

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-5-797-806

УДК 004.932.2:681.7:548.5

Применение машинного зрения для автоматического контроля процесса выращивания монокристаллов галогенидов таллия по методу Бриджмена–Стокбаргера

Максим Игоревич Кузьмин¹✉, Максим Сергеевич Ельников², Давид Ильич Кушнирук³,
Максим Витальевич Морозов⁴, Михаил Сергеевич Кузнецов⁵

^{1,2,3,4,5} Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н.П. Сагина, Москва, 111524, Российская Федерация

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

¹ mimikatz@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6265-9052>

² elnikow.max@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8149-5302>

³ k.davjd@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4419-6983>

⁴ MViMorozov@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1782-9623>

⁵ gradan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8441-4424>

Аннотация

Введение. Рассмотрена проблема управления процессом выращивания монокристаллов галогенидов таллия методом Бриджмена–Стокбаргера. Определена важность обеспечения робастного управления температурным градиентом в зоне кристаллизации, оказывающего прямое влияние на качество получаемого монокристалла. Предложено и научно обосновано применение методов машинного зрения для определения положения границы расплав–кристалл и последующего автоматического управления температурным режимом выращивания. **Метод.** Для автоматизированного управления температурным градиентом предлагается использовать алгоритм, основанный на визуальном отслеживании положения кристаллизующейся границы (фронта). Распознавание фронта осуществляется посредством применения инструментов машинного зрения, позволяющих производить расчет корректирующего управляющего воздействия на верхнюю зону нагрева установки. **Основные результаты.** Представлено описание ключевых шагов алгоритма, приведена его блок-схема. На примере одной итерации производственного цикла проанализирована во времени динамика изменения высоты границы расплав–кристалл и температуры верхней печи. Соответствие полученного на опытной установке продукта принятым техническим условиям подтверждает эффективность предлагаемого подхода в стабилизации температурного профиля. **Обсуждение.** Разработанный алгоритм позволяет отказаться от ручного регулирования параметров на каждой установке и обеспечивает возможности для горизонтального масштабирования производства. Подход демонстрирует преимущества по сравнению с традиционными методами управления в контексте повышения повторяемости и качества выращиваемых монокристаллов. Предложенный алгоритм может быть использован при проектировании и модернизации установок, работающих по методу Бриджмена–Стокбаргера. Основным ограничением предлагаемого подхода является его применимость только к процессам, в которых осуществляется выращивание монокристаллов, обладающих характерной окраской.

Ключевые слова

машинное зрение, автоматическое управление, галогениды таллия, метод Бриджмена–Стокбаргера

Ссылка для цитирования: Кузьмин М.И., Ельников М.С., Кушнирук Д.И., Морозов М.В., Кузнецов М.С. Применение машинного зрения для автоматического контроля процесса выращивания монокристаллов галогенидов таллия по методу Бриджмена–Стокбаргера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 5. С. 797–806. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-5-797-806

Application of machine vision for automatic control of the process of growing monocrystals of thallium halides using the Bridgman-Stockbarger method

Maksim I. Kuzmin¹✉, Maksim S. Elnikov², David I. Kushniruk³,
Maksim V. Morozov⁴, Mikhail S. Kuznetsov⁵

^{1,2,3,4,5} JSC N.P. Sazhin State Scientific Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet”, Moscow, 111524, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

¹ mimikatz@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6265-9052>

² elnikow.max@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8149-5302>

³ k.davjd@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4419-6983>

⁴ MViMorozov@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1782-9623>

⁵ gradan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8441-4424>

Abstract

The article discusses the issue of controlling the growth process of monocrystals of thallium halides using the Bridgman-Stockbarger technique. The significance of maintaining a stable temperature gradient in the crystallization zone, which has a direct effect on the quality of the final monocrystal, is determined. The use of machine vision techniques to determine the position of the melt-crystal interface and subsequently automatic control of the temperature regime is proposed and scientifically justified. To control the temperature gradient automatically, it is suggested to utilize an algorithm that relies on visual tracking of the crystallization front. This front is identified using machine vision techniques, that allow calculating the corrective action on the upper heating zone of the apparatus. A brief overview of the main steps of the algorithm is provided, and a flowchart illustrating the process is included. Using the example of one iteration of the production cycle, the over time dynamics of changes in the height of the melt-crystal interface and the temperature of the upper furnace are analyzed. The compliance of the product obtained at the pilot apparatus with the accepted technical conditions confirms the effectiveness of the proposed approach in stabilizing the temperature profile. The developed algorithm eliminates manual parameter control at each apparatus, providing opportunities for horizontal scaling of production. It demonstrates advantages over traditional control methods, increasing the repeatability and quality of grown monocrystals. It can be used in the design and modernization of Bridgman-Stockbarger apparatuses. The main limitation of proposed approach is that it can only be applied to processes involving the growth of monocrystals with specific coloration.

Keywords

machine vision, automatic control, thallium halides, Bridgman-Stockbarger method

For citation: Kuzmin M.I., Elnikov M.S., Kushniruk D.I., Morozov M.V., Kuznetsov M.S. Application of machine vision for automatic control of the process of growing monocrystals of thallium halides using the Bridgman-Stockbarger method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 5, pp. 797–806 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-5-797-806

Введение

Получение монокристаллов различных веществ и их смесей с заданными характеристиками является одной из ключевых задач материаловедения и кристаллохимии. Повышенный интерес к данному вопросу объясняется широким применением кристаллов с высокой структурной совершенностью вследствие проявления ими уникальных свойств, актуальных для использования в ряде высокотехнологических областей, претерпевающих интенсивное развитие в

последние десятилетия: микроэлектронике [1], оптике [2, 3], медицине [4, 5], ядерной физике и многих других [6–8].

В настоящей работе в качестве исходного вещества для проведения процесса выращивания монокристаллов рассматриваются различные галогениды таллия (TlCl, TlBr, TlI) (рис. 1, а) как в индивидуальном виде, так и виде смеси. В зависимости от состава исходной шихты и соотношения входящих в нее компонентов, после проведения процесса выращивания и последующей механической обработки [9], могут быть получены



Рис. 1. Общий вид ампулы, заполненной шихтой (а) и заготовки после механической обработки полученного в ходе процесса монокристалла (b)

Fig. 1. General view of the ampoule filled with mixture (a) and of the workpiece after machining of the monocrystal obtained during the process (b)

заготовки (рис. 1, *b*), обладающие свойствами, специфическими для дальнейшего производства изделий в области инфракрасной техники, лазерной техники, акустооптики, волоконной оптики, приборов регистрации ионизирующего излучения.

На сегодняшний день разработано и опробовано в промышленности множество методов выращивания монокристаллов. Все они главным образом подразделяются на группы в зависимости от фазы (расплав, раствор, газ), из которой осуществляется кристаллизация целевого вещества. Выбор конкретного метода мотивируется физической и химической природой соединения, технико-экономическим расчетом, требованиями к структуре получаемого монокристалла. Применительно к рассматриваемым соединениям таллия, ввиду их плохой растворимости в воде и органических растворителях [10–14], процесс кристаллизации наиболее рационально проводить из фазы расплава.

Методы кристаллизации из расплава различаются между собой по ряду аспектов: объему кристаллизующего материала, способу ведения процесса, сложности аппаратного оформления. Одним из наиболее эффективных и широко используемых из них является метод Бриджмена–Стокбаргера [15]. Лежащая в основе выбранного метода идея заключается в направленной кристаллизации расплава. Конструктив установки (рис. 2), реализующей данный метод, включает в себя две высокотемпературные печи, разделенные термоизолирующим материалом для обеспечения градиента температур и создания двух функциональных зон, механизма перемещения ампулы и контура датчиков для мониторинга параметров течения процесса, а также управляющих устройств. В начале процесса ампулу заполняют шихтой заданного состава и запаивают таким образом, чтобы один из ее концов имел форму остроконечного конуса. Данная операция позволяет обеспечить образование затравочных кристаллов в нижней части сосуда. Подготовленную ампулу закрепляют на подвижном подвесе в зоне верхней печи и проводят первый этап процесса — плавление шихты. После полного расплавления содержимого активируется подъемно-опускной механизм, который с установленной постоянной скоростью обеспечивает движение ампулы вниз через зону температурного градиента. Перепад температуры ниже точки плавления шихты способствует началу процесса зародышеобразования, а затем, в соответствии с законом геометрического отбора, полноценному росту одного монокристалла. Постепенное снижение температуры приводит к упорядоченному росту кристаллической структуры по высоте ампулы, а скорость перемещения и профиль температурного градиента определяют качество получаемого изделия [16, 17]. После полного прохождения ампулы в зону нижней печи производится последний этап процесса — конечный отжиг. Для этого температурным регулятором осуществляется постепенное понижение температуры в зоне нижней печи до комнатных значений в соответствии с задаваемой температурной программой. Данный процесс позволяет избежать резкого охлаждения полученного монокристалла и снизить образование внутренних напряжений.

Основными достоинствами рассматриваемого метода являются простота конструкции установки и экономичность. С другой стороны, незначительные колебания температуры, нестабильность градиента или отклонения в скорости движения ампулы могут приводить к образованию дефектов, внутренних напряжений, неоднородности состава или росту поликристаллических структур вместо монокристаллических. Все вышеперечисленные негативные факторы способствуют растрескиванию кристалла во время процесса выращивания или при извлечении из ампулы. В соответствии с этим, главным недостатком метода является большая чувствительность к ошибкам управления. Другая немаловажная практическая проблема

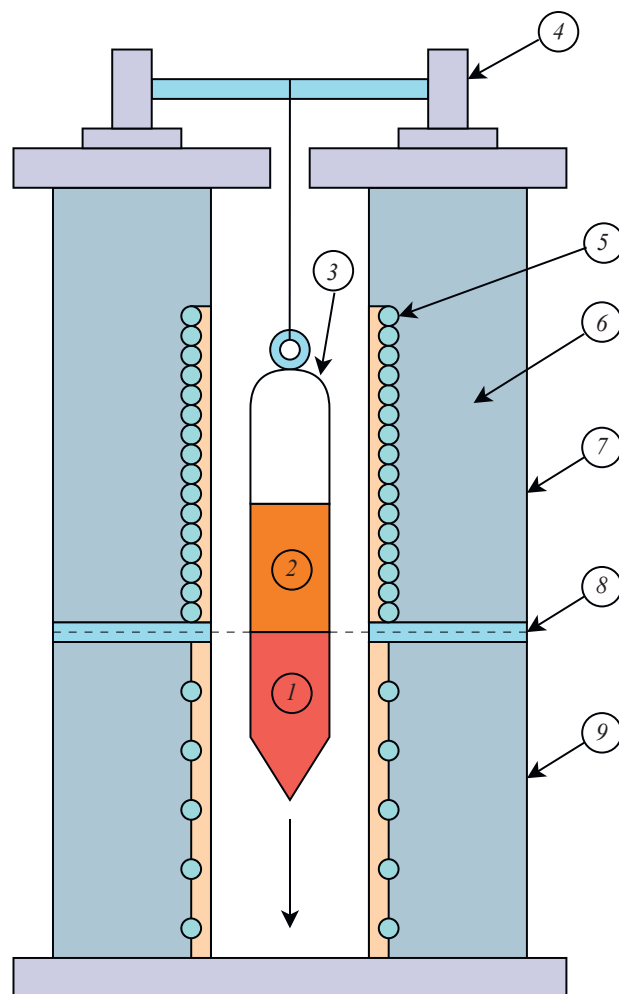


Рис. 2. Схема установки выращивания кристаллов методом Бриджмена–Стокбаргера.

1 — монокристалл; 2 — расплав; 3 — ампула на подвижном подвесе; 4 — привод с подъемно-опускным механизмом; 5 — элементы резистивного нагревателя; 6 — огнеупорный материал; 7 — верхняя печь; 8 — термоизоляция; 9 — нижняя печь

Fig. 2. Scheme of the apparatus for crystal growing by the Bridgman-Stockbarger method.

1 — monocrystal; 2 — melt; 3 — ampoule on a movable suspension; 4 — drive with lifting and lowering mechanism; 5 — elements of a resistive heater; 6 — refractory material; 7 — upper furnace; 8 — thermal insulation; 9 — lower furnace

с учетом недостатков — ручной контроль выращивания кристаллов в установках, число которых измеряется десятками. В каждой из таких установок может выращиваться монокристалл, имеющий отличный от других исходный состав шихты и потому требующий обеспечения индивидуального температурного профиля для оптимального протекания процесса. По этой причине одновременный ручной контроль выращивания во всех установках является затруднительной задачей. Вследствие этого особую актуальность приобретает автоматизация процесса выращивания кристаллов, позволяющая минимизировать влияние человеческого фактора и обеспечить стабильность условий кристаллизации.

Целью работы является программная реализация настраиваемого алгоритма автоматизации процесса выращивания монокристалла с использованием средств машинного зрения и апробация его работы.

Задача автоматизации процесса

Попытки оптимального управления рассматриваемым процессом предпринимались исследователями ранее. Для этого вносились изменения в конструкцию установки [18] и нагревателей [19], изучалось влияние величины температурного градиента на форму границы расплав–кристалл [20], а также проверялась возможность отслеживания положения этой границы с помощью вихретокового контроля [21].

Глобальной задачей автоматизации процесса является обеспечение постоянной оптимальной скорости роста монокристалла в области перепада температур (8, рис. 2). В настоящей работе, исходя из необходимости визуального наблюдения границы расплав–кристалл и недопущения стихийного протекания процесса, фронт кристаллизации поддерживался несколько выше этой области. Расстояние от начала зоны термоизоляции до визуально наблюдаемой границы расплав–кристалл в ампуле, находящейся в верхней печи, называется высотой фронта кристаллизации. Она является регулируемым параметром и, как правило, ее целевое значение устанавливается в интервале 2–5 см. Критерий оптимальной скорости роста монокристалла предполагает такое ее значение, которое позволяет фронту кристаллизации находиться в пределах установленного целевого значения высоты при постоянной скорости движения ампулы вниз.

Так как в установке имеется две функциональные зоны нижней и верхней печи, то возможны два варианта организации управления процессом.

Вариант 1. Регулировка изменением нагрева верхней печи, при этом в нижней поддерживается постоянная температура немного ниже точки кристаллизации расплава.

Вариант 2. Регулировка одновременным изменением нагрева обеих печей.

В настоящей работе сделан акцент на программной реализации алгоритма для варианта 1. В соответствии с ним управляемым параметром является значение мощности нагревателя верхней печи.

Используемые соединения таллия и их смеси (за исключением чистого хлорпроизводного) имеют есте-

ственную окраску. В дополнение к этому внутренняя структура расплава в отличие от монокристалла является неупорядоченной, вследствие чего при сквозном просвечивании прожектором он имеет вид темной области. Совокупность перечисленных факторов позволяет разработать метод определения высоты фронта используя методы машинного зрения. Для программной реализации и отладки алгоритма опытная установка стандартной конструкции (рис. 2) была модернизирована и дополнена (рис. 3) необходимым оборудованием.

Сзади установки на целевой высоте размещалась осветительная система в виде светодиодного прожектора AECLight АЭК-ДСП44-020-001 со световым потоком 2800 лм, а спереди на том же уровне устанавливалась IP-камера Beward SV2018M с функцией автофокусировки и расширенным динамическим диапазоном (рис. 4). В качестве температурного регулятора для каждой печи использовался ОВЕН ТРМ251, ко входу которого подключалась термопара типа «К». Выход температурного регулятора подсоединялся к твердотельному реле, управляющему мощностью, подаваемой на нагревательные элементы соответствующей печи. Спай термопары выводился во внутреннее пространство, по которому осуществлялось движение ампулы. Управляющий компьютер технолога подключался к интерфейсу RS-485 температурного регулятора верхней печи посредством витой пары. Связь с прибором и смена температурной уставки осуществлялась с помощью протокола Modbus RTU. Единоразовое задание фиксированной уставки в температурном регуляторе нижней печи производилось вручную через встроенный в прибор датчик в начале процесса.

В теплоизолирующей стенке опытной установки организовывался вертикальный паз минимальной ширины, достаточной для наблюдения содержимого. В ходе проведения процесса выращивания монокристалла из непрерывного видеопотока с установленным интервалом захватывался единичный кадр и отправлялся на вход реализованному алгоритму. Интервальный захват единичного кадра объясняется временем реакции системы (30–60 мин) на управляющее воздействие и инертностью рассматриваемой системы в целом. Слишком большой интервал срабатывания алгоритма и, соответственно, регулирования приводит к неконтролируемому уходу фронта, слишком малый — к нарушению процесса, так как система реагирует на корректирующее воздействие с запаздыванием. Время запаздывания системы определялось экспериментально заданием вручную небольшого ступенчатого воздействия путем смены температурной уставки и отслеживания начала изменения высоты фронта от исходного положения.

Выходным результатом работы алгоритма является корректировка уставки температуры в температурном регуляторе верхней печи в ответ на визуально отслеживаемое изменение положения фронта кристаллизации. Правильность работы алгоритма характеризуется корректным определением высоты пограничной области между расплавом и монокристаллом. Стабильность работы алгоритма основывается на получении сопоставимых по величине значений положения границы при

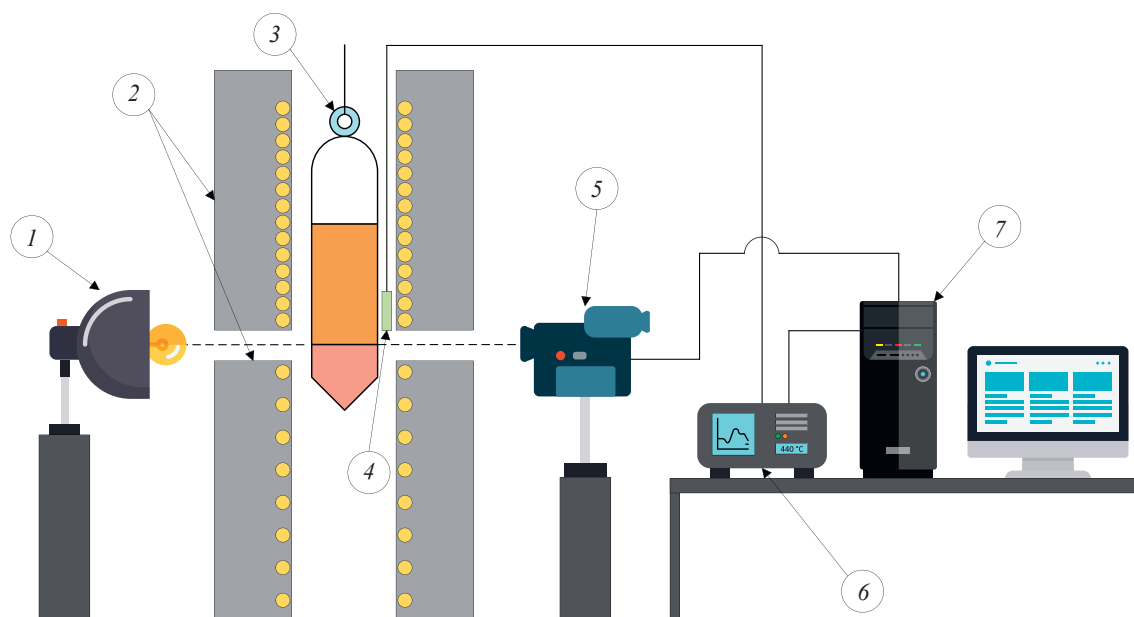


Рис. 3. Схема модернизированной и дополненной установки.

1 — светодиодный прожектор; 2 — верхняя и нижняя печь; 3 — ампула на подвижном подвесе; 4 — термопара типа «К»; 5 — IP-камера; 6 — терморегулятор; 7 — компьютер

Fig. 3. Scheme of the upgraded and augmented apparatus.

1 — light-emitting diode spotlight; 2 — upper and lower furnace; 3 — ampoule on a movable suspension; 4 — type “K” thermocouple; 5 — IP camera; 6 — thermoregulator; 7 — computer

неизменной реальной высоте фронта кристаллизации в ходе нескольких последовательных замеров в условиях воздействия негативных факторов. Среди подобных факторов в настоящей работе выступали: изменение условий внешнего освещения ввиду круглосуточного проведения производственного процесса; блики света, дефекты и загрязнения на поверхности кварцевой стенки установки.

Тестовое применение алгоритма показало, что определяемая высота фронта в некоторых случаях может варьироваться в пределах 1–2 мм, в связи с чем был введен в качестве одного из его внутренних параметров показатель буферной границы, позволяющий нивелировать подобную неточность определения и избежать ложных срабатываний операции регулирования. Последующие испытания алгоритма проводились в течение полного цикла выращивания, поэтому точность

выходных регулирующих воздействий напрямую влияла на качество получаемого продукта. Вследствие этого дополнительным критерием робастности алгоритма являлось соответствие полученного кристалла установленным производственным требованиям.

Структура алгоритма и особенности реализации

Программная реализация и отладка алгоритма осуществлялась на языке программирования Python с применением библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Структурно алгоритм подразделяется на две последовательно идущие части (рис. 5).

Блок 1. Блок определения высоты фронта.

Блок 2. Блок расчета регулирующего воздействия.

В самом начале работы алгоритма кадр, захваченный из видеопотока, поступает на вход блока 1, где осуществляется этап его предварительной обработки. Он заключается в повороте и обрезке полнокадрового изображения (рис. 4) до области интереса, представляющей собой зону технологического окна. К полученному изображению применяется размытие по Гауссу с ядром (3, 3). Размер ядра подбирался вручную таким образом, чтобы добиться легкого сглаживания без существенных искажений. Стандартное отклонение по Гауссу рассчитывалось автоматически на основании размера ядра. Цель предварительной обработки — нивелировать возможные шумы и подготовить изображение к последующим операциям.

Следующим этапом блока 1 алгоритма является фильтрация полезного сигнала. Основная задача состоит в отделении и усилении области изображения, относящейся непосредственно к монокристаллу. Как

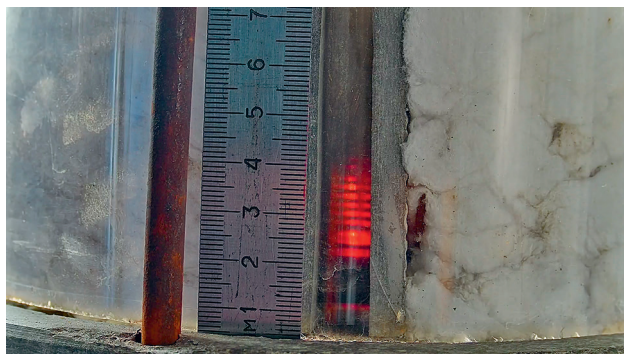


Рис. 4. Вид на установку с IP-камеры

Fig. 4. View of the apparatus from the IP camera

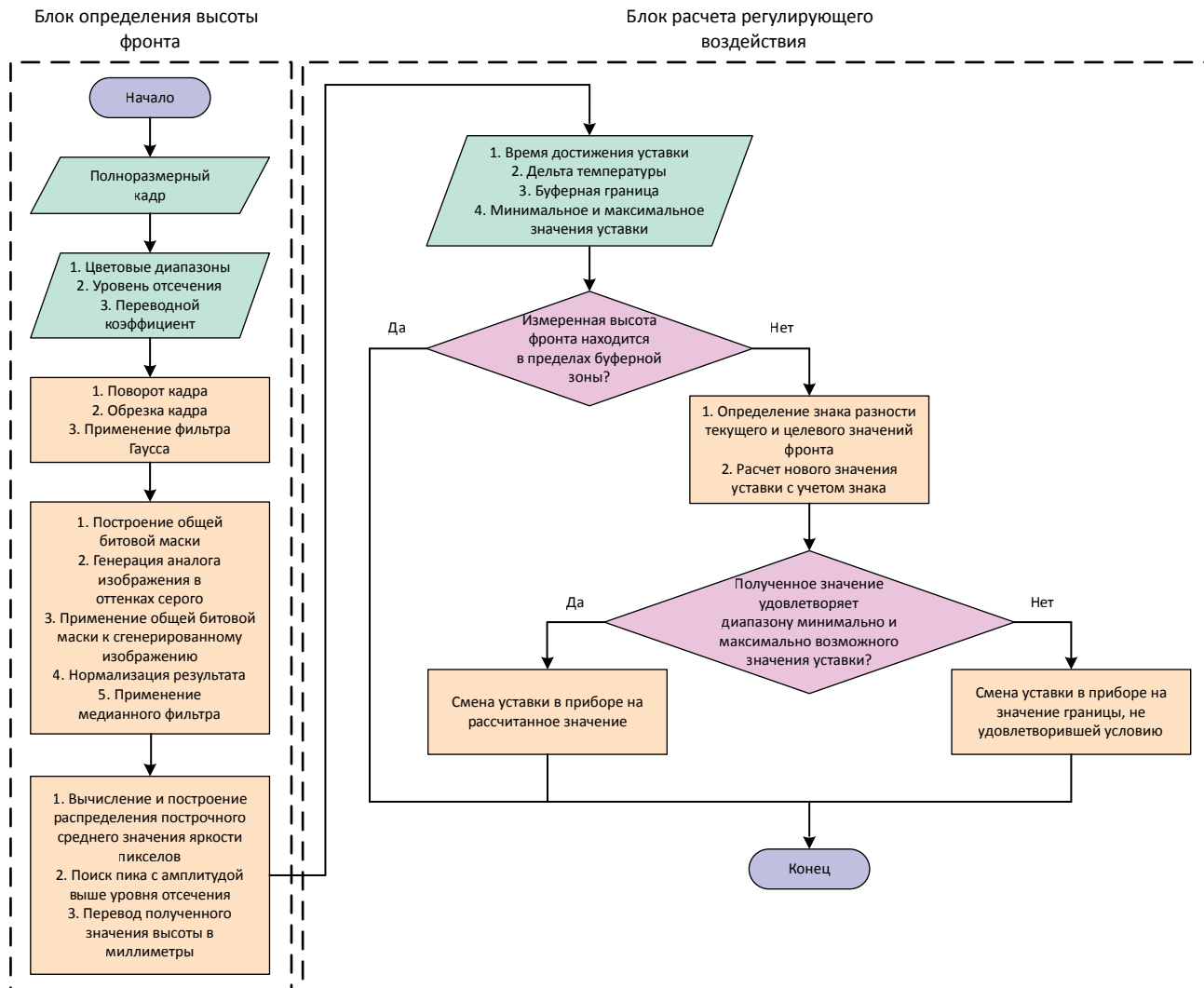


Рис. 5. Блок-схема алгоритма

Fig. 5. The block diagram of the algorithm

описывалось в разделе «Задача автоматизации процесса», в зависимости от используемых веществ и состава шихты цвет соответствующего монокристалла может варьироваться. В соответствии с рис. 4 монокристалл имеет красно-оранжевый цвет. В цветовой модели HSV (Hue, Saturation, Value — тон, насыщенность, значение) интересные цвета лежат в двух прямоугольных областях: $(0, 10) — (20, 255)$ и $(165, 10) — (180, 255)$ (рис. 6). Вследствие этого для качественного отделения полезного сигнала потребуется использовать две маски, объединенные в одну.

Таким образом, этап фильтрации включает в себя следующую последовательность операций:

- построение двух битовых масок на основе выбранных диапазонов от $(0, 10, 10)$ до $(20, 255, 255)$ и от $(165, 10, 10)$ до $(180, 255, 255)$ с помощью бинаризации;
- построение общей битовой маски на основе двух отдельных путем их логического сложения;
- генерация аналога исходного изображения в оттенках серого. Для этого определялась разность цветов пикселей красного канала и максимума из

двух других. Полученные значения нормировались в диапазоне $0–255$;

- применение общей битовой маски, сгенерированной бинаризацией цветного изображения, к полученному изображению в оттенках серого посредством логического умножения;
- нормализация результирующего изображения;
- применение медианной фильтрации с окном равным 9, для нивелирования возможного шума, созданного наложением битовой маски. Значение окна фильтрации подбиралось экспериментально аналогично ядру для размытия по Гауссу.

Завершающим этапом работы блока 1 алгоритма является непосредственное определение высоты границы расплав–кристалл на основе обработанного изображения. Для этого осуществляется вычисление построчного среднего значения яркости пикселей на изображении в оттенках серого, что позволяет построить характерный график распределения (рис. 7).

Определение высоты границы расплав–кристалл осуществляется путем поиска первого единичного пика, амплитуда которого больше некоторого уровня

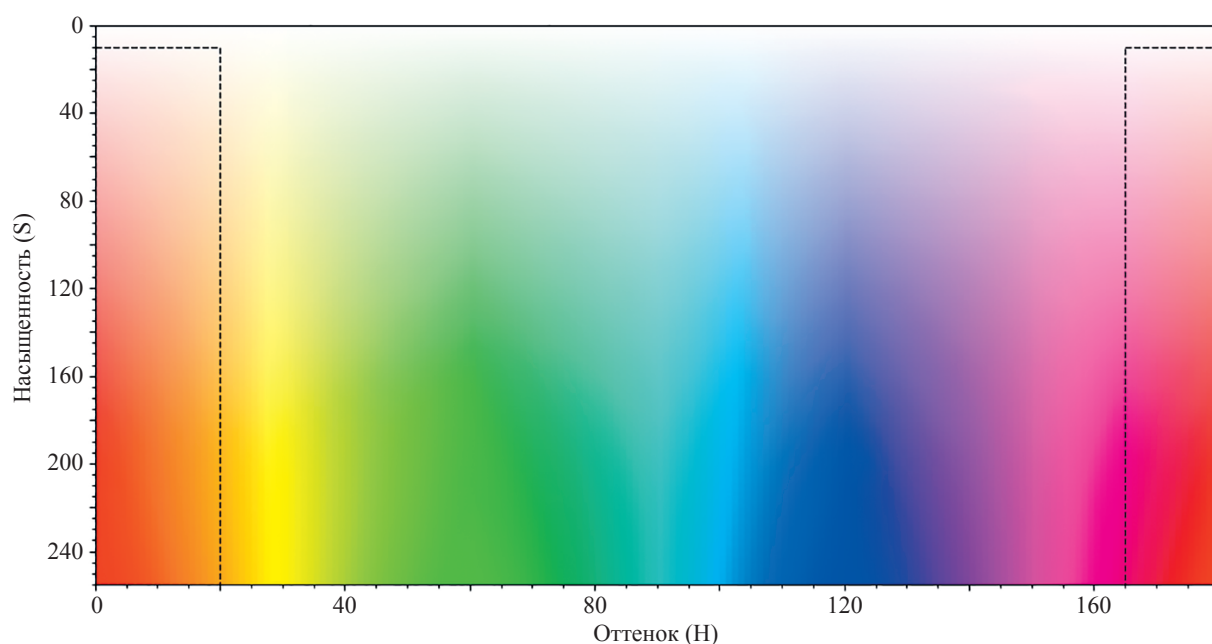


Рис. 6. Представление цветовой модели HSV в двух измерениях при фиксированном значении яркости равном 255

Fig. 6. Representation of the HSV color model in two dimensions with a fixed brightness value of 255

отсечения. Достоверное и математически обоснованное значение уровня отсечения может быть получено путем статистической обработки амплитуд пиков, извлеченных из массива кадров, снятых при данных условиях. Результирующая высота фронта кристаллизации определяется путем деления полученного значения высоты в пикселах на переводной коэффициент и подается на вход блоку 2. Для определения переводного коэффициента рядом с технологическим окном во время

тестового процесса выращивания устанавливается линейка (рис. 4). По линейке оценивается высота фронта кристаллизации относительно зоны термоизоляции. Делается снимок и обрабатывается алгоритмом до момента осуществления перевода значения. Полученное алгоритмом значение высоты в пикселах делится на наблюдаемое значение в миллиметрах. Полученный коэффициент (в пикс./мм) используется в дальнейшем для перевода значений.

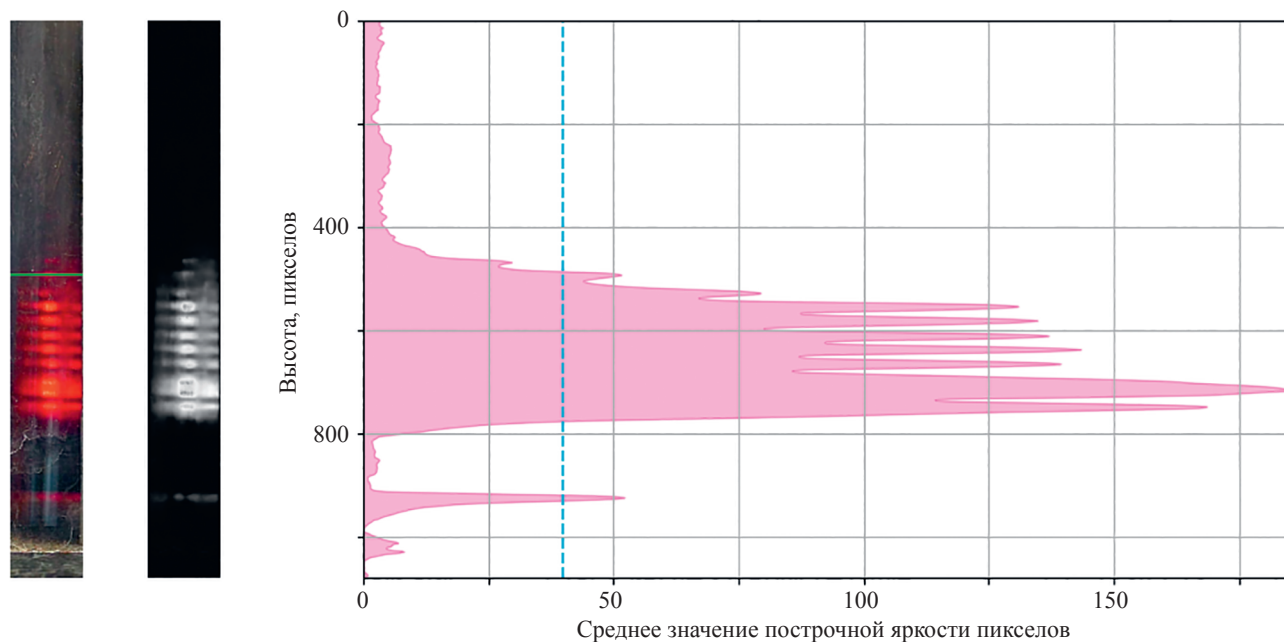


Рис. 7. График зависимости среднего значения построчной яркости пикселей на изображении в оттенках серого.

Синим пунктиром показан уровень отсечения, зеленой линией — результирующее положение фронта кристаллизации

Fig. 7. Graph of the dependence of the average line-by-line brightness of pixels in an image in shades of gray.

The blue dotted line shows the clipping level. The green line shows the resulting position of the crystallization front

Блок 2 принимает на вход измеренную текущую высоту фронта кристаллизации и сравнивает ее с целевым значением с учетом ряда параметров, задаваемых технологом. К внутренним параметрам блока 2 относятся: время достижения уставки терморегулятором, дельта температуры, минимально и максимально допустимые значения уставки, буферная граница. Если текущее значение высоты фронта кристаллизации располагается в диапазоне буферной зоны, рассчитываемой на основе значений целевой высоты и буферной границы, то смену уставки температуры производить не требуется. Температурный регулятор продолжает поддерживать текущее значение. В случае если измеренная высота границы находится за пределами — происходит расчет новой уставки. Для этого к ее текущему значению прибавляется с соответствующим знаком параметр дельты температуры. Если полученное новое значение попадает в заданный интервал минимально и максимально допустимых уставок температур, то оно отправляется в температурный регулятор верхней печи без изменения. В противном случае в прибор отправляется значение той границы, которой не удовлетворило рассчитанное значение. Если в результате регулирования высота фронта кристаллизации больше целевой — температура повышается, в противном случае снижается.

Обсуждение

Результат работы алгоритма в течение единичной производственной итерации показан на рис. 8. Низкая

температура в верхней печи в начале процесса обуславливает высокое положение границы между расплавом и кристаллом относительно зоны термоизоляции (8, рис. 2). Ступенчатые и линейные изменения температуры являются следствием смены соответствующих целевых уставок и работы температурного регулятора. Увеличение мощности, подаваемой на нагревательные элементы (5, рис. 2) верхней печи приводит к усилению плавления и смещению фронта кристаллизации в меньшую сторону по высоте.

Главной практической ценностью разработанного алгоритма является возможность полного исключения потребности в ручном контроле процесса. Это в свою очередь позволяет горизонтально масштабировать производство, значительно повысить количество и ассортимент выпускаемой продукции, а также увеличить положительный экономический эффект за счет снижения себестоимости. Установки для выращивания кристаллов по методу Бриджмена–Стокбаргера могут проектироваться и создаваться в модернизированном варианте с учетом аспектов работы алгоритма, предложенного в настоящей работе. Сам алгоритм в таком случае может быть реализован в адаптированном варианте с привлечением желаемого инструментария и языка программирования. Среди дополнительных особенностей его работы можно выделить возможность использования профилей, содержащих массив внутренних параметров, под индивидуальный состав шихты и условия окружающей среды.

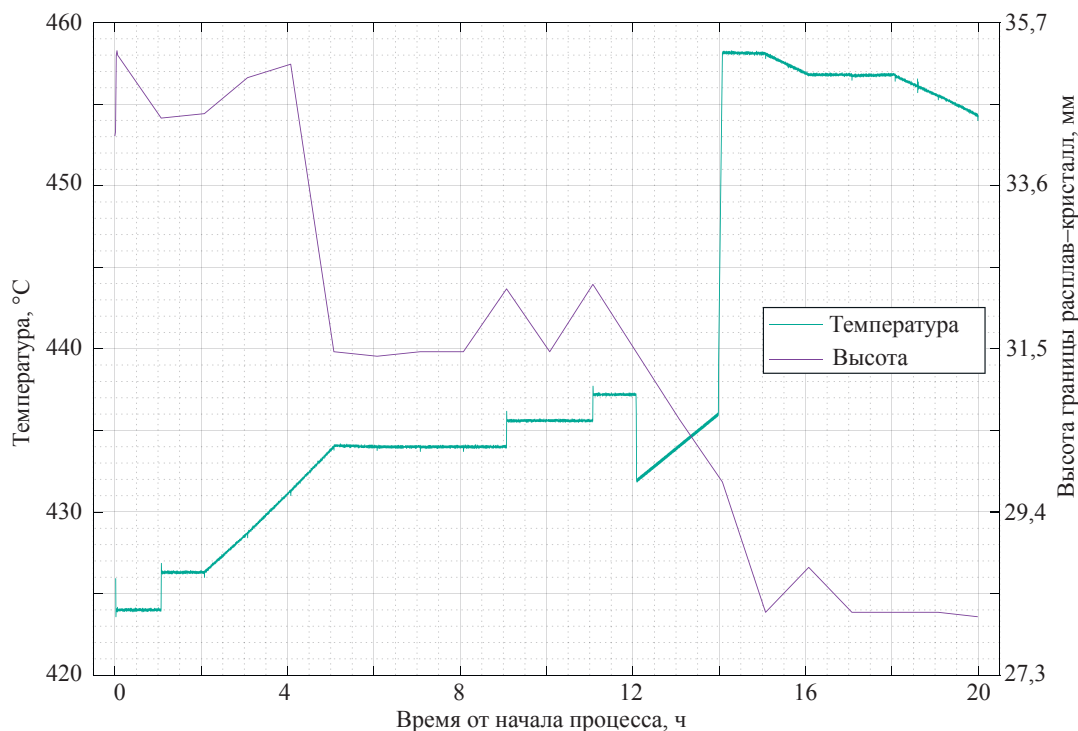


Рис. 8. Изменение температуры и высоты границы расплав–кристалл на протяжении единичной производственной итерации процесса

Fig. 8. Change in temperature and height of the melt-crystal boundary during a single production iteration of the process

Закключение

В работе рассмотрена задача автоматизации процесса выращивания монокристаллов галогенидов таллия с применением методов машинного зрения. С использованием языка программирования Python и библиотеки OpenCV реализован и отлажен алгоритм, осуществляющий определение высоты границы рас-

плав–кристалл и последующее регулирование процесса. Работоспособность алгоритма проверена в рамках единичных итераций производственного процесса.

В дальнейшем планируется разработка системы управления множеством параллельных процессов выращивания монокристаллов различного состава с использованием полученных наработок и практического опыта.

Литература

- Lang W. Silicon microstructuring technology // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 1996. V. 17. N 1. P. 1–55. [https://doi.org/10.1016/0927-796X\(96\)00190-8](https://doi.org/10.1016/0927-796X(96)00190-8)
- Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Gavalyan M.Y., Belotserkovskiy A.V. Optical properties of large germanium monocrystals // *Optics and Spectroscopy*. 2016. V. 120. N 4. P. 654–659. <https://doi.org/10.1134/S0030400X16030139>
- Isaenko L., Yelissev A., Tkachuk A., Ivanova S. New monocrystals with low phonon energy for mid-IR lasers // *NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*. 2008. P. 3–65. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6463-0_1
- Taubin M.L., Yaskolko A.A. Improvement of medical X-ray tube performance // *Biomedical Engineering*. 2010. V. 44. N 2. P. 73–75. <https://doi.org/10.1007/s10527-010-9159-8>
- Ababiy I., Aramă E. Advantages of applications UV detectors based on stratified crystals in medicine // *Proc. of the Professional Education and Economic Needs of the Black Sea Region*. 2015. P. 127–133.
- Ganesh V., Shkir M., Maurya K.K., Yahia I.S., AlFaify S. Phenol red dyed bis thiourea cadmium acetate monocrystal growth and characterization for optoelectronic applications // *Journal of Materials Research*. 2018. V. 33. N 16. P. 2364–2375. <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.235>
- Wischniewski M., Delibas B., Wischniewski A., Pertsch P. Microscale monocrystal ultrasonic actuators for miniature optical systems // *Proc. of the International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications*. 2022. P. 1–4.
- Wang D., Chen J.S. Progress on the applications of piezoelectric materials in sensors // *Materials Science Forum*. 2016. V. 848. P. 749–756. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.848.749>
- Лапшин В.В., Захаревич Е.М., Кузнецов М.С., Зараменских К.С., Осипов А.В. Технология обработки оптических деталей из кристаллов КРС-5 методом алмазного точения и фрезерования // *Фотоника*. 2021. Т. 15. № 1. С. 18–28. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.1.18.28>
- Жукова Л.В., Китаев Г.А., Козлов Ф.Н. Растворимость TlBr, TlI и их твердых растворов в воде // *Журнал физической химии*. 1978. Т. 52. № 7. С. 1692–1695.
- Китаев Г.А., Жукова Л.В., Козлов Ф.Н. Растворимость галогенидов таллия(I) и их твердых изоморфных смесей в полярных растворителях // *Журнал физической химии*. 1980. Т. 54. № 8. С. 2032–2036.
- Жукова Л.В., Китаев Г.А., Козлов Ф.Н. Растворимость галогенидов одновалентного таллия в воде и неводных растворителях. Справочник по продуктам растворимости. Новосибирск: Наука, 1983. 191 с.
- Козлов Ф.Н., Китаев Г.А., Жукова Л.В. Растворимость и кристаллизация галогенидов таллия(I) из водных растворов // *Журнал неорганической химии*. 1983. Т. 28. № 2. С. 482–486.
- Haynes W.M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, 2016. 2670 p.
- Bridgman P.W. Crystals and their manufacture. Patent US1793672A. 1931.
- Ерохин С.В., Зараменских К.С., Кузнецов М.С., Пилюшко С.М. Оптимизация процесса роста монокристалла КРС-5 с помощью расчета градиента температуры методом конечных элементов // *Тонкие химические технологии*. 2025. Т. 20. № 1. С. 55–62. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-1-55-62>
- Potts H., Wilcox W.R. Thermal fields in the Bridgman–Stockbarger technique // *Journal of Crystal Growth*. 1985. V. 73. N 2. P. 350–358. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(85\)90312-4](https://doi.org/10.1016/0022-0248(85)90312-4)

References

- Lang W. Silicon microstructuring technology. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 1996, vol. 17, no. 1, pp. 1–55. [https://doi.org/10.1016/0927-796X\(96\)00190-8](https://doi.org/10.1016/0927-796X(96)00190-8)
- Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Gavalyan M.Y., Belotserkovskiy A.V. Optical properties of large germanium monocrystals. *Optics and Spectroscopy*, 2016, vol. 120, no. 4, pp. 654–659. <https://doi.org/10.1134/S0030400X16030139>
- Isaenko L., Yelissev A., Tkachuk A., Ivanova S. New monocrystals with low phonon energy for mid-IR lasers. *NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*, 2008, pp. 3–65. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6463-0_1
- Taubin M.L., Yaskolko A.A. Improvement of medical X-ray tube performance. *Biomedical Engineering*, 2010, vol. 44, no. 2, pp. 73–75. <https://doi.org/10.1007/s10527-010-9159-8>
- Ababiy I., Aramă E. Advantages of applications UV detectors based on stratified crystals in medicine. *Proc. of the Professional Education and Economic Needs of the Black Sea Region*, 2015, pp. 127–133.
- Ganesh V., Shkir M., Maurya K.K., Yahia I.S., AlFaify S. Phenol red dyed bis thiourea cadmium acetate monocrystal growth and characterization for optoelectronic applications. *Journal of Materials Research*, 2018, vol. 33, no. 16, pp. 2364–2375. <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.235>
- Wischniewski M., Delibas B., Wischniewski A., Pertsch P. Microscale monocrystal ultrasonic actuators for miniature optical systems. *Proc. of the International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications*, 2022, pp. 1–4.
- Wang D., Chen J.S. Progress on the applications of piezoelectric materials in sensors. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 848, pp. 749–756. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.848.749>
- Lapshin V.V., Zakharevich E.M., Kuznetsov M.S., Zaramenskikh K.S., Osipov A.V. Technology of machining optical parts made of KRS-5 crystals by diamond turning and milling. *Photonics Russia*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 18–28. (in Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.1.18.28>
- Zhukova L.V., Kitaev G.A., Kozlov F.N. On solubility of TlBr, TlI and their solid solutions. *Zhurnal Fizicheskoy Himii*, 1978, vol. 52, no. 7, pp. 1692–1695. (in Russian)
- Kitaev G.A., Zhukova L.V., Kozlov F.N. Solubility of thallium(I) halides and their solid isomorphous mixtures in polar solvents. *Zhurnal Fizicheskoy Himii*, 1980, vol. 54, no. 8, pp. 2032–2036. (in Russian)
- Zhukova L.V., Kitaev G.A., Kozlov F.N. *Solubility of Monovalent Thallium Halides in Water and Non-Aqueous Solvents*. Handbook of Solubility Products. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 191 p. (in Russian)
- Kozlov F.N., Kitaev G.A., Zhukova L.V. Solubility and crystallization of thallium(i) halides from aqueous-solutions. *Zhurnal Neorganicheskoy Khimii*, 1983, vol. 28, no. 2, pp. 482–486. (in Russian)
- Haynes W.M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, 2016, 2670 p.
- Bridgman P.W. Crystals and their manufacture. Patent US1793672A. 1931.
- Erohin S.V., Zaramenskikh K.S., Kuznetsov M.S., Pilyushko S.M. Optimization of KRS-5 single crystal growth process by calculation of temperature gradient using finite element method. *Fine Chemical Technologies*, 2025, vol. 20, no. 1, pp. 55–62. (in Russian). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-1-55-62>
- Potts H., Wilcox W.R. Thermal fields in the Bridgman–Stockbarger technique. *Journal of Crystal Growth*, 1985, vol. 73, no. 2, pp. 350–358. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(85\)90312-4](https://doi.org/10.1016/0022-0248(85)90312-4)

18. Mouchovski J.T., Penev V.T., Kuneva R.B. Control of the growth optimum in producing high-quality CaF₂ crystals by an improved Bridgman–Stockbarger technique // *Crystal Research and Technology*. 1996. V. 31. N 6. P. 727–737. <https://doi.org/10.1002/crat.2170310603>
19. Nicoară D., Nicoară I. An improved Bridgman–Stockbarger crystal-growth system // *Materials Science and Engineering: A*. 1988. V. 102. N 2. P. L1–L4. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90584-8](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90584-8)
20. Chang C.E., Wilcox W.R. Control of interface shape in the vertical Bridgman–Stockbarger technique // *Journal of Crystal Growth*. 1974. V. 21. N 1. P. 135–140. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(74\)90161-4](https://doi.org/10.1016/0022-0248(74)90161-4)
21. Rosen G.J., Carlson F.M., Thompson J.E., Wilcox W.R., Wallace J.P. Monitoring vertical Bridgman–Stockbarger growth of cadmium telluride by an eddy current technique // *Journal of Electronic Materials*. 1995. V. 24. N 5. P. 491–495. <https://doi.org/10.1007/bf02657952>

18. Mouchovski J.T., Penev V.T., Kuneva R.B. Control of the growth optimum in producing high-quality CaF₂ crystals by an improved Bridgman–Stockbarger technique. *Crystal Research and Technology*, 1996, vol. 31, no. 6, pp. 727–737. <https://doi.org/10.1002/crat.2170310603>
19. Nicoară D., Nicoară I. An improved Bridgman–Stockbarger crystal-growth system. *Materials Science and Engineering: A*, 1988, vol. 102, no. 2, pp. L1–L4. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90584-8](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90584-8)
20. Chang C.E., Wilcox W.R. Control of interface shape in the vertical Bridgman–Stockbarger technique. *Journal of Crystal Growth*, 1974, vol. 21, no. 1, pp. 135–140. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(74\)90161-4](https://doi.org/10.1016/0022-0248(74)90161-4)
21. Rosen G.J., Carlson F.M., Thompson J.E., Wilcox W.R., Wallace J.P. Monitoring vertical Bridgman–Stockbarger growth of cadmium telluride by an eddy current technique. *Journal of Electronic Materials*, 1995, vol. 24, no. 5, pp. 491–495. <https://doi.org/10.1007/bf02657952>

Авторы

Кузьмин Максим Игоревич — руководитель направления по разработке программного обеспечения, Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н.П. Сагина, Москва, 111524, Российская Федерация, [sc 59374615000](mailto:mimikatz@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6265-9052>, mimikatz@mail.ru

Ельников Максим Сергеевич — стажер-исследователь, Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н.П. Сагина, Москва, 111524, Российская Федерация; студент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-8149-5302>, elnikow.max@gmail.com

Кушнирук Давид Ильич — начальник группы, Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н.П. Сагина, Москва, 111524, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0006-4419-6983>, k.davjd@gmail.com

Морозов Максим Витальевич — ведущий инженер-технолог, Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н.П. Сагина, Москва, 111524, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0007-1782-9623>, MViMorozov@yandex.ru

Кузнецов Михаил Сергеевич — начальник лаборатории, Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н.П. Сагина, Москва, 111524, Российская Федерация, [sc 55421893200](https://orcid.org/0000-0002-8441-4424), <https://orcid.org/0000-0002-8441-4424>, gradan@mail.ru

Authors

Maksim I. Kuzmin — Head of the Software Development Department, JSC N.P. Sazhin State Scientific Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet”, Moscow, 111524, Russian Federation, sc 59374615000, <https://orcid.org/0000-0001-6265-9052>, mimikatz@mail.ru

Maksim S. Elnikov — Research Intern, JSC N.P. Sazhin State Scientific Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet”, Moscow, 111524, Russian Federation; Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-8149-5302>, elnikow.max@gmail.com

David I. Kushniruk — Head of Group, JSC N.P. Sazhin State Scientific Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet”, Moscow, 111524, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0006-4419-6983>, k.davjd@gmail.com

Maksim V. Morozov — Leading Process Engineer, JSC N.P. Sazhin State Scientific Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet”, Moscow, 111524, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-1782-9623>, MViMorozov@yandex.ru

Mikhail S. Kuznetsov — Head of Laboratory, JSC N.P. Sazhin State Scientific Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet”, Moscow, 111524, Russian Federation, [sc 55421893200](https://orcid.org/0000-0002-8441-4424), <https://orcid.org/0000-0002-8441-4424>, gradan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.05.2025

Одобрена после рецензирования 20.07.2025

Принята к печати 23.09.2025

Received 20.05.2025

Approved after reviewing 20.07.2025

Accepted 23.09.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»