

669.7
П59

прор. н.т.р.

Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу

Логов

Порєв Геннадій Володимирович

УДК 621.307.13

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ
ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОННО-
ПРОМЕНЕВОЇ БЕЗТИГЕЛЬНОЇ ЗОННОЇ ПЛАВКИ**

05.11.13 — Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ — 2004

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ
Дата <u>09 03 04</u>
Реєстр. № <u>46.27.76</u>

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Науково-дослідному інституті прикладної електроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор Якименко Юрій Іванович, Національний технічний університет України "КПІ", завідувач кафедри мікроелектроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Пістун Євген Павлович, Національний університет „Львівська політехніка”, завідувач кафедри автоматизації теплових і хімічних процесів;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Примиський Володислав Пилипович, Український науково-дослідний інститут аналітичного приладобудування, завідувач відділу.

Провідна установа Вінницький національний технічний університет, кафедра метрології та промислової автоматики, м. Вінниця

Захист дисертації відбудеться "16" квітня 2004 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.20.052.03 в Івано-Франківському національному

Франківськ, вул. Карпатська 9, м.Івано-

З дисертацією Франківськ,

вул. Карпатська

Автореферат рс

Вчений секретар

кандидат техніч чук





Актуальність теми

Електронно-променева безтигельна зонна плавка (ЕПБЗП) відноситься до найбільш перспективних технологій отримання матеріалів із заданими властивостями, в тому числі надчастих напівпровідників, які є основою мікроелектроніки та інших важливих галузей науки і техніки.

Очевидно, що належна якість продукції може бути забезпечена тільки при дотриманні технологічних вимог щодо найважливіших параметрів плавки – температури та висоти зони розплаву (ЗР), що крім досконалої технології плавки вимагає адекватних методів і технічних засобів контролю.

Такі методи і технічні засоби повинні забезпечувати вимірювання параметрів ЕПБЗП на рівні сучасних вимог протягом всього циклу плавки, і в першу чергу, забезпечити необхідну точність вимірювання параметру в усьому діапазоні його зміни.

По-друге, такі методи і технічні засоби повинні створити умови для накопичення експериментального матеріалу щодо перебігу плавки, який буде використаний для розробки як методології контролю плавки, так і вдосконалення самої технології ЕПБЗП.

На сьогодні отримано достатньо теоретичних та експериментальних матеріалів, з яких випливає висновок, що серед усіх технічних засобів, які можуть бути використані для вимірювання температури та висоти ЗР, повністю адекватними задачі є тільки телевізійні засоби. Дійсно, сучасні телевізійні прилади в змозі одночасно забезпечити найвищі серед усіх інших засобів показники щодо просторового розрізнення, формату та часу формування виборки, що надає їм суттєві переваги при вимірюванні параметрів ЗР, в тому числі в плані точності вимірювань. Впровадження телевізійних засобів та спеціально розроблених методів в технологію зонної плавки дозволило в цілому вирішити проблему її контролю.

Але деякі питання, важливі з точки зору точності вимірювання параметрів ЗР, не вирішені і до цього часу. До таких питань, зокрема, належать наступні.

По-перше, це низька ефективність існуючих методик компенсації нерівномірності чутливості світлоселективного перетворювача (СЕН) та пов'язана з цим недосконалість методів визначення ефективної довжини хвилі (ЕДХ) телевізійних засобів вимірювання (ТЗВ), що може бути джерелом похибок вимірювання температури.

По-друге, обумовлені прагненням зменшити поверхневий градієнт температури розробка нових режимів плавки та введення в конструкції сучасних вакуумних камер додаткових елементів змінюють характер перевідбиття випромінювання, отже, змінюють алгоритм формування поля яскравості ЗР, що, в свою чергу, вимагає як розробки нових моделей формування поля яскравості ЗР, так і перегляду та вдосконалення існуючих методів вимірювання температури.

По-третє, існуючі методи вимірювання висоти ЗР за допомогою ТЗВ не

враховують останніх результатів досліджень поля яскравості на межі твердої і рідкої фаз, що зменшує точність вимірювання висоти.

Невирішеність вказаних питань перешкоджає ефективному застосуванню телевізійних засобів для вимірювання параметрів ЗР, стримує розвиток технології ЕПБЗП і ускладнює розв'язання однієї з найактуальніших проблем технічного розвитку України — становлення на якісно новому рівні вітчизняної напівпровідникової електроніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” у відповідності з планами держбюджетних науково-дослідних робіт: «Теорія процесу формування поля яскравості зони плавки кремнію (електронно-променева безтигельна зонна плавка)» (№ держреєстрації 0100U000625); «Наукові основи та методологія комплексного контролю і комп'ютеризованого керування в електронно-променевої технології безтигельної плавки» (№ держреєстрації 0102U002215); та у відповідності з технічними завданнями госдоговорних науково-дослідних робіт: “Розробка та експериментальна перевірка методики аналізу параметрів зони плавки в реальному масштабі часу” (№ держреєстрації 0199U000488); “Розробка методу експериментального дослідження температурного поля на поверхні монокристалу кремнію” (№ держреєстрації 0199U000487), які виконувались в рамках Національної космічної програми України “Міжнародна орбітальна станція - 2”, проект “Розробка науково-технологічних основ одержання унікальних матеріалів в космосі та створення спеціалізованої технологічної апаратури”, (шифр “Технологія”).

Мета роботи — підвищення точності вимірювання параметрів ЕПБЗП шляхом створення методів вимірювання, які базуються на експериментально встановлених закономірностях розподілу яскравості на поверхні ЗР.

Об'єкт дослідження — параметри ЕПБЗП, яка провадиться в вакуумній камері з метою отримання надчистих напівпровідникових матеріалів та матеріалів з заданими властивостями.

Предмет дослідження — технічні засоби та методи вимірювання висоти і температури зони розплаву.

Методи дослідження — математичне моделювання поля яскравості, методи теоретичної пірометрії, методи теорії похибок та обробки результатів експериментальних досліджень, методи об'єктно-орієнтованого програмування.

Задачі роботи:

1. Дослідження факторів, які визначають точність вимірювання висоти ЗР та температури її поверхні.
2. Розробка методик оцінки похибок вимірювання температури поверхні ЗР, обумовлених нерівномірністю чутливості СЕП, похибкою визначення ЕДХ та перевибиттям випромінювання.

3. Розробка і дослідження математичної моделі поля яскравості ЗР при наявності перевідбиття випромінювання в вакуумній камері та створення на цій основі вдосконаленого методу вимірювання температури ЗР.
4. Розробка методики, пристрою та програмного забезпечення для проведення експериментального дослідження розподілу яскравості поверхні ЗР на різних режимах плавки.
5. Створення методу підвищення точності вимірювання температури ЗР, який базується на експериментальному визначенні складової яскравості, обумовленої перевідбиттям випромінювання.
6. Розробка методу підвищення точності вимірювання висоти ЗР шляхом вдосконалення алгоритму виділення контуру зображення межі ЗР.
7. Створення методик, пристрою та програмного забезпечення для експериментального дослідження характеристик ТЗВ, які обумовлюють точність вимірювання параметрів ЗР.
8. Розробка методики оцінки перевищення температури поверхні рідкої фази над температурою плавлення кременю.

Наукова новизна

Створена математична модель поля яскравості ЗР при наявності перевідбиття випромінювання в вакуумній камері, на базі якої розроблено метод вимірювання температури та методику оцінки похибки, обумовленої неврахуванням перевідбиття випромінювання.

Розроблено метод підвищення точності вимірювання температури ЗР, який передбачає експериментальне визначення складової яскравості, обумовленої перевідбиттям випромінювання.

Вперше отримана аналітична залежність, яка пов'язує похибку вимірювання температури ЗР з нерівномірністю чутливості СЕП.

Створено метод підвищення точності вимірювання висоти ЗР, який базується на вдосконаленому алгоритмі виділення контуру зображення межі ЗР.

Вперше експериментально отримані функції розподілу яскравості та температури на поверхні ЗР для різних режимів плавки. Встановлено, що функція розподілу температури по висоті ЗР несиметрична, а збільшення швидкості переміщення ЗР приводить до збільшення температурного градієнту на поверхні рідкої фази.

Практична цінність

1. Створено методику визначення ЕДХ, яка враховує особливості світлосигнальної характеристики ТЗВ.
2. Розроблено методики, пристрій та програмне забезпечення для експериментального дослідження характеристик ТЗВ.
3. Вперше експериментально визначена температура, яка відповідає нижній межі температурного діапазону ТЗВ на основі ЛЗЗ-камери OS2511.

4. Розроблена методика оцінки перевищення температури поверхні рідкої фази над температурою плавлення кремнію.
5. Розроблені в дисертації методи і програмне забезпечення вимірювання параметрів ЗР та результати дослідження характеристик ТЗВ впроваджені в дослідну експлуатацію технологічного пристрою для ЕПБЗП в ІЕЗ ім. С. О. Патона, що підтверджено відповідним актом.
6. Програмне забезпечення для дослідження розподілу яскравості ЗР на різних режимах ЕПБЗП, яке створене з використанням сучасних засобів розробки в об'єктно-орієнтованій моделі програмування, може бути використане також в інших задачах, пов'язаних з вимірюванням геометричних та амплітудних параметрів зображень.
7. Матеріали дисертаційної роботи використані в навчальному процесі Національного авіаційного університету при формуванні робочої навчальної програми дисципліни „Основи телебачення” та в навчальному процесі Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут” при формуванні робочої навчальної програми дисципліни „Телевізійні наукові та технологічні прилади і системи”, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача

Нові наукові результати, які викладені в дисертації та авторефераті, належать особисто автору. В роботах, опублікованих в співавторстві, авторові належить: [2] — математична модель поля яскравості ЗР при наявності перевідбиття випромінювання в вакуумній камері, методика оцінки похибки вимірювання температури та метод підвищення точності вимірювання температури ЗР; [3] — обґрунтування підходів до визначення характеристик ТЗВ; [4] — спільна розробка і постановка задачі, обчислювальний алгоритм, участь в експерименті; [5] — обґрунтування і розробка методу виділення контуру зображення, який базується на експериментально встановлених закономірностях формування поля яскравості, і реалізується послідовним визначенням відносних перепадів сигналу; [6] — аналіз джерел методичних похибок ТЗВ; [7] — обґрунтування методу підвищення точності вимірювання температури ЗР шляхом експериментального визначення складової яскравості, обумовленої перевідбиттям випромінювання; [8] — обґрунтування методу підвищення точності вимірювання висоти ЗР; [11] — розробка методики програмної корекції нерівномірності чутливості;

Апробація результатів дисертації

Результати роботи обговорювались на Науково-технічній конференції з міжнародною участю “Приладобудування-96” (м. Вінниця — 1996); 6-му Міжнародному молодіжному форумі «Радиоелектроника и молодёжь в XXI веке» (м. Харків — 2002); Третій Українській конференції з перспективних космічних досліджень (Кацівелі — 2003); Конференції “Приладобудування 2002” (м. Київ -

2002); Конференції “Приладобудування 2003” (м. Київ — 2003), а також на наукових семінарах НДІ спеціального приладобудування „Спектр”, НДІ прикладної електроніки НТУУ “КПІ”, кафедри “Наукові, аналітичні та екологічні прилади і системи” НТУУ “КПІ”, кафедри „Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції” ІФНТУНГ.

Публікації

Основні наукові результати і положення роботи викладені в 6 статтях в наукових журналах, 1 збірнику наукових праць, 1 патенті України, 4 тезах конференцій.

Структура та обсяг роботи

Робота складається із вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку літератури та 2 додатків. Обсяг роботи : 110 сторінок основного тексту, 62 рисунки, 5 таблиць, список літератури — 77 найменувань на 8 стор.. Загальний обсяг роботи — 183 сторінки.

Основний зміст роботи

У вступі обґрунтовано актуальність теми та необхідність вдосконалення методів і засобів вимірювання параметрів ЕПБЗП. Сформульовані мета і задачі дослідження. Визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, показаний зв'язок роботи з науковими програмами.

В першому розділі на основі аналізу літературних даних та з врахуванням результатів виконаних за участю автора експериментальних досліджень сформульовані вимоги до точності вимірювання параметрів ЗР. Показано, що технічні засоби повинні забезпечувати на поверхні ЗР вимірювання висоти з похибкою не більше 0.1 мм і температури – не більше 3 К. В той же час існуючі методи та найбільш досконалі засоби забезпечують вимірювання з похибкою 0.2 мм та 5 К, відповідно.

Виконано дослідження факторів, які визначають точність вимірювання висоти та температури поверхні ЗР. Зроблено висновок, що основний внесок в сумарну похибку вимірювання вносять методичні похибки.

При аналізі методик компенсації нерівномірності чутливості СЕП показано, що принциповим недоліком існуючих методик компенсації є те, що двовірна матриця компенсації формується при одному значенні освітленості.

Виконано аналіз шляхів підвищення точності вимірювання параметрів ЗР. Встановлено, що підвищення точності вимірювання параметрів ЗР неможливе без дослідження особливостей формування поля яскравості поверхні ЗР та розробки на цій основі досконалих методів вимірювання. Показано, що точність вимірювання параметрів ЗР може бути підвищена також за рахунок покращення точносних характеристик технічних засобів та вдосконалення методик їх використання. До сукупності актуальних задач, спрямованих на вдосконалення ТЗВ, віднесено визначення нижньої межі температурного діапазону та еквівалентної шуму різниці

яскравісних температур; підвищення точності визначення ЕДХ; створення методики, яка б дозволила вибирати допустиму нерівномірність чутливості СЕП, при якій забезпечується необхідна точність вимірювання температури.

В другому розділі обґрунтовано методику формування тривимірної матриці компенсації для сукупності значень освітленості E_1, E_2, \dots, E_k в робочому діапазоні ТЗВ. Зважаючи на ту обставину, що процес вимірювання температури поверхні ЗР характеризується порівняно вузьким діапазоном змін освітленості мішені СЕП ($E_{\min}=0.72E_{\max}$), формування компенсуючої матриці доцільно обмежити значеннями $E_1=E_{\min}, E_2=E_{\max}$.

Вперше отримана залежність, яка пов'язує похибку ΔT_n вимірювання температури ЗР з нерівномірністю Н чутливості СЕП

$$\Delta T_n = \frac{2N(T_0 + \Delta T_n)}{B - \ln[A_0 + T_n \cdot \alpha]} \quad (1)$$

де ΔT_n — перевищення температури поверхні ЗР над температурою плавлення T_0 , а A_0 — значення сигналу при температурі T_0 , α — кут нахилу світлосигнальної характеристики, B — константа, яка враховує умови експерименту.

Розроблена методика, що дозволяє обґрунтовано вибирати допустиму нерівномірність чутливості N , при якій забезпечується необхідна точність вимірювання температури.

Розроблена методика дослідження похибки $\Delta \lambda$ визначення ЕДХ і запропонована формула для оцінки $\Delta \lambda$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_e}{1 + \frac{C_2 \cdot \Delta T}{\lambda_e \cdot T_1^2} \cdot \frac{k_{n1}}{\ln \frac{k_{n2}}{k_{n1}}}}, \quad (2)$$

де $C_2=14400$ мкм·К, k_{n1}, k_{n2} — тангенси кутів нахилу сусідніх ділянок світлосигнальної характеристики, $\Delta T=T_2-T_1$, λ_e — ЕДХ, яка визначається за сигналами, утвореними одним і тим же пікселом при температурах T_1 і T_2 .

Показано, що в діапазоні температур плавки ця похибка може досягати значень 0.1...0.6 мкм (рис.1), що на порядок перевищує допустиму.

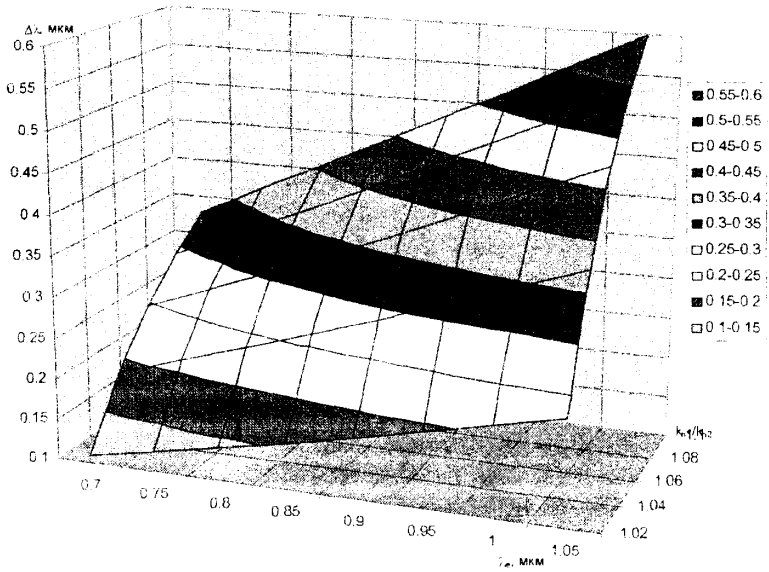


Рис.1. Похибка визначення ЕДХ ($T_1=1685$ К, $\Delta T=15$ К, $50^\circ \leq \alpha \leq 52^\circ 30'$).

Розроблена методика визначення ЕДХ за пірометричними сигналами $A(\lambda_c, T_1)$ і $A(\lambda_c, T_2)$, утвореними одним і тим же пікселем при температурах T_1 і T_2 з врахуванням реального характеру перетворення освітленості СЕП у вихідний сигнал, яка дозволяє зменшити вказану похибку

$$\lambda_c = \frac{C_2 [T_1^{-1} - T_2^{-1}]}{\ln A(\lambda_c, T_2) - \ln A(\lambda_c, T_1) + \ln \frac{k_{n1}}{k_{n2}}} \quad (3)$$

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що значення λ_c можуть виявитися різними для різних зон СЕП. Отже, при контролі температури по зображенню значних розмірів кожний результат по λ_c повинен співвідноситись з координатами в площині СЕП.

У відповідності зі схемою формування складових ефективної яскравості випромінювання в системі, утвореній катодом 1, ЗР 2 і фрагментом 3 перевідбиваючої поверхні (рис.2), розроблена математична модель поля яскравості ЗР при наявності перевідбиття.

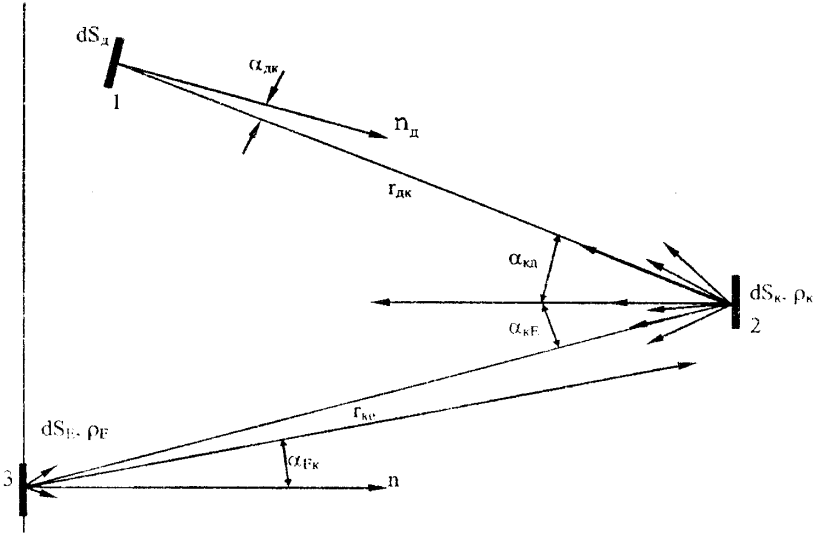


Рис.2. Схема формування складових ефективної яскравості. ρ_k, ρ_E — коефіцієнти відбиття ЗР і перевідбиваючої поверхні; $\alpha_{dk}, \alpha_{kd}, \alpha_{ek}, \alpha_{ek}$ — кути між нормальними до dS_d, dS_k і dS_E та лініями r_{dk} і r_{kE} , що з'єднують їх центри.

Отримано аналітичний вираз для ефективної яскравості $L_{\text{еф}}$ випромінювання, яке попадає у вхідну апертуру ТЗВ

$$\begin{aligned}
 L_{\text{еф}} = & L_0 + \rho_k L_d \int_{S_d} \frac{\cos \alpha_{dk} \cos \alpha_{kd}}{\pi r_{dk}^2} dS_d + \\
 & + \rho_k \rho_E L_0 \int_{S_k} \frac{\cos \alpha_{ek} \cos \alpha_{ke}}{\pi r_{ek}^2} dS_k \int_{S_E} \frac{\cos \alpha_{Ek} \cos \alpha_{kE}}{\pi r_{kE}^2} dS_E + \\
 & + \rho_k^2 \rho_E L_d \int_{S_d} \frac{\cos \alpha_{dk} \cos \alpha_{kE}}{\pi r_{dk}^2} dS_d \times \\
 & \times \int_{S_k} \frac{\cos \alpha_{Ek} \cos \alpha_{kE}}{\pi r_{kE}^2} dS_k \int_{S_E} \frac{\cos \alpha_{Ee} \cos \alpha_{kE}}{\pi r_{kE}^2} dS_E
 \end{aligned} \quad (4)$$

де S_d, S_k, S_E — площі поверхонь катоду, ЗР і перевідбиваючої поверхні.

На основі математичної моделі розроблено метод визначення яскравісної температури T_e поверхні ЗР з врахуванням перевідбиття випромінювання

$$T_e = \frac{T_s}{1 - T_s \frac{\lambda}{C_s} \ln[1 + \varphi_{FE} \rho_{FE} \rho_k \rho_E]} \quad (5)$$

де T_s — яскравісна температура без врахування перевідбиття випромінювання; $\Phi_{кЕ}$, $\Phi_{ЕК}$ — середні кутові коефіцієнти випромінювання кристалу на фрагмент поверхні і фрагменту поверхні на кристал.

Відносна похибка вимірювання температури при неврахуванні перевідбиття може бути визначена за формулою

$$\delta_1 = T_s \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[1 + \Phi_{ЕК}^2 \frac{S_E}{S_K} \rho_K \rho_E \right]. \quad (6)$$

Показано, що при вимірюванні температури ЗР кремнію методами, які не враховують перевідбиття випромінювання, похибка може досягати 5 і більше градусів.

Запропоновано метод підвищення точності вимірювання температури, який базується на уточнених закономірностях формування функції яскравості поверхні ЗР і передбачає експериментальне визначення складової сумарного сигналу, обумовленої перевідбиттям випромінювання. Реалізується метод шляхом одночасного аналізу основного сигналу, утвореного зображенням фрагменту зони dS_K , та додаткового, утвореного зображенням фрагменту катоду. В полі зору приладу виділяємо 2 пікселя — перший в межах зображення рідкої фази, другий — в межах зображення катоду. В інтервалі $t_1 \dots t_2$ по виборці n кадрів визначаємо середнє значення сформованого першим пікселем сигналу A_{P1} , яке пропорційне ефективній яскравості. В момент t_3 вимикаємо високу напругу і яскравість ЗР починає зменшуватись, відповідно сигнал, який формується першим пікселем, зменшується до значення A_{P2} .

В момент t_4 вимикається напруга живлення катоду і його яскравість, відповідно і сигнал $A_{P1}(t)$, який формується другим пікселем, починають швидко зменшуватись. В момент t_5 , коли сигнал $A_{P1}(t_5)$ зменшується до рівня шуму, визначаємо середнє значення сигналу A_{P3} , сформованого зображенням фрагменту рідкої фази при відсутності сторонніх джерел випромінювання.

Виключивши компоненту $(A_{P2} - A_{P3})$ із сигналу A_{P1} , отримаємо сигнал A , обумовлений власним випромінюванням поверхні ділянки dS_K .

Визначення температури поверхні ЗР провадиться за формулою

$$T = \beta [V - \ln A]^{-1}, \quad (7)$$

де $\beta = 21176 \text{ K}$ — параметр приладу,

V — константа, яка враховує умови експерименту.

В третьому розділі експериментально встановлено характер сигналу на межі твердої і рідкої фаз (рис.3), з якого можна зробити висновок про розміри та лінійність перехідної області. Показано, що при застосуванні існуючих методів похибка вимірювання висоти ЗР на поверхні кристалу становитиме 210 мкм. Така точність не може вважатися достатньою при вимірюванні висоти ЗР.

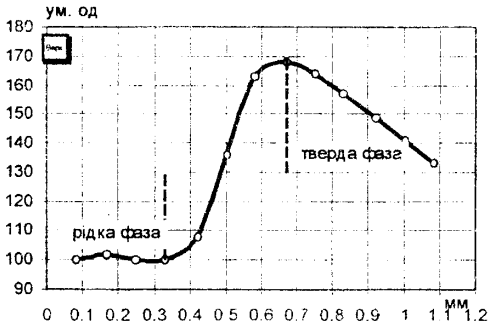


Рис.3. Зміни сигналу на межі твердої і рідкої фаз.

Показано, що точність вимірювання висоти, тобто різниці координат верхньої і нижньої меж ЗР, в першу чергу залежить від точного виділення контуру меж ЗР, які є лініями складної форми. Точне виділення контуру важливе як при визначенні висоти ЗР для будь-якої координати, так і при визначенні середнього значення висоти ЗР для заданого контуру.

Розроблено метод вимірювання висоти ЗР, який враховує характер сигналу на межі фаз. При цьому програмне забезпечення приладу доповнюється алгоритмом деталізації, згідно з яким висота зображення ЗР визначається за формулою

$$h_{\text{зд}} = (Y_{i,k-1} - Y_{i,j+1}) + \frac{\Delta_y}{N} (l_k + l_j), \quad (8)$$

де $N = \frac{A_T - A_P}{3 \cdot 2\sigma_P}$; A_T , A_P — сигнали, утворені фрагментами твердої і рідкої фаз; σ_P — середнє квадратичне відхилення сигналу в межах зображення рідкої фази; l_k , l_j — кількість ділянок розміром Δ_y/N , зайнятих зображенням ЗР в межах пікселя (i ; k) та пікселя (i ; j); Δ_y — розмір пікселя; $Y_{i,j+1}$, $Y_{i,k-1}$ — координати піксел, які повністю знаходяться в межах зображення ЗР.

Використання даного методу та вдосконаленого алгоритму виділення контуру дозволяє зменшити похибку вимірювання висоти ЗР на поверхні кристалу до 100 мкм, що цілком відповідає сучасним вимогам.

Показано, що наявність перевідбитого випромінювання приводить до зменшення контрасту на межі фаз у відповідності з формулою

$$K = K_c \left(1 + \frac{2L''(\lambda, T_p)}{L_r(\lambda, T_T) + L_p(\lambda, T_p) + 2L'(\lambda, T) + 2L''(\lambda, T_r)} \right), \quad (9)$$

де $L_T(\lambda, T_T)$, $L_P(\lambda, T_P)$ — яскравості власного випромінювання сусідніх ділянок твердої та рідкої фаз, якими визначається контраст K_c ; L' , L'' — компоненти яскравості цих ділянок, утворені за рахунок відбитого і перевідбитого

випромінювання катоду. Зменшення контрасту на межі фаз означає збільшення порогового контрасту, тобто зменшення роздільної здатності.

Для виділення контурів меж ЗР розроблено алгоритми адаптивного пошуку і показано, що задача зводиться до визначення відносних перепадів сигналу (ВПС) по вибраній групі послідовних піксел.

Базовою одиницею алгоритму, що автоматично здійснює пошук ВПС, є чутливий маркер (ЧМ) — об'єкт, який складається з одномірного масиву даних M , показника довжини масиву, процедур визначення перепадів GetDiff та знаходження центру мас GetCenter .

Алгоритм формує масив сигналів L , в якому, імовірно, присутній відносний перепад величин. Для запуску алгоритму викликаюча програма повинна задати такі параметри: показник довжини масиву L_L , напрямок руху ЧМ (прямий чи зворотній), потрібна довжина ЧМ L_M , крок ЧМ S_M , величина відносного перепаду D . Функціонування алгоритму протікає в тілі умовного циклу, умовою виходу з якого є або знаходження ВПС, або помилка, пов'язана з виходом ЧМ за межу масиву сигналів L . На початку циклу у властивість M екземпляру об'єкту ЧМ завантажується частина масиву L з позиції $P=0$ (для прямого напрямку руху) або з позиції $P=L_L-L_M$ (для зворотнього), вказується довжина цієї частини та викликається процедура GetDiff . Якщо величина, що повернута цим методом, перевищує або дорівнює заданому перепаду D , то вважається, що ЧМ знайшов ВПС. При цьому алгоритм припиняє своє виконання і повертає значення позиції, враховуючи результат, повернений процедурою ЧМ GetCenter . Якщо величина, що повернута процедурою GetDiff менша від D , то в кожній наступній n -ій ітерації у властивість M завантажується частина масиву L , починаючи з позиції $P=S_M \cdot n$ (для прямого напрямку руху) або $P=L_L-L_M-S_M \cdot n$ (для зворотнього). Якщо $P > L_L-L_M$ (для прямого напрямку руху) або $P < 0$ (для зворотнього), то алгоритм також припиняє своє виконання та повертає повідомлення про неможливість знаходження ВПС. Робота цього алгоритму наведена на рис.4.

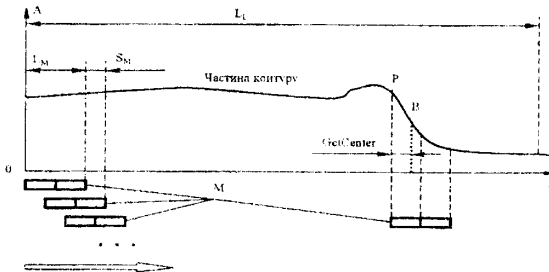


Рис.4. Робота алгоритму при проході у прямому напрямку.

Процедура об'єкту ЧМ GetDiff умовно розділяє масив M на дві рівні частини та обчислює середнє значення в кожній з них. Різниця між цими значеннями

повертається як результат виконання методу. Під час сканування може виникнути ситуація, коли ширина ділянки ВПС перевищить довжину маркера. Це буде тоді, коли кут між дотичною до контуру геометричної фігури та лінією виборки суттєво відхилиться від прямого, наслідком такої ситуації стає те, що ЧМ не знаходить ВПС, і частина контуру втрачається. Для аналізу геометричних фігур типу "сегмент" за допомогою алгоритмів визначення ВПС нами розроблений метод радіальної розгортки (МРР). Цьому методу не властиві помилки, спричинені відхиленням дотичної, що дозволило побудувати однопрохідний алгоритм з однозначним визначенням координат точок за ВПС. МРР базується на заміні в адресації піксел зображення декартових координат (X, Y) на полярні (ρ, ν) . Початок координат вибирається приблизно в центрі фігури. Навколо фігури умовно проводиться контрольне коло, що обмежує зону сканування. Зображення сканується радіус-вектором ρ , що формує масив L . Кутовий крок вибирається, виходячи з того, що кожен піксел контуру має бути врахований. Якщо радіус контрольного кола R піксел, то кутовий крок сканування буде $\Delta\nu = 1/R$ радіан. Завдяки застосуванню радіальної розгортки відхилення кута між дотичною до контуру та радіусом від прямого несуттєво по всьому периметру фігури незалежно від величини ν .

В четвертому розділі обґрунтовано, що істотні зміни в напрямку покращення характеристик i , в першу чергу, підвищення точності ТЗВ можливі тільки на шляху вдосконалення метрологічного забезпечення. Зокрема, визначення тих характеристик ТЗВ, які не паспортизуються виробниками телевізійних приладів, але є важливими з точки зору їх застосування як засобів вимірювання. (Дані про нерівномірність чутливості можуть бути внесені в паспорт телевізійних приладів, але, як правило, вони показують середнє значення для партії однотипних виробів.) Розроблено методики експериментального визначення ЕДХ, еквівалентної шуму різниці яскравісних температур та нижньої межі діапазону температур, які можуть бути виміряні за допомогою ТЗВ. Методики враховують базові положення концепції використання телевізійних камер в інформаційно-вимірювальній техніці і передбачають корекцію чутливості ПЗЗ-матриці.

Вперше з похибкою ± 2 К при імовірності 0.95 експериментально визначена температура $T_H = 555$ К, яка відповідає нижній межі температурного діапазону ТЗВ на основі ПЗЗ-камери OS25III.

Експерименти, спрямовані на створення методології контролю технології отримання надчистих напівпровідникових матеріалів методом ЕПБЗП, виконувались шляхом формування, запису і аналізу зображень ЗР за допомогою телевізійної камери, яка має такі характеристики — формат матриці 582×542 , розмір піксела 10.4 мкм, $\lambda_c = 0.68$ мкм, діапазон спектральної чутливості — 0.4...1.0 мкм.

Структурна схема експериментального пристрою для дослідження температурного поля на поверхні рідкої фази представлена на рис.5.

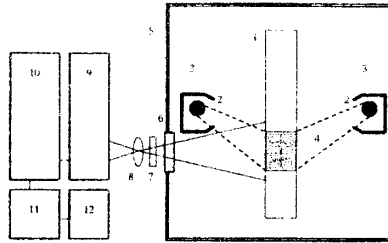


Рис.5. Структурна схема експериментального пристрою для дослідження температурного поля на поверхні рідкої фази. 1 — кристал кремнію, 2 — катод, 3 — фокусуєча система, 4 — електронний пучок, 5 — вакуумна камера, 6 — ілюмінатор, 7 — фільтр, 8 — об'єктив, 9 — передавальна камера, 10 — ПВВК, 11 — комп'ютер, 12 — монітор.

При плануванні та проведенні експериментів враховано, що у відповідності з вимогами технології плавки постійному контролю підлягає, головним чином, температурне поле рідкої фази.

В ході експериментів отримані криві розподілу яскравості вздовж вертикальної вісі кристалу в сукупності послідовних кадрів. Перехід від розподілу яскравості до розподілу температури (рис.6) здійснено на базі експериментального матеріалу, аналіз якого дозволив вдосконалити методику і обґрунтовано вибрати важливі параметри розробленого в розділі 2 алгоритму, зокрема, інтервал між вимкненням високої напруги та напруги живлення катоду.

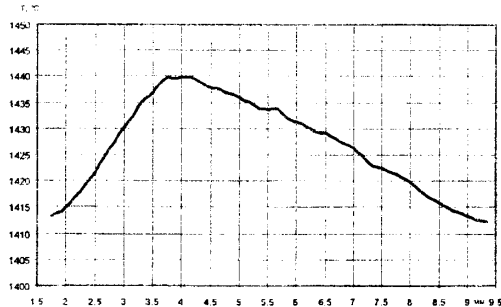


Рис.6. Розподіл температури на поверхні рідкої фази

Визначення загальної похибки результату непрямих вимірювань температури проведено з врахуванням випадкової похибки та невиключених систематичних похибок вимірювання температури, обумовлених, відповідно, перевідбиттям випромінювання, нерівномірністю чутливості, похибкою визначення ЕДХ. Показано, що середнє квадратичне відхилення загальної похибки результату вимірювання температури поверхні ЗР становить 1.5К.

Експериментально встановлено, що функція розподілу температури по висоті

ЗР несиметрична. Максимальна температура і максимальний температурний градієнт спостерігаються в нижній частині ЗР.

З рис.6 можна зробити також висновок щодо значень так званого перегріву поверхні ЗР. Терміном “перегрів” визначається перевищення температури поверхні рідкої фази над температурою плавлення кремнію. Відомо, що перегрів, особливо локальний, негативно впливає на якість плавки, оскільки порушується заданий температурний градієнт. Тому значні технологічні зусилля спрямовуються на боротьбу з перегрівом. Застосовується зменшення потужності електронного пучка, сканування пучка із заданою частотою, введення відбиваючих елементів тощо. Однак ефективність кожного з методів можна перевірити тільки вимірюючи поточні значення перегріву, але на сьогодні навіть оціночні значення перегріву є одним з дискусійних питань в технології ЕПБЗП. Нами розроблена методика оцінки перегріву, згідно з якою максимальний перегрів може бути визначений за формулою

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{л}}}{C_2} T_0^2 \ln \frac{\epsilon_{\text{т}}(\lambda_{\text{т}})}{\epsilon_{\text{р}}(\lambda_{\text{л}})}, \quad (10)$$

де $\epsilon_{\text{т}}(\lambda_{\text{л}})$, $\epsilon_{\text{р}}(\lambda_{\text{л}})$ — коефіцієнти випромінювальної здатності в твердій і рідкій фазах.

Оскільки для кремнію $\frac{\epsilon_{\text{т}}}{\epsilon_{\text{р}}} = 1.39$, $T_0 = 1685$ К, то $\Delta T_{\text{п}} = 60$ К.

В ході експериментів досліджувався вплив швидкості переміщення ЗР на поверхневий градієнт температури. Градієнт визначався як різниця температур в двох точках А і В, розташованих на відстані 1 мм і 2 мм від фронту кристалізації (рис.7а).

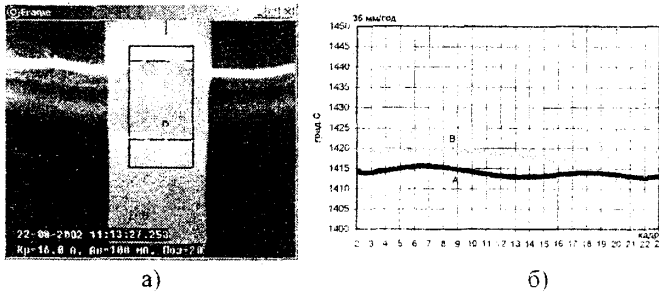


Рис.7. Зміна градієнту температур. а) — зображення ЗР, б) — температури в точках А і В.

При швидкості переміщення зони 35 мм/год зафіксовані значення градієнту в діапазоні 3...6 град/мм (рис.7б). Встановлено також, що збільшення швидкості переміщення ЗР приводить до збільшення температурного градієнту на поверхні рідкої фази.

Створені методи, пристрій та програмні алгоритми забезпечили точність вимірювання параметрів ЕПБЗП на рівні сучасних вимог, а отримані при виконанні дисертаційної роботи експериментальні результати дозволяють розширити уявлення про характер процесу зонної плавки.

ВИСНОВКИ

1. Вирішена важлива наукова задача підвищення точності вимірювання параметрів ЕПБЗП до рівня сучасних вимог шляхом створення методів вимірювання, які базуються на нових результатах теоретичних та експериментальних досліджень поля яскравості ЗР в процесі плавки.
2. Створена математична модель формування поля яскравості ЗР при наявності пересвідбиття випромінювання в вакуумній камері, на базі якої розроблено метод вимірювання температури та методику оцінки похибки, обумовленої неврахуванням пересвідбиття випромінювання.
3. Розроблено метод підвищення точності вимірювання температури ЗР, який передбачає експериментальне визначення складової яскравості, обумовленої пересвідбиттям випромінювання.
4. Для підвищення точності вимірювання висоти ЗР створено метод виділення контуру зображення, який базується на експериментально встановлених закономірностях формування поля яскравості в межах фазового переходу.
5. Розроблена методика дослідження похибки визначення ЕДХ і показано, що в діапазоні температур, який відповідає діапазону температур плавки, ця похибка може на порядок перевищувати допустиму. Для визначення ЕДХ запропоновано методику, яка враховує особливості світлосигнальної характеристики ТЗВ.
6. Отримана аналітична залежність, яка пов'язує похибку вимірювання температури ЗР з нерівномірністю чутливості СЕП.
7. Обґрунтовано, що матрицю компенсації необхідно формувати при двох значеннях освітленості СЕП — $0.72E_{\max}$ і E_{\max} , де E_{\max} — освітленість, яка відповідає яскравості твердої поверхні кристалу на межі фазового переходу.
8. Розроблено методики, пристрій та програмне забезпечення для експериментального визначення характеристик телевізійних приладів, які є важливими з точки зору їх застосування як засобів вимірювання.
9. Розроблені методика, пристрій та програмне забезпечення для експериментального дослідження розподілу яскравості поверхні ЗР на різних режимах плавки.
10. Експериментально отримані функції розподілу яскравості та температури на поверхні ЗР для різних режимів плавки. Встановлено, що функція розподілу температури по висоті ЗР несиметрична. При цьому збільшення швидкості переміщення ЗР приводить до збільшення температурного градієнту на поверхні рідкої фази.

11. Розроблена методика оцінки перевищення температури поверхні рідкої фази над температурою плавлення кремнію.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ,
В ЯКИХ ВИКЛАДЕНО ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Порев Г.В. Підвищення точності телевізійних засобів вимірювання температури поверхні зони плавки // *Методи та прилади контролю якості*.—2002.—№9.—С.39-41.
2. Згуровський Г.М., Порев Г.В. Вимірювання температури зони розплаву в електронно-променевої технології безтигельної зонної плавки // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*.—2003.—№ 3.—С.93-97.
3. Порев В.А., Порев Г.В. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*.—2001.—№ 1.—С.56-61.
4. Порев Г.В., Кісіль Р.І. Вимірювання геометричних розмірів обертової краплі за допомогою телевізійної системи контролю // *Методи та прилади контролю якості*.—2000.—№ 5— С.87-91.
5. Порев Г.В., Кісіль Р.І. Виділення контурів зображень складної форми методом радіальної розгортки // *Методи та прилади контролю якості*.—2000.—№6—С.32-36.
6. Порев В.А., Порев Г.В., Кісіль Р.І. Імовірносний підхід до визначення роздільної здатності телевізійних засобів контролю // *Методи та прилади контролю якості*.—2002.—№8.—С.40-43.
7. Патент 38844А, Україна, МКИ G01J3/00. Спосіб компенсації впливу випромінювання сторонніх джерел / В.А. Порев, Г.В. Порев (Україна); НТУУ “КПІ”.—№2000116167; заявл. 01.11.2000, опубл. 15.05.2001, Бюл.№4.
8. Якименко Ю.І., Порев Г.В. Підвищення точності вимірювання геометричних параметрів зони розплаву в умовах мікрогравітації // *Тези доповіді Третьої Української конференції з перспективних космічних досліджень*.—Кацівелі: НКАУ.—2003.—С.93.
9. Порев Г.В. Программное обеспечение телевизионной пирометрии электронно-лучевой зонной плавки // *Тези доповіді конференції “Приладобудування 2002”*.—Київ: НТУУ “КПІ”.—2002.—С.126-127.
10. Порев Г.В. Телевізійні засоби вимірювання параметрів електронно-променевої безтигельної зонної плавки // *Тези доповіді конференції “Приладобудування 2003”*.—Київ: НТУУ “КПІ”.—2003.
11. Порев Г.В., Лагодний В.І. Програмна корекція в телевізійних системах автоматизованого контролю // *Науково-технічна конференція з міжнародною участю “Приладобудування-96”*.—Том 1.—Судак: АІНУ.—1996.— С. 18.

12. Порев Г.В. Телевизионная измерительная система — концепция и практика // Сборник научных трудов 6го Международного молодёжного форума «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке». — Харьков: ХНУРЭ. — 2002. — С.235-236.

Порев Г.В. Вдосконалення методів і засобів вимірювання параметрів електронно-променевої безтигельної зонної плавки. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 — прилади і методи контролю та визначення складу речовин. — Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, 2004.

Дисертацію присвячено дослідженню питань, пов'язаних з підвищенням точності вимірювання параметрів зони розплаву при контролі електронно-променевої безтигельної зонної плавки. Створена математична модель формування поля яскравості зони розплаву при наявності перевідбиття випромінювання в вакуумній камері, на базі якої розроблені методика оцінки похибки вимірювання температури та метод підвищення точності вимірювання температури. Для підвищення точності вимірювання висоти зони розплаву створено метод виділення контуру зображення, який базується на експериментально встановлених закономірностях формування поля яскравості в межах фазового переходу. Розроблені методика, пристрій та та програмне забезпечення для експериментального дослідження розподілу яскравості поверхні зони розплаву на різних режимах плавки. Експериментально отримані функції розподілу яскравості та температури на поверхні зони розплаву. Встановлено, що функція розподілу температури по висоті зони розплаву несиметрична. При цьому збільшення швидкості переміщення зони розплаву приводить до збільшення температурного градієнту на поверхні рідкої фази.

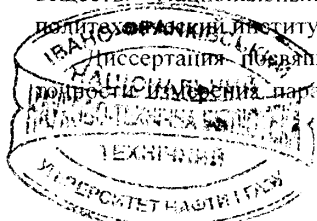
Отримані результати впроваджено в дослідну технологію зонної плавки кремнію.

Ключові слова: точність, вимірювання, висота, температура, зона розплаву, метод вимірювання, засіб вимірювання.

Порев Г.В. Усовершенствование методов и средств измерения параметров электронно-лучевой бестигельной зонной плавки. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 — приборы и методы контроля и определения состава веществ. — Национальный технический университет Украины “Київський політехнічний інститут”, Киев, 2004.

Диссертация посвящена исследованию вопросов, связанных с повышением точности измерения параметров зоны расплава при контроле электронно-лучевой



бестигельной зонной плавки. Создана математическая модель формирования поля яркости зоны расплава при наличии пересотражения излучения в вакуумной камере, на базе которой разработаны методика оценки погрешности измерения температуры и метод повышения точности измерения температуры. Разработана методика исследования погрешности определения эффективной длины волны, которая обусловлена нелинейностью светосигнальной характеристики телевизионных средств измерения. Показано, что в диапазоне температур, который соответствует диапазону температур плавки, эта погрешность может на порядок превышать допустимую. Для определения эффективной длины волны предложена методика, которая учитывает особенности светосигнальной характеристики телевизионных средств измерения. Получена формула, которая связывает погрешность измерения температуры зоны расплава с неравномерностью чувствительности светозлектрического преобразователя. Разработаны методики, устройство и программное обеспечение для экспериментального определения характеристик телевизионных средств измерения. Для повышения точности измерения высоты зоны расплава создан метод выделения контура изображения, который базируется на экспериментально установленных закономерностях формирования поля яркости в границах фазового перехода. Разработаны методика, устройство и программное обеспечение для экспериментального исследования распределения яркости поверхности зоны расплава на разных режимах плавки. Экспериментально получены функции распределения яркости и температуры на поверхности зоны расплава. Разработана методика оценки превышения температуры поверхности жидкой фазы над температурой плавления кремния. Установлено, что функция распределения температуры по высоте зоны расплава несимметрична. При этом увеличение скорости перемещения зоны расплава приводит к увеличению температурного градиента на поверхности жидкой фазы.

Полученные результаты внедрены в опытную технологию зонной плавки кремния.

Ключевые слова: точность, измерение, высота, температура, зона расплава, метод измерения, средство измерения.

Porev G.V. Improvement of the methods and tools for the measurement of the electron-beam crucible-less zoned melting.—Manuscript.

Thesis for candidate's degree by speciality 05.11.13 — Devices and methods for the control and the estimation of substance structure.— National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute", Kyiv, 2004.

The dissertation is devoted to the research of the questions, connected to increasing the accuracy of the measurement of the melted zone parameters in electron-beam crucible-less zoned melting.

The mathematical model of the brightness field development of the melted zone while the presence of re-reflection of radiation in the vacuum chamber is created. The technique of estimation of temperature measurement error and the method of increasing the accuracy of temperature measurement are developed on the basis of this model. The method of retrieving of the image shape, which are based on experimentally established laws of the brightness field formation in the borders of phase transition, are created for the increasing of accuracy of melted zone height measurement.

The technique, the device and the software for experimental research of brightness field distribution of the melted zone surface on the various modes of melting, are created.

The functions of distribution of the brightness across the melting zone surface are experimentally got. It is established, that the temperature distribution function across melting zone height are asymmetric. It is established, that increasing the speed of the movement of melting zone through specimen are causing to the increasing the temperature gradient on the surface of melting zone.

The results, that have been got, are implemented into the experimental technology of the zoned melting of the silicon.

Keywords: accuracy, measurement, height, temperature, melted zone, measurement method, measurement technique.