

Розроблено схему та проведено експериментальні дослідження теплоелектричних параметрів дослідної печі Кастнера. Проаналізовано експериментальні дані з розподілу температури в електродних заготовках під час їх графітування. Виявлено ефект газифікації вуглецевого матеріалу, що впливає на швидкість зростання температури у заготовках

Ключові слова: графітування, електродна продукція, газифікація, піч прямого нагріву, електроконтактна прокладка, струмомівід

Разработана схема и проведены экспериментальные исследования теплоэлектрических параметров печи Кастнера. Проанализированы экспериментальные данные по распределению температуры в электродных заготовках при их графитировании. Обнаружен эффект газификации углеродистого материала, который влияет на скорость роста температуры в заготовках

Ключевые слова: графитирование, электродная продукция, газификация, печь прямого нагрева, электроконтактная прокладка, токоподвод

УДК 621.365.32

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.56642

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЗАГОТОВКАХ ПІД ЧАС ЇХ ГРАФІТУВАННЯ У ПЕЧІ КАСТНЕРА

С. В. Лелека

Кандидат технічних наук, науковий співробітник*

E-mail: sleleka@rst.kpi.ua

Т. В. Лазарєв

Кандидат технічних наук, науковий співробітник**

E-mail: t_lazarev@rst.kpi.ua

А. Ю. Педченко

Аспірант**

E-mail: anatolek@rst.kpi.ua

Д. Г. Швачко

Асистент*

E-mail: max_shmag@ukr.net

*Науково-дослідний центр

«Ресурсозберігаючі технології»***

**Кафедра хімічного, полімерного
та силікатного машинобудування***

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Штучний графіт в промислових масштабах отримують в результаті нагрівання вуглецевого матеріалу до температур понад 2500 °С [1]. В країнах східної Європи для даних цілей головним чином використовують прямі та П-подібні електричні печі непрямого нагріву за технологією Ачесона. З появою доступного живильного обладнання, розрахованого на велику силу струму, стало доцільним використання більш енергетично ефективних електричних печей прямого нагріву (ЕППН) за технологією Кастнера [2].

Основною причиною вдосконалення технології графітування в ЕППН та їх конструкцій являється постійне підвищення вимог до якості електродів, необхідності впровадження у виробництво нових видів продукції та збільшення вартості енергоносіїв. Вирішення такої задачі можливе тільки за умови проведення ґрунтовного експериментального дослідження поточного теплоелектричного стану робочого простору ЕППН, яке характеризується надзвичайно високим рівнем температур та агресивністю середовища. Як відомо, дослідження таких високотемпературних процесів є досить складними [3].

Існує ряд технологічних складнощів промислової реалізації технології графітування в печах Кастнера, таких як:

– забезпечення якісного контакту електрод-електрод, та електрод- струмомівід та на ділянках спуски – струмомівід;

– розробка раціональних регламентів нагрівання з врахуванням характеристик живильного обладнання.

Вирішення вказаних задач найбільш доцільно проводити за допомогою числового моделювання. Порівняно з виконанням складного фізичного експерименту цей підхід дає змогу зберегти матеріальні, фінансові та часові ресурси.

Достовірність результатів числового моделювання визначається повнотою відтворення в моделі властивостей фізичного об'єкта дослідження, що можна встановити за допомогою її верифікації за даними фізичного експерименту. Тому актуальним являється проведення натурних експериментів з визначення теплоелектричного стану ЕППН.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для виробництва графітованих електродів найчастіше використовують електричні печі опору, що працюють за технологіями Кастнера й Ачесона [4]. Для графітування електродів великих діаметрів використовують виключно ЕППН за методом Кастнера, а для електро-

дів, виготовлених з коксу низької якості (з високим вмістом сірки та азоту), більш вигідно використовувати печі, які працюють за методом Ачесона [2, 5].

Технологія Кастнера порівняно з технологією Ачесона дає можливість [6–8]:

- зменшити питомі витрати електроенергії (ПВЕ) в 1,5–2 рази;
- збільшити однорідність температурного поля по заготовкам та, відповідно, збільшити темпи їх нагріву і забезпечити однорідність властивостей матеріалу;
- нагрівати електродні заготовки практично будь-якої довжини.

Зазначені переваги печей Кастнера та досягнутий рівень технологічного обладнання сприяють масштабному впровадженню ЕППН в країнах східної Європи на промисловому рівні.

Аналіз літературних даних з експериментальних досліджень ЕППН [1, 9] показав, що розподіл температурного поля в електродних заготовках залежать від:

- електричних параметрів живильного обладнання та втрат електроенергії в шинопроводі;
- масових та геометричних характеристик робочої середовища ЕППН;
- фізичних особливостей електродних заготовок та, в меншій мірі, теплоізоляції;
- охолодження струмопідводів тощо.

Якість готової продукції залежить від темпу нагрівання, рівномірності та рівня досягнутої температури. Однак впровадження кампанії графітування відбуваються такі фізико-хімічні процеси, як випаровування вологи, газифікація вуглецевого матеріалу водяною паром, спучування коксу тощо, що мають суттєвий вплив на теплоелектричний стан печі. Тому врахування зазначених факторів є важливим для одержання продукції високої якості [10–12]. А отже, вдосконалення технології прямого графітування Кастнера потребує самостійного дослідження.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є отримання експериментальних даних із теплоелектричного стану ЕППН, потрібних для налаштування та верифікації відповідної числової моделі.

Для досягнення вказаної мети необхідно поставити та розв'язати такі задачі:

- розробити схему та методику проведення експериментальних досліджень ЕППН та виконати їх;
- дослідити можливий вплив процесу газифікації вуглецевого матеріалу водяною паром на розподіл температури та темп нагріву в електродних заготовках;
- визначити вплив форми електроконтактної прокладки на розподіл температури в електродних заготовках;
- отримати необхідні вихідні дані для розробки та верифікації числової моделі теплоелектричного стану ЕППН, що включають: матеріали і геометричні характеристики печі та її завантаження; витратні характеристики системи охолодження печі; регламент вводу електричної потужності в піч та часова змінна температури у дослідних точках печі під час кампанії графітування; ефективний коефіцієнт тепловіддачі в системі охолодження струмопідводів.

4. Опис експериментального дослідження теплоелектричного стану ЕППН

Як зазначено вище, дослідження теплоелектричного стану печі Кастнера раціонально виконувати за допомогою числового моделювання, що базується на даних експериментальних досліджень. При цьому методика експериментальних досліджень повинна враховувати:

- нерівномірність розподілу температурного поля в електродних заготовках та свічки в цілому;
- геометричні характеристики печі та матеріали, що входять до її складу.

Для проведення фізичного експерименту обрано кампанію графітування дослідної печі Кастнера зі схемою завантаження електродних заготовок, яка приведена на рис. 1. Завантаження печі проводилося у два ряди по 13 заготовок з діаметром $\varnothing 435$ мм з використанням компенсаційних вставок на кінцях. Ряди заготовок розташовані горизонтально один від одного по нижньому краю струмопідводу. Для покращення контакту між електродними заготовками використовувалися електроконтактні прокладки кільцевого типу на основі терморозширеного графіту. У якості теплоізоляційного матеріалу застосовано оборотний коксовий дріб'язок фракції $(-6+1)$ мм з додаванням просушеного та просіяного «свіжого» коксового дріб'язку фракції $(-6+1)$ мм.

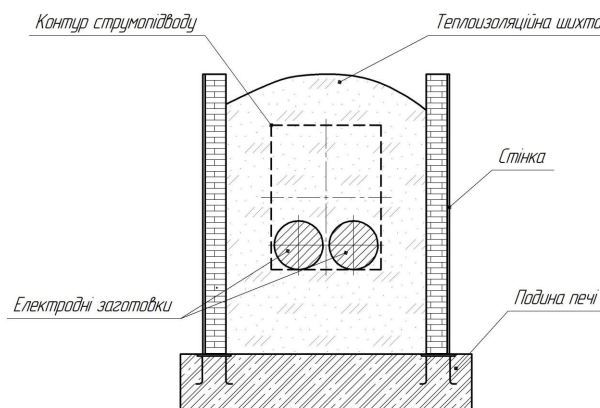


Рис. 1. Поперечний переріз дослідної печі графітування

Для охолодження струмопідводів використовувалися металеві пояси із зазором, по яких для кращого відведення теплоти пропускали воду. Витрата води протягом кампанії графітування становила $5,5 \text{ м}^3/\text{год}$. Площа контакту між поясом і струмопідводом $-1,428 \text{ м}^2$.

Для проведення вимірювання температури використано вольфрам-ренієві термометри в захисних керамічних чохлах, які розміщено в електродних заготовках у центрі та на глибині 50 мм у відповідних досліджуваних перерізах. Також використано хром-алюмелеві термометри у захисних металевих чохлах і без них для дослідження температури у менш нагрітих частинах печі, а саме теплоізоляція, верхній подинок та бічні стінки, що знаходяться у контакт з теплоізоляцією, поверхня струмопідводів, струмінь води на вході та виході з охолоджувального поясу.

Дослідження проводилося на базі вимірювального комплексу із застосуванням модулів збору даних ICP CON I-7018 [13, 14].

5. Результати експериментальних досліджень теплового стану електродних заготовок та струмопідводу під час кампанії графітування

Результати дослідження теплового стану електродних заготовок під час кампанії графітування в ЕППН представлені на рис. 2–5, а струмопідводу – на рис. 6, 7.

Аналіз отриманих результатів фізичного експерименту показав, що в центральному перерізі заготовок, розташованих посередині печі, найбільш нагрітими є центральна частина та частина заготовки, обернена до сусіднього ряду (рис. 2, 3).

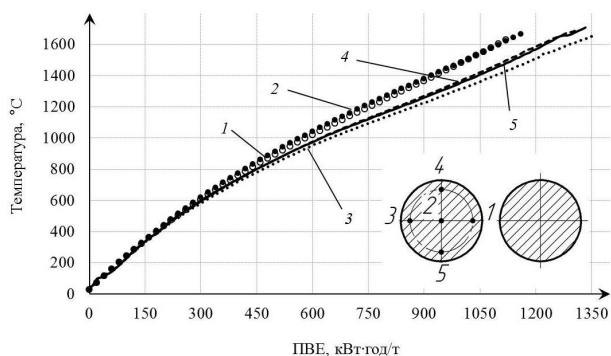


Рис. 2. Розподіл температури у поперечному перерізі центральної частини лівого ряду заготовок: 1–5 – номери термопар

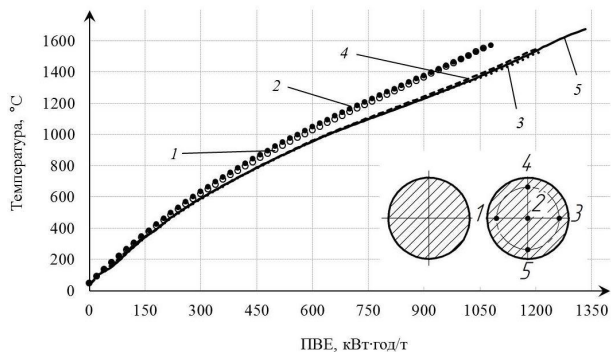


Рис. 3. Розподіл температури у поперечному перерізі центральної частини правого ряду: 1–5 – номери термопар

Починаючи з рівня температури 600 °С темп зростання температури зовнішньої поверхні заготовок (за винятком сторін, обернених до сусіднього ряду, тобто сторін, що контактують з великим об'ємом теплоізоляції) знизився, що ймовірно пов'язано з інтенсивним відбором теплоти на випаровування води та газифікацію вуглецевого матеріалу. При досягненні рівня ПВЕ 900 кВт·год/т темп зростання температури зовнішньої поверхні заготовок відновлюється, що ймовірно пов'язано із закінченням процесу газифікації.

В торці центральної заготовки лівого ряду найбільш нагрітою є її частина, що обернена до сусіднього

ряду, а найменш нагрітою до початку зменшення темпу зростання температури – центральна частина (рис. 4). Такий розподіл температури є наслідком застосування кільцевої (з внутрішнім отвором) електроконтактної прокладки та використання схеми завантаження заготовок у два ряди.

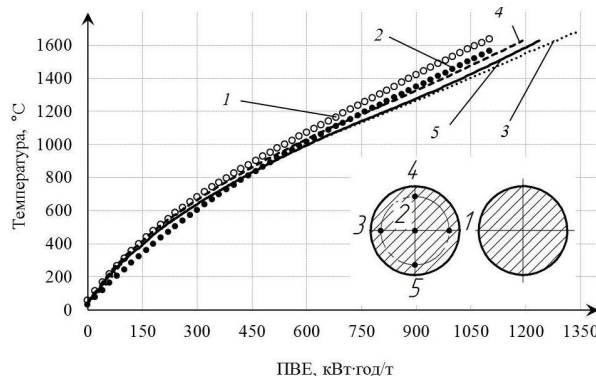


Рис. 4. Розподіл температури у поперечному перерізі торця середньої заготовки лівого ряду: 1–5 – номери термопар

Максимальне значення дослідженого перепаду температури по перерізу заготовок не перевищує 200 °С (рис. 2–4), а по їх довжині у центральній частині ряду (від ¼ до ¾ ряду) не перевищує 70 °С (рис. 5).

Аналіз отриманих результатів охолодження струмопідводів показав, що інтенсивність відведення теплоти охолоджувальним поясом збільшується після досягнення рівня ПВЕ на кампанії графітування 1300 кВт·год/т (рис. 6).

На основі наявних даних розраховано ефективні значення коефіцієнта тепловіддачі від поверхні графітового струмопідводу в охолоджуваній водяний пояс залежно від температури струмопідводу, результати яких наведено на рис. 7.

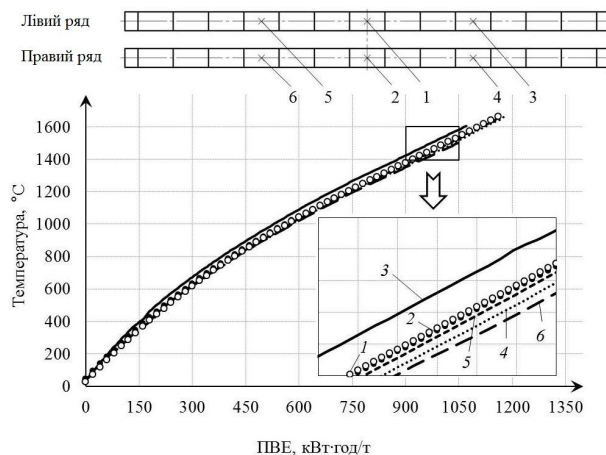


Рис. 5. Розподіл температури в центрах електродних заготовок: 1–6 – номери розміщення термопар

Встановлено, що ефективний коефіцієнт тепловіддачі до досягнення рівня температури поверхні струмопідводу 140 °С становить 190 Вт/(м²·К), а понад 140 °С – близько 350 Вт/(м²·К). Підвищення ефективного коефіцієнта тепловіддачі у діапазоні температур вищих за 140 °С можна пояснити різким зменшенням

термічного контактного опору між металевим поясом охолодження і графітовим струмовідводом за рахунок температурного розширення останнього.

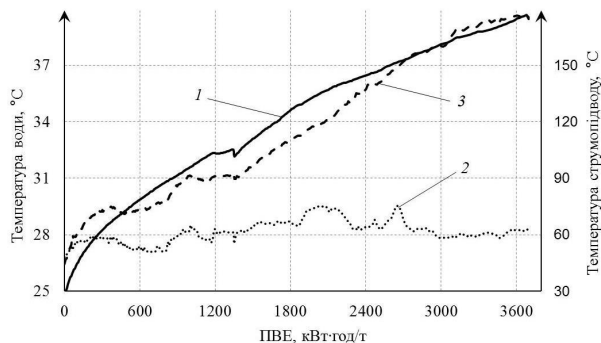


Рис. 6. Розподіл температури на поверхні струмовідводу під охолоджувальним поясом та температура охолодної води: 1 – температура на поверхні струмовідводу; 2 – температура води на вході в охолоджувальний пояс; 3 – температура води на виході з охолоджувального поясу

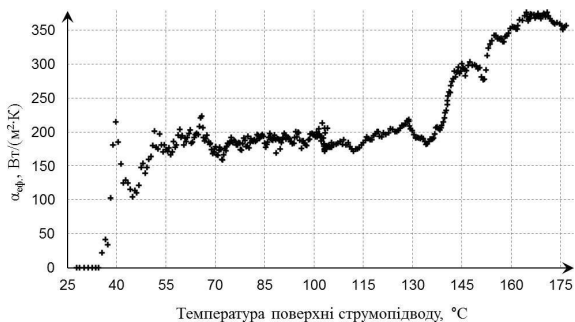


Рис. 7. Ефективний коефіцієнт тепловіддачі від поверхні графітового струмовідводу в охолоджуваний пояс

6. Висновки

В результаті проведених досліджень:

1. Проведено експериментальні дослідження теплоелектричного стану печі Кастнера на підставі розробленої схеми та експериментальної методики. Представлено геометричні та теплоелектричні параметри схеми завантаження печі Кастнера для проведення натурального експерименту.

2. Встановлено, що під час кампанії графітування печі має місце процес газифікації вуглецевого матеріалу водяною парою у робочому просторі печі, який призводить до зменшення темпу нагрівання в електродних заготовках на 10–20%. Аналіз отриманих даних залежності росту температури від ПВЕ показав, що та частина заготовок, яка контактує з більшим об'ємом теплоізоляції, в діапазоні температур 600–900 °C нагрівається повільніше ніж інша завдяки додатковому відбору теплоти на випаровування вологи та газифікацію вуглецевого матеріалу водяною парою.

3. Виявлено, що ефект кільцевої форми електроконтактної прокладки спостерігається тільки у торцевій зоні заготовок. Завдяки застосуванню кільцевих електроконтактних прокладок перепад температури по осі центральних заготовок обох рядів практично відсутній, а перепад температури по всіх заготовках центральної частини ряду не перевищує 70 °C.

4. В результаті проведених експериментальних досліджень ЕППН зібрано та отримано комплекс необхідних вихідних даних для розробки та верифікації числової моделі теплоелектричного стану обладнання, яка є необхідною для вдосконалення процесу та устаткування за технологією Кастнера.

Подальша робота в області вдосконалення промислового процесу графітування буде пов'язана зі створенням та верифікацією числової моделі ЕППН за даними фізичного експерименту.

Література

1. Чалых, Е. Ф. Оборудование электродных заводов [Текст]: учеб. пособие / Е. Ф. Чалых. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
2. Adams, R. Graphite electrode and needle coke development [Text] / R. Adams, W. Frohs, H. Jäger et. al. // Carbon 2007 Conference. – Seattle, Washington, USA, 2007.
3. Санников, А. К. Производство электродной продукции [Текст] / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. – М.: Металлургия, 1985. – 129 с.
4. Janerka, K. The carburizer influence on the crystallization process and the microstructure of synthetic cast iron [Text] / K. Janerka, D. Bartocha, J. Szajnar, J. Jezierski // Archives of Metallurgy and Materials. – 2010. – Vol. 55, Issue 3. – P. 851–859.
5. Панов, Е. Н. Анализ развития печей графитирования Кастнера в условиях потребностей современного рынка [Текст] / Е. Н. Панов, А. Ю. Педченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – Т. 4, № 1 (18). – P. 57–60. doi: 10.15587/2312-8372.2014.26434
6. Лелека, С. В. Теплоэлектрическое состояние печей графитирования Ачесона [Текст]: монография / С. В. Лелека, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий и др. – К.: НТУУ «КПИ», 2014. – 238 с.
7. Kuznetsov, D. M. A comparison of properties of electrodes graphitized by the Acheson and Castner methods [Text] / D. M. Kuznetsov, V. K. Korobov // Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika. – 2001. – Vol. 10. – P. 16–20.
8. Jäger, H. Carbon, 4. Industrial Carbons. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry [Text] / H. Jäger, W. Frohs, M. Banek et. al. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. – 40 p. doi: 10.1002/14356007.n05_n03
9. Панов, Е. Н. Энергосбережение при производстве электродной продукции [Текст]: 3-й междунар. конгр./ Е. Н. Панов, С. В. Кутузов, А. Я. Карвацкий и др. // Цветные металлы. – Красноярск, 2011.
10. Frohs, W. Expansion of carbon artifacts during graphitization [Text] / W. Frohs, F. Roebner // TANSO. – 2015. – Vol. 2015, Issue 267. – P. 77–83. doi: 10.7209/tanso.2015.77
11. Wang, Y.-J. Temperature calculation during lengthwise graphitization process [Text] / Y.-J. Wang // Carbon Tech. – 2010. – Vol. 29, Issue 5 – P. 47–48.
12. Xu, H.-F. Numerical simulation of heat field in lengthwise graphitization furnace during heating process [Text] / H.-F. Xu, C.-F. Liu, Y.-B. Wang // Carbon Tech. – 2009. – Vol. 28, Issue 1. – P. 1–3.

13. Kutuzov, S. V. Making the Heat-Insulating Charge of Acheson Graphitization Furnaces More Efficient [Text] / S. V. Kutuzov, V. V. Buryak, V. V. Derkach, E. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, G. N. Vasil'chenko, S. V. Leleka, T. V. Chirka, T. V. Lazarev // Refractories and Industrial Ceramics. – 2014. – Vol. 55, Issue 1. – P. 15–16.
14. Панов, Е. Н. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов [Текст] / Е. Н. Панов, С. В. Лелека, М. В. Коржик // ПиКАД. – 2005. – № 2. – С. 28–30.

Розроблена технологія виготовлення іонно-легованих структур GaAs. Імплантація іонів кремнію, берилію, цинку проводилась в підкладку із напівізолюючого арсеніду галію марки АГЧП-2а. Імплантація домішки через капсулююче покриття дозволило отримати досить високі значення рухливості носіїв струму в каналах польового транзистора Шотткі (ПТШ), що дозволяє формувати на них КМОН-структури. Застосування багатозарядної імплантації та імпульсного фотонного відпалу для активації p^+ -областей витоку і стоку забезпечило рівень ретроградного легування стік-витокових контактів на рівні $(2-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Ключові слова: багатозарядна іонна імплантація, арсенід галію, КМОН технологія, транзистор Шотткі, p^+ - n перехід, варизонний сонячний елемент

Разработана технология изготовления ионно-легированных структур GaAs. Имплантация ионов кремния, бериллия, цинка проводилась в подложку с полупроводящего арсенида галлия марки АГЧП-2а. Имплантация примеси через капсулирующее покрытие позволило получить достаточно высокие значения подвижности носителей тока в каналах полевого транзистора Шотткі (ПТШ), что позволяет формировать на них КМОП-структуры. Применение многозарядной имплантации и импульсного фотонного отжига для активации p^+ -области истока и стока обеспечило уровень ретроградного легирования сток-истоковых контактов на уровне $(2-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Ключевые слова: многозарядная ионная имплантация, арсенид галлия, КМОП технология, транзистор Шотткі, p^+ - n переход, варизонный солнечный элемент

УДК 537.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.54233

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ БАГАТОЗАРЯДНОЇ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ GAAS ДЛЯ СУБМІКРОННИХ СТРУКТУР ВЕЛИКИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

С. П. Новосядлий
Доктор технічних наук, професор*
E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

С. І. Бойко
Аспірант*
E-mail: sergiy1300@gmail.com

Л. В. Мельник
Аспірант*
E-mail: lj-3d@rambler.ru

С. В. Новосядлий*
E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

*Кафедра комп'ютерної інженерії і електроніки
Прикарпатський національний
університет ім. В. Стефаника
вул. Шевченка, 57,
м. Івано-Франківськ, Україна, 76025

1. Вступ

Постійно зростаючі вимоги до комп'ютерів та іншої споживчої електроніки роблять необхідним підвищення швидкодії структур великих інтегральних схем. Одним з шляхів досягнення цього є використання арсеніду галію, оскільки він володіє рядом переваг над кремнієм, які дозволяють формувати структури з високою швидкістю та надійністю. Також він являється прямим напівпровідником, що дозволяє ефективно поглинати та виділяти світло. У зв'язку з цим викликає необхідність розробки технології виготовлення іонно-легованих структур GaAs, що включає в себе виготовлення p^+ - i - n^+ -шарів, p^+ - n -шарів та p^+ - n - i -структур.

2. Огляд літературних джерел та постановка проблеми

Високоенергетична багатозарядна імплантація є необхідним інструментом для формування структур швидкісних ВІС/НВІС на GaAs, оскільки він володіє фізичними властивостями, які дроблять його більш швидкодіючим та енергоефективним ніж кремній [11]. В літературі багато відомостей про технології формування методом іонного легування шарів n -типу в напівізолюючому арсеніді галію і, зокрема, досліджені електричні властивості шарів і транзисторних структур в залежності від вибору вихідного напівізолюючого матеріалу, дози, енергії та виду імпантованих іонів, від умов термічного відпалу [12–14]. Вже відомі дослідження електричних властивостей шарів p -типу, сформова-