

УДК 532.5; 548.5

В. Ф. Демченко, О. П. Федоров

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Київ

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ СТРУКТУРОЮ ТВЕРДІННЯ В НЕВАГОМОСТІ МЕТОДАМИ СПРЯМОВАНОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ З НАКЛАДЕННЯМ ВІБРАЦІЙНОГО ВПЛИВУ

З метою підготовки космічного експерименту проведено математичне моделювання гідродинамічних і теплових процесів при вирощуванні кристалів за схемою Бріджмена та методом плаваючої зони у земних умовах та в умовах мікрогравітації. Вивчено особливості гідродинамічного стану розплаву при накладанні аксіальних вібраційних збурень різної частоти та інтенсивності. Показано, що для обох методів можливе придушення нестационарних контурів течії розплаву перед фронтом, а в умовах невагомості метод плаваючої зони є менш чутливим до прояву релей-тейлорівської нестійкості течії рідкої фази.

Ключові слова: кристалізація, мікрогравітація, гідродинаміка розплавів, метод Бріджмена, метод плаваючої зони.

ВСТУП

Управління структурою твердіння в умовах космічного польоту є актуальним завданням сучасного космічного матеріалознавства. При твердінні в космічних умовах істотно змінюється відносний внесок поверхневих і об'ємних сил, що діють на розплав [4, 5, 7]. При цьому фізична картина тепломасоперенесення в умовах мікрогравітації (внаслідок дії залишкових мікроприскорень, g -jitter) залишається далекою від повної ясності, особливо для практично важливих технологій одержання кристалів з розплаву. Так, у багатьох дослідженнях саме цей фактор вважають відповідальним за труднощі отримання кристалів з бажаними структурою та властивостями [4]. У той же час з роботи [13] впливає висновок про несуттєвий вплив залишкових мікроприскорень на процеси тепломасоперенесення. У ряді робіт

теоретично та експериментально продемонстровано можливість управління тепломасоперенесенням у розплаві шляхом накладення низькочастотних вібрацій на матеріал, що кристалізується [3, 11, 12, 15].

Предметом цієї роботи є порівняльний аналіз теплової та гідродинамічної обстановки при вирощуванні кристалів за схемою Бріджмена і методом зонної плавки в земних умовах і в умовах мікрогравітації при наявності вібраційного впливу на розплав і без нього. При цьому розглядалася гравітаційна конвекція, конвекція Марангоні (істотна при наявності вільної поверхні [9]), а також вібраційний вплив на розплав для деяких спеціальних випадків. Застосовувалися методи математичного моделювання, результати порівнювались з експериментальними даними, отриманими авторами для прозорої модельної речовини — сукцинонітрилу (метод Бріджмена), а також кремнію (метод плаваючої зони). Використані речовини, параметри процесів і харак-

© В. Ф. ДЕМЧЕНКО, О. П. ФЕДОРОВ, 2015

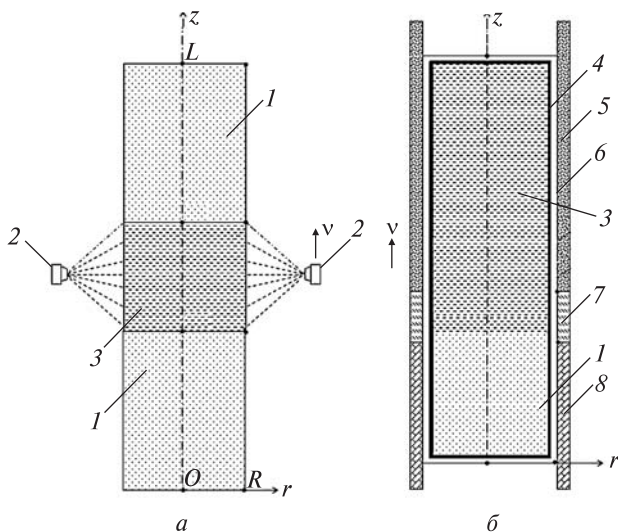


Рис 1. Схеми вирощування кристалів методом плаваючої зони (а) і методом Бріджмена (б): 1 — кристал, 2 — нагрівач, 3 — розплав, 4 — ампула, 5 — нагрівач, 6 — газовий проміжок, 7 — ізолятор, 8 — холодильник

теристики експериментальних установок відповідають апаратурі для космічних досліджень, що розроблюється. Розглядалася спрощена задача, в якій напрямок накладення вібрацій збігається з віссю кристала, частота описувалася гармонійним законом, а сила тяжіння варіювалася.

Технологічні схеми відповідних процесів показані на рис. 1. При зонній плавці (рис. 1, а) у початковому зразку 1 за допомогою нагрівача 2 формується розплавлена зона 3, яка, переміщуючись разом з нагрівачем уздовж твірної зразка, забезпечує плавлення заготовки та кристалізацію розплаву. У методі Бріджмена (рис. 1, б) плавлення заготовки та кристалізація розплаву 1 здійснюється за допомогою градієнтного пристрою, який складається з нагрівача 5, холодильника 8 та розташованого між ними теплоізоляційного шару 7. Нагрівач при зонній плавці та градієнтний пристрій у схемі Бріджмена переміщуються із заданою швидкістю v відносно зразка.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

В осесиметричному наближенні спільний конвективно-кондуктивне перенесення енергії в системі «кристал — розплав» описується рівнянням

$$\operatorname{ср}\left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad r, z \in \Omega, \quad (1)$$

де T — температура, $\mathbf{V} = \{V_r, V_z\}$ — вектор швидкості руху розплаву, c, ρ, λ — теплофізичні властивості матеріалу, $\{r, z\}$ — циліндричні координати. Рівняння (1) інтегрується у прямокутнику $\Omega = \{0 < r < L, 0 < z < R\}$, який охоплює розплав, кристал і заготовку, при моделюванні схеми Бріджмена в розрахункову область включається також стінка ампули. Сформулюємо граничні умови. При $r = 0$ має місце симетрія температурного поля:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (2)$$

а при $r = R$ — умова теплообміну кристалу з нагрівачем і навколишнім середовищем

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = q(z, t) + \alpha(z) [T(R, z, t) - T_h(z, t)] - \varepsilon \sigma_0 (T^4(R, z, t) - T_c^4), \quad (3)$$

де $q(z, t)$ — щільність теплового потоку, який надходить до поверхні зразка від зовнішнього нагрівача (рис. 1, а); $\alpha(z)$ — коефіцієнт теплопередачі між стінкою ампули і нагрівачем 5 (холодильником 8); $T_h(z, t)$ — температура нагрівача (холодильника), ε — ступінь чорноти, σ_0 — постійна Стефана — Больцмана, T_c — температура зовнішнього середовища. У схемі Бріджмена береться до уваги лише теплопередача через газу щілину 6. Коефіцієнт теплопередачі α розраховувався як величина, обернена до термічного опору газового зазору; на границі з ізолятором коефіцієнт α покладался рівним нулю. Процес зонної плавки здійснювався у вакуумній камері, при цьому розплавлена зона утримувалася силами поверхневого натягу, а в якості джерела енергії використовувався кільцевий електронно-променевий нагрівач. Вважається, що на торцевих поверхнях зразка теплообміну з навколишнім середовищем немає:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L_z} = 0. \quad (4)$$

На фронтах кристалізації і плавлення формулюються умови ідеального контакту між рідкою

і твердою фазами (при швидкостях кристалізації 1...10 мкм/с виділенням прихованої теплоти можна знехтувати). При моделюванні схеми Бріджмена у початковий момент часу $t=0$ задається початкове положення системи «нагрівач — ізолятор — холодильник», а у схемі плаваючої зони — положення нагрівача відносно твірної зразка.

Гідродинамічні процеси в розплаві описуються системою рівнянь Нав'є — Стокса в наближенні Буссінеска:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{V_r}{r^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) + F_z, \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) = 0, \quad (7)$$

де P — тиск, ν — коефіцієнт кінематичної в'язкості, $F_z = g\beta_T T$ — підйомна сила Архімеда, $g = g(t)$ — прискорення, β_T — коефіцієнт об'ємного розширення розплаву. Рівняння (5)–(7) інтегруються в області, яка визначається поточною формою фронтів плавлення і кристалізації. На твердих границях області задаються умови прилипання і непроникнення, а при $r=0$ — умова симетрії поля швидкостей. У схемі зонної плавки будемо вважати вільну поверхню такою, що не деформується, тоді граничні умови на цій поверхні можна записати у вигляді

$$V_r|_{r=R} = 0, \quad \nu \frac{\partial V_r}{\partial z} \Big|_{r=R} = -\frac{1}{\rho} \beta_\sigma \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R}. \quad (8)$$

Тут $\beta_\sigma = d\sigma/dT$, $\sigma = \sigma(T)$ — коефіцієнт поверхневого натягу. Прискорення $g = g(t)$ представимо у вигляді суми $g(t) = g_0 + g_v(t)$, де g_0 — фонове, $g_v(t)$ — вібраційне прискорення. Будемо вважати, що вібраційні коливання здійснюються уздовж осі ампули і є гармонічними, так що $g_v(t) = -4A\pi^2\omega^2 \sin 2\pi\omega t$, де ω — частота, A — амплітуда коливань.

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Метод плаваючої зони. Теплові та гідродинамічні процеси при зонній плавці вивчалися при переплавленні зразка кремнію ($R = 5$ мм, $L = 100$ мм) зі швидкостями протяжки джерела електронно-променевого нагріву $v_e = 1...10$ мкм/с. Розподіл густини теплового потоку на поверхні зразка задавався у відповідності з експериментальними даними роботи [2], отриманими методом розрізного анода. Чисельними дослідженнями встановлено, що висота розплавленої зони визначається потужністю Q електронно-променевого нагрівання та практично не залежить від швидкості v_e переміщення джерела нагрівання. Ос-

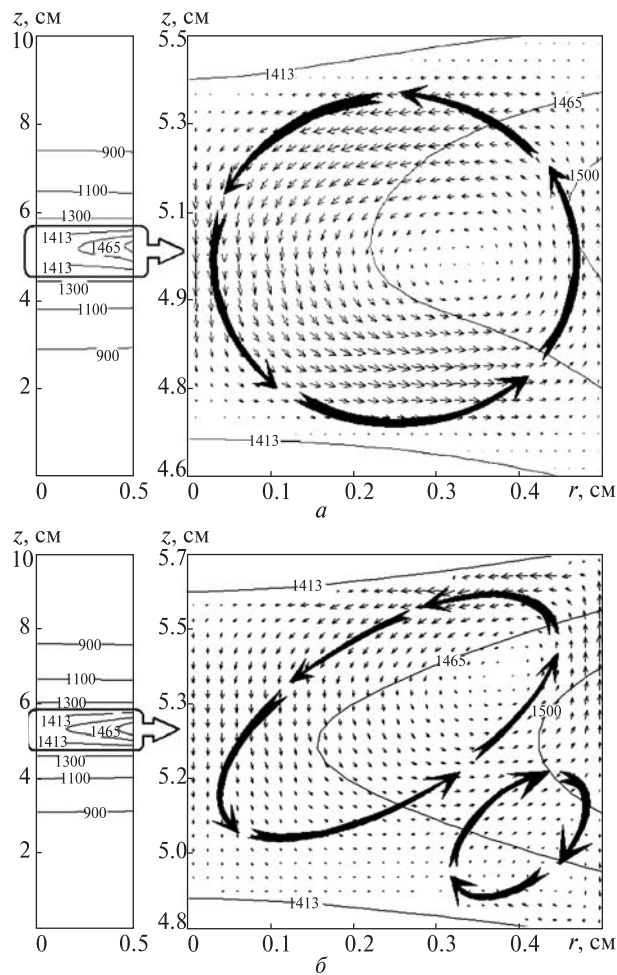


Рис. 2. Температурне поле і течія розплаву при формуванні монокристалу кремнію методом плаваючої зони: а — земні умови, б — мікрогравітація

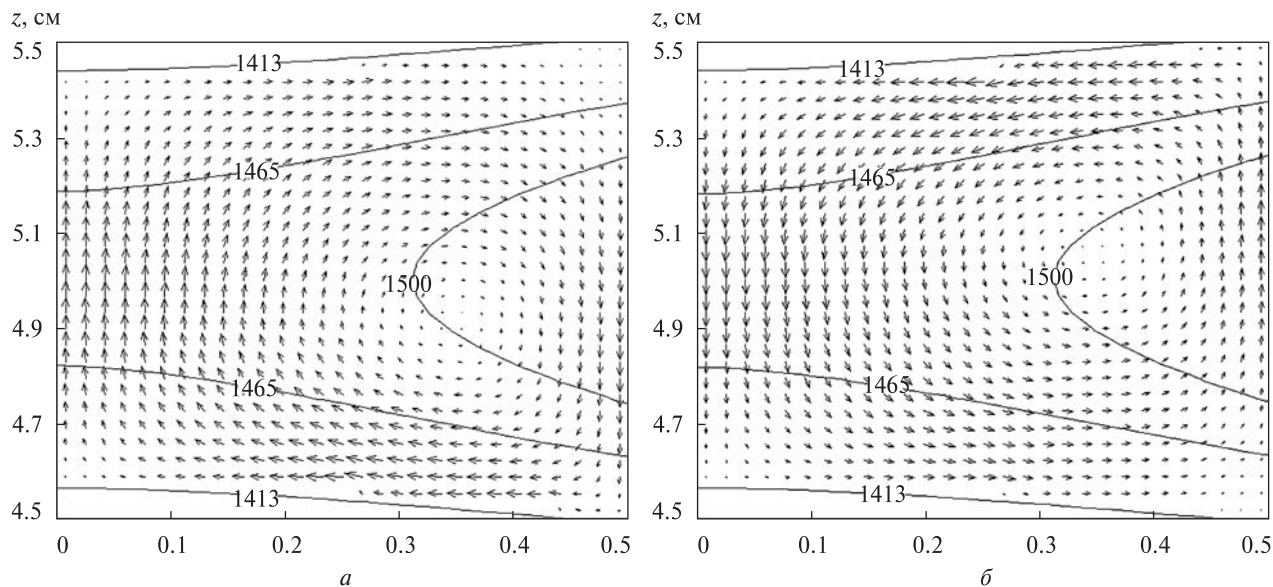


Рис. 3. Циркуляція розплаву кремнію в умовах зниженої сили тяжіння: *a* — початок періоду вібрації, *б* — середина періоду

танне пояснюється малими значеннями теплового числа Пекле, розрахованого за значенням ν_e . Висота розплавленої зони на бічній поверхні зразка при $Q = 280$ Вт становить 10 мм, що з точністю 5 % збігається з висотою, виміряною експериментально.

На рис. 2 показано температурні поля та поля швидкостей руху розплаву при вирощуванні монокристала кремнію методом плаваючої зони в земних умовах і в умовах малої гравітації ($g_0 = 1 \text{ см/с}^2$).

У земних умовах (рис. 2, *a*) рух розплаву формується переважно під впливом архімедової сили. На вільній поверхні виникає висхідний потік, який поблизу фронту плавлення розгортається в радіальному напрямку, утворюючи торіодальний вихор (схематично показаний великими стрілками на збільшеному фрагменті розплавленої зони), центр якого зміщений до фронту плавлення. У земних умовах найбільша швидкість течії ($|V| = 3 \text{ см/с}$) спостерігається на вільній поверхні в зоні максимального тепловідведення електронного променя.

Рух рідкого кремнію в умовах зниженої сили тяжіння (рис. 2, *б*) формується за рахунок конкурентної взаємодії термогравітаційної та термокапілярної сил, внаслідок чого в розплавленій зоні поблизу фронту кристалізації утворюється

вторинний вихор. У цьому випадку максимальна швидкість руху розплаву знижується на два порядки, висота розплавленої зони зменшується на 5 %, і утворюється більш опуклий фронт кристалізації.

Виділимо два режими, при яких протягом одного циклу вібрації: 1) сумарне прискорення $g(t)$ залишається знакопостійним ($\max|g_v| < g_0$), 2) $g(t)$ змінює знак ($\max|g_v| > g_0$). В умовах невагомості зміна знаку віброприскорення відбувається двічі за період одного вібраційного циклу. У цьому випадку слід очікувати втрати стійкості руху розплаву за типом релей-тейлорівської нестійкості.

Як постійну часу гідродинамічного процесу будемо вважати таке значення часу τ_g , яке є необхідним для перебудови течії з одного стійкого стану в інший. Для чисельної оцінки постійної часу величина фоновго прискорення імпульсно змінювалася з $g_0 = 1 \text{ см/с}^2$ до $g_0 = 5 \text{ см/с}^2$. Розрахунками встановлено, що при зонній плавці постійна часу складає $\tau_g = 1 \text{ с}$. При частотах вібрації, для яких період τ одного циклу вібрації сумірний з τ_g , вібраційні збурення призводять до істотної зміни гідродинамічних потоків у розплавленій зоні. На рис. 3 наведено поля швидкостей руху розплаву кремнію при вирощуванні кристалу методом плаваючої зони в умовах пони-

женої гравітації ($g_0 = 1 \text{ см/с}^2$) при частоті вібрації $\omega = 0.1 \text{ Гц}$ і максимальній величині вібраційного прискорення 4 см/с^2 . При цій частоті $\tau > \tau_g$, внаслідок чого протягом одного періоду вібрації напрямок циркуляції вихору змінюється на протилежний. Навпаки, при височастотній вібрації ($\omega > 50 \text{ Гц}$) різнополярні вібраційні прискорення усереднюються, тому структура і інтенсивність конвективних потоків зберігаються практично такими ж, як і при відсутності вібрації.

Метод Бріджмена. Обрана схема методу Бріджмена (рис. 1, б) відповідає лабораторній наземній установці, на якій відпрацьовується орбітальний експеримент. Гравітаційна конвекція в розплаві виникає внаслідок наявності радіального градієнта температури [1]. Числові значення параметрів, які входять у математичний опис, вибиралися наступними: $R = 7.5 \text{ мм}$, довжина нагрівача 100 мм , довжина ізолятора 10 мм , довжина холодильника 20 мм , температура нагрівача $85 \text{ }^\circ\text{C}$, температура холодильника $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Використовувалися значення термодинамічного та транспортного параметрів сукцинонітрилу з робіт [10, 14]. Найбільший інтерес представляють потоки розплаву поблизу фронту кристалізації, тому що саме вони визначають стійкість росту кристалу і його морфологію.

На рис. 4, а показані розрахункові лінії струму в розплаві до початку вібрації (земні умови вирощування). Під дією підйомної сили в рідкій фазі утворюється глобальна вихрова течія: поблизу стінки нагрівача розплав піднімається до верху ампули, в осьовій частині ампули формується спадна течія, направлена до фронту кристалізації. При гальмуванні потоку розплаву поблизу фронту кристалізації формуються нестійкі слабоінтенсивні вторинні вихори, які періодично руйнуються і виникають знову.

Виявлені в розрахунках нестационарні вторинні вихори спостерігалися в експериментальній установці Бріджмена. Для цього в розплав сукцинонітрилу вводилися маркери — спори лікоподію, рух яких фіксувався відеокамерою [6, 8]. Рухомі в розплаві маркери можна розділити на дві групи. У першій з них траєкторії руху частинок відповідали циркуляції розплаву в глобальній вихровій течії. Друга група марке-

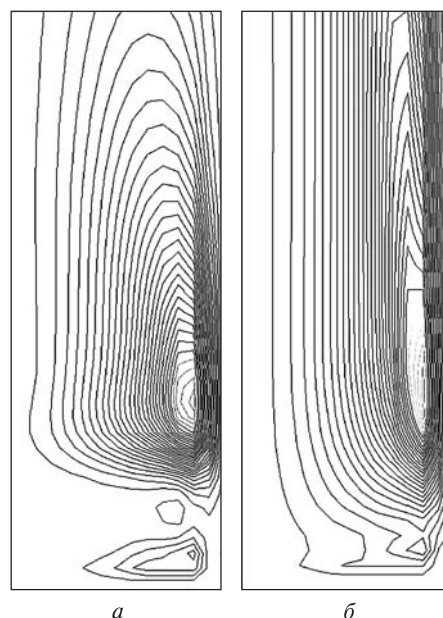


Рис. 4. Структура потоків розплаву при земних умовах вирощування кристалу: а — без вібрації, б — з вібрацією при $A = 1 \text{ мм}$, $\omega = 11 \text{ Гц}$

рів здійснювала коливальні рухи поблизу фронту кристалізації, що може свідчити про наявність вторинних вихорів, виявлених чисельним моделюванням. Спрощена експериментальна схема не дає можливості отримати кількісні дані про швидкості потоків, однак характер руху частинок біля фронту свідчить про нестационарний характер руху розплаву поблизу фронту та наявність кількох контурів циркуляції поблизу фронту кристалізації.

При накладенні вібрації з частотою 11 Гц ($\max|g_x| < g_0$, $\max|g_y| = 0.5g_0$), вже на першому вібраційному циклі вторинні вихори, що утворилися до початку вібрації, руйнуються, і формується одноконтурна схема циркуляції розплаву, яка підтримується протягом подальших циклів вібрації (рис. 4, б). При цьому центр глобального вихору зміщується до стінки ампули, швидкості потоків в осьовій зоні істотно послаблюються. З цією обставиною, мабуть, пов'язане зникнення вторинних вихорів, що осцилюють поблизу фронту кристалізації. Таким чином, при певних параметрах примусова вібрація може слугувати регулятором гідродинамічних потоків у розплаві.

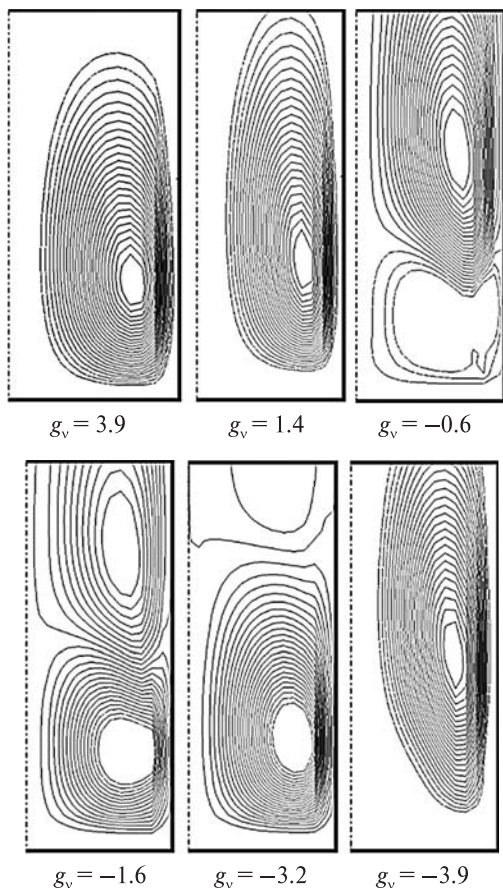


Рис. 5. Ізолінії функції струму в різні моменти часу першого півперіоду вібраційного циклу (величини вібраційного прискорення надані в $\text{см}/\text{с}^2$)

Якісно інша картина виникає при накладенні вібрації при відсутності гравітації ($g_0 = 0$). На рис. 5 представлено картини ліній струму в різні моменти першого півперіоду вібраційного циклу при $\omega = 1$ Гц, $A = 1$ мм.

При зміні знаку віброприскорення в нижній частині розплаву зароджується вихор, що циркулює в напрямку, протилежному до напрямку обертання глобального вихору, який був до зміни знаку віброприскорення. Новоутворений вихор поступово витісняє у верхню частину ампули початковий вихор аж до повного його зникнення. У другому півперіоді вібраційного циклу формується аналогічний нестационарний рух рідкої фази, але з протилежним напрямом обертання новоутвореного вихору. Вистачає декілька

десятиків циклів вібрацій, щоб встановилася подібна періодична структура течії розплаву.

Описаний вплив вібрації на гідродинаміку розплаву можна трактувати як прояв квазістационарної релей-тейлорівської нестійкості руху рідкої фази в умовах неперервного перерозподілу густини розплаву. За допомогою обчислювального експерименту встановлено, що подібні гідродинамічні осциляції розплаву продовжують підтримуватися і при інших частотах вібрації в діапазоні до 20 Гц.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

При виروشванні кристалів ефективність управління потоками в розплаві визначається способом виروشвання, геометрією зразка, транспортними та термодинамічними властивостями препарату, а також параметрами вібрації. У цій роботі зіставлено гідродинаміку розплаву при виروشванні кристалів двома методами, які в даний час розглядаються як найбільш перспективні для орбітальних експериментів — методи Бріджмена і плаваючої зони. Порівняльний аналіз отриманих розрахункових даних показує, що відмінності цих методів у формуванні потоків розплаву (як при наявності вібраційних впливів, так і без них) пов'язані з різною тепловою обстановкою в рідкій фазі. У схемі Бріджмена температура розплаву монотонно зростає вздовж аксіальної координати від температури кристалізації до температури нагрівача, зберігаючи незмінним знак температурного градієнта. У методі зонної плавки тепловий центр розплаву розташований симетрично відносно фронтів плавлення і кристалізації. Внаслідок цього при $\max|g_v| > g_0$ у схемі Бріджмена виникає нестійкість течії розплаву типу релей-тейлорівської. При використанні методу плаваючої зони рух розплаву зберігає стійкість, а вплив вібраційних збурень обмежується періодичною зміною напрямку обертання вихору. Таким чином, метод плаваючої зони є менш чутливим до вібраційних збурень. Практична важливість цього висновку пов'язана з тим, що при орбітальному польоті періодична зміна знаку сумарного прискорення відбувається практично для всіх джерел вібраційних збурень.

Чисельним експериментом встановлено, що в установці Бріджмена при відсутності вібраційного впливу виникає зона нестационарних вторинних вихорів поблизу фронту кристалізації, яка розширюється при послабленні рівня гравітаційної конвекції. У роботі [15] для тієї ж системи сукцинонітрил — ацетон і близьких умов експерименту повідомляється про наявність локального вихору, що обертається в напрямку, протилежному напрямку обертання глобального вихора. Накладення крутильних коливань призводило до розбиття такого вихору на два, що сприяє вирівнюванню концентраційної неоднорідності вздовж фронту кристалізації. В аналізованому нами випадку накладення аксіальних вібрацій при $\max|g_v| < g_0$ сприяло зникненню вторинних вихорів у схемі Бріджмена. Аналогічний ефект виявляється у числовому експерименті для методу плаваючої зони, коли пригнічувався вторинний вихор поблизу фронту кристалізації (плавлення), утворений в результаті взаємодії конвекції Марангоні та гравітаційної конвекції.

Зіставлення цих розрахункових даних вказує на необхідність подальших експериментальних досліджень впливу вібрації на гідродинаміку розплаву та процес формування кристалу. Розглянута в цій роботі математична модель побудована при істотних спрощеннях реальних експериментальних умов вирощування кристалу. Вібраційний вплив обмежувався аксіальним напрямком, а умови мікрогравітації імітувались зменшенням фонового прискорення. Разом з тим така спрощена модель дозволила встановити ряд закономірностей, які пояснюють фізичну картину досліджуваного процесу та становлять інтерес з точки зору вдосконалення експериментальних методик. Зіставлення розрахункових даних для двох методів вирощування дозволяє оцінити їхню чутливість до вібраційних збурень.

Розглянуті випадки накладення вібрації показують принципову можливість їхнього застосування для придушення нерегулярності потоків поблизу фронту. Такого роду потоки впливають не тільки на макроскопічний розподіл домішок, але й на мікросеграгаційну структуру. Відомо, що цілеспрямований розподіл домішок перед фронтом кристалізації є потужним способом управ-

ління структурою та структурно-чутливими властивостями кристалічного матеріалу [8]. Подальші кроки в даному напрямку передбачають врахування варіативності напрямку вектора мікротяжіння, тривимірне моделювання та зіставлення з реальною картиною твердіння на прозорих моделях.

ВИСНОВКИ

1. Вібраційний вплив на розплаву у процесі спрямованої кристалізації може слугувати ефективним засобом управління структурою твердіння при різних рівнях гравітаційної конвекції. Для випадку накладення вібрації уздовж осі вирощування чисельний експеримент виявив суттєві особливості руху розплаву для методів Бріджмена і плаваючої зони в двох характерних діапазонах вібраційного впливу: знакозмінного і знакосталого прискорення.

2. При накладенні низькочастотних коливань малої амплітуди ($|g_v| < g_0$) уздовж осі вирощування продемонстровано можливість придушення вторинних вихрових течій поблизу фронту кристалізації в обох методах отримання кристалів.

3. При знакозмінному вібраційному впливі ($|g_v| > g_0$) і низькій частоті вібрації можливе виникнення релей-тейлорівської нестійкості течії розплаву в методі Бріджмена.

4. В таких же умовах метод плаваючої зони характеризується стійким рухом розплаву, а вплив вібрації зводиться тільки до зміни напрямку течії розплаву. Мала чутливість до прояву релей-тейлорівської нестійкості пояснюється симетрією температурного поля розплаву вздовж аксіальної осі зразка.

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. — М.: Наука, 1972. — 296 с.
2. Демченко В. Ф., Аснис Е. А., Лесной А. Б. и др. Исследование распределенных характеристик электронного пучка, формируемого кольцевым катодом при электроннолучевой бестигельной зонной плавке // Современная электротехнология. — 2007. — № 3. — С. 20—23.
3. Жариков Е. В., Аветисов И. Х., Скоренко А. В. и др. Подготовка космического эксперимента по выращиванию кристаллов методом направленной кристаллизации в условиях вибрационного воздействия

- на Российском сегменте Международной космической станции // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2001. — № 9. — С. 56—62.
4. Земсков В. С., Раухман М. Р., Шалимов В. П. Влияние условий микрогравитации на однородность кристаллов полупроводников, выращенных на космических аппаратах методами направленной кристаллизации. Итоги и перспективы исследований в ИМЕТ РАН // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2001. — № 9. — С. 41—47.
 5. Иванов Л. И., Земсков В. С., Кубасов В. Н. и др. Плавление, кристаллизация и фазообразование в невесомости. — М.: Наука, 1979. — 256 с.
 6. Овсиенко Д. Е., Федоров О. П., Темкин Д. Е., Чемеринский Г. П. Взаимодействие твердых частиц с кристаллами, растущими из расплава // Кристаллография. — 1987. — 32, № 5. — С. 1246—1252.
 7. Патон Б. Е., Аснис Е. А., Заболотин С. П. и др. Получение совершенных материалов в космосе // Космічна наука і технологія. — 2002. — 8, № 5/6. — С. 15—18.
 8. Федоров О. П. Процессы роста кристаллов: кинетика, формообразование, неоднородности. — Киев: Наук. думка, 2010. — 207 с.
 9. Artemyev V. K., Folomeev V. I., Ginkin V. P., et al. The mechanism of Marangoni convection influence on dopant distribution in Ge space — grown single crystals // J. Crystal Growth. — 2001. — 223, N 1-2. — P. 29—37.
 10. Chopra M. A., Glicksman M. E., Singh N. B. Dendritic Solidification in Binary Alloys // Met. Trans. A. — 1988. — 19, N 12. — P. 3087—3096.
 11. Fedoseyev A. I., J. Iwan D Alexander. Investigation of vibrational control of convective flows in Bridgeman melt growth configurations // J. Cryst. Growth. — 2000. — 211, N 1—2. — P. 34—42.
 12. Fedyushkin A., Bourago N., Polezhaev V., Zharikov E. The influence of vibration on hydrodynamics and heat-mass transfer during crystal growth // J. Cryst. Growth. — 2005. — 275, N 1—2. — P. e1557—e1563.
 13. Mazzoni S., Shevtsova V., Mialdun A., et al. Vibrating liquids in space // Europhys. news. — 2010. — 41, N 6. — P. 14—16.
 14. Trivedi R., Somboonsuk K. Patter formation during directional solidification of binary systems // Acta Met. — 1985. — 33, N 6. — P. 1061—1068.
 15. Yu W. C., Chen Z. B., Hsu W. T., et al. Reversing radial segregation and suppressing morphological instability during Bridgman crystal growth by angular vibration // J. Cryst. Growth. — 2004. — 271, N 3—4. — P. 474—480.

Стаття надійшла до редакції 16.12.14

В. Ф. Демченко, О. П. Федоров

Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ В НЕВЕСОМОСТИ МЕТОДАМИ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ С НАЛОЖЕНИЕМ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

С целью подготовки космического эксперимента проведено математическое моделирование гидродинамических и тепловых процессов при выращивании кристаллов по схеме Бриджмена и методом плавающей зоны в земных условиях и в условиях микрогравитации. Изучены особенности гидродинамического состояния расплава при наложении аксиальных вибрационных возмущений различной частоты и интенсивности. Показано, что для обоих методов возможно подавление нестационарных контуров течения расплава перед фронтом, а в условиях невесомости метод плавающей зоны является менее чувствительным к проявлению релей-тейлоровской неустойчивости течения жидкой фазы.

Ключевые слова: кристаллизация, микрогравитация, гидродинамика расплавов, метод Бриджмена, метод плавающей зоны.

V. F. Demchenko, O. P. Fedorov

Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

FEATURES OF THE CONTROL OF SOLIDIFICATION STRUCTURE USING DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION WITH SUPERIMPOSED VIBRATION EXPOSURE UNDER WEIGHTLESSNESS CONDITIONS

For the purpose of preparing a space experiment, we accomplished a mathematical simulation of the hydrodynamic and thermal processes during crystal growing by the Bridgeman and the floating zone techniques under terrestrial and microgravity conditions was held. The features of the hydrodynamic state of the melt when exposed to axial vibration of different frequencies and intensities were studied. It is shown that the suppression of non-stationary contours of melt flow before the crystallization front is possible in both methods, but the floating zone method is less sensitive to Rayleigh-Taylor instability of liquid phase flow under weightlessness conditions.

Key words: crystallization, microgravity, melt flow, Bridgman technique, floating zone technique.