

Гурін І.В.¹, к.техн.н., Невлюдов І.Ш.², д.техн.н., професор,
Овчаренко В.Є.², д.техн.н., професор, Токарева О.В.², к.техн.н., професор

ЗАСТОСУВАННЯ ВВКМ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАГРІВАЧІВ ТЕПЛОВИХ ВУЗЛІВ З АВТОМАТИЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ

¹ Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків
² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Ключові слова: тепловий вузол, нагрівач, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, система автоматичного регулювання, температура.

На сьогоднішній день вуглець-вуглецевий композиційний матеріал (ВВКМ) знаходить широке застосування завдяки високій температурі сублімації, стійкості до термічних і механічних навантажень, хімічній і радіаційній стійкості, низькій щільності, достатньому електричному опорі для виготовлення резистивних нагрівачів. До переваг виробів з ВВКМ слід віднести їх низьку питому вагу (1,35–1,85 г/см³), високі механічні властивості в широкому діапазоні температур (-100°C – +2200°C), високу стійкість до термічних ударів, здатність зберігати свою форму та геометричні розміри під час термоциклювання [1, 2].

В ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» розроблено технологію та спеціальне технологічне обладнання для промислового виробництва виробів з композиційних матеріалів на основі вуглецю. Електричні властивості цих композиційних матеріалів, а саме їх питомий опір, дозволяють створювати нагрівальні елементи для високотемпературних вакуумних печей або печей з інертною атмосферою, які працюють при температурах до 2200 °C [3–7].

Метою представленої роботи є обґрунтування доцільності використання високотемпературних нагрівачів з ВВКМ для теплових вузлів камер ростової установки вирощування великогабаритних монокристалів кремнію та вдосконалення системи автоматичного регулювання температури нагрівача.

В даний час одержання особливо чистих напівпровідникових монокристалів кремнію проводиться у високотемпературних електровакуумних печах опору модифікованим методом із застосуванням погрузного обертаючого формоутворювача із розплаву. В якості нагрівача використовують вуглеграфітові матеріали з робочою температурою до 2000–2500 °C. Геометричні розміри вирощених монокристалів визначаються геометричними розмірами формоутворюючого пристрою та теплового вузла. Залежно від області використання застосовуються кристали з діаметром до 300 мм і більше. Режими теплових процесів, що протікають при вирощуванні кристалів, визначаються технологічним процесом залежно від складу вихідної сировини та вимагають високої рівномірності нагріву робочої зони, високої точності та стабільності підтримки температурного режиму нагрівача [8].

Аналіз конструкції установки «Редмет-30», обраної як базова, показав, що в ній використовується нагрівач збірної типу. Нагрівач складається з графітових пластин, які за допомогою спеціальних графітових перемичок з різьбовими отворами та графіто-

вих болтів збираються в циліндричну, точніше – багатогранну, конструкцію необхідних розмірів по діаметру та висоті. Пластини, перемички та болти виготовляються з особливо чистих графітів. Основним недоліком нагрівачів такого типу є наявність перехідних електричних контактів у місцях з'єднань пластин. Зазначені сполуки практично немінуче мають різні контактні опори та неконтрольовані енерговиділення, і температуру у процесі резистивного нагрівання. До того ж, у процесі роботи, навіть ідеально підібрані у вихідному стані контактні з'єднання послаблюються внаслідок різниці коефіцієнтів термічного розширення болтів, їх корозії, корозії пластин і перехідників тощо, що спричиняє нестабільність загального електричного опору нагрівача та температурних полів у робочому просторі печей у процесі вирощування монокристалів. При значному розбалансуванні контактних опорів у місцях ослаблення контактів виникають електричні дуги, що супроводжується виходом з експлуатації нагрівачів. Зрештою, все це відбивається на якості кристалів. Для усунення цих недоліків потрібно підвищити рівномірність нагріву в зоні вирощування циліндричного зливка кристала, що можна вирішити за рахунок застосування циліндричного суцільного нагрівача. Така форма раціонально використовує робочий простір та забезпечує рівномірний розподіл температури та стійкість до деформації при термоциклюванні [9].

Одним із основних контрольованих параметрів є значення температури. Теплові вузли, що розробляються в даний час, оснащуються системами автоматичного регулювання температури. Підтримка температури на заданому рівні виконується за допомогою регулятора потужності. Залежно від вимог технологічного процесу обробки матеріалу завантаження, застосовуються різні регулятори температури, у тому числі регулятор температури з обмеженням струму нагрівача (струмова відсічка); регулятор температури з перемиканням ступенів напруги трансформатора; регулятор температури з адаптивним струмовим відсіканням, та інші методи. Застосування сучасної силової електроніки, датчиків, мікропроцесорів, удосконалення системи автоматичного керування ростової установки та розробка нових алгоритмів керування дозволять покращити енергетичну ефективність ростової установки та підвищити її термін служби.

В представленій роботі об'єктом дослідження є високотемпературний нагрівач з ВВКМ для теплового вузла камери ростової установки вирощування великогабаритних монокристалів кремнію, який може забезпечувати потужності для нагрівання від сотень кіловат до двох-трьох тисяч кіловат. Такі значення потужності зумовлюють додаткові вимоги щодо елементної бази системи управління та регулювання температури нагрівача.

У ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» була виготовлена нова конструкція теплового вузла камери ростової установки вирощування великогабаритних монокристалів кремнію (рис. 1), із застосуванням ВВКМ для виготовлення теплонавантажених елементів.

Елементи 1, 2, 4, 6, 7, 9 виготовлені з ВВКМ. Одним з найбільш важливих елементів теплового вузла є резистивний нагрівач 1, виконаний у вигляді циліндричної конструкції, виготовленої з вуглець-вуглець конструкційного матеріалу. Нагрівач має внутрішній діаметр 310 мм, висоту робочої зони 250 мм. З урахуванням характеристик трансформатора, що використовується в установках «Редмет-30», електричний опір нагрівача при кімнатній температурі має бути в межах $0,03 \pm 0,005$ Ом. Така конструкція виключає головний недолік графітових нагрівачів - неконтрольоване енерговиділення в процесі резистивного нагрівання за рахунок наявності перехідного електричного опору в місцях з'єднань пластин, і забезпечується більш рівномірне температурне поле за об'

смом камери. Можливості за максимально допустимою температурою такого нагрівача з ВВКМ більш ніж удвічі перевищують робочу, що також позитивно впливає на термін експлуатації. Зовнішній вигляд нагрівача з ВВКМ представлений на рис. 2.

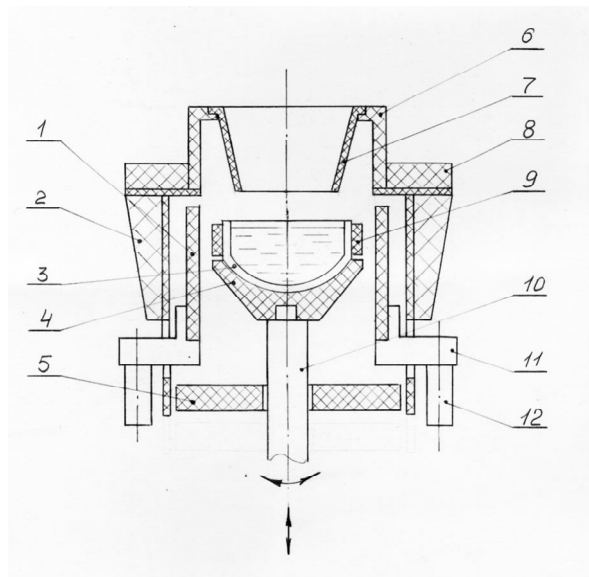


Рисунок 1 – Схема теплового вузла:

1 – нагрівач; 2 – бічний теплоізоляційний екран; 3 – кварцовий тигель з кремнієм; 4 – підставка тигля; 5 – нижній теплоізолюючий екран; 6 – перехідник; 7 – криниця; 8 – верхній теплоізолюючий екран; 9 – обічайка; 10 – графітовий токопідвод



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд нагрівача з ВВКМ

Технологічний процес вирощування монокристалів кремнію вимагає швидкодії та точного регулювання зміни електричного струму при зміні температури нагрівача. Для вимірювання температури всередині теплової камери зазвичай застосовують резистивні або термоелектричні датчики, встановлені в об'єкті в певному місці. Недоліком такого методу є наявність у зоні вимірювання датчика, у якого робочий діапазон має бути гарантовано вище вимірюваної температури об'єкта. Крім того, датчик неминуче має певну теплову інерційність, а розміщення такого датчика створює певні технологічні труднощі, ускладнює конструкцію та знижує надійність усієї системи [10]. При проведенні випробувань протягом 50 годин високотемпературних вольфрамрениєвих термопар, спостерігалася їх нестабільність при температурах 2000 °С та 2200 °С. В ос-

новному спостерігається негативний дрейф струму термоЕРС внаслідок шунтування сигналу по керамічним ізоляторам термопар, опір ізоляції яких і визначає верхню межу робочих температур самого датчика. Проведені випробування датчиків на граничних температурах до 2500 °С показали, що короточасне використання вольфрамєнієвої термопари при температурі вище 2200 °С можливе лише без ізоляторів, якщо це дозволяють умови монтажу датчика. Доступні в даний час керамічні ізолятори значно шунтують сигнал термопари і занижують її показання від 50 °С до 150 °С в діапазоні 1300–2500 °С.

Для точного регулювання теплового режиму, запропоновано додатково вимірювати інтегральну температуру в камері непрямим методом, який заснований на вимірюванні сили електричного струму, що протікає через нагрівач, який знаходиться в умовах термодинамічної рівноваги з об'єктом. Таким чином, нагрівач розглядається як деяка система, схильна до різних теплових впливів, які визначають процес теплоперенесення і характер зміни температури всередині камери та в зоні розташування тігля теплового вузла.

Для забезпечення швидкодії та точності регулювання температури була запропонована автоматична система регулювання температури з датчиком зворотного зв'язку по струму, що протікає при нагріванні в цьому ж нагрівачі, для якого відома залежність електричного опору від температури. Аналогічна система регулювання температури була застосована для теплової камери в електротермічному двигуні з нагрівальним елементом ВВКМ для космічної техніки [11]. На рис.3 наведені зразки нагрівачів потужністю до 240 Вт з робочою напругою постійного струму 24В та температурою експлуатації до 1200 °С.



Рисунок 3 – Зразки нагрівачів з ВВКМ

У роботі [11] наведено методику розрахунку таких нагрівачів та розроблено імітаційну модель системи автоматичного регулювання температури, що дозволяє обґрунтовано вибирати параметри елементів системи управління. Враховуючи порівняно невеликі потужності та наявність джерела постійного струму, плавне регулювання під навантаженням забезпечувалося за допомогою мікропроцесорів та сучасної інтегрованої електроніки для нормування та перетворення сигналів .

Одним із різновидів адаптивних систем автоматичного регулювання є екстремальна система крокового типу [12, 13], структурна схема якої представлена на рис. 4 .

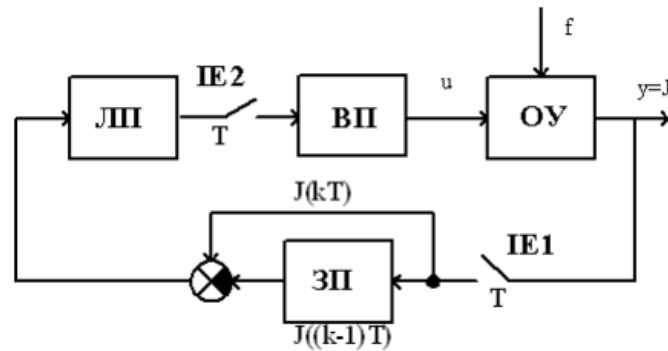


Рисунок 4 – Структурна схема екстремальної системи крокового типу:
 ЛП – логічний пристрій; ВП – виконавчий пристрій; ОУ – об’єкт управління;
 ЗП – запам’ятовуючий пристрій; ІЕ1, ІЕ2 – елементи регулювання

У системі через певні проміжки часу T , що задаються елементом ІЕ1, вимірюється значення критерію $J(kT)$, яке запам’ятовується в ЗП на якусь годину T . На виході порівнюючого пристрою з’являється різниця:

$$\Delta J(kT) = J(kT) - J((k-1)T),$$

що характеризує вплив зміни сигналу управління на вихідний екстремальний параметр $y = J$.

Залежно від знаку одержаної різниці логічний пристрій, що періодично підключається до виконавчого пристрою за допомогою імпульсного елемента ІЕ2, формує крок руху до екстремуму:

$$X_{ЛП} = \text{sign}(\Delta J).$$

Для практичної реалізації системи крокового типу, в силу того, що заздалегідь не визначено порядок і значення постійних часу, була застосована система імпульсно-фазового керування випрямлячами на сучасному спеціалізованому термоконтролері з ПД-регулюванням, оскільки ані П-регулятор, ані ІІ-регулятор не дозволять скомпенсувати (скоригувати) при відповідному налаштуванні постійні часу одночасно. Використання ПД-закону керування дозволяє підтримувати коливання температури більш точно з високою чутливістю до відхилення оптимуму їх налаштувань [14, 15]. Визначення коефіцієнтів передавальних функцій ПД-регулятора температури для вакуумної камери простіше отримати дослідним шляхом і в подальшому отримати логарифмічні амплітудно-частотні характеристики, перевірити систему на стійкість, здійснити налаштування синтезованого регулятора і розробити інженерну методику синтезу регулятора і замкнутої системи автоматичного регулювання з керуючим впливом на нагрівач з ВВКМ виходячи з контролю часових характеристик та меж стійкості.

В останні роки суттєво розширилися функціональні можливості систем управління, зокрема сучасні системи мають елементи самонавчання, стають складніші та потребують точної взаємодії між силовими напівпровідниками, контролером системи, механікою та датчиками зворотного зв’язку. Це означає що упорядкованість та організованість системи у процесі функціонування зростають. У початкові моменти система може складатися з елементів, які пов’язані між собою довільним чином. У процесі фун-

кціонування на основі аналізу взаємодії з оточуючим середовищем у системі виникають стійкі зв'язки між елементами, утворюється потрібна структура. Це відноситься також до підсистем підтримки прийняття рішень, експертних систем, коли бази даних та значень постійно поповнюються і система самонавчається без участі людини. Не менш важливим з точки зору енергоефективності є застосування силової електроніки з використання інверторного управління, яке здатне заощадити до 30% електроенергії у ланцюгу живлення нагрівачів.

Результати заводських випробувань високотемпературних нагрівачів з ВВКМ в установці «Редмет-30» на двох підприємствах України протягом двох місяців довели, що заміна графітових елементів теплового вузла на вуглець-вуглецеві в установках «Редмет-30» дозволяє заощаджувати близько 30% електроенергії, що витрачається на вирощування монокристалів кремнію.

Таким чином, основні результати роботи можна сформулювати так:

- було виготовлено тепловий вузол камери ростової установки вирощування великогабаритних монокристалів кремнію «Редмет-30» з застосуванням високотемпературного нагрівача з ВВКМ та проведено експериментальні дослідження в заводських умовах;
- запропоновано удосконалена структурну схему екстремальної системи крокового типу для автоматичного регулювання температури високотемпературного нагрівача.

Література

1. Study on corrosion properties of carbon-carbon composites / Yu.A. Gribanov, I.V. Gurin, V.V. Gujda, A.N. Bukolov, V.V. Kolosenko // Problems of atomic science and technology. – 2020, № 1 (125), p. 154–160.
2. Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review) / V.N. Voyevodin, Yu.O. Gribanov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Gujda // Problems of atomic science and technology. – 2015, № 2 (96), p. 52–64.
3. Consideration of the inertial characteristics of thermoresistive temperature transmitters in their design / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XIX International scientific and practical conference «Innovative approaches to solving scientific problems», May 16-19, 2023, Tokyo, Japan. International Science Group. 2023. P. 411–413.
4. Study of the influence of atmospheric water vapor on the corrosion resistance of CCCM at high temperatures / V. Ovcharenko, O. Tokarieva, I. Gurin // XIII International scientific and practical conference «Information activity as a component of science development», April 04-07, 2023, Edmonton, Canada. International Science Group. 2023. P. 459–460.
5. Дослідження стабільності електричного опору високотемпературного резистивного нагрівача під час роботи з газоподібним аміаком / Овчаренко В.С., Токарева О.В., Гурін І.В. // XII International scientific and practical conference «Actual issues of the development of science and ensuring the quality of education», March 28 – 31, 2023, Florence, Italy. International Science Group. 2023. P. 407–408.
6. Study of the possibility of creating a high-temperature resistance thermoconverter from a carbon-carbon composite material / O. Tokarieva, I. Gurin, V. Ovcharenko // IX International scientific and practical conference «Study of world opinion regarding the development of science», November 22–25, 2022, Prague, Czech Republic. 2022. P. 606–608.

7. Малогабаритний нагрівач з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу / Гурін І.В., Овчаренко В.С., Токарева О.В. // XXII International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic research, innovation and results», June 07–10, 2022, Prague, Czech Republic, 2022. P. 726–728.

8. Богомаз А.В. Тепловой узел ростовой камеры установки выращивания крупногабаритных кристаллов германия методом погруженного вращающегося формообразователя // А.В. Богомаз, Т.В. Критская, А.В. Карпенко // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА. – 2010. – Вип. 22. С. 139–146.

9. Тепловое деформирование углерод-углеродных композиционных материалов с различными схемами армирования при термоциклировании / Л.И. Грачева // Проблемы прочности. – 2007. – № 3. – С. 118–133.

10. Теплометрия: теорія, метрологія, практика. Монографія у трьох книгах. / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.І. Воробйов [та ін.]; за ред. д-р техн. наук Т.Г. Грищенко. Кн. 1: Методи та засоби вимірювання теплового потоку – К.: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2017. – 438 с.

11. Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), p.133–137.

12. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: Підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 190 с.

13. М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. Теорія автоматичного керування: Підручник. – Київ: «Лібідь», 2007, 656 с.

14. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, Systems and Automation Society), 2006. – 461 p.

15. М.М. Казачковський Керовані випрямлячі: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999 – 229 с.

Bibliography (transliterated)

1. Study on corrosion properties of carbon-carbon composites / Yu.A. Gribanov, I.V. Gurin, V.V. Gujda, A.N. Bukolov, V.V. Kolosenko // Problems of atomic science and technology. – 2020, № 1 (125), p. 154–160.

2. Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review) / V.N. Voyevodin, Yu.O. Gribanov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Gujda // Problems of atomic science and technology. – 2015, № 2 (96), p. 52–64.

3. Consideration of the inertial characteristics of thermoresistive temperature transmitters in their design / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XIX International scientific and practical conference «Innovative approaches to solving scientific problems», May 16-19, 2023, Tokyo, Japan. International Science Group. 2023. P. 411–413.

4. Study of the influence of atmospheric water vapor on the corrosion resistance of CCCM at high temperatures / V. Ovcharenko, O. Tokarieva, I. Gurin // XIII International scientific and practical conference «Information activity as a component of science development», April 04-07, 2023, Edmonton, Canada. International Science Group. 2023. P. 459–460.

5. Doslidzhennya stabilnosti elektrychnoho oporu vysokotemperaturnoho rezystyvnoho nahriyacha pid chas robiti z hazopodibnym amiyakom / Ovcharenko V.Ye, Tokarieva O.V., Hurin I.V. // XII International scientific and practical conference «Actual is-

sues of the development of science and ensuring the quality of education», March 28 – 31, 2023, Florence, Italy. International Science Group. 2023. P. 407–408.

6. Study of the possibility of creating a high-temperature resistance thermoconverter from a carbon-carbon composite material / O. Tokarieva, I. Gurin, V. Ovcharenko // IX International scientific and practical conference «Study of world opinion regarding the development of science», November 22–25, 2022, Prague, Czech Republic. 2022. P. 606–608.

7. Malohabarytnyy nahriyach z vuhlets-vuhletsevoho kompozytsiynoho materialu / Hurin I.V., Ovcharenko V.Ye., Tokarieva O.V. // XXII International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic research, innovation and results», June 07–10, 2022, Prague, Czech Republic, 2022. P. 726–728.

8. Bogomaz A.V. Teplovoi uzel rostovoi kamery ustanovki vyrashchivaniya krupnogabaritnykh kristallov germaniya metodom pogruzhdennoho vrashchayushchegosya formoobrazovatelya // A.V. Bogomaz, T.V. Kritskaya, A.V. Karpenko // Metalurgiya: nauchnye tratsi ZDIA. – Zaporozhzhya: ZDIA. – 2010. – Vyp. 22. P. 139–146.

9. Teplovoye deformirovaniye uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov s razlichnymi skhemami armirovaniya pri termotsiklirovanii / L.I. Gracheva // Problemy prochnosti. – 2007. – № 3. – P. 118–133.

10. Teplometriya: teoriya, metrologiya, praktyka. Monohrafiya u tryokh knyhad. T.H. Hryshchenko, L.V. Dekusha, L.I. Vorobyov [ta in.]; za red. dr. tekhn. nauk T.H. Hryshchenko. Kn. 1: Metody ta zasoby vymiriuvannya teplovoho potoku – K.: Instytut tekhnichnoyi teplofizyky NAN Ukrainy, 2017. – 438 p.

11. Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), p. 133–137.

12. Nevlyudov, I.Sh. Avtomatychnye upravlinnya tekhnolohichnymy obyektamy: Pidruchnyk / I.Sh. Nevlyudov, O.V. Tokarieva. – Kharkiv: KhNURE, 2018. – 190 p.

13. M.G. Popovych, O.V. Kovalchuk. Teoriya avtomatychnoho keruvannya: Pidruchnyk. – Kyiv: "Libid," 2007, 656 p.

14. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, Systems and Automation Society), 2006. – 461 p.

15. М.М. Kazachkovskiy Kerovani vypriamlyachi: Navchalnyi posibnyk. – Dnipropetrovsk: NHA Ukrainy, 1999. – 229 p.

УДК 621.365.4

Гурін І.В. к.техн.н., Невлюдов І.Ш. д.техн.н., професор,
Овчаренко В.Є. д.техн.н., професор, Токарева О.В. к.техн.н., професор

ЗАСТОСУВАННЯ ВВКМ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАГРІВАЧІВ ТЕПЛОВИХ ВУЗЛІВ З АВТОМАТИЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ

В статті обґрунтовано використання високотемпературних нагрівачів з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу (ВВКМ) для теплового вузла камери ростової установки вирощування великогабаритних монокристалів кремнію. Проведений аналіз підтверджує, що електричні властивості композиційних матеріалів, а саме їх питомий опір, дозволяють створювати нагрівальні елементи для високотемпературних вакуум-

них печей або печей з інертною атмосферою, які працюють при температурах до 2200 °С.

Застосування нагрівачів з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу виключає головний недолік графітових нагрівачів - неконтрольоване енерговиділення в процесі резистивного нагрівання за рахунок наявності перехідного електричного опору в місцях з'єднань графітових пластин, і забезпечує більш рівномірне температурне поле за об'ємом камери. Можливості за максимально допустимою температурою такого нагрівача з ВВКМ більш ніж удвічі перевищують робочу, що також позитивно впливає на термін експлуатації.

Режими теплових процесів, що протікають при вирощуванні кристалів модифікованим методом із застосуванням погрузного обертаючого формоутворювача із розплаву, визначаються технологічним процесом залежно від складу вихідної сировини та вимагають високої рівномірності нагріву робочої зони теплової камери, високої точності та стабільності підтримки температурного режиму нагрівача. Для точного регулювання теплового режиму, запропоновано додатково вимірювати інтегральну температуру в камері непрямим методом, який заснований на вимірюванні сили електричного струму, що протікає через нагрівач, який знаходиться в умовах термодинамічної рівноваги з об'єктом. Таким чином, нагрівач розглядається як деяка система, схильна до різних теплових впливів, які визначають процес теплоперенесення і характер зміни температури всередині камери та в зоні розташування тігля теплового вузла.

Запропоновано удосконалену структурну схему екстремальної системи крокового типу для автоматичного регулювання температури високотемпературного нагрівача із застосуванням сучасної силової електроніки, датчиків, мікропроцесорів. Для забезпечення швидкодії та точності регулювання температури був застосований метод імпульсно-фазового керування випрямлячами реалізований на сучасному спеціалізованому термоконтролері з ПІД-регулюванням.

Проведені експериментальні випробування на установці «Редмет-30» в заводських умовах підтверджують енергоефективність застосування високотемпературних нагрівачів з ВВКМ.

Ключові слова: тепловий вузол, нагрівач, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, система автоматичного регулювання, температура.

Гурин І.В. к.техн.н., Невлюдов І.Ш. д.техн.н., професор,
Овчаренко В.Е. д.техн.н., професор, Токарева Е.В. к.техн.н., професор

ПРИМЕНЕНИЕ УУКМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ УЗЛОВ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРОЙ

В статье обосновано использование высокотемпературных нагревателей из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) для теплового узла камеры ростовой установки выращивания крупногабаритных монокристаллов кремния. Проведенный анализ подтверждает, что электрические свойства композиционных материалов, а именно их удельное сопротивление, позволяют создавать нагревательные элементы для высокотемпературных вакуумных печей или печей с инертной атмосферой, которые работают при температурах до 2200 °С.

Использование нагревателей из углерод-углеродного композиционного материала исключает основной недостаток графитовых нагревателей – неконтролируемое выделение энергии в процессе резистивного нагрева из-за наличия переходного электрического сопротивления в местах соединения графитовых пластин, и обеспечивает более равномерное температурное поле по объему камеры. Возможности при максимально допустимой температуре такого нагревателя из УУКМ более чем вдвое превышают рабочую температуру, что также положительно сказывается на сроке службы.

Режимы тепловых процессов, которые происходят при выращивании кристаллов модифицированным методом с использованием погружного вращающегося формообразователя из расплава, определяются технологическим процессом в зависимости от состава исходного сырья и требуют высокой равномерности нагрева рабочей зоны тепловой камеры, высокой точности и стабильности поддержания температурного режима нагревателя. Для точной регулировки теплового режима предлагается дополнительно измерять интегральную температуру в камере косвенным методом, который основан на измерении силы электрического тока, протекающего через нагреватель, находящийся в условиях термодинамического равновесия с объектом. Таким образом, нагреватель рассматривается как система, подверженная различным тепловым воздействиям, которые определяют процесс теплообмена и характер изменения температуры внутри камеры и в зоне размещения элементов теплового узла.

Предложена усовершенствованная структурная схема экстремальной системы шагового типа для автоматического регулирования температуры высокотемпературного нагревателя с использованием современной силовой электроники, датчиков и микропроцессоров. Для обеспечения быстродействия и точности регулирования температуры был применен метод импульсно-фазового управления выпрямителями, реализованный на современном специализированном термоконтроллере с ПИД-регулированием.

Проведенные экспериментальные испытания на установке «Редмет-30» в заводских условиях подтверждают энергоэффективность применения высокотемпературных нагревателей из УУКМ.

Ключевые слова: тепловой узел, нагреватель, углерод-углеродный композиционный материал, система автоматического регулирования, температура.

Hurin I., Nevlyudov I, Ovcharenko V., Tokarieva O.

APPLICATION OF CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF HIGH-TEMPERATURE HEATERS OF HEAT EXCHANGERS WITH AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL

The article justifies the use of high-temperature heaters made of carbon-carbon composite material (CCCM) for the thermal unit of a silicon single crystal growth chamber. The conducted analysis confirms that the electrical properties of composite materials, specifically their specific resistance, allow for the creation of heating elements for high-temperature vacuum furnaces or furnaces operating in inert atmospheres at temperatures up to 2200°C.

The use of heaters made from carbon-carbon composite material eliminates the main drawback of graphite heaters - uncontrolled energy dissipation during resistive heating due to the presence of transient electrical resistance at the junctions of graphite plates, and ensures a

more uniform temperature field throughout the chamber volume. The capabilities in terms of the maximum permissible temperature of such a CCCM heater exceed the working temperature by more than two times, which also positively affects the service life.

The modes of thermal processes occurring during crystal growth are determined by the technological process depending on the composition of the raw material and require high uniformity of heating in the working zone, high precision, and stability of the heater's temperature control. For precise temperature regulation, it is proposed to additionally measure the integral temperature in the chamber indirectly, which is based on measuring the electrical current passing through the heater, which is in thermodynamic equilibrium with the object. Thus, the heater is considered as a system susceptible to various thermal influences that determine the heat transfer process and the temperature change within the chamber and in the zone of the thermal unit's bricks.

An improved structural diagram of a step-type extremal control system is proposed for automatic temperature control of a high-temperature heater using modern power electronics, sensors, microprocessors. To ensure speed and accuracy in temperature control, the pulse-phase control method implemented with modern specialized thermoregulator with PID-regulation was applied.

Experimental tests conducted on the «Redmet-30» installation under factory conditions confirm the energy efficiency of using high-temperature heaters made of CCCM.

Keywords: thermal unit, heater, carbon-carbon composite material, automatic control system, temperature.