

Одержання, структура, властивості

УДК 661.868.1:004.94:62-987

О. П. Людвіченко*, О. О. Лещук, І. А. Петруша

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*ludvial@ukr.net

Комп'ютерне моделювання впливу концентрації складових і розміру нагрівачів на тепловий стан комірки високого тиску для вивчення розчинності нітриду галію у залізі

Розглянуто існуючі технології отримання кристалів нітриду галію. Змодельовано, з використанням методу скінченних елементів, тепловий стан комірки апарата високого тиску, що застосовують для дослідження розчинності нітриду галію у залізі. Результати розрахунків представлені температурними полями в різних елементах апарата. Досліджено вплив варіювання товщини стінки трубчастого нагрівача і зміни концентрації діоксиду цирконію в осьових нагрівачах на тепловий стан комірки високого тиску. Показано, що у разі зміни товщини стінки трубчастого нагрівача температура в центрі комірки змінюється лінійно. Збільшення товщини нагрівача веде до незначного (~ 2 °C) збільшення максимального перепаду температури в досліджуваному зразку із армо-заліза. Перепад температури в характеристичних точках комірки в радіальному і осьовому напрямках зменшується зі збільшенням концентрації діоксиду цирконію в осьових нагрівачах. Оптимальний склад осьових нагрівачів для проведення експериментів з вивчення розчинності нітриду галію в залізі відповідає значенням концентрації ZrO_2 і графіту відповідно у 60 і 40 % (за масою).

Ключові слова: нітрид галію, висока температура, високий тиск, апарат високого тиску (АВТ), комірка високого тиску (КВТ), метод скінченних елементів.

ВСТУП

Багато сучасних напрямків розвитку мікроелектроніки засновані, зокрема, на використанні нітриду галію, завдяки його унікальним фізичним властивостям. Наприклад, за допомогою світлодіодів на його основі можна отримати перетворення електричної енергії в світлову з високим коефіцієнтом корисної дії (до 45 %) [1].

© О. П. ЛЮДВІЧЕНКО, О. О. ЛЕЩУК, І. А. ПЕТРУША, 2023

Нітрид галію – це широкозонний напівпровідник, що має зростаюче технологічне застосування. Сьогодні для росту кристалів GaN застосовують такі технології: синтез у натрієвому потоці, амонотермічну та гідридну парофазну епітаксію. У разі використання перших двох технологій кристали зростають з розчину, а в разі третьої – з парової фази. Зазначені методи мають як переваги, так і недоліки. До недоліків можна віднести низьку технологічність за високої вартості, низьку якість отриманих кристалів, що накладає обмеження на їхнє застосування.

Інший підхід для отримання нітриду галію – перекристалізація в багатокомпонентній розчин-розплавній системі Fe–Ga–N за високих тиску і температури, аналогічно тому, як це відбувається в комірці високого тиску (КВТ) у разі кристалізації алмазу з розчину вуглецю в розплаві металу. Дослідження отримання нітриду галію в такий спосіб в останні роки здійснюють в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України.

Для забезпечення умов кристалізації GaN із його розчину у розплаві заліза в апараті високого тиску (АВТ) потрібно було попередньо вивчити поведінку системи Fe–Ga–N за тиску 6–8 ГПа і температур 1500–2000 °С. Аналіз експлуатаційних характеристик АВТ типу “тороїд”, за умов модернізації його комірки, підтвердив доцільність його використання для вивчення розчинності нітриду галію в залізі. Відомо, що за тиску ~ 8 ГПа температура плавлення заліза складає ~ 1800 °С [2]. Отже, основною задачею даної роботи було визначення умов нагрівання КВТ апарата типу “тороїд-30”, за яких можливо реалізувати плавлення зразка заліза у контакті з нітридом галію і, відповідно, подальше розчинення останнього.

Нагрівання АВТ проводять прямим пропусканням електричного струму, а заданого температурного режиму в комірці досягають балансом потужності джерел джоулевого тепла і тепловідводом в системі охолодження апарата [3]. Аналітичне розв’язання задачі електронагрівання багатокомпонентної конструкції АВТ неможливе, а експериментальне визначення параметрів резистивної системи надзвичайно трудомістке і довготривале. У цьому випадку для визначення оптимальних форм, складів та розмірів нагрівачів і елементів теплоізоляції КВТ доречно застосовувати чисельні методи, а саме метод скінченних елементів, який дозволяє детально аналізувати процес резистивного нагрівання комірки з метою створення в ній необхідних умов для дослідження розчинності нітриду галію у залізі.

Застосування методу скінченних елементів забезпечує можливість вирішення практично будь-якої крайової задачі. Можна описати будь-яку область, оскільки об’єкти, що мають складну геометричну форму, дискретизуються на трикутні і прямокутні елементи (у двовимірній постановці) або тетраедри і гексаедри (у тривимірній постановці). За необхідності підвищення точності обчислень у деяких областях можна збільшити густину скінченно-елементної сітки.

Серед досліджень, присвячених розрахунку полів електричного потенціалу і температури в АВТ різних типів, відмітимо, наприклад, [4–11]. Особливо виділимо [12], де розраховано теплові режими в АВТ типу “белт” з метою оцінки градієнтів температури в ростовому об’ємі для реалізації конвективного масопереносу в процесі вирощування кристалів нітриду галію.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянуто стаціонарну модель процесу нагрівання КВТ, оскільки проміжні результати у часі не є актуальними для дослідження розчинності нітриду

галію у залізі. Отже, тепловий стан комірки у випадку її електрорезистивного нагрівання моделюється розв'язанням зв'язаної задачі електро- і теплопровідності, яка для стаціонарного випадку в припущенні про відсутність електричних зарядів описується наступною системою нелінійних рівнянь:

$$\operatorname{div}[\gamma(T)\operatorname{grad}\varphi] = 0, \quad (1)$$

$$\operatorname{div}[\lambda(T)\operatorname{grad}T] + \gamma(T)|\operatorname{grad}\varphi|^2 = 0, \quad (2)$$

де γ – коефіцієнт електропровідності; T – температура; φ – потенціал електричного поля; λ – коефіцієнт теплопровідності; $\gamma(T)|\operatorname{grad}\varphi|^2$ – питома потужність джерел джоулевого тепла. Рівняння (1) і (2) доповнюються граничними умовами

$$\varphi = \varphi_{S_\varphi}; \quad (3)$$

$$T = T_{S_T}; \quad (4)$$

$$\mathbf{n} \cdot \lambda(T)\operatorname{grad}T = -\alpha_{S_\alpha}(T - \theta), \quad (5)$$

де S_φ, S_T, S_α – відповідно граничні поверхні, на яких задаються значення електрорезистивності, температури та умови конвекційного теплообміну; α_{S_α} – коефіцієнт тепловіддачі; θ – температура зовнішнього середовища.

Проведений аналіз літературних даних з електро- і теплофізичних властивостей матеріалів [13–26], що використовують в АВТ, засвідчив їхню суттєву температурну залежність, що необхідно враховувати у разі моделювання теплового стану комірки для дослідження розчинності нітриду галію в залізі.

Електро- і теплофізичні властивості композиційних матеріалів елементів КВТ (графіт + оксид цирконія, хлорид цезія + оксид цирконія) визначали за теорією стохастичних неоднорідних матеріалів [27]. Згідно з цією моделлю коефіцієнт теплопровідності N -композиційної суміші визначається наступним чином:

$$\lambda^* = \left[\sum_{i=1}^N x_i^V (\lambda_i + 2\langle\lambda\rangle)^{-1} \right]^{-1} - 2\langle\lambda\rangle,$$

де x_i^V – об'ємна концентрація i -ї фази; λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -ї фази; $\langle\lambda\rangle = \sum_{i=1}^N x_i^V \lambda_i$. Ефективне значення питомого електроопору композита підраховується як обернене значенню його питомої електропровідності $\rho^* = 1/\gamma^*$, де

$$\gamma^* = \left[\sum_{i=1}^N x_i^V (\gamma_i + 2\langle\gamma\rangle)^{-1} \right]^{-1} - 2\langle\gamma\rangle.$$

Систему зв'язаних нелінійних рівнянь (1)–(5) вирішували методом скінченних елементів за покрокової корекції властивостей матеріалів і досягненні заданого критерію збіжності ($T_i - T_{i-1} < 1$ °С, де i – номер ітераційного наближення). В якості програмного забезпечення використовували власну розробку [6] авторів та пакет ANSYS, що забезпечувало достовірність розрахунків.

Розрахункову схему АВТ показано на рис. 1, КВТ і її характеристичні точки – на рис. 2, сітку елементів і граничні умови – на рис. 3. Відзначимо, що на поверхнях BC, DE, FG, HI задавали умови конвективного теплообміну

апарата з повітрям, на поверхнях CD , GH – з водою (див. рівняння (5)). Відповідні значення коефіцієнтів тепловіддачі і температури оточуючого середовища, а також умова теплоізоляції між поверхнями скріплюючих кілець були попередньо обґрунтовані в роботах О. А. Будяка [28, 29]. Температура на торцевих поверхнях підкладних плит була заміряна експериментально. Отже, з огляду на осьову симетрію, розглядали 1/2 частину апарата, і зв'язану задачу електрорезистивного нагрівання під час визначення теплового стану КВТ вирішували в осесиметричній постановці.

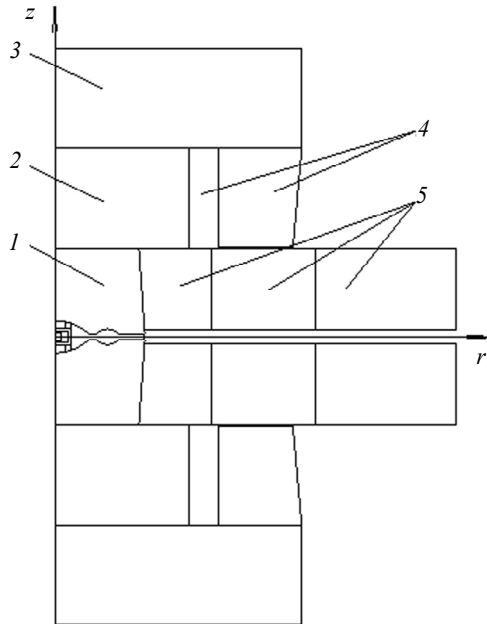


Рис. 1. Розрахункова схема АВТ типу “тороїд-30”: 1 – матриця (ВК6); 2 – опорна плита (ВК15); 3 – підкладна плита (35ХГСА); 4, 5 – скріплюючі кільця (35ХГСА).

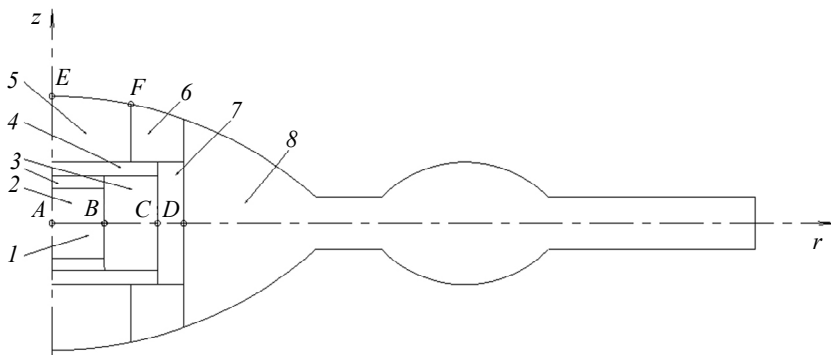


Рис. 2. Комірка для проведення експериментів з визначення розчинності нітриду галію у розплаві армо-заліза: 1 – зразок армо-заліза; 2 – зразок GaN; 3 – теплоізоляційна капсула ($\text{CzCl} + 10\%$ (за масою) ZrO_2); 4 – торцевий нагрівач (графіт МГ-1); 5 – осьовий композиційний нагрівач (графіт ГСМ-1 + ZrO_2); 6 – теплоізоляційне кільце (пірофіліт); 7 – трубчастий нагрівач (графіт МГ-1); 8 – контейнер (літографський камінь); $A-F$ – характеристичні точки.

Функціональне призначення елементів спорядження КВТ (див. рис. 2) полягає в наступному. Торцевий і трубчастий нагрівачі 4, 7 з графіту МГ-1 є

головними резистивними елементами. Теплоізоляційна капсула 3 із суміші CzCl і ZrO_2 захищає зразок від хімічно активного графіту. Осьовий нагрівач 5 є допоміжним композиційним (суміш графіту ГСМ з ZrO_2) резистивним елементом, який дозволяє суттєво впливати на топологію температурного поля у комірниці, корегувати радіальний градієнт температури в досліджуваному зразку $\text{Fe} + \text{GaN}$ шляхом зміни співвідношення вмісту компонентів нагрівача та його геометричних розмірів, тобто – його електричного опору. Для виготовлення композиційних нагрівачів використовують методи порошкової металургії, що забезпечує можливість змінювати їхні резистивні властивості шляхом зміни складу дисперсно-композиційного матеріалу [30]. Теплоізоляційне кільце 6 з пірофіліту ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) зменшує тепловий потік з центральної зони комірки і теплове навантаження на силові елементи АВТ. Контейнер 8 із літографського каменю виконує роль теплоізолятора і деформуючого ущільнювача центральної зони комірки.

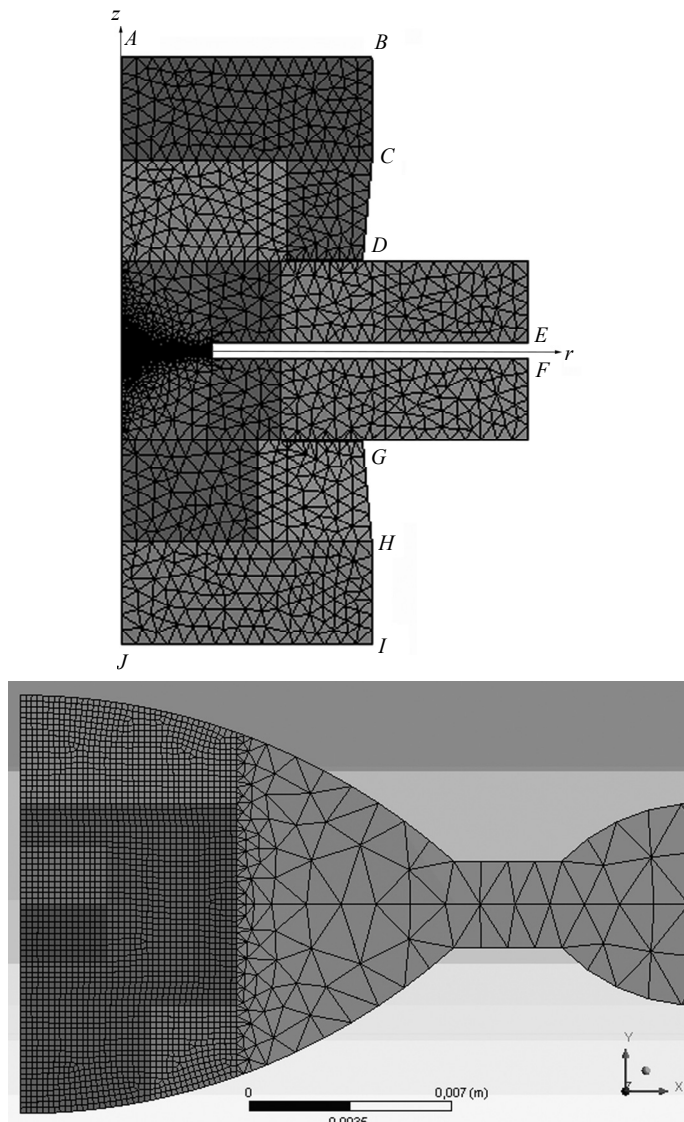


Рис. 3. Скінченно-елементна сітка для АВТ (а) і КВТ (б) та граничні умови для задачі електро- і теплопровідності: $\varphi_{AB} = 3,21$ В, $\varphi_{IJ} = 0$ В, $T_{AB} = T_{IJ} = 40$ °С, $\alpha_{BC} = \alpha_{DE} = \alpha_{FG} = \alpha_{HI} = 50$ Вт/(м²·°С), $\alpha_{CD} = \alpha_{GH} = 7600$ Вт/(м²·°С), $\theta = 20$ °С.

РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЕНЬ

Результати розрахунків стаціонарних температурних полів в різних зонах АВТ представлено на рис. 4. Їх отримано за наступних умов: перепад напруги на підкладних плитах становив 3,21 В, концентрація ZrO_2 в осьовому нагрівачі 5 % (див. рис. 2) становила 40 % (за масою), товщина стінки трубчастого нагрівача 7 – 1,5 мм.

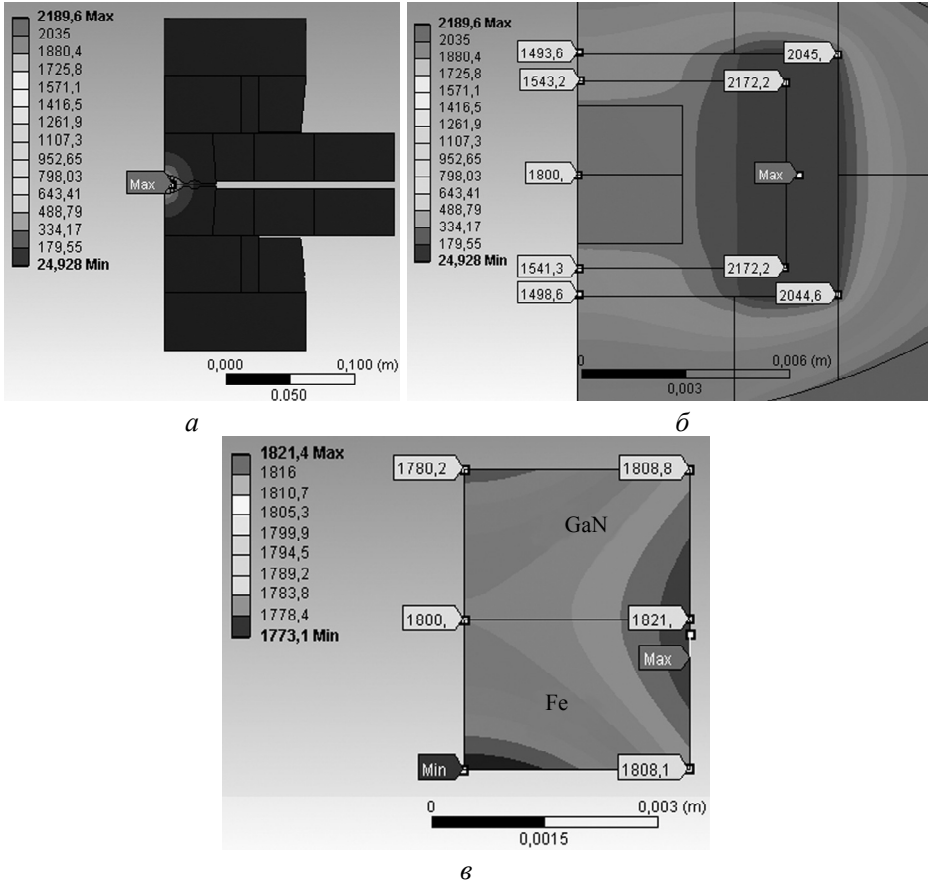


Рис. 4. Поля температури в АВТ (а), КВТ (б) і досліджуваному зразку GaN + Fe (в).

Для визначення впливу геометричних параметрів елементів КВТ на її тепловий стан проведено розрахунки температурного поля за різних значень товщини стінки трубчастого нагрівача. Початкове значення товщини стінки становило 1,5 мм, за якого температура в центрі КВТ дорівнювала 1800 °С (див. рис. 4, в) за напруги на підкладних плитах апарата 3,21 В. За фіксованого (3,21 В) значення напруги змінювали товщину стінки трубчастого нагрівача від 1,0 до 2,1 мм з інтервалом в 0,1 мм. Отримали, що температура в центрі комірки змінюється лінійно від 1580 до 2059 °С під час зміни товщини нагрівача (рис. 5). Збільшення товщини стінки нагрівача веде до незначного (на 2 °С) збільшення максимального перепаду температури в досліджуваному зразку (рис. 6). Варто відзначити, що у разі збільшення товщини стінки нагрівача від 1,6 до 1,7 мм відбувається зміщення точки максимуму температури в АВТ (рис. 7, в).

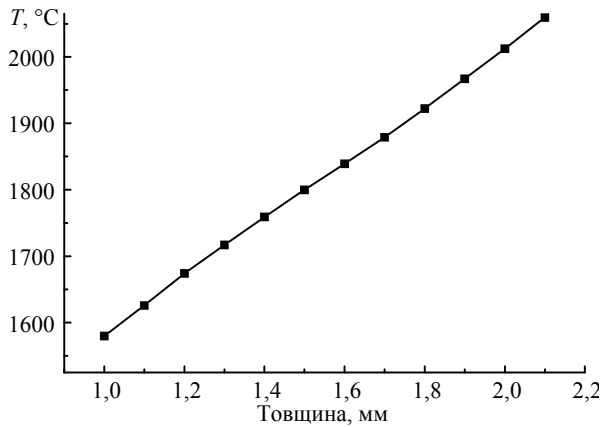


Рис. 5. Залежність температури в центрі КВТ від товщини стінки трубчастого нагрівача.

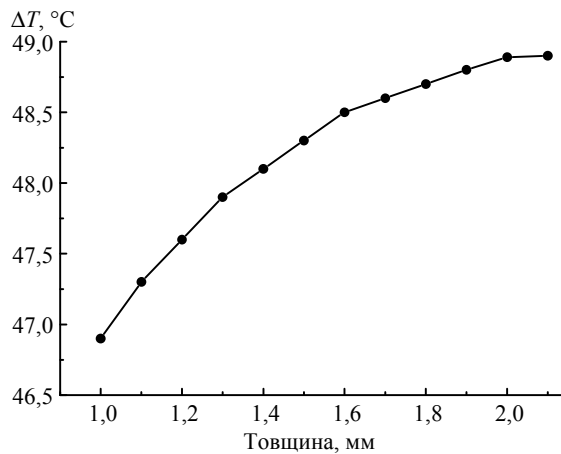


Рис. 6. Залежність максимального перепаду температури в досліджуваному зразку (GaN + Fe) від товщини стінки трубчастого нагрівача.

Вплив властивостей матеріалів елементів КВТ на її тепловий стан проаналізовано шляхом варіювання вмісту діоксиду цирконію у верхньому і нижньому осьових нагрівачах. Розподіл температури в зразку із армко-заліза при фіксованому падінні напруги в АВТ в 3,21 В представлено на рис. 8, 9. Отримано, що перепади температури в радіальному і осьовому напрямках, як і максимальний перепад, зменшуються зі збільшенням концентрації ZrO_2 (рис. 10), і за значення останньої $\sim 85\%$ (за масою) досліджуваний зразок знаходиться в порівняно однорідному температурному полі ($\Delta T_{\max} = 5\text{ }^\circ\text{C}$). Але водночас температура в об'ємі зразка армко-заліза значно нижча за температуру його плавлення ($\sim 1800\text{ }^\circ\text{C}$), тому оптимальним для проведення експериментів з вивчення розчинності нітриду галію в залізі є варіант розподілу температури, що представлений на рис. 8, б, який відповідає 60%-ній концентрації ZrO_2 у осьових нагрівачах. За такої умови температура в зразку змінюється в інтервалі 1805–1842 $^\circ\text{C}$.

Отримані дані зі складу і розмірів елементів комірки, її конфігурації, параметрів нагрівання реалізовані в подальших експериментах з вивчення розчинності нітриду галію у залізі в умовах високих тисків і температур в АВТ типу “тороїд-30” [2]. Позитивні результати таких досліджень опосередковано підтверджують достовірність методики аналізу теплового стану комірки і розрахованих в ній температурних полів.

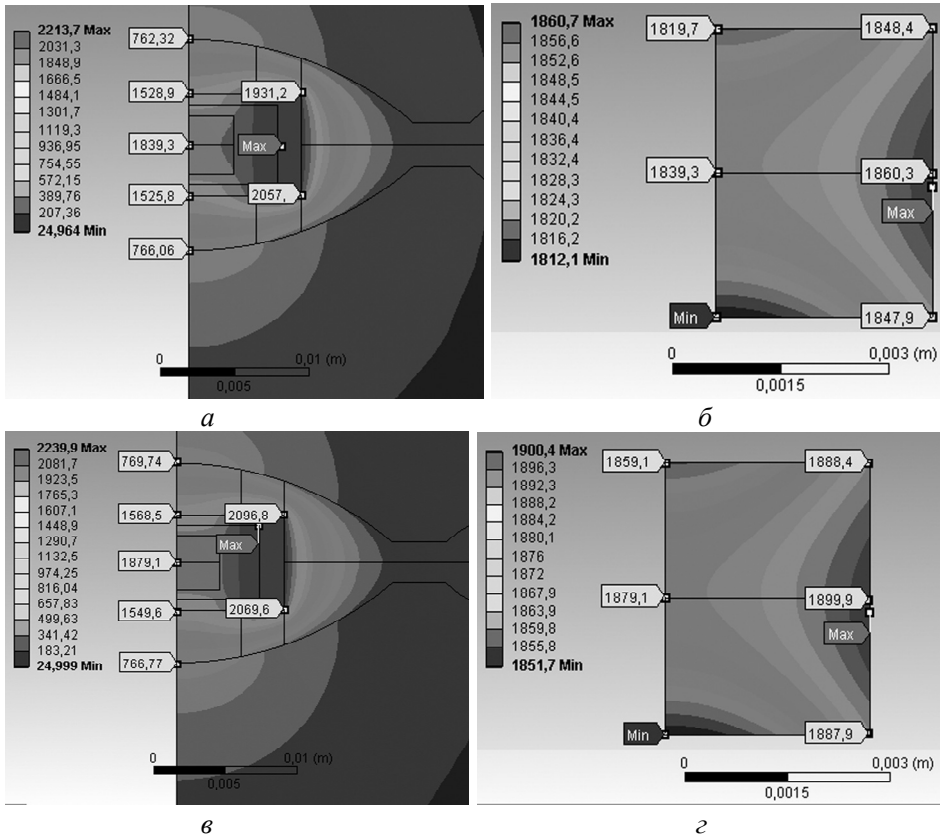


Рис. 7. Температурне поле в КВТ і в досліджуваному зразку (GaN + Fe) за товщини стінки трубчастого нагрівача в 1,6 (а, б) і 1,7 мм (в, г).

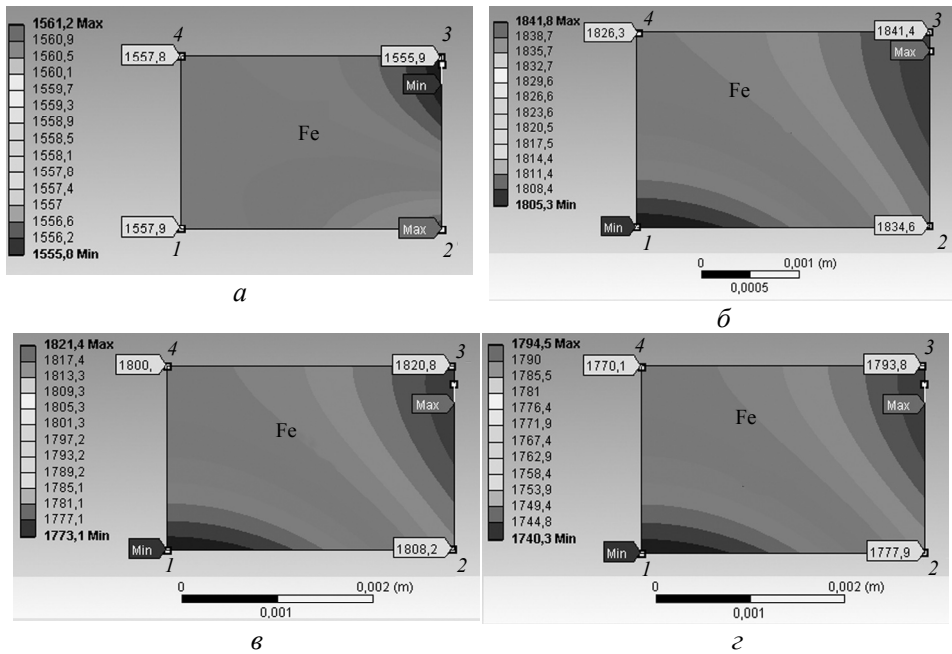


Рис. 8. Розподіл температури і характерні точки 1–4 в зразку армо-заліза за концентрації ZrO_2 в осьових нагрівачах 85 (а), 60 (б), 40 (в), 20 (г) % (за масою).

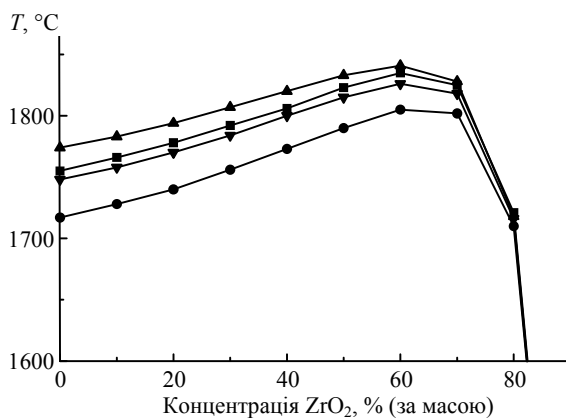


Рис. 9. Зміна температури в характеристичних точках 1 (●), 2 (■), 3 (▲), 4 (▼) зразка армко-заліза в залежності від концентрації ZrO₂ в осьових нагрівачах.

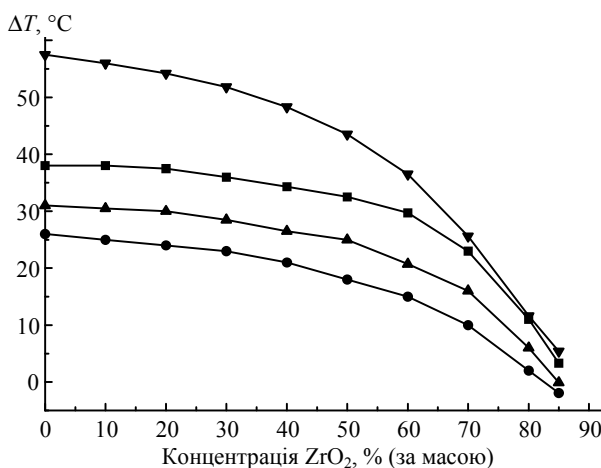


Рис. 10. Зміна перепаду температури в зразку армко-заліза в залежності від концентрації ZrO₂ в осьових нагрівачах: ▼ – максимальний перепад; ▲ – в осьовому напрямку між характеристичними точками 4 і 1 (див. рис. 8); ●, ■ – в радіальному напрямку відповідно між точками 3 і 4 та 2 і 1.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику моделювання резистивного нагрівання АВТ, що дає можливість аналізувати тепловий стан комірки для вивчення розчинності нітриду галію у залізі з урахуванням температурних залежностей провідних властивостей елементів АВТ і ефективних значень властивостей композиційних матеріалів. Програмне забезпечення дозволяє проводити сумісний розрахунок полів електропотенціалу, густини джерел джоулевого тепла і температури для геометрично складної конструкції АВТ.

В результаті чисельного моделювання проаналізовано вплив концентрації діоксиду цирконію в осьових нагрівачах КВТ на розподіл температури в зразку армко-заліза. Отримано, що оптимальним для проведення експериментів з вивчення розчинності нітриду галію в залізі є варіант нагрівання комірки (за інших рівних умов), що відповідає 60 %-ній концентрації ZrO₂ у осьових нагрівачах, за якого температура в зразку змінюється в інтервалі 1805–1842 °С. Разом з тим, збільшення товщини стінки трубчастого нагрівача веде до незначного (~ 2 °С) збільшення максимального перепаду температури в зразку GaN + Fe за одночасної лінійної зміни температури в центрі зразка від 1580 до 2059 °С, що

забезпечує можливість його дослідження в широкому температурному інтервалі без зміни ступеня однорідності його теплового стану.

Отримано конфігурації КВТ і визначено параметри її електрорезистивного нагрівання, що реалізовані для експериментальних досліджень розчинності GaN в контакт з Fe в умовах високих тисків і температур.

ФІНАНСУВАННЯ

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).

O. P. Liudvichenko, O. O. Lyeshchuk, I. A. Petrusha
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Influence of the concentration of components and the size
of heaters on the thermal state of a high-pressure cell
for studying the solubility of gallium nitride in iron

Existing technologies for obtaining gallium nitride crystals are considered. Using the finite element method, the thermal state of the cell of the high-pressure apparatus used to study the solubility of gallium nitride in iron has been modeled. The results of calculations are represented by temperature fields in various elements of the device. The effect of varying the wall thickness of the tubular heater and changes in the concentration of zirconium dioxide in the axial heaters on the thermal state of the high-pressure cell was studied. It was found that when the wall thickness of the tubular heater changes, the temperature in the centre of the cell changes linearly. An increase in the thickness of the heater leads to a slight (by 2 °C) increase in the maximum temperature difference in the tested sample of iron. The temperature difference at the characteristic points of the cell in the radial and axial directions decreases with an increase in the concentration of zirconium dioxide in the axial heaters. The optimal composition of axial heaters for carrying out experiments on the solubility of gallium nitride in iron corresponds to the concentration of ZrO₂ and graphite in 60 and 40 wt. %, respectively.

Keywords: gallium nitride, high temperature, high pressure, high-pressure apparatus, high-pressure cell, finite element method.

1. Туркин А.Н. Полупроводниковые светодиоды: история, факты, перспективы. *Полупроводниковая светотехника*. 2011. Т. 1, № 5. С. 28–33.
2. 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*. 2021. Вип. 24. С. 312–325.
3. 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*. 2021. Вип. 24. С. 325–334.
4. Novikov N.V., Levitas V.I., Leshchuk A.A., Idesman A.V. Mathematical modeling of diamond synthesis process. *High Pres. 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, no. 3. P. 277–292.
6. Lyeshchuk O. Computational modeling of superhard materials synthesis. *Comp. Mater. Sci.* 2010. Vol. 49, no. 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. Дутка В.А., Майстренко А.Л., Боримський О.І., Кулич В.Г., Косенчук Т.О. Моделювання температурного поля в апараті високого тиску при спіканні крупногабаритних виробів на основі карбиду бору. *Надтверді матеріали*. 2020. № 4. С. 49–61.

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. *Diam. 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. Лещук А.А. Расчет распределений температуры в реакционной ячейке АВД при кристаллизации нитрида галлия. *Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов*. Киев: Ин-т сверхтв. материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2000. С. 158–171.
13. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Москва: НПО “Информ ТЭИ”, 1992.
14. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. Москва: Металлургия, 1975.
15. Охотин А.С. Теплопроводность твердых тел: Справ. Москва: Энергоатомиздат, 1984.
16. Соседов В.П. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справ. Москва: Металлургия, 1975.
17. Савіцький О.В., Лисаківський В.В., Бовсунівський О.В. Властивості графіту за високими тисками та високими температурами. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб. науч. тр.* Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2019. Вып. 22. С. 299–303.
18. Туманов В.И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама–кобальт: Справ. Москва: Металлургия, 1971.
19. Shibata H., Waseda Y., Ohta H., Kiyomi K., Shimoyama K., Fujito K., Nagaoka H., Kagamitani Y., Simura R., Fukuda T. High thermal conductivity of gallium nitride (GaN) crystals grown by HVPE process. *Mater. Trans.* 2007. Vol. 48, no. 10. P. 2782–2786.
20. Исследование теплофизических свойств материалов реакционного сосуда и их влияния на работоспособность кристаллов алмаза и свойств примесей в них: Отчет о НИР. Т. 1. Исследование теплофизических свойств материалов реакционного сосуда. Киев: Ин-т сверхтв. материалов АН УССР, 1978.
21. Гутман М.Б. Материалы для электротермических установок: Справ. пособие. Москва: Энергоатомиздат, 1987.
22. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства окислов: Справ. Москва: Металлургия, 1978.
23. He C., Hu C., Zhang T., Qi Y., Chen X. Lattice dynamics and thermal conductivity of cesium chloride via first-principles investigation. *Solid State Commun.* 2017. Vol. 254. P. 31–36.
24. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справ. Москва: Металлургия, 1989.
25. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы): Справ. книга. Ленинград: Энергия, 1973.
26. Самсонов Г.В. Нитриды. Киев: Наук. думка, 1969.
27. Хорошун Л.П., Маслов Б.П. Методы автоматизированного расчета физико-механических постоянных композиционных материалов. Киев: Наук. думка, 1980.
28. Будяк А.А. О приближенном расчете поля температур в АВД. *Сверхтв. материалы*. 1982. № 2. С. 13–17.
29. Будяк А.А. О влиянии теплообмена между аппаратом высокого давления и окружающей средой на температурное поле в реакционном объеме. *Влияние высокого давления на структуру и свойства материалов: Сб. науч. тр.* Киев: Ин-т сверхтв. материалов АН УССР, 1983. С. 21–26.
30. Савіцький О.В., Лисаківський В.В., Серга М.А. Питома електропровідність композиційних нагрівачів на основі графіту для НРНТ вирощування алмазу. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.* Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2017. Вып. 20. С. 348–351.

Надійшла до редакції 08.09.22

Після доопрацювання 07.10.22

Прийнята до опублікування 10.10.22