

Винахід стосується способів вирощування кристалів за методом Чохральського, переважно в автоматичному режимі.

Відомі способи вирощування кристалів за методом Чохральського, у тому числі в автоматичному режимі, наприклад, [патент Російської Федерації за №2023063 С30В15/00]. Спосіб дозволяє в автоматичному режимі здійснювати вирощування кристалів починаючи з моменту дотику затравки до поверхні розплаву. Проте, стадія затравлювання, тобто, процес підводу затравки до поверхні розплаву аж до механічного контакту з ним, не автоматизована, хоча має важливе значення з огляду на тривалість цього процесу та вплив його перебігу на успіх подальших технологічних переходів, особливо на стадію вирощування перетяжки. Тривалість процесу отримання перетяжки, серед інших факторів, залежить від концентрації мікротріщин у затравці, яка, у свою чергу залежить від градієнту температур, який виникає у ній у процесі її наближення до розплаву.

Автоматичний контроль цих параметрів можливий у разі контролю відстані між затравкою та поверхнею розплаву.

Відомі способи вирощування монокристалів за методом Чохральського з використанням датчика рівня розплаву [патент Російської Федерації №212850 С30В15/20, патент України №46202 С30В15/02] у яких положення спеціального щупа відносно поверхні розплаву контролюється по наявності чи відсутності електричного контакту між ними, тобто, по дискретній зміні опору ділянки електричного кола щуп-поверхня розплаву.

Однак, такий спосіб контролю відстані до поверхні розплаву не придатний для визначення відстані між затравкою та поверхнею розплаву як з огляду на те, що спеціальний щуп ніяк не пов'язаний з затравкою, так і на те, що сигнал датчика має логічний характер (є чи нема контакту зі щупом) і не дає змоги визначати фактичну відстань між ним та поверхнею розплаву. Отже, ці способи не дають змоги контролювати відстань між затравкою та поверхнею розплаву на стадії затравлювання, а значить і автоматизувати цю стадію вирощування кристала.

Найближчим до пропонованого способу вирощування кристалів є спосіб [за патентом США №6,497,761 С30В15/20 – прототип].

Згідно з ним, кристал вирощують за методом Чохральського з контролем опору ділянки кола затравка-розплав, проте цей контроль здійснюють лише при наявності механічного контакту між затравкою (а точніше, зростаючим кристалом) та поверхнею розплаву. Тут сама затравка приймає безпосередню участь у процесі контролю опору ділянки кола затравка-розплав, проте тільки при механічному контакті між ними. Отже, і у цьому випадку контрольований опір ділянки кола затравка-розплав не несе ніякої інформації про відстань між затравкою та поверхнею розплаву до моменту їх механічного контакту, тобто, не може бути використана для керування процесом затравлювання та автоматизації цього процесу.

Пропонується спосіб вирощування кристалів за методом Чохральського за яким контролюють опір ділянки кола затравка-розплав починаючи з моменту переходу до стадії затравлювання, тобто ще до того, як затравка увійде у механічний контакт з поверхнею розплаву. Фізична суть цього опору обумовлена термоелектронною емісією з поверхні розплаву, яку можна виявити на значній відстані від поверхні розплаву, оскільки процес ведуть при розрідженій атмосфері. Так, наприклад, при проведенні вирощування кристалів кремнію, відчутна зміна опору проміжку затравка-поверхня розплаву спостерігається на відстані понад 500мм. Це створює передумови для використання значення цього опору для визначення відстані від затравки до поверхні розплаву і, таким чином, контролю процесу наближення затравки до поверхні розплаву, забезпечивши необхідні умови виконання цього процесу, наприклад, неперевищення допустимого градієнта температур у затравки і уникнувши, таким чином, росту концентрації наявних механічних дефектів затравки та мінімізувавши тривалість процесу затравлювання.

На Фігурі 1 приведені типові залежності опору проміжку затравка-поверхня розплаву, на Фігурі 2 приклад схеми пристрою для реалізації способу, на Фігурі 3 залежність вихідної напруги пристрою від відстані затравка-поверхня розплаву.

Оскільки носіями електричного струму у даному разі є електрони, то опір проміжку затравка-поверхня розплаву буде проявлятися при позитивній полярності прикладеної відносно розплаву напруги до затравки, яка відіграє роль своєрідного анода по відношенню до емітента електронів, яким є поверхня розплаву - катода. Опір проміжку затравка-поверхня розплаву є пропорційним усередненому по довжині проміжку значенню концентрації термоелектронів, яка, у свою чергу, обернено пропорційна відстані до поверхні розплаву. Типова залежність опору проміжку затравка-поверхня розплаву при сталих параметрах процесу (перш за все, це температура розплаву та тиск у камері печі), приведена на Фігурі 1, залежність а. Як бачимо, основна частина залежності є практично лінійною, що дозволяє легко її використати для формування потрібної швидкості переміщення затравки до розплаву, забезпечивши потрібні параметри процесу затравлювання, наприклад, сталий градієнт температури у затравки, що сприяє відсутності розвитку тріщин на поверхні затравки і, загалом, скорочує тривалість самого процесу затравлювання. (Дотепер затравлювання проводиться в режимі ступінчатого наближення затравки до розплаву з витримкою у часі між цими наближеннями для зменшення градієнту температур у затравки, тобто, із неконтрольованим запасом у часі для гарантування якості процесу).

Як видно з наведеної Фігури 1, при дотику затравки до поверхні розплаву (відстань рівна нулю, точка 1), спостерігається скачок опору, що зумовлено наявністю скачка різниці потенціалів на границі розподілу розплав-вакуум, тобто, поверхня розплаву має позитивний потенціал в силу того, що вона імітує електрони. Отже, цей скачок опору дає нам момент дотику затравки до поверхні розплаву. Однак, ця зміна є відносно малою і її використання є небажаним, хоча і можливим.

Якщо до затравки прикласти від'ємну напругу відносно розплаву, то опір проміжку затравка-поверхня розплаву буде мати практично нескінченне значення, що впливає з електронного характеру провідності у проміжку.

Однак, при механічному дотоку затравки до поверхні розплаву, опір скачком зменшується до значення, практично рівного опору при позитивній полярності напруги на затравці у момент її дотику до розплаву. Типова залежність опору від відстані затравка-поверхня розплаву при негативній полярності напруги на затравці відносно розплаву, приведена на Фігурі 1, б.

Як бачимо, скачок опору у момент дотику затравки до поверхні розплаву є набагато більшим, отже, момент

дотику затравки до поверхні розплаву. в даному випадку можна фіксувати набагато легше.

З розгляду залежності, приведеної на Фігурі 1, а видно, що швидкість зміни опору від відстані затравка-поверхня розплаву на близьких відстанях практично зменшується до нуля, отже похибка визначення відстані у цьому випадку є значною а система автоматичного регулювання швидкістю руху затравки може стати нестійкою.

Доцільно, при підході затравки до поверхні розплаву на близьку відстань, коли провідність проміжку затравка-поверхня розплаву досягне певного значення (кінець лінійної ділянки, точка 2 на Фігурі 1, а), встановити швидкість руху затравки незмінною, а полярність напруги, прикладеної до затравки, змінити на від'ємну відносно розплаву. Це відповідає переходу значення опору затравка-розплав з точки 2 на Фігурі 1, а у точку 3 на Фігурі 1, б. При подальшому русі затравки до поверхні розплаву, у момент часу, коли буде зафіксований скачок опору (перехід у точку 1 на Фігурі 1), матимем момент дотику затравки до поверхні розплаву, чим завершується процес затравлювання.

Спосіб вирощування кристалів здійснюють так. Встановлюють максимальну робочу швидкість переміщення затравки до розплаву, встановлюють позитивну напругу на затравці відносно розплаву і постійно контролюють опір проміжку затравка-поверхня розплаву. У момент часу (точка 4 на Фігурі 1, а), коли буде встановлено зменшення опору, швидкість переміщення затравки змінюють у відповідності до зміни опору, тобто, здійснюють контрольоване переміщення затравки до поверхні розплаву. Закон зміни швидкості у функції опору може бути різним, в залежності від того, які вимоги ставляться до перебігу процесу затравлювання.

При зменшенні опору до наперед встановленого значення (точка 2 на Фігурі 1, а), встановлюють незмінну (незалежну від відстані до поверхні розплаву) швидкість переміщення затравки, встановлюють від'ємну полярність напруги на затравці відносно розплаву та продовжують контролювати опір проміжку затравка-поверхня розплаву. (перехід у точку 3 на Фігурі 1, б), очікуючи скачка опору (точка 1 на Фігурі 1). Скачок опору засвідчує момент часу закінчення процесу затравлювання і переходу до стадії вирощування перетяжки.

Зазначимо, що окремі кроки запропонованого способу можуть бути відсутні або повторюватися декілька разів. Наприклад, при практичній реалізації способу можуть спостерігатися спонтанні скачки контрольованого опору внаслідок електромагнітних завад з боку потужного нагрівача, тощо. Згідно з пропонуваним способом, у цьому випадку може бути проведена зміна полярності напруги на затравці відносно розплаву, аби переконатися, що дотику до розплаву насправді нема (опір прямує практично до нескінченності), оскільки у протилежному випадку опір буде мати значення опору при дотику затравки до розплаву. У іншому варіанті, перемикання полярності напруги на затравці може не бути, оскільки в умовах конкретного технологічного процесу величина скачка опору, при дотику затравки до поверхні розплаву та при позитивній полярності напруги на затравці відносно розплаву, є достатньою для того, аби встановити момент дотику до розплаву достатньо впевнено.

Приклад пристрою для практичної реалізації запропонованого способу приведено на Фігурі 2.

На цій Фігурі тигель 1 з розплавом взаємодіє шляхом термоелектронної емісії з затравкою 2, яка з'єднана з входом повторювача 3 напруги на проміжку затравка 2 - поверхня розплаву у тиглі 1, та з резистором 4, котрий з'єднаний з перемикачем 5 полярності напруги джерела 6 живлення. Роль повторювача 3 напруги у пристрої зводиться до забезпечення високого вхідного опору, чим усувається вплив на проміжок затравка-поверхня розплаву подальшої частини пристрою, яка не показана на Фігурі.

Напруга $U_{вих}$ на виході повторювача 3 напруги тут пропорційна опору проміжку затравка-поверхня розплаву, а саме:

$$U_{вих} = K E_0 R_x / (R_0 + R_x) \approx K E_0 R_x / R_0.$$

де: K - коефіцієнт передачі повторювача 3 напруги;

E_0 - напруга джерела 6 живлення;

R_x - опір проміжку затравка-поверхня розплаву;

R_0 - опір резистора 4.

У схемі для основного діапазону зміни відстані між затравкою та поверхнею розплаву забезпечувалось співвідношення $R_0 \gg R_x$, що і зумовлює останнє наближене співвідношення у приведеному виразі.

У конкретному випадку мали такі параметри пристрою: $E_0 = 4В$, $K = 1$, $R_0 = 250кОм$, при цьому діапазон зміни напруги на виході повторювача 3 напруги був $0...3,6В$, скачок напруги у момент дотику затравки до поверхні розплаву при позитивній полярності напруги на затравці сягав $+0,5В$ (точка 1 на Фігурі 3, а). Вихідна напруга для випадку негативної полярності напруги, прикладеної до затравки відносно розплаву, приведена на Фігурі 3, б. Скачок напруги у момент дотику затравки до розплаву для цього випадку становив від $-3,6В$ до $-0,5В$.

Отже, спираючись на наведені дані, можна твердити, що практична реалізація запропонованого способу на викликає технічних труднощів і може бути реалізована на сучасному рівні техніки.

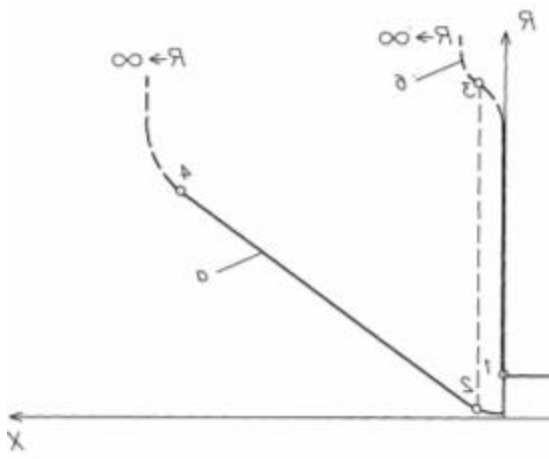


Рис. 1

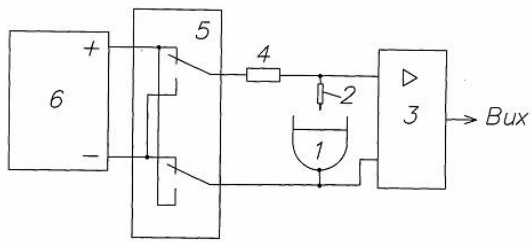


Рис. 2

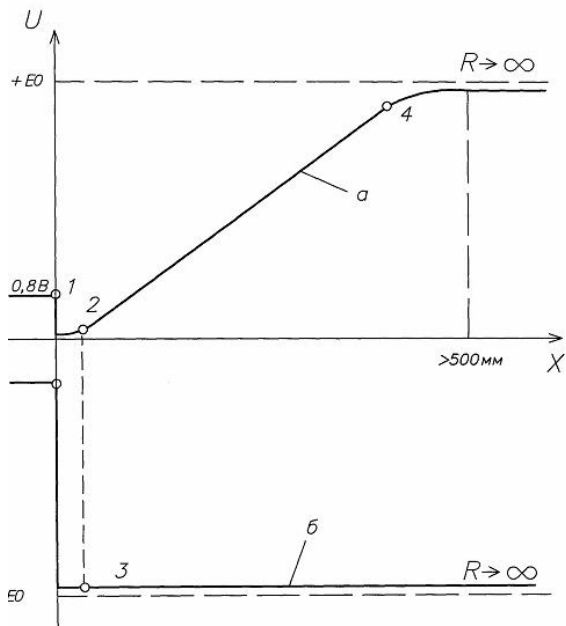


Рис. 3