, отримані при значенні радіусів торцевих нагрівачів в 5,0 мм. Точка максимуму градієнта температури знаходиться у місці, де спостерігається мінімальне значення температури (див. рис. 8, а). Максимальне значення густини джерел джоулевого тепла (див. рис. 8, б) знаходиться в нижній частині трубчастого нагрівача (на лінії з'єднання із струмопровідним диском).

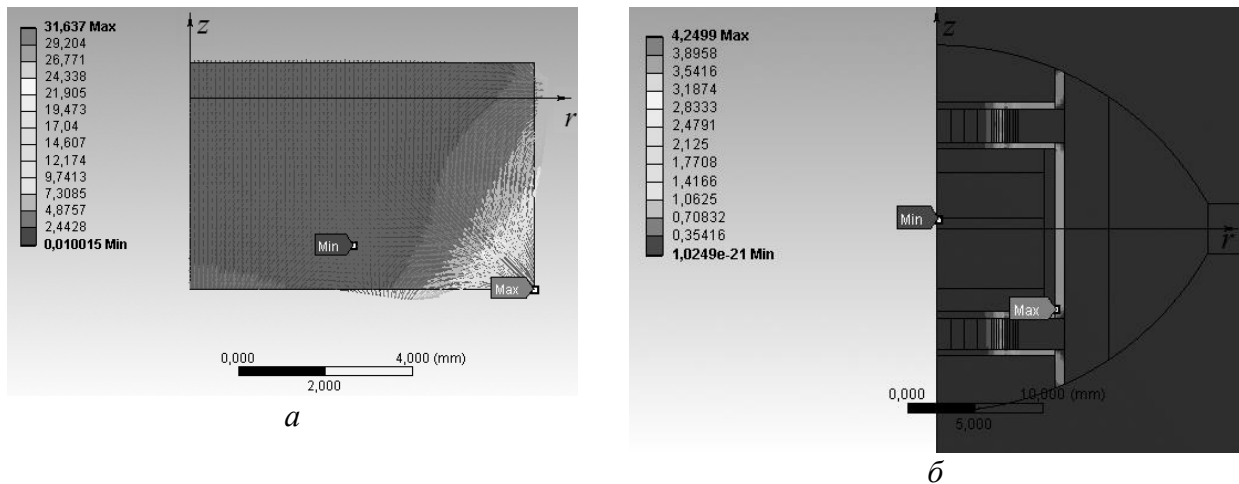


Рис. 8. Поля вектора градієнта температури в ростовому об'ємі і густини джерел джоулевого тепла в комірці за значення радіуса торцевих нагрівачів в 5,0 мм (відповідно а, б)

Висновки

1. Змодельовані поля температури, градієнта температури (скалярне і векторне) і густини джерел джоулевого тепла для модернізованої комірці АВТ «тороїд-40». Розрахунки здійснені з використанням розробленої методики скінченно-елементного моделювання електрорезистивного нагрівання АВТ, з урахуванням залежності провідних властивостей матеріалів від температури.

2. Розрахунки показали, що за умови використання торцевих нагрівачів з радіусом 5,0 мм можливо створити необхідні теплові умови в комірці для проведення експериментів з вирощування кристалів GaN, а саме: мінімізувати градієнт температури для більшої частини ростового об'єму до значень в 0,01 °C/мм і отримати максимум температури у верхній частині ростового об'єму.

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту «Монокристали нітриду галію GaN: отримання під високим тиском, структура, властивості» (реєстраційний номер 2020.02/0078).

О. Liudvichenko, О. Lyeshchuk, S. Hordieiev, I. Petrusha

V.M. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine

RESEARCH OF THE THERMAL STATE OF THE HIGH-PRESSURE APPARATUS CELL WITH COMBINED HEATERS WHEN GROWING THE GALLIUM NITRIDE CRYSTALS

Using the finite element method, the fields of temperature, temperature gradient, density of Joule heat sources in the high-pressure device «Toroid-40» were obtained. The use of these data made it possible to modernize the cell intended for conducting experimental research on the growth of gallium nitride crystals. The nature of the effect on the thermal state of the growth volume of the size of the end heaters, which are part of the resistive circuit of the high-pressure apparatus, is considered. As a result, the dimensions of the combined end heaters were determined, usage of which ensures that the maximum temperature is in the upper part of the growth volume and the temperature gradients are minimal. These conditions correspond to the values of the radii of the upper and lower end heaters of 5 mm.

Key words: gallium nitride, high-pressure apparatus (HPA), high-pressure cell (HPC), finite element method (FEM).

Література

1. Petrusha I. A., Sadovyi B. S., Sadovyi P. S., Osipov A. S., Rumiantseva Yu. Yu., Balabanov P. A., Klimczyk P., Sadova Yu. I., Savitskyi O. V., Hordieiev S. O., Sakal T. O. Investigation of GaN behavior in contact with Fe, Fe₂₋₄N and Co/Cr at high pressures and high temperatures. *Інструментальне матеріалознавство*. Зб. наук. пр. Вип. 24. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля, НАН України, 2021. С. 312–325.
2. Turkevych V. Z., Rumiantseva Yu. Yu., Sadova Yu. I., Kushch O. V., Hladkyi I. O., Turkevych D. V. Thermodynamic calculations of the Fe–Ga–N melting diagram in the context of gallium nitride crystallization under high temperatures and pressures. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, N 2. P. 73–78.
3. Liudvichenko O. P., Lyeshchuk O. O., Petrusha I. A. Effect of the concentration of components and the size of heaters on the thermal state of a high-pressure cell to study the solubility of gallium nitride in iron. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, N 2. P. 83–92.
4. Novikov N. V., Levitas V. I., Leshchuk A. A., Idesman A. V. Mathematical modeling of diamond synthesis process. *High Press. Res.* 1991. Vol. 7. P. 195–197.
5. Leshchuk A. A., Novikov N. V., Levitas V. I. Computer simulation of physical and mechanical processes running in the reaction cells of high-pressure installations in the course of synthesis of diamonds. *Strength Mater.* 2001. Vol. 33, N 3. P. 277–292.
6. Lyeshchuk O. Computational modeling of superhard materials synthesis. *Comp. Mater. Sci.* 2010. Vol. 49, N 1S. P. S85–S94.
7. Lyeshchuk O. O., Polotniak S. B., Novikov M. V. Thermomechanical approach to the modeling of HP–HT material processing. *J. Phys. Conf. Ser.* 2012. Vol. 377, art. 012095.
8. Dutka V. A., Maystrenko A. L., Borymskyi O. I., Kulich V. G., Kosenchuk T. O. Modeling the temperature field in a high-pressure apparatus during the sintering of large-sized products based on boron carbide. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, N. 4. P. 240–250.
9. Li R., Zheng G., Liu Y., Wang M., Chen P., Chen M., Zhang Q. Finite element design of a temperature field for high-pressure diamond synthesis. *Diamond Relat. Mater.* 2016. Vol. 69. P. 133–137.
10. Li Y., Wang C., Chen N., Chen L., Guo L., Jia X., Ma H. Significant improvement of multi-seed method of diamond synthesis by adjusting the lateral cooling water temperature. *Cryst. Eng. Comm.* 2017. Vol. 19. P. 6681–6685.
11. Li R., Ding M., Shi T. Finite element design for the HPHT synthesis of diamond. *J. Cryst. Growth.* 2018. Vol. 491. P. 111–115.
12. Панасюк Т. С., Лещук О. О., Лисаковський В. В., Івахненко С. О., Бовсунівський О. В., Ключок В. Ю. Застосування шестипуансонного апарата високого тиску для вирощування монокристалів алмазу інструментального призначення. *Технічна інженерія*. 2019. № 2. С. 36–43.
13. Людвіченко О. П., Анісін О. М., Лещук О. О., Петруша І. А. Моделювання теплового стану апарата високого тиску при дослідженні розчинності нітриду галію в залізі. *Інструментальне матеріалознавство*. Зб. наук. праць. Вип. 24. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля, НАН України, 2021. С. 325–334.
14. Людвіченко О. П., Анісін О. М., Лещук О. О., Щидловський В. І. Скінченноелементний аналіз електрорезистивного нагрівання апарата високого тиску для дослідження розчинності GaN у Fe. *Mech. Adv. Technol.* 2021. Vol. 5, N 3. P. 302–306.
15. Людвіченко О. П., Лещук О. О., Гордєєв С. О. Моделювання теплового стану комірки апарата високого тиску при вирощуванні кристалів нітриду галію. *Технічна інженерія*. 2023. № 1 (91). С. 57–66.
16. Chen W., Decker D. L. Pressure dependence of the thermal conductivity of pyrophyllite to 40 kbar. *J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 71, N. 6. P. 2624–2627.

Надійшла 12.09.23

References

1. Petrusha, I. A., Sadovyi, B. S., Sadovyi, P. S., Osipov, A. S., Rumiantseva, Yu. Yu., Balabanov, P. A., Klimczyk, P., Sadova, Yu. I., Savitskyi, O. V., Hordieiev, S. O., & Sakal,

- T. O. (2021). Investigation of GaN behavior in contact with Fe, Fe₂₋₄N and Co/Cr at high pressures and high temperatures. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling materials science*. (24th Issue, p. 312–325).
2. Turkevych, V. Z., Rumiantseva, Yu. Yu., Sadova, Yu. I., Kushch, O. V., Hladkyi, I. O., & Turkevych, D. V. (2022). Thermodynamic calculations of the Fe–Ga–N melting diagram in the context of gallium nitride crystallization under high temperatures and pressures. *J. Superhard Mater.* 44(2), 73–78.
 3. Liudvichenko, O. P., Lyeshchuk, O. O., & Petrusha, I.A. (2023). Effect of the concentration of components and the size of heaters on the thermal state of a high-pressure cell to study the solubility of gallium nitride in iron. *J. Superhard Mater.* 45(2), 83–92.
 4. Novikov, N. V., Levitas, V. I., Leshchuk, A. A., & Idesman, A. V. (1991). Mathematical modelling of diamond synthesis process. *High Pres. Res.* 7, 195–197.
 5. Leshchuk, A. A., Novikov, N. V., & Levitas V.I. (2001). Computer simulation of physical and mechanical processes running in the reaction cells of high-pressure installations in the course of synthesis of diamonds. *Strength Mater.* 33(3), 277–292.
 6. Lyeshchuk, O. (2010). Computational modeling of superhard materials synthesis. *Comp. Mater. Sci.* 49(1S), S85–S94.
 7. Lyeshchuk, O. O., Polotniak, S. B., & Novikov, M. V. (2012). Thermomechanical approach to the modeling of HP–HT material processing. *J. Phys. Conf. Ser.* 377, 012095.
 8. Dutka, V. A., Maystrenko, A. L., Borymskyi, O. I., Kulich, V. G., & Kosenchuk, T. O. (2020). Modeling the temperature field in a high-pressure apparatus during the sintering of large-sized products based on boron carbide. *J. Superhard Mater.* 42(4), 240–250.
 9. Li, R., Zheng, G., Liu, Y., Wang, M., Chen, P., Chen, M., & Zhang, Q. (2016). Finite element design of a temperature field for high-pressure diamond synthesis. *Diam. Relat. Mater.* 69, 133–137.
 10. Li, Y., Wang, C., Chen, N., Chen, L., Guo, L., Jia, X., & Ma, H. (2017). Significant improvement of multi-seed method of diamond synthesis by adjusting the lateral cooling water temperature. *Cryst. Eng. Comm.* 19, 6681–6685.
 11. Li, R., Ding, M., & Shi, T. (2018). Finite element design for the HPHT synthesis of diamond. *J. Cryst. Growth.* 491, 111–115.
 12. Panasiuk, T. S., Lyeshchuk, O. O., Lysakovskiy, V. V., Ivakhnenko, S. O., Bovsunivskiy, O. V., & Klochok, V. Yu. (2019). Zastosuvannya shestypuansonnoho aparata vysokoho tysku dlia vyroshchuvannya monokrystaliv almazu instrumentalnoho pryznachennia [The use of a six-punch high-pressure apparatus for growing diamond single crystals for instrumental purposes. *Tekhnichna inzheneriia – Technical engineering*, (2), 36–43 [in Ukrainian].
 13. Liudvichenko, O. P., Anisin, O. M., Lyeshchuk, O. O., & Petrusha, I.A. (2021). Modeliuvannya teplovoho stanu aparata vysokoho tysku pry doslidzhenni rozchynnosti nitrydu galiuu v zalizi [Modeling of the thermal state of the high-pressure apparatus during the study of the solubility of gallium nitride in iron]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling materials science*. (24th Issue, p. 325–334) [in Ukrainian].
 14. Liudvichenko, O. P., Anisin, O. M., Lyeshchuk, O. O., & Shchydlovskiy, V.I. (2021). Skinchennoelementnyi analiz elektrozystyvnoho nahrivannia aparata vysokoho tysku dlia doslidzhennia rozchynnosti GaN u Fe. [Finite element analysis of electroresistive heating of a high-pressure apparatus for studying the solubility of GaN in Fe]. *Mech. Adv. Technol.* 5(3), 302–306 [in Ukrainian].
 15. Liudvichenko, O. P., Lyeshchuk, O. O., & Hordieiev, S. O. (2023). Modeliuvannya teplovoho stanu komirky aparata vysokoho tysku pry vyroshchuvanni krystaliv nitrydu galiuu [Modeling the thermal state of the cell of the high-pressure apparatus during the growth of gallium nitride crystals]. *Tekhnichna inzheneriia – Technical engineering*, 1(91), 57–66 [in Ukrainian].
 16. Chen, W., & Decker, D. L. (1992). Pressure dependence of the thermal conductivity of pyrophyllite to 40 kbar. *J. Appl. Phys.* 71(6), 2624–2627.