

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ЛЕЙКОСАПФИРА ДЛЯ ОПТИКИ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Т.Д. Кожина, проректор по науке и инновациям Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, д-р техн. наук, проф.
А.В. Юдин, доц. каф. Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, канд. техн. наук
В.Ю. Ерошков, доц. каф. Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, канд. техн. наук

Объектом исследований является монокристаллический синтетический сапфир — искусственно выращиваемый кристалл, широко применяемый в микроэлектронике, оптоэлектронике, оптике, машино- и приборостроении, медицине и др. отраслях. В работе представлен анализ методов и способов обеспечения стабильности условий роста тугоплавких монокристаллов за счет совершенствования элементов системы автоматизации, применения современных алгоритмов управления на основе прогнозирования физических явлений, протекающих в ростовой электротермической установке.

Ключевые слова: монокристалл, синтетический сапфир, лейкосапфир, метод Чохральского, метод Киропулоса.

Введение. Синтетические кристаллы используются практически во всех технологических областях, и появление новых эффективных методов их выращивания и обработки способно если не совершить промышленную революцию, то уж точно напрямую повлиять на уровень конкурентоспособности завязанной на их использование продукции. Из существующих в природе тысяч кристаллических минералов люди научились искусственно выращивать несколько сотен, а широкое практическое применение получили и вовсе лишь несколько десятков кристаллов. Причина — в сложности протекания процессов кристаллизации и в технических трудностях, связанных с необходимостью тщательного соблюдения режима выращивания монокристаллов.

По данным зарубежной печати, производство лейкосапфиров в мире растет по экспоненте и в ближайшие 10 лет увеличится в 10 раз. Мировой рынок лейкосапфира и изделий из него является развивающимся с темпом роста 10–15 % в год. Высокочистый оксид алюминия является сырьем для роста монокристаллических сапфиров, что ведет к повышению спроса и на данном рынке. Рост российского рынка высокочистого оксида алюминия и лейкосапфиров может быть только при условии развития высоких технологий, что невозможно без активной поддержки государства. Здесь важной является и ориентация на международный рынок. Но для этого необходима активная маркетинговая политика производителей.

Разработка технологии получения монокристаллов лейкосапфира и изделий из них во многом определяет успехи развития важнейших направлений квантовой электроники, микроэлектроники, атомной энергетики. Весьма широк диапазон потребительских свойств монокристаллического лейкосапфира: от генерации, усиления и преобразования электромагнитных колебаний до использования в качестве конструкционного материала. Такое широкое применение монокристаллов лейкосапфира связано с тем, что они обладают набором уникальных качеств [1]: высокая оптическая однородность и прозрачность в широком диапазоне длин волн, радиационная стойкость, хорошие механические, термические и диэлектрические свойства.

На сегодняшний день выполняются прикладные НИР по производству в промышленных масштабах тугоплавких монокристаллов, в том числе монокристаллов лейкосапфира, для применения в электронике, оптоэлектронике, оптике, точной механике, приборостроении и лазерной технике, для производства сверхъярких светодиодов. Одним из перспективных направлений энергосберегающих технологий является замена традиционных ламп накаливания на источники освещения на основе сверхъярких светодиодов. Стандартный поверхностно монтируемый сверхъяркий светодиод в 12 раз эффективнее лампы накаливания, при этом срок его службы выше в 50 раз, он стоек к коррозии и к механическим воздействиям, миниатюрен и потребляет минимальное количество энергии. Основой для их производства служат подложки, изготавливаемые из монокристаллов лейкосапфира.

Осваиваются также технологии получения профилированных кристаллов тугоплавких соединений рубина, алюмоиттриевого граната и др. Ведутся работы по переходу на более эффективное технологическое оборудование, позволяющее получать були (округленные формы) монокристаллов лейкосапфира весом до 100 кг. В промышленных масштабах лейкосапфир производится по всему миру и фактически используется в каждой крупной отрасли промышленности.

Разработка технологии получения монокристаллов лейкосапфира и изделий из них является актуальной задачей для микроэлектроники. Однако производство и решение научно-технических задач, связанных с получением и обработкой крупногабаритных кристаллов лейкосапфира, до сих пор остается серьезной проблемой.

Основные результаты исследования. Основными методами выращивания объемного монокристалла лейкосапфира в России являются методы Чохральского, Киропулоса, Бриджмена, Вернейля горизонтально направленной кристаллизации (ГНК). Для производства кристаллов профилированного лейкосапфира применяется метод Степанова. Этим методом выращивают в основном ленты, которые идут на изготовление различных оптических окон.

Качественные монокристаллы лейкосапфира выращивают методом Чохральского, однако этот метод не позволяет получать монокристаллы больших размеров.

Преимущество этого метода (вытягивания из расплава) по сравнению с другими методами заключается в том, что кристалл растет в свободном пространстве без контакта со стенками тигля, при этом достаточно легко можно менять диаметр растущего кристалла и визуально контролировать рост. Наиболее существенным недостатком метода Чохральского, ограничивающим его применение, является значительная химическая неоднородность выращиваемых кристаллов, выражающаяся в монотонном изменении состава последовательных слоев кристалла вдоль направления роста.

Объемные монокристаллы лейкосапфира выращивают в основном по методу Киропулоса. Он достаточно прост и хорошо освоен, но имеет ряд недостатков, которые влияют на качество монокристаллов. Рассмотрим некоторые особенности реализации этого метода на практике.

Данный метод относится к методам с неограниченным объемом расплава, так как все исходное сырье перед выращиванием расплавляется. Он заключается в том, что выращивание осуществляется в самом расплаве (вглубь расплава) путем плавного снижения температуры. Во время роста монокристалл занимает практически весь объем тигля (рис. 1).

Наиболее существенным недостатком данного метода выращивания монокристаллов является нестабильность скорости кристаллизации [2], так как в процессе роста с изменением массы расплава и кристалла изменяется и теплообмен. Скорость кристаллизации прямо пропорциональна температурному градиенту на фронте кристаллизации. Отсюда следует, что для получения заданной стабильной скорости кристаллизации необходимо управление температурным градиентом фронта кристаллизации.

Температурный градиент зависит от множества факторов, главными из которых являются скорость изменения напряжения на нагревателе, скорость вытягивания монокристалла из

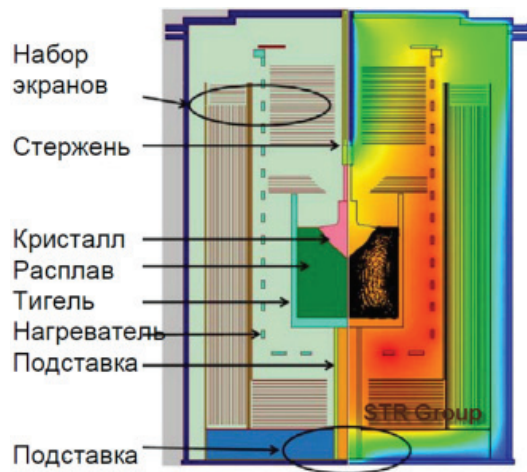


Рис. 1. Особенности выращивания сапфира в промышленных масштабах по методу Киропулоса

расплава, а также температура воды в различных контурах охлаждения. Рассматриваемые процессы выращивания проводятся при стабилизированной температуре воды, отклонение которой обычно составляет не более $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Изменение скорости вытягивания не представляет особых проблем. А вот изменение температуры затруднено большой *тепловой инерцией* объекта регулирования. Реализация замкнутого принципа управления в таких условиях оказывается неэффективной, поскольку существует большое запаздывание в контуре обратной связи. Для реализации разомкнутого принципа управления на основе метода обратных задач было получено аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, позволяющее рассчитать *оптимальный закон управления* для перевода термического объекта в новое состояние.

Для этого требуется определить закон изменения во времени напряжения $U(t)$ на нагревательном элементе для того, чтобы была получена зависимость изменения температуры, обеспечивающая за интервал времени τ изменение температуры до заданного конечного T_K значений, при этом в момент достижения температурой конечного значения скорость ее изменения должна быть равна нулю, а напряжение на нагревателе – заданному конечному значению. На практике прямое измерение температуры затруднено. Косвенно о стабильности температуры можно судить по стабильности мощности – в работе [3] показано, что при постоянном напряжении на нагревателе и стабильной мощности температура в зоне кристаллизации также будет неизменна. Т. е. приведенные требования могут быть применены и к значению мощности.

Сказанное эквивалентно системе уравнений

$$U(\tau) = U_K,$$

$$P(\tau) = P_K,$$

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=\tau} = 0.$$

Как объект управления электротермическая установка для выращивания монокристаллов лейкосапфира может быть представлена в виде динамического звена второго порядка.

Исходное дифференциальное уравнение для такой системы является линейным неоднородным с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^2 P}{dt^2} + K_V \frac{dP}{dt} = K_U U,$$

где K_V — коэффициент, характеризующий инерционные свойства объекта; K_U — коэффициент, характеризующий степень восприимчивости системы к управляющему воздействию.

Алгоритм оптимального управления таким объектом подразумевает форсированный разогрев до некоторой скорости, а затем активное его торможение с целью уменьшения длительности переходного процесса. То есть, управление должно быть знакопеременным. В этом случае удобно формировать управление в классе параболических функций:

$$U = At^2 + Bt + C.$$

Установки выращивания монокристаллов характеризуются значительной тепловой инерцией, поэтому после окончания этапа разогрева наблюдается рост температуры в зоне кристаллизации по «инерции», что затрудняет вывод установок на режим.

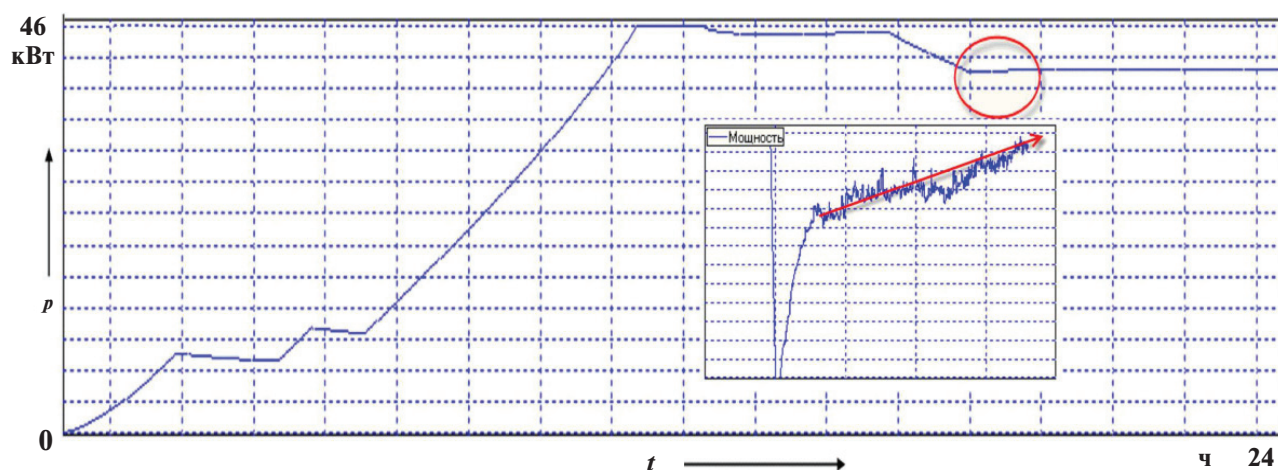
Используя алгоритм оптимального управления, можно рассчитать закон изменения напряжения на нагревателе, обеспечивающий постоянное значение мощности в конце этапа нагрева. Внедрение данной методики расчета управления на ОАО «Рыбинские кристаллы» позволило сократить время перехода от режима разогрева к режиму затравления на 4 часа. Закон изменения мощности при линейном изменении напряжения приведен на рис. 2, а. На рис. 2, б приведен закон изменения мощности при изменении напряжения по параболическому закону.

Как видно из рис. 2, б, по завершению разогрева мощность неизменна (а следовательно и температура) и возможен переход к этапу затравления. Сокращение времени разогрева особенно важно при переходе к производству большеразмерных монокристаллов, поскольку тепловая инерция установок значительно возрастает.

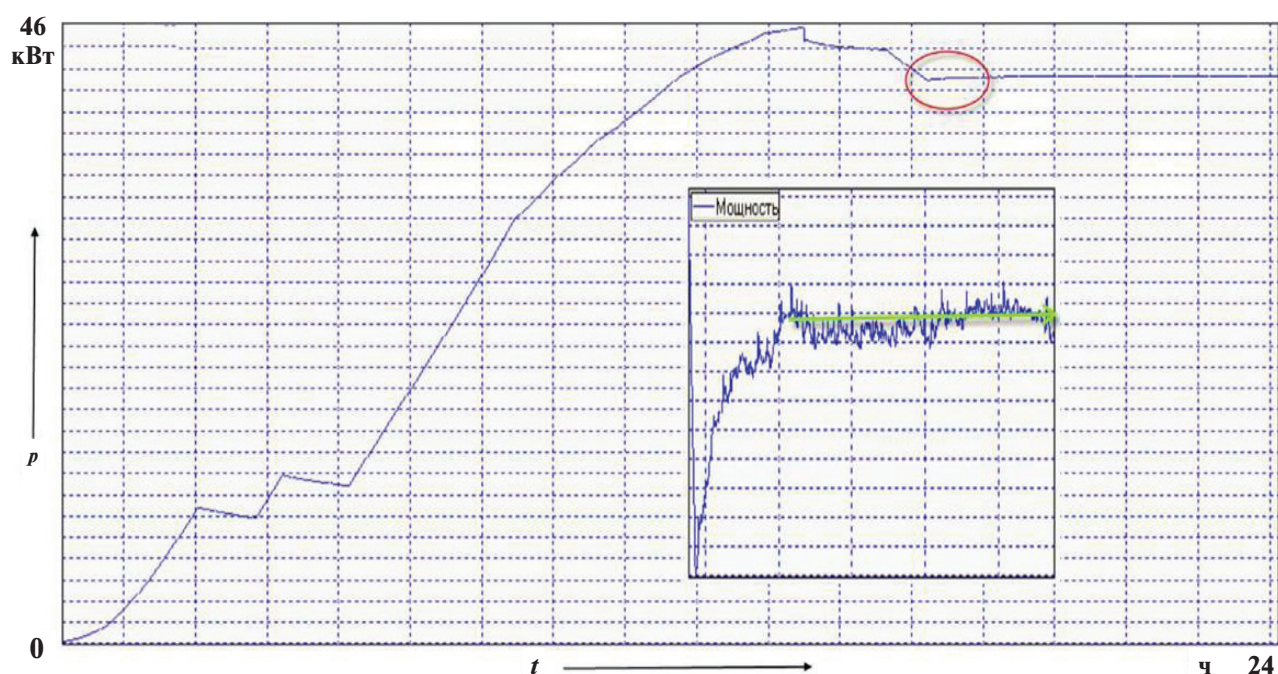
Помимо значительной инерционности сложность управления процессом кристаллизации связана с сложностью измерения параметров роста. Анализ конструкции ростовой установки показывает невозможность визуального наблюдения за фронтом кристаллизации. Это связано с характером роста монокристалла, так как монокристалл занимает практически весь объем тигля и при этом фронт кристаллизации находится в расплаве, а также с наличием экрана-пробки.

Измерение температур фронта кристаллизации также не представляется возможным. Использование термопар и терморезисторов ограничено их рабочим диапазоном температур, а использование бесконтактных способов измерения температуры с применением пирометров и тепловизоров ограничено наличием экрана-пробки, практически полностью закрывающего расплав.

Так как невозможно визуальное наблюдение и измерение температур фронта кристаллизации, то необходимо использование косвенного параметра, который бы характеризовал скорость кристаллизации. Единственным информационным каналом, по которому можно косвенно судить о состоянии монокристалла, является датчик веса, откалиброванный в килограммах и показывающий массу растущего монокристалла. Масса монокристалла в текущий момент времени зависит от скорости кристаллизации и от площади фронта кристаллизации. С учетом того, что площадь фронта кристаллизации изменяется достаточно медленно, скорость изменения массы монокристалла является косвенным параметром, характеризующим скорость кристаллизации.



а)



б)

Рис. 2. Оптимизация этапа разогрева:

а – линейный закон изменения напряжения;
б – параболический закон изменения напряжения

Анализ направления исследований и разработок показывает, что основными направлениями являются моделирование температурного поля ростовой установки и вычисление оптимальных режимов выращивания на основе данных моделей [4]. При этом не производится исследований, связанных с алгоритмами управления данным технологическим процессом.

Существующие системы управления обладают рядом серьезных недостатков: большинство являются разомкнутыми и не имеют обратной связи по скорости изменения массы мо-

нокристалла; в существующих системах управления не учитываются данные предыдущих проведенных ростовых процессов; отсутствует прогнозирование роста монокристалла [5].

В процессе управления ростом монокристалла не допускаются резкие воздействия на объект управления, так как они приводят к нарушению структуры монокристалла. Классические системы управления на основе ПИД-регулирования не способны к такому управлению, так как в таких системах возмущение по входу регулятора приводит к пропорциональному изменению выхода регулятора, и, соответственно, в случае сильных возмущений будут возникать резкие воздействия на объект управления.

В результате анализа возмущений, действующих на датчик веса, данные возмущения разделены на две группы: возмущения, связанные с конструктивными особенностями ростовых установок; возмущения, связанные непосредственно с процессом роста.

К возмущениям, связанным с конструктивными особенностями, относятся: постоянный шум, присутствующий в сигнале тензодатчика; задевания и трения штока или монокристалла об экран-пробку; возмущения, связанные с системой водяного охлаждения.

Для подавления постоянного шума успешно используются фильтры на основе алгоритма «скользящее среднее», с временными воротами, равными 1 мин.

Возмущения, причины которых — задевание и трение штока или монокристалла, являются случайными и их влияние не может быть снижено с помощью обработки сигнала датчика веса. Причины таких возмущений необходимо устранять путем центровки штока до начала процесса роста.

К возмущениям, связанным непосредственно с процессом роста, относятся: возмущения в виде «сдвигов» сигнала; возмущения в виде «провалов» сигнала; возмущения от залипания монокристалла (прилипания к стенкам тигля).

Для уменьшения влияния возмущений на расчет скорости изменения массы предложены специальные алгоритмы. Алгоритм устранения возмущений в виде «сдвигов» и «провалов», основанный на измерении отклонения текущей массы монокристалла, позволяет устранять «сдвиги» и «провалы». Алгоритм обнаружения залипаний 1-го рода основан на контроле отклонения дисперсии сигнала датчика относительно нормальной дисперсии сигнала на данном процессе. При этом если отклонение дисперсии составляет больше 10 % от нормальной дисперсии сигнала для данного процесса, то это значит, что произошло залипание 1-го рода. Алгоритм определения залипания 2-го рода основан на контроле вхождения текущей скорости изменения массы в диапазон скоростей. Для вычисления текущей скорости изменения массы разработан алгоритм аппроксимации кусочно-линейной функции с динамическим определением интервалов. Параметрами данного алгоритма является время расчета скорости и порог превышения прогнозируемой массы монокристалла.

При анализе непосредственно объекта управления определено, что он является существенно нелинейным. Несмотря на то, что в 90 % случаев оператор не в состоянии сформулировать какой-либо точный количественный критерий, операторам и технологам на основе своего опыта удается успешно управлять технологическим процессом, не прибегая при этом к каким-либо сложным математическим формулам, объектам, структурам и инструментам.

Такое положение дел наталкивает на использование принципиально иного инструмента идентификации нелинейных систем, а именно использование математического аппарата нечеткой логики.

Оценивая возможности данного инструмента для решения задачи построения системы автоматического управления технологическим процессом выращивания монокристалла лейкоапира, можно выделить следующие особенности аппарата нечеткой логики:

1. Согласно теореме о нечеткой аппроксимации, доказанной Б. Коско, любая математическая система может быть аппроксимирована системой на основе математического аппарата нечеткой логики. Таким образом, в принципе может быть получена модель любого

нелинейного объекта управления, в том числе объекта управления для системы автоматического управления ростом монокристалла сапфира как частный случай.

2. Идентификация нелинейных систем с помощью аппарата нечеткой логики обходится без использования интегрального и дифференциального исчисления, традиционно применяемого при создании систем управления и при идентификации систем.

Обобщая преимущества данного инструмента, можно сделать вывод, что использование математического аппарата нечеткой логики для проектирования системы автоматического управления выращиванием монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса наиболее эффективно по сравнению с традиционными методами. При этом нечеткая модель процесса является основой для прогнозирующего регулятора, входящего в структуру системы управления ростовой установкой [6].

При проектировании *теплового узла* в конструкцию закладываются характеристики, обеспечивающие плоский фронт кристаллизации. Искажения теплового поля, возникающие за счет разброса параметров отдельных секций нагревателя, не учитываются, хотя изменения радиальной составляющей фронта кристаллизации при этом могут быть весьма значительными.

Высокотемпературный нагреватель, как правило, представляет собой решетчатую конструкцию из вольфрамовых прутков, расположенных по наружной поверхности цилиндрического вольфрамового тигля. Как следует из анализа [7], минимальному уровню напряженности соответствуют синфазные токи (рис. 3), т. е. для снижения воздействия магнитного поля на расплав необходимо запитывать все прутки нагревателя в одной фазе. Конструкция такого нагревателя должна содержать токоподводящее кольцо в верхней и нижней части нагревателя. В то же время конструктивное исполнение нагревателей с двумя полукольцами в верхней части, применяемое в настоящее время, отличается почти в два раза большим уровнем воздействия магнитного поля.

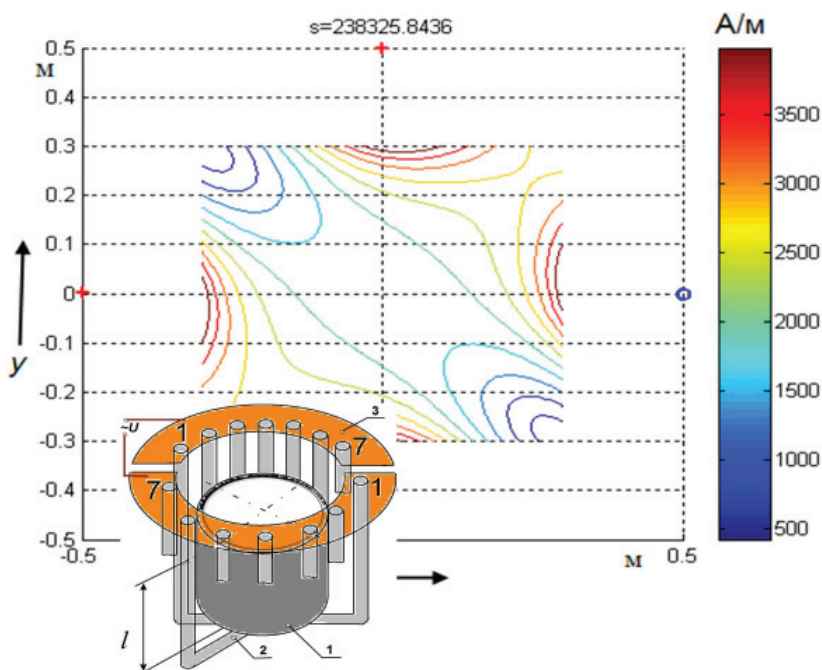


Рис. 3. Моделирование влияния магнитных полей со стороны высокотемпературного нагревателя на расплав



Рис. 4. Изделия из монокристалла лейкосапфира ОАО «РЗП»

В РГАТУ имени П.А. Соловьева совместно с ОАО «РЗП» реализован инновационный проект по освоению технологии и промышленному производству в больших масштабах монокристаллов лейкосапфира весом до 30 кг для применения в электронике, оптоэлектронике, оптике, точной механике, приборостроении и лазерной технике (рис. 4). Полученные лейкосапфиры используются для создания сверхъярких светодиодов, для разработки и производства паст для металлизации солнечных элементов, являющихся одним из наиболее перспективных сегментов рынка возобновляемых источников энергии. В перспективе — освоение технологий получения профилированных кристаллов тугоплавких соединений рубина, алюмоиттриевого граната и др. Ведутся работы по переходу на более эффективное технологическое оборудование выращивания монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса, позволяющие получать були монокристаллов лейкосапфира весом до 60 кг.

Следует особо отметить, что большое значение в области развития любой отрасли науки и техники имеют не только наукоемкие инженерные технологии, но и образовательные.

Анализ ситуации в сфере обеспечения квалифицированными кадрами высокотехнологичных предприятий, а также ситуации на региональном сегменте рынка труда показал, что имеет место не количественный, а качественный и структурный дефицит кадров. Фактически прекратилось воспроизводство профессий по многим важным направлениям, а система подготовки специалистов в учреждениях профессионального образования не успевает за изменениями в сфере практической деятельности. Ситуация с кадровым обеспечением наукоемких предприятий осложняется отсутствием эффективных форм взаимодействия системы профессиональной подготовки и сферы потребления специалистов. На рынке труда практически отсутствуют механизмы, обеспечивающие приток новых кадров и молодых специалистов в промышленность.

В условиях дефицита высококвалифицированных специалистов на рынке труда предприятия авиационной, ракетно-космической промышленности и прочих наукоемких отраслей вынуждены разрабатывать и применять новые технологии подготовки и привлечения кадров.

По инициативе РГАТУ и при финансовой поддержке ГК «РОСНАНО» создан Учебно-технический центр подготовки специалистов в области наноматериалов и нанотехнологий (УТЦ ПС ЭРИП). Специализация центра выбрана на основе запросов работодателей. Подготовка по программе «Технологии выращивания монокристаллов лейкосапфира и других тугоплавких монокристаллов для электроники и приборостроения» осуществляется в рамках договора с ОАО «Рыбинский завод приборостроения».

В основу образовательных программ учебно-технического центра положен модульный принцип, обеспечивающий возможность создания специализаций с усилением подготовки

в определенном направлении по желанию заказчика. Обучение специалистов, а также повышение их квалификации осуществляется на основе компетентностных учебных планов, которые являются основным документом. Особенностью такого учебного плана является ориентация подготовки не на совокупность тем и дисциплин, преподаваемых в определенном объеме, а на полученные слушателями практические знания и умения, позволяющие специалистам успешно решать задачи, связанные с созданием и производством современной высокотехнологичной техники.

Например, модуль М2 «Технология выращивания тугоплавких монокристаллов методом Киропулоса» — один из шести профилирующих модулей, предполагает специализированную подготовку инженеров-технологов в области выращивания тугоплавких монокристаллов методом Киропулоса. В результате усвоения данного модуля слушатели приобретают следующие компетенции: по ПК2.1 слушатель осуществляет расчет технологических режимов для выращивания тугоплавких монокристаллов методом Киропулоса; по ПК2.2 адаптирует используемые на предприятии средства управления к обеспечению заданных технологических режимов; ПК2.3 проектирует и внедряет новые технологические режимы, обеспечивающие повышение качества монокристалла и снижение производственных затрат; ПК2.4 достигает средствами автоматизации приемлемых параметров производительности и качества продукции, как на основных операциях, так и технологическом процессе в целом и т. д.

В рамках специальностей и направлений переподготовки и повышения квалификации предусмотрена возможность создания специализаций. Они являются частью специальности, в рамках которой создаются, и предполагают более углубленное получение профессиональных знаний по отдельному профилю специальности. Объем часов (трудоемкость), отводимых на дисциплины специализации, должен определяться на основе специфики дисциплины.

Основными инструментами оценки прироста компетенций специалистов в процессе и по итогам обучения являются следующие технологии: применение автоматизированной информационной системы, осуществляющей измерение компетенций на основе тестирования, объединение результатов в группы компетенций, построение лепестковой диаграммы компетенций слушателя и наложение этой диаграммы на лепестковую диаграмму требуемых компетенций; самооценка изменения компетенций, для реализации которой каждый слушатель снабжается имеющимися в составе учебно-методического комплекса задачами для самоподготовки, контрольными вопросами. Кроме того, предполагается модификация автоматизированной информационной системы измерения компетенций для обеспечения возможности онлайн-доступа слушателей, задействованных в программе обучения.

В целом, разработанная двухуровневая система подготовки специалистов обеспечивает реализацию оптимальной образовательной траектории для каждого слушателя и позволяет сформировать необходимые компетенции для программы. Предлагаемая программа обучения слушателей может быть использована для разработки компетентностно-ориентированной программы опережающей переподготовки кадров для предприятий наноиндустрии. Экзаменационные оценки по результатам изучения дисциплин, а также результаты защит выпускных работ свидетельствуют о приобретении слушателями необходимых компетенций, которые будут использованы в дальнейшей производственной деятельности специалистов на предприятиях наноиндустрии и авиадвигателестроения.

Заключение. В процессе исследования процессов и разработки технологий выращивания и обработки монокристаллов лейкосапфира и других тугоплавких монокристаллов получены качественные монокристаллические материалы со специальными оптическими свойствами, сверхтвердые материалы. Они могут использоваться как функциональные материалы для космической техники, приборостроения, электроники.

Проведенный анализ существующих промышленных ростовых установок показал отсутствие автоматизированных систем управления ростом монокристаллов лейкосапфира по методу Киропулоса, что связано со сложностью структуры объекта управления. Конструкционные

ограничения, присущие данным установкам, не позволяют наблюдать ни форму фронта кристаллизации, ни диаметр выращиваемого монокристалла. В связи с этим управление ростом монокристалла возможно только на основе косвенного параметра, в качестве которого предложена скорость изменения массы монокристалла.

Для управления ростом цилиндрической части монокристалла с учетом недопустимости резких управляющих воздействий необходимо применение прогнозирующего управления. Для решения этой задачи необходимо разработать модель роста цилиндрической части монокристалла. Для создания модели, с учетом существенной нелинейности объекта управления, можно выбрать математический аппарат нечеткой логики. На основе нечеткой модели роста цилиндрической части монокристалла лейкосапфира можно создать прогнозирующую модель, которая позволит рассчитать рост монокристалла на заданном горизонте прогнозирования. На основе прогнозирующей модели можно разработать оптимальный регулятор.

Анализ тенденций развития оборудования выращивания монокристаллов показал, что в этой сфере существует тенденция к увеличению размеров монокристаллов. Исследователи проявляют интерес к снижению уровня электромагнитного излучения в расплав, например за счет применения нагревателя специальной формы. Также увеличивается количество регулируемых тепловых зон. Снижение уровня электромагнитного излучения в расплав не всегда может быть достигнуто путем изменения конструкции нагревателя. Значительный эффект дает снижение уровня искажения напряжения на нагревателе за счет разработки специального класса прецизионных регуляторов мощности на основе дискретно регулируемых трансформаторных элементов.

Реализация научно-технических достижений при исследовании в области технологий выращивания и обработки монокристаллов лейкосапфира и других тугоплавких монокристаллов для оптики и нанoeлектроники позволяет повысить эффективность производства монокристаллов лейкосапфира массой до 60 кг и более, а также расширить спектр применения лейкосапфиров. Освоенные на ОАО «Рыбинский завод приборостроения» разработки позволили увеличить ресурс работы существующих установок на 15–20 %, повысить экономичность до 30 %, а также снизить почти 2 раза трудоемкости технического обслуживания. Одновременно успешно реализована программа подготовки кадров РГАТУ им. П.А. Соловьева для работы на модернизированном оборудовании.

Список литературы

1. **Еськов Э.В., Игнатов А.Ю., Постолов В.С., Филимонов А.С.** Оптический сапфир, технические требования и технология выращивания кристаллов // Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии. VIII Междунар. конф. Ставрополь: СевКавГТУ. 2008.
2. **Багдасаров Х.С.** Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит, 2004.
3. **Юдин А.В.** Особенности регулирования мощности на вольфрамовом высокотемпературном нагревателе // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. Сб. науч. тр. Рыбинск, 2011. № 2(20). Часть 2.
4. **Синельников Б.М., Игнатов А.Ю., Москаленко С.В.** Математическое моделирование начальной стадии роста кристаллов сапфира методом Киропулоса // Химия твердого тела: монокристаллы, наноматериалы, нанотехнологии. IX Междунар. науч. конф. Ставрополь. СевКавГТУ. 2008.
5. **Юдин А.В.** Методология проектирования систем управления электротермическими установками выращивания монокристаллов: Моногр. М.: Машиностроение, 2010.
6. **Юдин А.В., Лобацевич К.Л.** Беспoisковая адаптивная система стабилизации скорости кристаллизации монокристаллов // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 11.
7. **Юдин А.В.** Электромагнитная модель многокомпонентного высокотемпературного нагревателя // Вестник ИГЭУ. 2011. № 5.