

## КЛАСТЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫМИ УСТАНОВКАМИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ИЗ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РАСТВОРОВ

© 2019 г. А. Э. Волошин<sup>1</sup>, В. В. Егоров<sup>2</sup>, А. П. Калинин<sup>3,\*</sup>, В. Л. Маноменова<sup>1</sup>, А. И. Родионов<sup>4</sup>,  
И. Д. Родионов<sup>4</sup>, Е. Б. Руднева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт проблем механики РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup> Институт химической физики РАН, Москва, Россия

\* E-mail: kalinin@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 20.09.2018 г.

После доработки 24.10.2018 г.

Принята к публикации 24.10.2018 г.

Разработана новая автоматизированная система управления кристаллизационными установками, обеспечивающая их надежную работу и дистанционное управление ими. Описаны принципы построения и функционирования системы управления большим количеством установок для выращивания кристаллов из низкотемпературных растворов.

DOI: 10.1134/S0023476119020334

### ВВЕДЕНИЕ

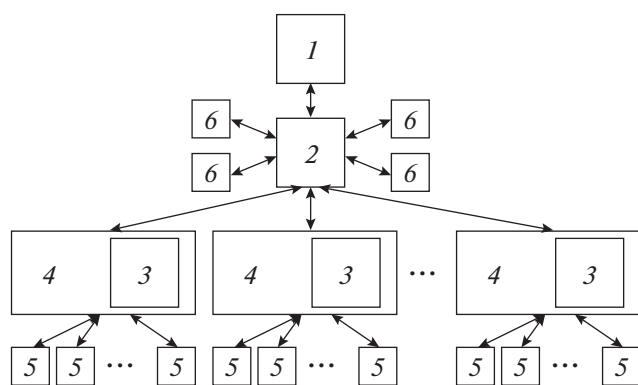
Кристаллы, выращиваемые из водных растворов, несмотря на их в разной степени выраженную гигроскопичность, находят широкое применение в технике. В качестве примеров можно привести нелинейно-оптические кристаллы группы KDP и иодата лития, которые используются в лазерных системах, пьезоэлектрические кристаллы триглицинсульфата (TGS), применяющиеся в приемниках ИК-излучения, кристаллы сульфатов переходных металлов (NSH, KCSH и др.), которые применяются в качестве фильтров в сенсорах УФ-диапазона, предназначенных для изучения физических процессов в газодинамических течениях, процессов экологического мониторинга, и во многих других приложениях.

Время роста кристаллов из низкотемпературных растворов в зависимости от типа кристалла, выбранных условий роста и требуемого размера кристалла может варьироваться от нескольких недель до нескольких месяцев. Основными параметрами, влияющими на рост кристаллов, являются чистота исходного сырья и правильный выбор условий роста. Однако поддержание заданных условий на всем протяжении процесса роста — это существенный фактор, оказывающий непосредственное влияние на качество кристалла.

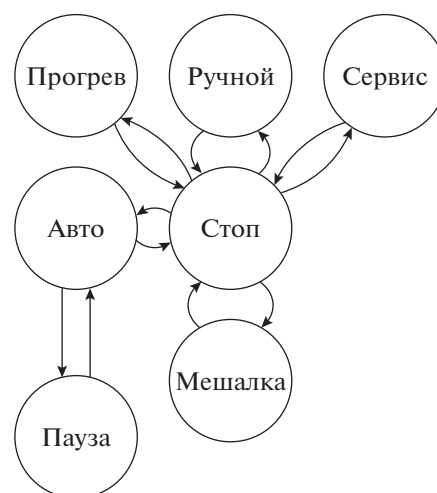
Приборы, обеспечивающие температурный режим роста, прошли долгий путь развития. Из-

начально использовались контактные термометры, позволявшие вручную задавать температуру роста. На смену им пришли программируемые контроллеры РЕМИКОНТ, а затем ОВЕН, которые выпускаются как в одноканальных, так и в многоканальных вариантах. Из зарубежных аналогов наиболее известны контроллеры EURO-THERM (Германия) и OMRON (Япония). Приборы такого типа позволяют использовать программный режим задания температуры, а в случае наличия дополнительных каналов также управлять режимом реверсивного перемешивания. Несколько лет назад была разработана система управления кристаллизационными установками [1], которая обеспечивает не только задание, поддержание и контроль температуры в кристаллизаторе, но и позволяет плавно менять скорость перемешивания раствора. Применение всех этих систем рассчитано на одну или несколько кристаллизационных установок (КУ), что хорошо подходит для лабораторного выращивания кристаллов. Однако при мелкосерийном производстве кристаллов к регулирующим установкам предъявляются несколько иные требования: разграничение функций технолога и оператора, управление параметрами роста через компьютер, повышенная надежность.

Цель работы — разработка новой автоматизированной системы управления большим количеством кристаллизационных установок.



**Рис. 1.** Блок-схема управления кластерами из  $n \times 10$  кристаллизационных установок с системой управления: 1 – центральный сервер, 2 – коммутатор верхнего уровня, 3 – коммутаторы нижнего уровня, 4 – блоки управления, 5 – кристаллизационные установки, 6 – управляющие компьютеры.



**Рис. 2.** Режимы работы программы управления. Стрелками показаны возможные переходы между режимами.

## ПОДХОДЫ К РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧИ

Одним из главных свойств системы управления большим количеством КУ должна быть ее надежность, поэтому было решено остановиться на системе кластерного типа, когда блок управления (БУ) работает с ограниченным количеством кристаллизаторов (например, с десятью), и таких БУ в системе может быть несколько десятков.

Принципиальная схема ростовой КУ, которая неоднократно описывалась в литературе (например, в [2]), не изменилась. Однако с целью повышения надежности ее функционирования были добавлены датчики вращения моторов мешалок кристаллизатора и термостата, которые отсутствовали в предыдущих версиях КУ. Отметим, что выход из строя любого из этих моторов приводил к незапланированным изменениям в режиме роста кристалла и, как следствие, возникновению дефектов, несовместимых с практическим использованием кристалла. Кроме того, предусмотрено подключение резервного датчика температуры.

Специальные требования предъявлялись к программе управления. Ввиду большого количества КУ и работы с ними людей разной квалификации созданы разные уровни доступа к управлению процессом роста для операторов и технологов.

## ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Схема автоматизированной системы управления представлена на рис. 1. Центральный сервер 1 выполняет сбор данных о ростовом процессе и аварийных ситуациях в КУ через коммутатор

верхнего уровня 2. Коммутатор 2 осуществляет связь между управляющими компьютерами 6 и коммутаторами нижнего уровня 3, входящими в блоки управления 4. Управляющие компьютеры работают по технологии “тонкого клиента” и позволяют следить за работой каждой КУ и дистанционно управлять ею. Все БУ, которых может быть подключено в систему до пятидесяти, объединены в сеть через коммутаторы нижнего уровня. Каждый БУ представляет собой модульную систему, обеспечивающую сбор информации и одновременное управление десятью КУ. Таким образом, с помощью описанной автоматизированной системы можно управлять пятьюстами КУ. При этом в каждой установке может независимо выполняться своя технологическая программа (ТП) выращивания кристалла. Связь БУ с управляющим компьютером осуществляется Ethernet коммутатором ЕК1-3528 (коммутатор среднего уровня).

Пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование температуры раствора согласно фиксированной уставке или заданной ТП осуществляется контроллерами Advantech ADAM-5560KW, БУ управляет моторами мешалок кристаллизатора и термостата. Датчики Холла, размещенные на кристаллизационной установке, передают в БУ сигнал в случае аварийной остановки моторов. Регулировка температуры возможна от комнатной до 100°C. Точность поддержания температуры  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ . Скорость вращения мешалки кристаллизатора варьируется от 20 до 80 об./мин.

При возникновении аварийной ситуации (существенное расхождение уставки температуры и показаний термодатчика, остановка мотора мешалки и т.п.) БУ включает звуковое и световое оповещение об аварии.

Для удобства работы БУ имеет табло, на котором отображаются все важные параметры ростового процесса: температура, скорость вращения мешалки кристаллизатора, режим работы и т.п. Через табло можно изменять параметры ростового процесса, доступные для уровня “оператор”.

Для управления автоматизированным кластером КУ создана программа управления отдельными КУ или целыми блоками установок, которая имеет два уровня доступа к технологическому процессу: “оператор” и “технолог”, что защищает от внесения несанкционированных изменений в ТП. Программа управления имеет семь режимов (рис. 2), позволяющих выполнять различные стадии процесса выращивания кристалла (таблица 1).

Программа управления позволяет создавать, редактировать и загружать ТП в контроллер БУ, в том числе просматривать и редактировать исполняемую ТП. Через программу управления могут быть заданы все параметры работы КУ. На экран управляющего компьютера выводится информация обо всех КУ, включенных в кластер, независимо от того, в каком режиме они находятся. Сохраняется информация обо всех аварийных ситуациях и действиях технолога через управляющий компьютер. Возможен просмотр графиков изменения заданных и реальных температур в произвольном диапазоне. Возможно управление отдельными параметрами через табло БУ, например температурой в “ручном” режиме. Для одной из десяти КУ, управляемых БУ, на табло могут отображаться: режим работы программ управления, заданная температура, показания двух термодатчиков, скорость вращения мешалки кристаллизатора, стадия выполнения ТП, аварии. Выбор КУ осуществляется через табло.

### АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

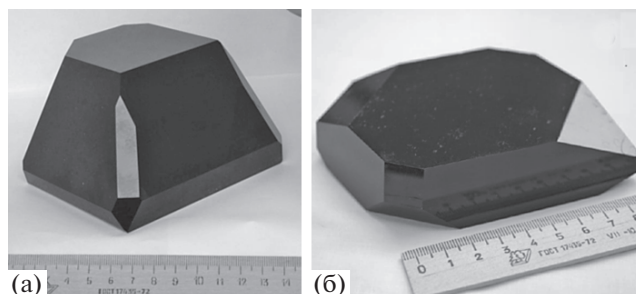
Система управления КУ успешно протестирована на примере кластера, состоящего из 220 КУ, в которых выращена экспериментальная партия кристаллов гексагидратов сульфатов никеля и калия-кобальта, применяемых в качестве оптических фильтров УФ-диапазона (рис. 3). Выращенные кристаллы высокого оптического качества используются в приборах солнечно-слепой технологии [3].

**Таблица 1.** Режимы работы программы управления

Режим	Описание режима
Стоп	Никакого регулирования процессом не проводится.
Ручной	Поддержание постоянных значений температуры и скорости вращения мешалки кристаллизатора, которые могут быть заданы через управляющий компьютер или через табло БУ. Может использоваться, например, при определении температуры насыщения раствора.
Авто	Управление температурой и скоростью вращения мешалки кристаллизатора в соответствии с заложенной ТП, которая задается и изменяется только через управляющий компьютер.
Пауза	Приостановка выполнения заложенной ТП. Поддержание текущего значения температуры.
Мешалка	Работает только мешалка кристаллизатора, скоростью вращения которой можно управлять. Включается при снижении температуры до заданного значения на начальном этапе роста кристалла.
Прогрев	Аналогичен режиму “ручной”, но мешалка кристаллизатора выключена. Используется при перегреве раствора перед фильтрацией или началом процесса кристаллизации.
Сервис	Режим аналогичен режиму “стоп”, но отличается тем, что в нем отключается контроль аварийных ситуаций. Используется при выводе из работы кристаллизационной установки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная система управления позволяет одновременно управлять большим количеством ростовых установок (до 500), контролировать процесс выращивания кристаллов и при необходи-



**Рис. 3.** Примеры выращенных кристаллов: а – α-гексагидрат сульфата никеля (α-NSH), б – гексагидрат сульфата калия-кобальта (KCSH).

мости вносить в него коррективы. Практическое использование автоматизированного кластера показало правильность заложенных при его проектировании принципов и позволило вырастить кристаллы хорошего оптического качества в необходимом количестве для серийно выпускаемых приборов. Эти приборы могут эффективно использоваться при исследованиях физических процессов в газодинамике, изучении процессов горения и взрыва, а также при решении задач мониторинга и управления экологическим состоянием окружающей среды.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26 в части выращивания и исследования спектров пропускания кристаллов,

№ гос. рег. АААА-А18-118022790133-1 в части разработки программного обеспечения управляющей системы, № гос. рег. АААА-А17-117021310376-4 в части создания концепции управляющей системы, № гос. рег. АААА-А17-117112240026-5 в части реализации управляющей системы).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов С.Н., Белов А.А., Волошин А.Э. и др. // Датчики и системы. 2011. № 3. С. 13.
2. Петров Т.Г., Трейвус Е.Б., Пунин Ю.О., Касаткин А.П. Выращивание кристаллов из растворов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1983. 200 с.
3. Belov A.A., Egorov V.V., Kalinin A.P. et al. // Autom. Remote Control. 2014. V. 75. № 8. P. 1479.