УДК 6.62.620.66.66-6

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-3-68-81

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ГРАФИТОВОМ ТЕПЛОМ УЗЛЕ УСТАНОВКИ ПО ВЫРАЩИВАНИЮ МОНОКРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ГНК

**Саркисов С. Э.¹, Юсим В. А.¹, Рябченков В. В.^{1,2}, Калимуллин Р. К.¹,
Говорун И. В.^{1,2}, Сакмаров А. В.^{1,2}**

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Российская Федерация

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9,
Российская Федерация

Аннотация. Впервые для развития возможностей метода горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) по расширению химических классов выращиваемых кристаллов создана высокотемпературная установка синтеза галоидных соединений. Основным элементом установки является графитовый тепловой узел, впервые разработанный для выращивания фторсодержащих монокристаллов методом ГНК. Для оценки работоспособности установки и выявления температурных особенностей проведения кристаллизационного процесса комплекс исследований включал математическое моделирование процессов гидродинамики, тепло- и массопереноса внутри графитового теплового узла, а также между ним и кристаллизационным аппаратом. Для численных расчётов использовались усреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса и модифицированный закон Стефана-Больцмана для не абсолютно чёрного тела. Экспериментально определены температурные интервалы тепловой инерционности и установления термодинамического равновесия в тепловом узле ростовой установки вплоть до температур выше 1500 °С. Знание величин этих температурных параметров необходимо для предупреждения самопроизвольного перегрева расплава в процессе выращивании кристаллов фторидов.

Ключевые слова: графитовый тепловой узел; теплоперенос; тепловая инерция; термодинамическое равновесие; теплозащитное покрытие, метод конечных элементов

STUDY OF HEAT TRANSFER IN A GRAPHITE THERMAL UNIT OF THE FACILITY FOR GROWING SINGLE CRYSTALS BY THE HDC METHOD

**S. Sarkisov¹, V. Yusim¹, V. Ryabchenkov^{1,2}, R. Kalimullin¹, I. Govorun^{1,2},
A. Sakmarov^{1,2}**

¹ National Research Center “Kurchatov Institute”
pl. Akad. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russian Federation

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
Institutskii per. 9, 141701 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russian Federation

© СС ВУ Саркисов С. Э., Юсим В. А., Рябченков В. В., Калимуллин Р. К., Говорун И. В., Сакмаров А. В., 2019.

Abstract. We report the development of a high-temperature installation for the synthesis of halide compounds to improve the capabilities of the method of horizontal directed crystallization (HDC) that makes it possible to expand the chemical classes of crystals grown. The main element of the facility is a graphite thermal unit, developed for growing fluorine-containing single crystals for the first time by the HDC method. To assess the installation operability and to identify the temperature features of the crystallization process, the research complex included mathematical modeling of the processes of hydrodynamics, heat and mass transfer inside the graphite thermal unit, as well as between it and the crystallization apparatus. Numerical calculations relied on Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and a modified Stefan-Boltzmann law used for a not absolutely black body. The temperature ranges of thermal inertia, as well as the establishment of the thermodynamic equilibrium in the thermal unit of the growth facility up to temperatures above 1500 °C, were experimentally determined. Knowledge of the values of these temperature parameters is necessary to prevent spontaneous overheating of the melt during the growth of fluoride crystals.

Keywords: graphite thermal unit, heat transfer, thermal inertia, thermodynamic equilibrium, heat insulation coating, finite element method

Введение

Метод ГНК был разработан исключительно для синтеза оксидных кристаллов, главным образом, лейкосапфира в вольфрам-молибденовых узлах [1; 2]. Данная работа посвящена развитию метода горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) по выращиванию крупногабаритных монокристаллов фторидов в графитовом тепловом узле. На рис. 1 показана разработанная конструкция графитового теплового узла, который вставляется в стальную водоохлаждаемую рубашку (СВР) кристаллизационной установки по выращиванию кристаллов методом ГНК.

Рис. 1. Модель графитового теплового узла в сборе.

В данном узле имеется высокотемпературный модуль с градиентным участком кристаллизации (1), из которого растущий кристалл попадает в модуль охлаждения (2) для последующего отжига, что важно для получения оптически совершенных фторидных и других галоидных кристаллов без дополнительного послеростового отжига.

Актуальность использования технологии выращивания фторидов по методу ГНК связана с тем, что монокристаллы этих соединений являются важными оптическими материалами с окном прозрачности в широком спектральном диапазоне [3] и перспективными матрицами для кристаллических лазеров [4–8] и сцинтилляторов [9–12]. Для создания мощных лазерных систем и эффективных электромагнитных калориметров необходимы широкоформатные детекторы и соответственно крупногабаритные объёмные кристаллы с большой площадью [2; 13]. В исследовательскую программу НИЦ «Курчатовский институт» по синтезу кристаллов для эффективных γ -детекторов включены работы по получению объёмных высокоапертурных монокристаллов CeF_3 размером до $250 \times 330 \times 40$ мм для экспериментов в области физики высоких энергий. Кристаллы такого размера общепринятым методом выращивания фторидов по Бриджмену получить невозможно. Кристаллы CeF_3 по световому выходу, радиационной стойкости на порядок превосходят кристаллы PbWO_4 , которые сейчас используются в детекторах Большого адронного коллайдера (БАК), а по своему быстродействию (23 нс) практически не уступают последним.

В целях проведения теоретических исследований, касающихся тепло- и массопереноса в конструкции графитового теплового узла, а также его взаимодействия с СВР кристаллизационной установки, сделана попытка выполнить компьютерное моделирование и анализ теплообмена внутри графитового теплового узла, гидродинамических процессов, протекающих в проточной части СВР, конвективного теплообмена СВР с окружающей атмосферой.

В качестве объектов исследований были выбраны температурные модули теплового узла, отвечающие за получение кристалла [10; 14]. Для моделирования тепловых процессов в указанных объектах использовалась программа SolidWorks Flow Simulation.

С целью изучения реальной динамики развития тепловых процессов внутри графитового теплового узла, которые оказывают влияние на температурные особенности протекания процесса выращивания кристаллов, были проведены высокотемпературные исследования. Экспериментально определены такие важные параметры, оказывающие влияние на процесс кристаллизации, как тепловая инерционность графитового узла и установления термодинамического равновесия в нём вплоть до температур выше 1500°C , характерных для области плавления практически всех галоидных кристаллов.

Результаты и их обсуждение

Моделирование процессов теплопереноса в тепловом узле

Во внутреннем пространстве кристаллизационного аппарата на поверхностях графитового узла и окружающей его СВР задаются условия, учитывающие два механизма теплообмена поверхностей. К ним относятся: радиационный теплообмен с окружающими поверхностями и молекулярный перенос тепла от более нагретых деталей узла к менее нагретым деталям.

Для расчёта скорости теплообмена за счёт излучения между абсолютно чёрным телом и окружающей средой для реальных поверхностей закон Стефана-

Больцмана должен быть подвергнут изменениям. Для не абсолютно чёрных поверхностей спектральная интенсивность излучения не подчиняется распределению Планка и для испускаемого излучения характерны предпочтительные направления.

Модифицированный закон Стефана-Больцмана для не абсолютно чёрного тела определяется соотношением:

$$Q_{\text{излучение}} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T_s^4 - T_a^4), \quad (1)$$

где ε является коэффициентом излучения испускающей поверхности, определяемым как отношение к излучению абсолютно чёрного тела, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_s – температура абсолютно чёрного тела, T_a – температура окружения, A – площадь излучающей поверхности.

В ситуациях, когда излучающие тела производят частичный обмен излучением, следует ввести понятие коэффициент видимости излучения (F). Коэффициент видимости излучения поверхности i в отношении поверхности j определяется как отношение энергии, испускаемой с поверхности i и непосредственно достигающей поверхности j , к общему количеству энергии, покидающей поверхность i . Имея в виду такое определение, получаем, что чистый обмен излучением между поверхностью площадью A_i с температурой T_i и некоторой поверхностью A_j с температурой T_j задаётся соотношением:

$$Q_{\text{излучение}} = \varepsilon_i \times \sigma \times A_i \times F_{ij} (T_i^4 - T_j^4), \quad (2)$$

где F_{ij} есть конфигурационный фактор поверхности i относительно поверхности j , ε_i – коэффициент излучения поверхности i .

В случаях, когда поверхности имеют разные коэффициенты излучения ε_i и ε_j , остаточный радиационный теплообмен задаётся следующей формулой:

$$Q_{\text{радиация}} = \sigma \times \frac{T_i^4 - T_j^4}{\left(1 - \frac{\varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i}\right) + \left(\frac{1}{A_i F_{ij}}\right) + \left(1 - \frac{\varepsilon_j}{F_j \varepsilon_i}\right)}. \quad (3)$$

Перенос тепла подчиняется закону Фурье:

$$Q_{\text{проводимости}} = -K \times A \times \left(\frac{dT}{dx}\right), \quad (4)$$

где K – коэффициент теплопроводности.

Расчёты были выполнены в линейном приближении по методике [15] в модели, построенной в программном модуле Solid Works Flow Simulation [15–17] для распределения тепловой нагрузки на графитовую часть теплового узла в различных сечениях. В результате выполненных расчётов установлены изотермы температурного распределения в рабочем пространстве теплового узла, которые наглядно отражают существование участков роста и отжига кристаллов в конструкции настоящего теплового узла.

Экспериментальное исследование динамики тепловых процессов в графитовом узле

Кристаллизация методом ГНК предусматривает плавную протяжку тигля с шихтой сквозь нагревательный блок через температурное градиентное поле в холодную зону ростовой установки. Нагревательный блок в конструкции теплового узла состоит из двух плоских ленточных графитовых нагревателей, расположенных друг над другом, между которыми перемещается графитовый тигель (в форме лодочки) с шихтой из фторсодержащего материала (рис. 2).

Рис. 2. Тепловой узел в сборе. 1 – центральный модуль; 2 – левое крыло; 3 – правое крыло.

В простейшей математической модели процессов внутреннего теплообмена для графитового теплового узла (далее объекта) при условии, что теплопередача в окружающую среду ничтожно мала благодаря эффективной внутренней теплоизоляции ростовой установки уравнение теплового баланса для системы «нагреватель-тепловой узел-теплоизоляция» записывается в виде:

$$Q_{уз} = Q_{нагр} + Q_{изол}, \quad (5)$$

где $Q_{уз} = CM[T(t) - T(t - \Delta t)]$ – количество тепла, которое требуется для того, чтобы нагреть на температуру $T(t) - T(t - \Delta t)$ объект (тепловой узел) с массой M и удельной теплоёмкостью C за время Δt ;

$Q_{уз} = \lambda_{ну} [T(t) - T(t)] \Delta t$ – количество тепла, которое поступает за время Δt от нагревателя с температурой поверхности $T_n(t)$ и с коэффициентом теплопередачи «нагреватель-объект» $\lambda_{ну}$.

$Q_{изол} = \lambda_{ну} [T(t) - T_{ср}(t)] \Delta t$ – тепловые потери за время Δt за счёт теплопередачи от объекта к теплоизоляции с температурой $T_{ср}(t)$ и с коэффициентом теплопередачи «объект-теплоизоляция» $\lambda_{уи}$. Температура в объекте описывается следующим уравнением:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau_0} = \left[\left(\frac{T_{ср}(t)}{1 + \mu} \right) + \left(\frac{T_n(t)\mu}{1 + \mu} \right) \right], \quad (6)$$

где $\tau_o = C M / (\lambda_{yu} + \lambda_{ny})$ – постоянная времени объекта с учётом эффектов теплопередачи с окружающей средой и нагревателем; $\mu = \lambda_{ny} / \lambda_{yu}$ – коэффициент, показывающий насколько эффективней теплопередача «объект-нагреватель» по сравнению с теплопередачей «объект-теплоизоляция».

На рис. 3 показана кривая плавного инерционного нарастания температуры теплового узла при резком скачкообразном изменении температуры нагревателя. Характерное время инерционного нарастания равно постоянной времени τ_o , которая определяется только свойствами объекта (теплоёмкостью $C M$) и условиями теплообмена с окружающей средой λ_{yu} и λ_{ny} .

Рис. 3. Графики изменения температуры узла и нагревателя.

Из уравнения (6) и рис. 3 следует, что большие масса и теплоёмкость делают тепловой узел более инерционным. Для стабилизации поддержания необходимой температуры выращивания кристалла теплоёмкость узла должна быть значительно выше теплоёмкости синтезируемого материала.

На рис. 4, 5 показаны зависимости изменения температуры от подаваемой мощности, соответственно для нижнего и верхнего нагревателей, полученные в результате высокотемпературных измерений.

Рис. 4. Кривая тепловой зависимости нижнего нагревателя.

Рис. 5. Кривая тепловой зависимости верхнего нагревателя.

Подъём температурных зависимостей нагревателей (рис. 4; 5), на участке 800–1400 °C в большей степени связан с тепловой инерционностью при прогреве системы «нагреватель-окружение» (см. табл. 1), но также своё влияние оказывает полученная температурная зависимость роста удельного сопротивления ρ при тех же температурах, как показано на рис. 6.

Рис. 6. Температурная зависимость изменения удельного сопротивления графитового нагревателя.

В таблице 1 представлены данные результатов изменения температуры на нижнем нагревателе в интервале 1020–1570 °C при трёх значениях мощностей на нагревателе с общей протяжённостью по времени 240 мин.

Таблица 1.

Изменение температуры нагревателя от времени прогрева

$P_1 = 9660$ Вт		$P_2 = 10464$ Вт		$P_3 = 11237$ Вт	
$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мин}$	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мин}$	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мин}$
1019	0	1425	0	1515	0
1175	30	1448	30	1567	15
1270	60	1448	15	1567	15
1320	10	1448	15	1567	15
1370	10	–	–	1567	15
1370	10	–	–	–	–

Как следует из приведённых в таблице данных, при P_1 в температурном интервале 1019–1370 $^\circ\text{C}$ до наступления термодинамического равновесия (T не изменяется от времени прогрева) системы «нагреватель-окружение» интервал тепловой инерционности системы $\Delta T_{\text{инерц.}} = 351$ $^\circ\text{C}$, что приблизительно на порядок выше соответствующих значений при P_2 и P_3 . Зависимости, построенные по данным таблицы 1, демонстрирует рис. 7.

Рис. 7. Кривые изменения тепловой инерционности нагревателя от подаваемой мощности.

Из приведённых кривых следует, что с увеличением уровня прогрева внутреннего объёма узла тепловая инерционность значительно уменьшается и быстрее наступает термодинамическое равновесие (переход кривых в горизонтальное положение). Эти факторы имеют важное значение, их необходимо учитывать при проведении нагрева и плавления шихты, а также дальнейшего процесса кристаллизации, чтобы предотвратить неконтролируемый (самопроизвольный) инерционный перегрев расплава после начала роста кристалла. Уменьшение инерционности и более быстрое наступление термодинамического равновесия системы «нагреватель-окружение» с увеличением прогрева связано с соответствующим уменьшением тепловых потерь, согласно формуле:

$$Q_{\text{пот}} = \alpha(T_{\text{нагр}} - T_{\text{окр}})S, \quad (7)$$

где α – коэффициент теплового рассеяния, $T_{\text{нагр}}$ – температура нагревателя, $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды (деталей теплового узла и всего объема установки), S – площадь излучения нагревателя. Из формулы следует, что при $T_{\text{окр}} \rightarrow T_{\text{нагр}}$ тепловые потери $Q_{\text{пот}} \rightarrow 0$, то есть, чем будет выше прогрев теплового узла, тем быстрее наступит термодинамическое равновесие тепловой системы. На рис. 8 показана зависимость времени наступления термодинамического равновесия от температуры в объеме теплового узла, рассчитанная по данным таблицы 1.

Конструкция теплового узла создана из комбинации различающихся по теплопроводности графитовых материалов, включающих изостатический и пористый (войлок) графит. Это позволило создать эффективный теплосберегающий узел, в котором при температуре нагревателей $\sim 2600^\circ\text{C}$, температура на внутренних стенках графитового теплового узла была порядка 500°C , на внутренней стороне водоохлаждаемой рубашки менее 300°C , а на внешней стороне ростовой установки не более 35°C .

Рис. 8. Временная зависимость уменьшения инерционности тепловой системы графитового теплового узла.

Заключение

В данной работе путём компьютерного моделирования проведены расчёты процессов переноса тепла в графитовом тепловом узле, разработанном для установки по выращиванию кристаллов методом ГНК. Установлены изотермы температурного распределения по всей длине теплового узла, которые в значительной степени точности совпадают с экспериментальными данными соответствующих тепловых измерений.

Экспериментально исследована динамика тепловых процессов, непосредственно влияющих на температурные параметры процесса роста кристалла. Отградуированы температурные режимы нагревателей в зависимости от подаваемой мощности, и определены соответствующие интервалы тепловой инерци-

онности, которые позволяют определить время наступления термодинамического равновесия системы «нагреватель-тепловой узел» для различных температур в диапазоне от 800 до 1600 °С, в который попадают температуры плавления всех известных фторидных соединений. Проведённые тепловые испытания показали, что создан эффективный теплосберегающий графитовый узел, позволяющий при 2600 °С на нагревателях получать температуру на внешней стороне ростовой установки не более 35 °С.

Статья поступила в редакцию 12.07.2019 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках грантов РФФИ (19-29-02007, 18-08-00291, 17-08-00963, 17-08-00443, 18-08-00192). Расчёты проведены на основе пакета SolidWorks Educational Edition CAMPUS500 модуль FlowSimulation на кафедре моделирования ядерных процессов физтех-школы фундаментальной и прикладной физики МФТИ. Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт», приказ от 14.08.2019, №1808.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant Nos 19-29-02007, 18-08-00291, 17-08-00963, 17-08-00443, and 18-08-00192). The calculations were carried out using the SolidWorks Educational Edition CAMPUS500 package with the Flow Simulation module at the Department of Nuclear Modeling of the Physics and Technology School of Fundamental and Applied Physics at MIPT. This work was supported by the National Research Center “Kurchatov Institute”, order of 08/14/2019, No. 1808.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багдасаров Х. С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит, 2004. 159 с.
2. Багдасаров Х. С., Гориянов Л. А. Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией. М.: Физматлит, 2007. 224 с.
3. Юшкин Н. П., Волкова Н. В., Маркова Г. А. Оптический флюорит. М.: Наука, 1983. 146 с.
4. Исследование стимулированного излучения кристаллов $\text{Sr}_2\text{Y}_5\text{F}_{19}$ с ионами Nd^{3+} / Каминский А. А., Саркисов С. Э., Сейранян К. Б., Соболев Б. П. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. №1. С. 187–189.
5. Kaminskii A. A., Sarkisov S. E., Eichler H.-J. Spectroscopic and laser properties of Er^{3+} -doped monoclinic BaY_2F_8 single crystals // Optical and Quantum Electronics. 1990. Vol. 22. Supplement 1. P. S95–S105.
6. Kaminskii A. A., Sarkisov S. E. Thermodynamical consideration of the peculiarities of activator ion quascentres in disordered laser crystals // Physica status solidi (a). 1991. Vol. 123. Iss 1. P. 213–219.
7. Kaminskii A. A., Sarkisov S. E., Butashin A. V. Manifestation of structural disordered peculiarities of $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, $\text{Ca}_3(\text{Nb},\text{Ga})_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ and $\text{BaF}_2\text{-YF}_3$ crystalline solid solutions in fundamental optical phonon spectra // Physica status solidi (a). 1990. Vol. 119. Iss. 1. P. 285–295.

8. Каминский А. А., Саркисов С. Э. Физика и спектроскопия лазерных кристаллов. М.: Наука, 1986. 282 с.
9. Шендрик Р. Ю., Раджабов Е. А., Непомнящих А. И. Сцинтилляционные свойства кристаллов SrF_2 и $\text{SrF}_2\text{-Ce}^{3+}$ // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39. Вып. 13. С. 9–16.
10. Саркисов С. Э., Рябченков В. В. Сцинтилляционный материал для регистрации ионизирующего излучения (Варианты). Патент РФ №2627573 от 08.08.2017 г.
11. Каминский А. А., Вердун Г. Р. Новые кристаллические лазеры на основе разупорядоченных фторидов с ионами Nd^{3+} , накачиваемых излучением полупроводниковых лазеров // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 2. С. 109–111.
12. Generation of 103 fs mode-locked pulses by a gain linewidth-variable Nd:YCaF₂ disordered crystal / Qin Z. P., Xie G. Q., Ma J., Ge W. Y., Yuan P., Qian L. J., Su L. B., Jiang D. P., Ma F. K., Zhang Q., Cao Y. X., Xu J. // Optics Letters. 2014. Vol. 39. Iss. 7. P. 1737–1739.
13. Применение фотодиодов большой площади для улучшения характеристик электромагнитного калориметра на основе кристаллов вольфрамата свинца / Балыгин К. А., Ипполитов М. С., Климов А. И., Лебедев В. А., Манько В. И. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 5. С. 13–18.
14. Тепловой узел установки для выращивания галоидных кристаллов методом горизонтально направленной кристаллизации. Патент РФ №2643980 от 06.02.2018 г. / Юсим В. А., Калиммулин Р. К., Рябченков В. В., Саркисов С. Э.
15. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006/2007. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК ПРЕСС, 2007. 786 с.
16. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation 2012. Как решать практические задачи. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 445 с.
17. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation 2009. Tutorial. Как решать практические задачи. СПб.: «БХВ-Петербург», 2008. 244 с.

REFERENCES

1. Bagdasarov Kh. S. *Vysokotemperaturnaya kristallizatsiya iz rasplava* [High temperature crystallization from melt]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 159 p.
2. Bagdasarov Kh. S., Goriyanov L. A. *Teplo- i massoperenos pri vyrashchivanii monokristallov napravlennoi kristallizatsiei* [Heat and mass transfer in growing single crystals by directed solidification]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 224 p.
3. Yushkin N. P., Volkova N. V., Markova G. A. *Opticheskii flyuorit* [Optical fluorite]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 146 p.
4. Kaminskii A. A., Sarkisov S. E., Seiranyan K. B., Sobolev B. P. [Investigation of the stimulated emission from $\text{Sr}_2\text{V}_3\text{F}_{19}$ crystals doped with Nd^{3+} ions]. In: *Kvantovaya elektronika* [Soviet Journal of Quantum Electronics], 1974, vol. 1, no. 1, pp. 187–189.
5. Kaminskii A. A., Sarkisov S. E., Eichler H.-J. Spectroscopic and laser properties of Er^{3+} -doped monoclinic BaY_2F_8 single crystals. In: *Optical and Quantum Electronics*, 1990, vol. 22, Supplement 1, pp. S95–S105.
6. Kaminskii A. A., Sarkisov S. E. Thermodynamical consideration of the peculiarities of activator ion quasicentres in disordered laser crystals. In: *Physica status solidi (a)*, 1991, vol. 123, iss 1, pp. 213–219.
7. Kaminskii A. A., Sarkisov S. E., Butashin A. V. Manifestation of structural disordered peculiarities of $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, $\text{Ca}_3(\text{Nb,Ga})_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ and $\text{BaF}_2\text{-YF}_3$ crystalline solid solutions in fundamental optical phonon spectra. In: *Physica status solidi (a)*, 1990, vol. 119, iss. 1, pp. 285–295.

8. Kaminskii A. A., Sarkisov S. E. *Fizika i spektroskopiya lazernykh kristallov* [Physics and spectroscopy of laser crystals]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 282 p.
9. Shendrik R. Yu., Radzhabov E. A., Nepomnyashchikh A. I. [Scintillation properties of SrF_2 and $\text{SrF}_2\text{-Ce}^{3+}$ crystals]. In: *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Technical Physics], 2013, vol. 39, no. 13, pp. 9–16.
10. Sarkisov S. E., Ryabchenkov V. V. *Stsintillyatsionnyi material dlya registratsii ioniziruyushchego izlucheniya (Varianty)*. Patent RF №2627573 ot 08.08.2017 g. [Scintillation material for detecting ionizing radiation (Options). RF patent No. 2627573 from 08.08.2017].
11. Kaminskii A. A., Verdun G. R. [New crystal lasers utilizing disordered fluoride crystals activated with Nd^{3+} ions pumped by semiconductor laser radiation]. In: *Kvantovaya elektronika* [Soviet Journal of Quantum Electronics], 1992, vol. 19, no. 2, pp. 109–111.
12. Qin Z. P., Xie G. Q., Ma J., Ge W. Y., Yuan P., Qian L. J., Su L. B., Jiang D. P., Ma F. K., Zhang Q., Cao Y. X., Xu J. Generation of 103 fs mode-locked pulses by a gain linewidth-variable Nd:Y:CaF₂ disordered crystal. In: *Optics Letters*, 2014, vol. 39, iss. 7, pp. 1737–1739.
13. Balygin K. A., Ippolitov M. S., Klimov A. I., Lebedev V. A., Manko V. I. et al. [Use of Large-Area Photodiodes for Improving the Characteristics of an Electromagnetic Calorimeter Based on Lead Tungstate Crystal]. In: *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2018, no. 5, pp. 13–18.
14. Yusim V. A., Kalimmulin R. K., Ryabchenkov V. V., Sarkisov S. E. *Teplovoi uzel ustanovki dlya vyrashchivaniya galoidnykh kristallov metodom gorizonta'no napravlennoi kristallizatsii*. Patent RF №2643980 ot 06.02.2018 g. [Thermal unit of the plant for growing halide crystals by the method of horizontally directed crystallization. RF patent No. 2643980 dated 02/06/2018].
15. Alyamovskii A. A. *SolidWorks/COSMOSWorks 2006/2007. Inzhenernyi analiz metodom konechnykh elementov* [SolidWorks/COSMOSWorks 2006/2007. Engineering analysis with finite elements]. Moscow, DMK PRESS Publ., 2007. 786 p.
16. Alyamovskii A. A. *SolidWorks Simulation 2012. Kak reshat' prakticheskie zadachi* [SolidWorks Simulation 2012. How to solve practical problems]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2012. 445 p.
17. Alyamovskii A. A. *SolidWorks Simulation 2009. Tutorial. Kak reshat' prakticheskie zadachi* [SolidWorks Simulation 2009. Tutorial. How to solve practical problems]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2008. 244 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саркисов Степан Эрвандович – кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией экспериментального моделирования и синтеза тугоплавких материалов Управления по нераспространению и физической защите Курчатовского комплекса реабилитации и нераспространения Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;
e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com;

Юсим Валентин Александрович – старший научный сотрудник Лаборатории экспериментального моделирования и синтеза тугоплавких материалов Управления по нераспространению и физической защите Курчатовского комплекса реабилитации и нераспространения Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;
e-mail: Yusim_VA@nrcki.ru;

Рябченков Владимир Васильевич – кандидат физико-математических наук, заместитель руководителя Управления нераспространения и физической защиты Курчатовского комплекса реабилитации и нераспространения Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; ассистент Московского физико-технического института (национально-исследовательского университета); e-mail: RVV55@yandex.ru;

Калимуллин Раф Каюмович – научный сотрудник Лаборатории экспериментального моделирования и синтеза тугоплавких материалов Управления по нераспространению и физической защите Курчатовского комплекса реабилитации и нераспространения Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com;

Говорун Игорь Викторович – аспирант, ассистент Московского физико-технического института (национального исследовательского университета); e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com;

Сакмаров Александр Викторович – аспирант, ассистент Московского физико-технического института (национального исследовательского университета); e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stepan E. Sarkisov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory for Experimental Modeling and Refractory Materials Synthesis at the Office for Non-Proliferation and Physical Protection of the Kurchatov Rehabilitation and Non-Proliferation Complex, National Research Center “Kurchatov Institute”; e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com;

Valentin A. Yusim – Senior Researcher of the Laboratory of Experimental Modeling and Refractory Materials Synthesis at the Office for Non-Proliferation and Physical Protection of the Kurchatov Rehabilitation and Non-Proliferation Complex, National Research Center “Kurchatov Institute”; e-mail: Yusim_VA@nrcki.ru;

Vladimir V. Ryabchenkov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Department on Non-Proliferation and Physical Protection of the Kurchatov Rehabilitation and Non-Proliferation Complex, National Research Center “Kurchatov Institute”; assistant lecturer, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University); e-mail: RVV55@yandex.ru;

Raf K. Kalimullin – researcher of the Laboratory of Experimental Modeling and Refractory Materials Synthesis at the Office for Non-Proliferation and Physical Protection of the Kurchatov Rehabilitation and Non-Proliferation Complex, National Research Center “Kurchatov Institute”; e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com;

Igor V. Govorun – postgraduate student, assistant lecturer, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University); e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com;

Aleksandr V. Sakmarov – postgraduate student, assistant lecturer, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Исследование теплообмена в графитовом тепловом узле установки по выращиванию монокристаллов методом ГНК / Саркисов С. Э., Юсим В. А., Рябченков В. В., Калимуллин Р. К., Говорун И. В., Сакмаров А. В. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика–математика. 2019. № 3. С. 68–81.

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-3-68-81

FOR CITATION

Sarkisov S. E., Yusim V. A., Ryabchenkov V. V., Kalimullin R. K., Govorun I. V., Sakmarov A. V. Study of heat transfer in a graphite thermal unit of the facility for growing single crystals by the HDC method. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2019, no. 3, pp. 68–81.

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-3-68-81