

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ КИСНЮ ПО ДОВЖИНІ МОНОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ, ЛЕГОВАНИХ КОМПОНЕНТАМИ З РІЗНИМ ТИПОМ ПРОВІДНОСТІ

<sup>1</sup>Опольський університет, Польща

<sup>2</sup>Полтавський державний аграрний університет

*Метою статті є дослідження конвективних течій та їх впливу на вирощування монокристалів кремнію методом Чохральського з розплаву великого обсягу, що сприяє виникненню нестационарної конвекції. Тому моделювання конвекції для вирощування монокристалів кремнію є важливим етапом розробки умов зростання досконалих монокристалів. Кремнієві підкладки використовуються для виготовлення понад 90 % напівпровідникових приладів та сонячних осередків. Особливу роль у розвитку електроніки відіграє монокристалічний кремній, який використовується для виготовлення напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем. Основними вимогами розвитку технології виготовлення кремнієвих підкладок є підвищення якості при зниженні вартості. Перспективні технології 10-нм розміру та 3D-транзисторні структури значно підвищують вимоги до однорідності розподілу компонентів, зокрема і шаруватості у монокристалах кремнію. Для математичного моделювання конвективних течій розглядали течії розплаву для тигля циліндричної форми радіусом 150 мм при висоті розплаву до 40 мм. Такі параметри забезпечують стаціонарну конвекцію у розплаві кремнію. Методи зниження шаруватості вивчаються та розробляються понад 50 років, але ще не знайшли остаточного рішення. Для вивчення умов вирощування монокристалів кремнію зі зниженою шаруватістю було обрано метод Чохральського, яким одержують більшу частину монокристалів кремнію. Цей метод зростання монокристалів є найбільш контрольованим і дає змогу впливати ультразвуковими хвилями мегагерцового діапазону на конвективні потоки в розплаві кремнію під межею розділу фаз. Ефективність застосування ультразвуку у процесі витягування монокристалів напівпровідників залежить від створення спеціальних умов введення їх у розплав.*

*Важкорозв'язною задачею кремнієвої технології є зменшення впливу кисню на електрофізичні властивості монокристалів кремнію. Одним зі шляхів вирішення цього питання є легування ізоморфною домішкою, наприклад, оловом. Розробка методу легування монокристалів кремнію оловом вимагає визначення його концентрації в рідкій та твердій фазах.*

**Ключові слова:** нанотехнології, напівпровідникові матеріали, мікросхеми, легуючі компоненти у монокристалах, епітаксійний шар, методи спрямованої кристалізації, метод Чохральського, гравітаційна конвекція.

### Вступ

Нанотехнології на сьогоднішній день дають змогу перевести технології виробництва напівпровідників на інший рівень, досягаючи нових властивостей у результаті теоретичних викладок, підтверджених експериментами. Завдяки цим дослідженням з'являється можливість зумовити (передбачити) виникнення нових властивостей та параметрів напівпровідникових матеріалів унаслідок змін кристалічних ґрат. Одним з основних матеріалів напівпровідникової електроніки виступає монокристалічний кремній та його похідні, отримані з використанням нанотехнологій. Але, оскільки кремній підходить не для всіх приладів і деякі його фізичні властивості обмежують можливості для подальшої мініатюризації та підвищення потужності чипів і створення гнучких пристроїв, то його альтернативами виступають германій, арсенід галію тощо. Германій не підходить для сучасної мікроелектроніки, але завдяки тому, що носії заряду в цьому матеріалі більш рухливі, він використовується в деяких радіочастотних приладах. Наприклад, його застосовують для створення НВЧ-пристроїв, аудіоапаратури. Арсенід галію, завдяки особливим властивостям, давно застосовується переважно для створення надвисокочастотних приладів мікроелектроніки: цифрових та аналогових інтегральних схем, дискретних польових транзисторів та діодів Ганна, які працюють без р-п-переходу завдяки власним засобам матеріалу. Крім того, мікросхеми на основі арсеніду галію застосовуються під час виготовлення мобільних телефонів, мікрохвильових приладів, пристроїв супутникового зв'язку та деяких радарних систем. Однак арсенід галію досить крихкий матеріал із меншою рухливістю прогалію, ніж у кремнію, що унеможливує створення таких пристроїв, як, наприклад, КМОП-транзистори, схеми яких мають більш високу швидкодію і менше

енергоспоживання, маючи в наявності як  $n$ - так і  $p$ -канальні польові транзистори, інших швидкодіючих та енергозберігаючих електронних схем. В арсеніду галію досить низька теплопровідність, що підвищує ризик перегріву пристроїв.

Створення наноелектронних приладів на напівпровідникових підкладках вимагає підвищення якості, зокрема й однорідного розподілу легуючих компонентів у монокристалі. Найбільш важкою неоднорідністю є шаруватість, обумовлена підвищеною концентрацією компонентів у шарі. Це значно знижує відтворюваність електричних параметрів електронних приладів.

Зниження та усунення неоднорідного розподілу легуючих компонентів у монокристалі напівпровідників, вирощених методами спрямованої кристалізації, є одним з основних невирішених завдань сучасної технології їх вирощування. Надалі у процесі епітаксійного росту неоднорідність підкладки формує неоднорідний розподіл легуючих компонентів в епітаксійному шарі. Однак перші експериментальні роботи з вивчення вирощування кристалів металів методами спрямованої кристалізації привернули увагу дослідників наявністю в них сегрегації компонентів.

### Аналіз джерел

Проведення тривалих дослідницьких програм за умов мікрогравітації підтверджує актуальність вивчення природи утворення шаруватості легуючих компонентів [8, 9–11]. Спосіб із впливом гравітаційного поля, альтернативним невагомості, тобто з прискореннями вище прискорення вільного падіння  $g$ , було розроблено та проведено групою дослідників під керівництвом Г. Мюллера в Інституті матеріалознавства в Німеччині [6].

Накопичена до цього часу інформація про вирощування монокристалів різних напівпровідників: Si, InSb, GaAs, твердих розчинів на основі напівпровідників і напівметалів визначає актуальність і значимість досліджень у цій сфері. Вплив магнітного поля на примісну неоднорідність було вивчено більш детально в монокристалі, витягнутих методом Чохральського. Дослідження процесу зростання монокристалів Si, GaAs і InP при дії магнітного поля індукцією 0,125–0,2 Тл показали можливість зниження коливань температури розплаву, а також неоднорідного розподілу домішок [9]. Встановлено, що вплив магнітного поля з індукцією 0,4 Тл на розплав діє на рівноважний та ефективний коефіцієнт розподілу кисню і вуглецю. Ефективний коефіцієнт розподілу кисню в магнітному полі зменшується, а вуглецю – збільшується.

Однак вплив магнітного поля з індукцією до 8 Тл перешкоджає формуванню макроступенів епітаксціальних шарів. Це значно знижує продуктивність процесу зростання. Цей фактор, а також складність створення апаратури для формування магнітного поля, не сприяли широкому поширенню на практиці методу епітаксціальних шарів. Цей метод дозволяє розширити експериментальні можливості для фундаментальних досліджень процесу зростання кристалів.

Разом з експериментальними методами досліджень було широко розгорнуто і методи комп'ютерного моделювання гідродинамічної дії розплаву. Зазвичай ці методи застосовувалися для процесу витягування монокристалів кремнію та сполук  $A^{III}B^V$  методом Чохральського з використанням тиглів діаметром понад 250 мм при магнітному впливі. Це пояснює велику вартість високочистого матеріалу для експериментальних досліджень вирощування монокристалів напівпровідників великого діаметру [10, 11]. Попереднє комп'ютерне моделювання дає змогу отримувати наочні динамічні ілюстрації фізичних експериментів та явищ, імітувати конвективне тепло- та масоперенесення в рідкій фазі, а також не тільки прогнозувати, а й визначати найбільш сприятливі умови зростання монокристалів із рівномірним розподілом домішок.

Поведінка ультразвукових хвиль у розплаві кремнію вимагає проведення математичного моделювання їх поширення, траєкторії та швидкості переміщення конвективних течій, а також взаємодії ультразвукових хвиль із течіями. Розробка механізму придушення конвективних течій у розплаві кремнію дасть змогу визначити умови ефективного впливу ультразвуку.

Під час дослідження розподілу кисню по довжині монокристалів кремнію, легованих компонентами з різним типом провідності, встановлено, що концентрація кисню по довжині монокристалів зазвичай зменшується від верхнього до нижнього кінця злитка [16]. Концентрація кисню в монокристалі кремнію зростає зі збільшенням тиску інертного газу в камері під час проведення дослідження. За однакового тиску в камері концентрація кисню вища в тих монокристаліях, які вирощені з меншою витратою аргону.

Здійснення процесу вирощування кристала в області малих тисків у камері 0,13–0,76 кПа і за витрати аргону понад  $2,5 \cdot 10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с дає можливість отримати рівномірний розподіл і величину концентрації кисню, що наближається до значень монокристалів, які вирощуються у вакуумі [16].

Рівномірний розподіл кисню в цьому разі по довжині монокристалу обумовлений тим, що товщина прикордонного динамічного шару над поверхнею розплаву залишається практично постійною протягом усього процесу вирощування, тобто процес протікає при постійній швидкості випаровування монооксиду кремнію SiO. Як зазначалося вище, у разі малої витрати аргону, в міру зменшення розплаву, відведення SiO знижується внаслідок екранування бічної поверхні тигля надходження аргону над поверхнею розплаву. Внаслідок цього товщина прикордонного шару зростає, випаровування SiO з розплаву погіршується і відбувається уповільнення реакції між розплавом кремнію та тиглем.

Для усунення неоднорідного розподілу кисню у злитку проводять також підживлення розплаву з іншого тигля, забезпечуючи постійний рівень розплаву в тиглі.

Крім того, слід відзначити нерівномірне впровадження кисню в кристалі внаслідок того, що швидкість розчинення кварцового тигля в процесі вирощування поступово зменшується через появу дифузійного шару, збагаченого оксидом SiO. Цей шар утворюється на ранній стадії процесу зростання між кварцом і розплавленим кремнієм і в міру витягування кристала збагачується окислом.

Для руйнування оксидного шару та забезпечення постійної швидкості розчинення кисню з тиглю у процесі вирощування кристала створюють зсувні впливи на межі розділу розплав-тигель шляхом періодичних зупинок та відновлення обертання тигля у напрямку, протилежному до обертання кристала. Швидкість обертання у протилежному напрямку та тривалість зупинки можуть змінюватися, призводячи до зміни концентрації кисню. Цим методом можливо отримати відносно однорідний розподіл кисню вздовж напрямку витягування.

Фазова діаграма системи кремній–кисень у ділянці, збагаченій кремнієм, наведена на рисунку 1.

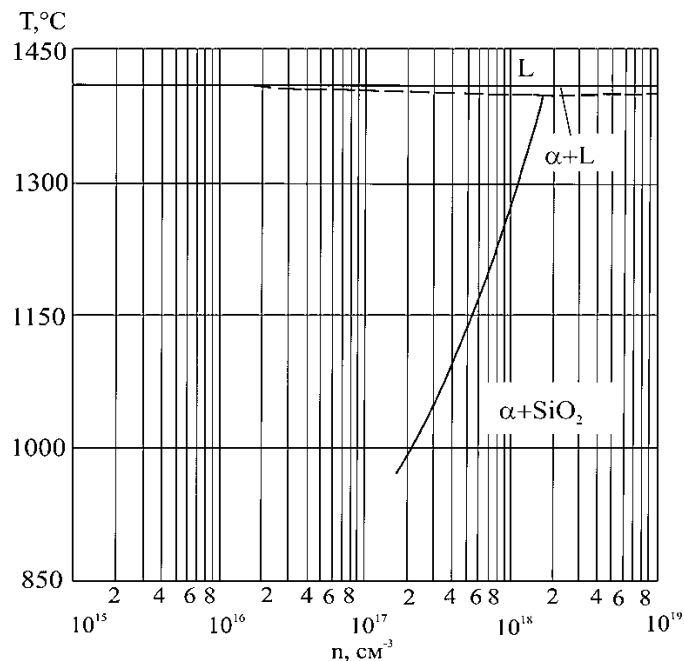


Рис. 1. Фазова діаграма системи кремній–кисень, збагачена кремнієм

Висока температура розплаву кремнію в процесі витягування монокристалів створює додаткові труднощі передачі ультразвукових хвиль мегагерцевого діапазону частот від джерела ультразвуку до межі розділу фаз. Відсутність даних щодо поширення ультразвукових хвиль у високотемпературних матеріалах передбачає проведення математичного моделювання та експериментальних досліджень поглинання ультразвуку у хвилеводах. Конструктивні особливості хвилеводів відіграють важливу роль у забезпеченні передачі ультразвукових коливань по всьому перерізу межі розділу фаз та створення оптимальних умов теплового вузла.

Відомо [8], що шарувата неоднорідність у кристалах, яка утворюється в процесі їх зростання, є результатом конвекції та флуктуацій температури у розплаві. Гравітаційна конвекція спостерігається під час вирощування кристалів усіма методами спрямованої кристалізації. Конвекція також може бути викликана температурними та концентраційними градієнтами, зокрема і градієнтом поверхневого натягу. Однак вважають, що більший вплив на утворення поперечної або шаруватої неоднорідності компонентів монокристалів, що вирощуються в промислових умовах, надає термогравітаційна конвекція.

## Результати досліджень

Термогравітаційна конвекція у розплаві відіграє як позитивну, так і негативну роль у процесі вирощування монокристалів. Позитивною якістю конвекції є забезпечення перемішування компонентів розплаву. Це значною мірою знижує макронеоднорідність компонентів у кристалах, що ростуть. Особливо це спостерігається при великій відмінності щільності основної речовини і легуючого компонента. Негативна якість цієї конвекції обумовлена перенесенням речовини в розплавах течіями, в яких проявляються мікронеоднорідні потоки, збагачені легуючими компонентами. Тому для вирощування однорідних монокристалів конвективне перемішування необхідне такою мірою, щоб ним можна було керувати в області розплаву під межею розділу фаз. Така поведінка розплаву, ймовірно, може бути здійснена в умовах стаціонарної конвекції.

Основним чинником, що визначає характер конвекції у процесі витягування монокристалів методом Чохральського, є розподіл швидкостей конвективних течій у розплаві. Використовуючи математичне моделювання конвективних течій, було розглянуто течії розплаву для циліндричного тигля, радіус якого становить 150 мм. Водночас висота розплаву не повинна перевищувати 40 мм. Саме ці параметри можуть забезпечити стаціонарну конвекцію у розплаві кремнію. Оскільки структура конвективних течій у тиглі є переважно вісесиметричною, розрахунки проводилися стосовно однієї половини обсягу тигля, заповненої розплавом.

З огляду на це процес зниження та управління конвективними течіями в області розплаву, що прилягає до межі розділу фаз, є найбільш оптимальною умовою для вирощування досконалих монокристалів. Подібні умови можна забезпечити за допомогою формування стоячих хвиль в області під межею поділу фаз. Тому особливу цікавість викликає визначення швидкості течій, умов придушення конвекції чи зниження швидкості конвективних потоків на полі стоячої ультразвукової хвилі.

Просторовий розподіл швидкостей течій розплаву зумовлений процесами тепломасоперенесення і залежить від параметрів об'єму розплаву. Саме тому як вихідне рівняння для аналізу розподілу швидкостей течій застосовувалося рівняння Нав'є–Стокса, яке застосовується в математичному моделюванні багатьох природних явищ і технічних задач [7]:

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (v, \nabla)v \right] = -\text{grad}p + \eta \Delta v + \left( \zeta + \frac{\eta}{3} \right) \text{grad} \text{div}v, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність розплаву;  $v = v(x, y, z)$  – швидкість елемента розплаву у точці з координатами  $(x, y, z)$ ;  $p$  – зовнішній тиск, що діє на розплав;  $\eta, \zeta$  – коефіцієнти динамічної та зсувної в'язкості рідини.

Зазвичай процес витягування монокристалів кремнію діаметром 150 мм проводять при швидкості витягування приблизно 60 мм/год та обертанні кристала до 5 об/хв. В умовах зростання швидкість течій розплаву під кристалом становить менше 10 мм/с. Крім того, для умов, що розглядаються, течії в розплаві кремнію вважали квазістаціонарними внаслідок того, що процес вирощування кристалів проводиться при фіксованих швидкостях витягування і частоті обертання. Кутова швидкість обертання кристала становила менше 1 рад/с. Тому рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$(v, \nabla)v = -\frac{1}{\rho} \text{grad}p + \frac{\eta}{\rho} \Delta v.$$

Графічне відображення функції, яка описує швидкості конвективних потоків у двох взаємно перпендикулярних напрямках, представлено на рисунку 2 [8]. Графік побудовано з урахуванням параметрів росту кристалів і сил, що діють на частинки в розплавах, представлених у таблиці 1.

З отриманого графіка можна зазначити, що максимальна швидкість конвективних потоків відповідає просторовій орієнтації, близькій до периферії кристала для радіуса приблизно 60 мм біля поверхні розплаву. Подібні особливості розподілу швидкостей конвективних течій дають можливість позитивно оцінювати вплив ультразвукової стоячої хвилі на стабілізацію конвекції, при цьому достатньо враховувати розрахункове значення максимальної швидкості течії в розплаві. За цих умов зростання монокристалів кремнію, при  $r_k = 75$  мм,  $\omega = 0,5$  с<sup>-1</sup> максимальна швидкість конвективних потоків спостерігається в точці розплаву з координатами  $r = 5$  см,  $z = 0,68$  см і становить 12,6 см/с [8].

У процесі зростання монокристалів компоненти розплаву мають складний рух, і більшою мірою для оцінки характеру та просторової орієнтації найбільших швидкостей течій необхідно враховувати одночасно течії потоків у взаємно перпендикулярних напрямках, що розглядаються.

Параметри росту кристалів і сили, що діють на частинки в розплавах

Змінна	Символ	Кристал	
		Ga <sub>0,03</sub> In <sub>0,97</sub> Sb	Si
Радіус кристала, mm	$r_c$	5	75
Радіус тигля, mm	$R_c$	15	150
Висота розплаву, mm	$h$	23	40
Швидкість обертання кристала, rpm	$\Omega$	1–20	5–10
Радіус частинки, nm	$r_p$	5	5
Маса частинок, kg	$m_p$	$3 \times 10^{-21}$	$1,3 \times 10^{-21}$
Максимальна швидкість течії, cm/s	$V$	0,047–0,9	12,6–28
Сила, що діє на частинку в конвективному потоці, N	$F_C \cdot 10^{-23}$	0,16–3,0	1,6–36,0
Періодичність УЗД, MHz	$f$	0,1–4,0	0,1–4,0
Сила, що діє на частинку в ультразвуковій стоячій хвилі, N	$F_{US} \cdot 10^{-20}$	0,043–70	0,0063–10,1

Для визначення умов впливу ультразвукових хвиль на придушення конвективних потоків течій у розплаві під кристалом у процесі зростання необхідно розглянути механізм формування стоячих хвиль та їх вплив на легуючі компоненти, що захоплюються течіями розплаву. Через те, що сила, яка діє на частку в стоячій хвилі, значно перевищує силу в хвилі, що біжить, для дослідження були обрані стоячі хвилі.

Стояча хвиля утворюється в результаті різниці суперпозицій: падаючої від джерела ультразвуку і відбитої від поверхні, розташованої перпендикулярно напрямку поширення хвилі [6]. При формуванні стоячих хвиль у розплаві частинки, зокрема і легуючих компонентів, потрапляючи в область стоячих хвиль, осцилюються у пучності, що перешкоджає їх захопленню конвективними потоками.

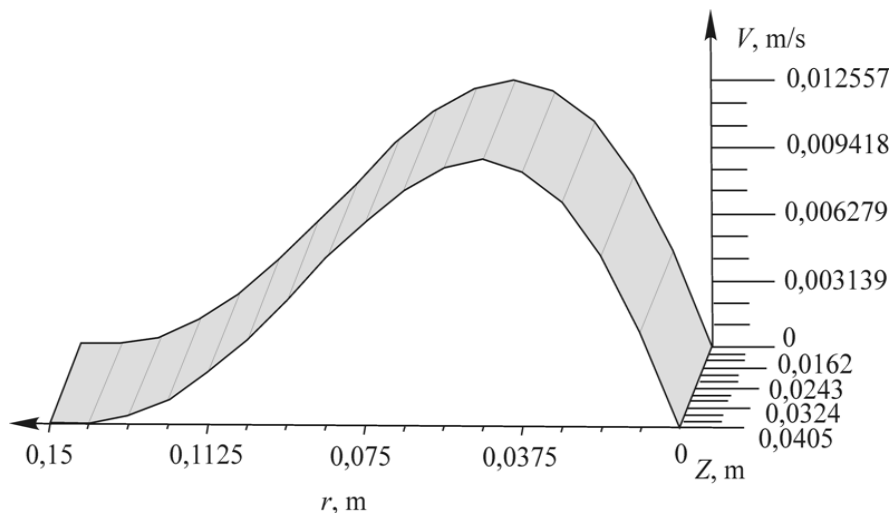


Рис. 2. Розподіл швидкості конвективних потоків у двох взаємно перпендикулярних напрямках

Вводити ультразвук для утворення каналу стоячих ультразвукових хвиль у розплаві при витягуванні монокристалів методом Чохральського можна двома способами. Перший спосіб забезпечує передачу ультразвукових коливань через дно тигля в розплав під кристалом, що витягується, а другий – від кристала, що витягується через межу розділу фаз у розплав. У першому випадку межа розділу фаз буде поверхнею відображення падаючої хвилі. Поверхнею відбиття ультразвукових коливань у другому випадку є дно тигля. Але другий метод введення ультразвуку має низку істотних недоліків. Практично важко реалізувати передачу ультразвукових коливань від п'єзопретворювача до кристала, який закріплений на водоохолоджуваному штоку, що обертається.

Крім того, в процесі витягування довжина кристала збільшується. Це вимагає проведення коригування частоти для створення максимальної амплітуди сигналу і, відповідно, максимальної інтенсивності. Саме ефективність використання ультразвукових хвиль під час витягування монокристалів напівпровідників залежить від комплексу умов введення їх у розплав. Найбільш простим і доступним методом є передача ультразвукових хвиль через дно тигля, що зі свого боку вимагає вивчення впливу поверхні дна тигля на конвективні течії в розплаві. Поверхня дна тигля

розглядалася як поглиблення чи виступ, які можуть проводити швидкість конвективних течій у розплаві кремнію за умов витягування монокристалів методом Чохральського.

Ключовим параметром формування каналу стоячих ультразвукових хвиль у розплаві є перевищення сили, що діє на кластери у стоячій хвилі над силою, яка приводить у рух кластер конвективними течіями. Для оцінки такого співвідношення досить враховувати максимальну швидкість руху кластера в області розплаву під межею розділу фаз.

Пригнічення конвекції забезпечується гальмуванням конвективних течій при впливі ультразвуку шляхом формування стоячих хвиль під межею поділу фаз у розплаві.

Слід зазначити, що розрахунки для розплаву кремнію дали змогу встановити важливу закономірність, яку необхідно враховувати для розробки технології, що дозволяє усувати шаруватість у процесі зростання монокристалів. У разі зменшення співвідношення радіусів тигля і кристала величина максимальної швидкості течій зміщується в область розплаву під межею розділу фаз у напрямку до осі кристала, що може створювати певні труднощі при усуненні шаруватості в монокристалі, що витягується. Тому більш сприятливі умови зниження конвекції створюються за умов зростання, коли радіус тигля більш ніж удвічі перевищує радіус монокристалу.

Особливий інтерес становлять ультразвукові хвилі мегагерцового діапазону частот і малої інтенсивності, що вводяться в розплави напівпровідників у процесі їх вирощування, з метою отримання однорідних монокристалів. Однак значна різниця температури кристалізації напівпровідникових матеріалів, які використовуються в електроніці, вимагає вивчення можливості застосування для хвилеводно-випромінюючої системи, що забезпечує введення ультразвуку в розплав.

Витягування монокристалів кремнію методом Чохральського супроводжується появою в них кисню, що є домішкою, яка важко усувається та негативно впливає на їхні електрофізичні параметри. Наявність кисню обумовлена тим, що в процесі росту кристала розплав кремнію, що міститься в кварцовому тиглі, контактує із внутрішньою поверхнею. За температури розплаву кремнію приблизно 1440 °C відбувається часткове розчинення кварцу, завдяки чому кисень проникає в розплав.

Кисень, що надійшов у розплав, переноситься від стінок тигля далі в решту об'єму розплавленого кремнію завдяки конвективним течіям. Одночасно з цим процесом відбувається випаровування кисню з вільної поверхні розплаву. Кисень, переміщений конвективними потоками до межі розділу фаз, кристалізується разом із розплавом і саме так виявляється в монокристалі, що зростає. Питання вивчення впливу кисню на властивості монокристалів кремнію є актуальним. Вивчення способів дії, спрямованих на зниження його концентрації, проводяться протягом усього періоду вдосконалення технології його вирощування. Кисень у кремнії є основною домішкою, що визначає поведінку термодонорів, термостабільність часу життя носіїв заряду, утворення мікрodefektів, ефективність генерування, та є каталізатором різних фізичних і технологічних ефектів.

Отже, слід зазначити, що одним з основних технологічних параметрів, що визначають вплив ультразвуку, який вводиться в розплав, є його інтенсивність, оцінити яку можна за допомогою коефіцієнта поглинання. При поширенні ультразвуку в твердих тілах зі збільшенням температури вище згадана інтенсивність зазвичай зменшується, що тягне за собою можливість зниження позитивного впливу ультразвуку на монокристали напівпровідників, які вирощуються. Тому вивчення акустичних властивостей матеріалів для хвилеводів становить науковий та практичний інтерес.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Nanostructured thermoelectric materials: Current research and future challenge / Z.-G. Chen et al. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2012. Vol. 22, № 6. P. 535–549.
- [2] Pichanusakorn P., Bandaru P. Nanostructured thermoelectrics. *Nature Nanotechnology*. 2010. Vol. R67. P. 19–63.
- [3] Яцишин В. І., Бурдукова С.С. Основи фізики напівпровідникових приладів. Київ: НМК ВО, 1992. 120 с.
- [4] Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Oxford, 1961. 654 p.
- [5] Yue J. T., Voltmer F. W. Influence of gravity-free solidification on solute microsegregation. *Growth / J. Cryst.* 1975. V. 29. P. 329–34.
- [6] Witt A. F., Gatos H. C., Lichtensteiger M. Crystal growth and segregation under zero gravity: Ge. *Electrochem / J. Soc.* 1978. V. 125. № 11. P. 1832–1840.
- [7] Yu K., Chen J. Enhancing solar cell efficiencies through 1-D nanostructures. *Nanoscale Res Lett*. 2009. № 4. P. 1–10
- [8] Ostrogorski A. Numerical simulation of single crystal growth by submerged heater method. *Growth / J. Cryst.* 1990. V. 104. P. 233–238.
- [9] Choe K. S. Growth striations and impurity concentrations in HMCZ silicon crystals. *Growth / J. Cryst.* 2004. V. 262. P. 35–39.
- [10] Numerical simulation for silicon crystal growth of up to 400 mm diameter in Czochralski furnaces / K Takano et al. *Materials Science and Engineering: B*. 2000. V. 73. P. 30–35.
- [11] Global simulation of the CZ silicon crystal growth up to 400mm in diameter / K. Takano et al. *Journal of Crystal Growth*. 2001. V. 229. P. 26–30.

[12] Каліон В. А. Рівняння Нав'є–Стокса: навч. посіб. К.:Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016. 221 с.

[13] Kozhemyakin G., Degtyareva A. A. Modeling of melt convection in Czochralski crystal growth of silicon under ultrasound. *The 7th International Workshop on Modeling in Crystal Growth (IWMCG-7)*, Grand Hotel Taipei, Taiwan, from October 28 to 31, 2012. URL: [https://www.researchgate.net/publication/270685013\\_MODELING\\_OF\\_MELT\\_CONVECTION\\_IN\\_CZOCHELSKI\\_CRYSTAL\\_GROWTH\\_OF\\_SILICON\\_UNDER\\_ULTRASOUND](https://www.researchgate.net/publication/270685013_MODELING_OF_MELT_CONVECTION_IN_CZOCHELSKI_CRYSTAL_GROWTH_OF_SILICON_UNDER_ULTRASOUND)

**Буланкіна Анна Олександрівна** – магістр, теологічний факультет, e-mail: [anna1307d@gmail.com](mailto:anna1307d@gmail.com)

Опольський університет, м. Ополь, Польща

**Дегтярова Лариса Миколаївна** – канд. техн. наук, доцент, доцент, e-mail: [ladegt12@gmail.com](mailto:ladegt12@gmail.com)

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава

**A. Bulankina<sup>1</sup>**  
**L. Degtyarova<sup>2</sup>**

## **Study of oxygen distribution along the length of silicon single crystals doped with components with different types of conductivity**

<sup>1</sup>University of Opole, Poland

<sup>2</sup>Poltava State Agrarian University

*The purpose of the article is the study of convective flows and their influence on the growth of single crystals of silicon by the Czochralsky method from a large melt, which contributes to the emergence of non-stationary convection. Therefore, simulation of convection for the growth of silicon single crystals is an important step in the development of conditions for the growth of perfect single crystals. Silicon substrates are used to manufacture more than 90% of semiconductor devices and solar cells. A special role in the development of electronics is played by monocrystalline silicon, which is used for the manufacture of semiconductor devices and integrated microcircuits. The main requirements for the development of technology for the production of silicon substrates is an increase in quality at a decrease in cost. Promising technologies of 10-nm size and 3D-transistor structures significantly increase the requirements for uniformity of distribution of components, including layering in silicon single crystals. For the mathematical modeling of convective flows, melt flows were considered for a cylindrical crucible with a radius of 150 mm at a melt height of up to 40 mm. Such parameters ensure stationary convection in molten silicon. Methods of reducing stratification have been studied and developed for more than 50 years, but have not yet found a definitive solution. This method of single crystal growth is the most controlled and allows to influence the convective flows in the silicon melt below the phase interface with ultrasonic waves in the megahertz range. The effectiveness of using ultrasound in the extraction of semiconductor single crystals depends on the creation of special conditions for introducing them into the melt.*

*Reducing the influence of oxygen on the electrophysical properties of silicon single crystals is an intractable problem of silicon technology. One of the ways to solve this problem is alloying with an isomorphic impurity, for example, tin. The development of a method of doping single crystals of silicon with tin requires determination of its concentration in the liquid and solid phases.*

**Key words:** nanotechnology, semiconductor materials, microcircuits, doping components in single crystals, epitaxial layer, directional crystallization methods, Czochralskii method, gravitational convection.

**Bulankina Anna** – master's degree (Eng.), Faculty of Theology, e-mail: [anna1307d@gmail.com](mailto:anna1307d@gmail.com)

**Degtyarova Larisa** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Poltava State Agrarian University, e-mail: [ladegt12@gmail.com](mailto:ladegt12@gmail.com)