

УДК 621.382

Ю.В. Клунникова

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ПОДЛОЖЕК ИЗ САПФИРА
ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ***

Предложена методика и представлены результаты оптимизации технологического процесса получения изделий из сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) для интегральных схем. Отличиями предлагаемой методики оптимизации технологического процесса получения подложек из сапфира для интегральных схем являются использование методов экспертной оценки и планирования эксперимента в ходе проведения моделирования технологического процесса, разработка оптимизационной модели, использование специализированной базы данных. Проведены расчеты времени кристаллизации и уровня дефектов в кристалле сапфира, определяющегося количеством пузырей на единицу площади. Построена модель, позволяющая задавать различные уровни дефектов сапфира и проводить оптимизацию временных параметров технологического процесса получения кристаллов сапфира. В статье приведена обобщенная структура управления технологическим процессом получения изделий из сапфира. Разработано программное обеспечение на языке программирования C++, позволяющее рассчитывать режимы роста и обработки кристаллов сапфира, выбирать оптимальные параметры технологических процессов роста и обработки сапфира, представить прогноз дефектных характеристик сапфира, выявлять закономерности в процессах роста и обработки кристаллов сапфира. Данное программное обеспечение является универсальным и может быть использовано при выращивании кристаллов из различных материалов. На основе проведенных исследований отработана технология роста сапфира с ориентацией (1102) методом горизонтальной направленной кристаллизации с низким содержанием микрочастиц (10^4 см^{-3}) и низким уровнем остаточных напряжений (менее 3 МПа). Приведены основные технические данные подложек из сапфира, изготовленных по разработанной технологии в сравнении с другими производителями.

Сапфир; оптимизация; технологический процесс.

Yu.V. Klunnikova

**OPTIMIZATION OF HIGH-QUALITY SAPPHIRE SUBSTRATES
PRODUCTION TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR INTEGRATED
CIRCUITS**

The method and the results of the sapphire ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) products technological process optimization for integrated circuits are described. Differences of the proposed method of sapphire substrates technological process optimization for integrated circuits are the following: the use of expert evaluation methods and experiment planning during simulation process, the development of optimization model, and the use of specialized database. The calculation of crystallization time and the defects level was made. The model for different sapphire defects level definition and optimization time parameters of sapphire crystals technological process is presented. The article describes the generalized structure of technological process control for sapphire products reception. The software in C++ allows to calculate the sapphire crystal growth and treatment modes, to choose the optimum process parameters of sapphire growth and treatment, to give the forecast of sapphire defect characteristics, and to find the law of sapphire growth and treatment. This software is multipurpose and can be used for growing crystals from various materials. Based on these studies the technology of sapphire growth with orientation (1102) by the horizontal directed crystallization method with low content of microparticles (10^4 cm^{-3}) and low-residual stresses (less than 3 MPa) is presented. The author describes the main technical data of the sapphire substrates made by the developed technology and compares them with other manufacturers.

Sapphire; optimization; technological process.

* Статья написана в рамках выполнения проекта ФЦП Россия № 14.587.21.0025. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58716X0025.

Введение. Развитие современного оптического и электронного приборостроения в первую очередь определяется созданием нового уровня функциональных возможностей приборов и устройств, и, соответственно, повышением технических требований к качеству материала, классу оптической чистоты, высокой отражательной способности и высокой точности поверхности их деталей. Для решения указанных проблем необходимо проведение фундаментальных исследований в области оптимизации синтеза оптических материалов, обеспечивающих получение высококачественных оптических элементов из различных кристаллов. Применение оптических элементов из сапфира становится в последнее время все более актуальным, что объясняется свойствами этого материала [1–3].

Особое значение приобретает качество обработанной поверхности с минимизацией отходов сырья в микроэлектронике при изготовлении подложек интегральных микросхем. От качества подложки и качества ее приповерхностного слоя зависит надежность работы микросхемы. Микродефекты и дислокации поверхностного слоя формируются от подложки и наследуют ее отрицательные свойства, ухудшая эксплуатационные качества микросхемы [4–9].

Постановка задачи. В современных рыночных отношениях технологический процесс получения изделий из монокристаллов сапфира должен быть направлен на реализацию целевой функции вида:

$$F(KK, Ц) \rightarrow \text{opt}, \quad (1)$$

где KK – критерии качества получаемых изделий из монокристаллов сапфира; $Ц$ – цена получаемого изделия.

В общем случае качество и стоимость технологического процесса получения монокристаллов сапфира характеризуется множеством параметров выращивания монокристаллов сапфира G (например, на установках типа СЗВН-155 по росту методом горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК)):

$$G = \{p, v, n, q, w, o\}, \quad (2)$$

где p – мощность нагревателя; v – скорость роста кристалла; n – степень вакуума; q – качество шихты; w – конструктивное исполнение (материал контейнера, материал теплового узла); o – пространственная ориентация. Выбор параметров должен предусматривать выполнение следующих условий (задача условной оптимизации):

$$p \leq p_0, v \leq v_0, n \leq n_0, \quad (3)$$

где p_0, v_0, n_0 – соответственно мощность нагревателя, скорость роста кристалла и степень вакуума, максимально возможные для технологического процесса получения монокристаллов сапфира.

Для успешного использования информационных технологий в производстве кристаллов сапфира и усовершенствования технологического процесса получения подложек из сапфира для интегральных схем необходимо разработать методику оптимизации технологического процесса получения высококачественных подложек из сапфира для электронной техники.

Проведенные исследования. Автором предложен алгоритм оптимизации технологического процесса получения сапфира, который представлен на рис. 1. Оптимизация технологического процесса получения сапфира делится на три основные части [10–17]:

- ◆ подготовка исходных данных для расчета. Этот процесс является наиболее ответственным и трудоемким;
- ◆ расчет параметров и дефектов;
- ◆ оптимизация технологического процесса.

После получения данных в необходимом количестве строятся модели зависимости уровня дефектов от параметров технологического процесса получения монокристаллов сапфира. Заключительной частью является построение оптимизационной модели технологического процесса получения монокристаллов сапфира.

Для этого определяется целевая функция (время, уровень дефектов и т.п.) и вводятся ограничения (температуры, уровни дефектов, скорости и т.п.).

Для оптимизации необходимо учесть влияние времени кристаллизации на качество кристаллов сапфира. Автором проведены расчеты времени кристаллизации и уровня дефектов в кристалле, определяющегося количеством пузырей на единицу площади. Были рассчитаны различные варианты скоростей движения лодочки ($V = 6-8$ мм/ч), мощности нагревателя ($N = 20.5-22.5$ кВт), степени вакуума ($P = 0.02-0.06$ Па).

На основании полученных данных выведены зависимости времени кристаллизации и уровня дефектов от V, N, P :

$$\begin{aligned} y_1 &= 325.562 + 6.375x_1 - 15.875x_2 - 1365.625x_3 + 56.25x_2x_3, \\ y_2 &= 87.5 - 6.25x_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где x_1 – скорость движения лодочки (мм/час); x_2 – мощность нагревателя (кВт); x_3 – степень вакуума (Па); y_1 – количество пузырей на единицу площади (см^{-2}); y_2 – время кристаллизации (ч).

На основании полученных зависимостей (4) построена модель, позволяющая задавать различные уровни дефектов и проводить оптимизацию временных параметров технологического процесса. Целевой функцией является время кристаллизации, а задачей оптимизации – сократить время технологического процесса:

$$y_2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Ограничения представляются в виде:

$$\begin{cases} y_1 \leq a, \\ 6 \leq x_1 \leq 8, \\ 20.5 \leq x_2 \leq 22.5, \\ 0.02 \leq x_3 \leq 0.06. \end{cases} \quad (6)$$

где a – заданный уровень дефектов.

В ходе решения оптимизационной задачи симплекс-методом были определены режимы роста кристаллов. При условии, что уровень дефектов не должен превышать 2 см^{-2} , оптимальными параметрами являются: скорость движения лодочки $x_1=6.216$ мм/ч; мощность нагревателя $x_2=22.5$ кВт; степень вакуума $x_3=0.06$ Па.

Задача оптимизации выращивания монокристаллов сапфира также решалась методом вычислительного эксперимента по анализу температурных и термоупругих полей в кристалле. Математическое моделирование и расчеты проводились для всех уравнений, входящих в систему, а именно: уравнения теплопроводности и термоупругости:

$$\begin{cases} \mu \Delta u + (\lambda + \mu) \frac{\partial \delta}{\partial x} = -\frac{\partial(\alpha T)}{\partial x} - F_x, \\ \mu \Delta u + (\lambda + \mu) \frac{\partial \delta}{\partial y} = -\frac{\partial(\alpha T)}{\partial y} - F_y, \\ \mu \Delta u + (\lambda + \mu) \frac{\partial \delta}{\partial z} = -\frac{\partial(\alpha T)}{\partial z} - F_z, \\ \text{div}(\lambda_i \text{grad} T_i(x, y, z)) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где u, v, w – компоненты перемещения; α – коэффициент объемного теплового расширения; λ и μ – коэффициенты Ламе; $\delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$, F_x, F_y, F_z – компоненты объемных сил; T – температура кристалла.

Автор статьи разработал информационную систему анализа и сбора информации в качестве инструментария для реализации поставленной цели исследования [17].

Алгоритмы анализа и сбора информации выполняют следующие функции: анализ исходной технологической информации; статистическая обработка данных; моделирование влияния параметров технологического процесса на качество кристалла; прогнозирование качества кристалла по исходным данным; принятие решения; анализ причин отклонений; коррекция параметров модели.

В целом алгоритмы анализа и сбора информации включают несколько основных блоков:

- ◆ блок хранения данных;
- ◆ аналитический блок, позволяющий определить оптимальные параметры технологического процесса и обеспечить высокое качество кристалла [8–12];
- ◆ логический блок, позволяющий рассчитать режимы роста и обработки монокристаллов сапфира [13–20];
- ◆ логический блок, позволяющий произвести экспертный анализ исходной технологической ситуации, оценить текущую технологическую ситуацию относительно базовой, представить прогноз степени дефектности и шероховатость поверхности получаемого кристалла, сформулировать управляющее воздействие [17–25].

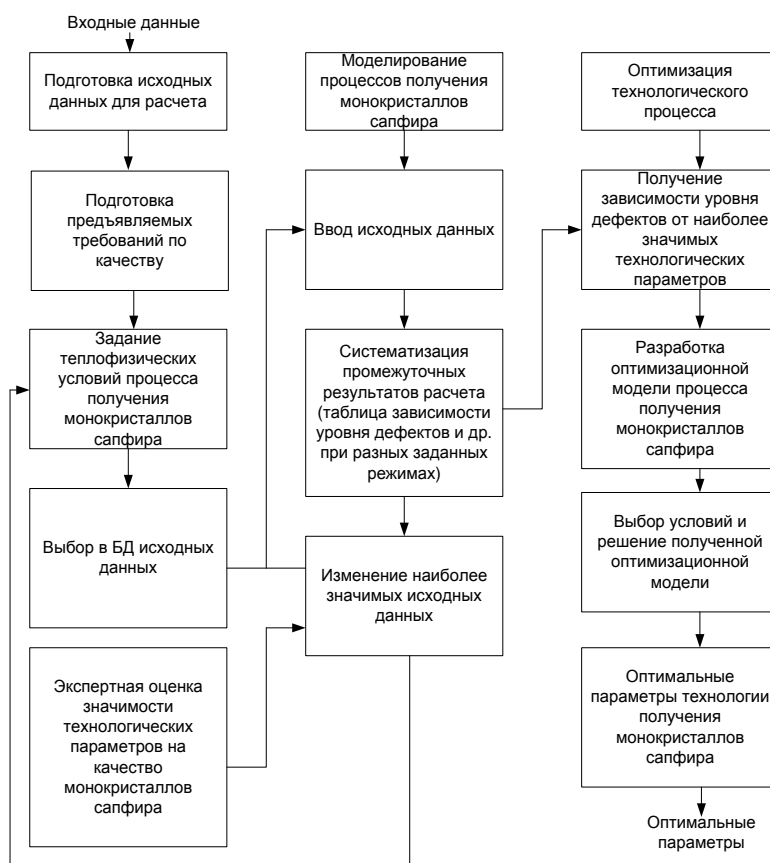


Рис. 1. Алгоритм оптимизации технологического процесса получения сапфира для подложек интегральных схем

Усовершенствование предложенной ранее системы заключается в разработке модели распределения пузырей и механических напряжений в процессе роста кристаллов сапфира, проведении серии экспериментальных исследований и разработке пакета компьютерных программ с интегрированием его в разработанную ранее информационную и экспертную систему процесса роста кристаллов сапфира.

Обобщенная структура управления технологическим процессом получения изделий из сапфира приведена на рис. 2.

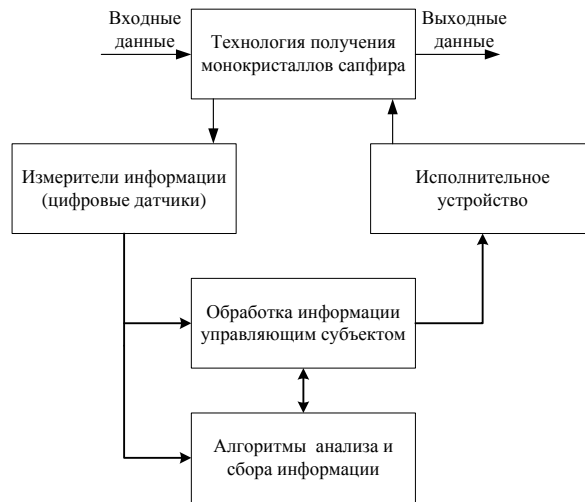


Рис. 2. Обобщенная структура управления технологическим процессом получения монокристаллов сапфира

Спроектирована общая структура математического и информационного обеспечения получения изделий из сапфира, включающая базу данных, информационную и экспертную системы получения изделий из сапфира для электронной техники (рис. 3).

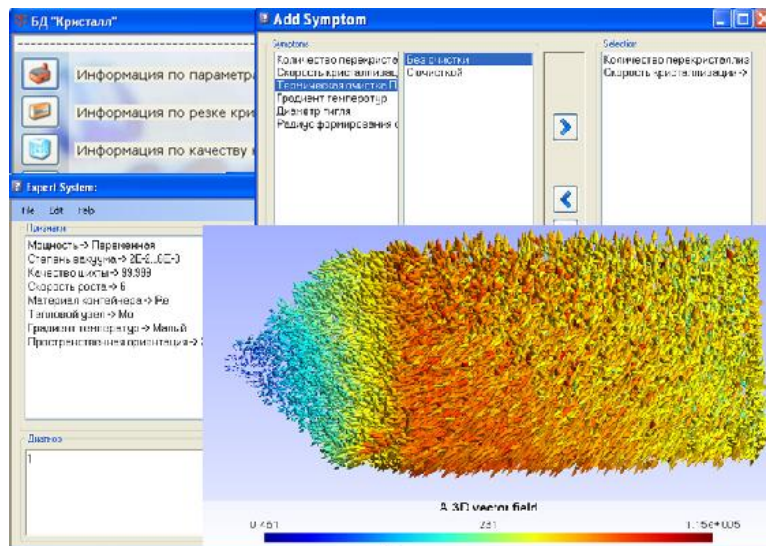


Рис. 3. Разработанное программное обеспечение для роста кристаллов сапфира методом горизонтальной направленной кристаллизации

В рамках работы были выращены по отработанной технологии методом горизонтальной направленной кристаллизации монокристаллы сапфира с ориентацией (1102). Для выращивания использовался высокочистый порошок Al_2O_3 с чистотой 99,996 %, спеченный в брикеты по бестигельному методу. Параметры кристаллов сапфира и уровень остаточных напряжений в полученных кристаллах приведен в табл. 1.

Таблица 1

Режим получения кристаллов сапфира с низким содержанием микрочастиц и низким уровнем остаточных напряжений

Плоскость кристалла	Вакуум	Скорость кристаллизации	Количество пор в кристалле	Остаточные напряжения в кристалле	Содержание примесей в шихте
(1102)	$2 - 6 \cdot 10^{-3}$ Па	6–8 мм/ч	10^4 см ⁻³	≤ 3 МПа	0,0001 %

Исследования, проведенные автором, позволили также существенно усовершенствовать технологию получения изделий из сапфира для электронной техники. В табл. 2 приведены основные технические данные подложек, изготовленных на ООО «Завод Кристалл» (г. Таганрог) по разработанной технологии в сравнении с другими производителями [15].

Таблица 2

Сравнительная таблица основных технических данных подложек

	Параллельность, мин	Разнотолщинность (TTV), мкм	Коробление (WARP), мкм	Неплоскостность, мкм/см	Шероховатость рабочих поверхностей (R_a), нм
Разработанная технология	<2	10-15	<4	4	<1
НПФ «Экситон» (г. Ставрополь)	<3	15-25	<5	8-15	<3
ООО «Электростекло» (г. Москва)	<3	15-25	<5	8-15	<3
ЗАО «Эпитекс» (г. Н.Новгород)	<5	20-25	<8	10-20	<5
ООО «Профиль-С» (г. Москва)	<5	20-25	<8	10-20	<5

Сравнительный анализ технических данных подложек показал, что проведенные автором исследования повысили выход годных кристаллов сапфира (в среднем на 5 %) для интегральных схем.

Результаты. Таким образом, проведена оптимизация технологического процесса получения высококачественных подложек из сапфира для интегральных схем. Отличиями предлагаемой методики оптимизации технологического процесса получения изделий из сапфира является использование методов экспертной оценки и планирования эксперимента в ходе проведения моделирования и построение моделей зависимости выходных параметров (уровни дефектов и т.п.) от исходных данных (скорость роста, мощность нагревателя и т.п.); разработка оптимизационной модели; использование специализированной базы данных, позволяющей более адекватно учитывать особенности технологии.

Результаты моделирования влияния параметров роста на качество получаемых кристаллов сапфира позволяют установить зоны дефектообразования, определить оптимальные режимы роста кристаллов сапфира, с помощью вычислитель-

ного эксперимента провести анализ изменений температурных и термоупругих полей в кристалле, зависящих от пространственных и геометрических характеристик нагревателей, и на основании анализа провести перераспределение дефектов в сапфире, тем самым повысив качество выращиваемых кристаллов.

На основании проведенных исследований выявлено что для того, чтобы уровень дефектов не превышал 2 см^{-2} , оптимальными параметрами являются: скорость движения лодочки $x_1=6.216 \text{ мм/ч}$; мощность нагревателя $x_2=22.5 \text{ кВт}$; степень вакуума $x_3=0.06 \text{ Па}$.

Выявлены основные особенности технологии получения кристаллов сапфира методом горизонтальной направленной кристаллизации, позволяющие получать кристаллы сапфира с низким содержанием микрочастиц (10^4 см^{-3}) и низким уровнем остаточных напряжений (менее 3 МПа). Разработано математическое и программное обеспечение, позволяющее выявить закономерности в процессах кристаллизации и обработки сапфира, которое может быть использовано при выращивании кристаллов из различных материалов.

Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Лазерные технологии», Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Багдасаров Х.С., Горяинов Л.А.* Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией. – М.: Физматлит, 2007. – 224 с.
2. *Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pishchik V.* Sapphire: material, manufacturing, applications. – US: Springer, 2009. – 362 p.
3. *Nizhankovskiy S.V., Tanko A.V., Sidelnikova N.S., Adonkin G.T.* Formation of longitudinal aggregation of inclusions in bulk sapphire and yttrium-aluminum garnet grown by horizontal directed crystallization method // *Crystal Research and Technology*. – 2015. – № 50 (3). – P. 223-229.
4. *Rogov V.V.* Physicochemistry in processes of the formation of functional surfaces of glass and sapphire ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) components for electronics and optical systems in tribochemical polishing // *Journal of superhard materials*. – 2009. – No. 3. – Vol. 31. – P. 74-83.
5. *Багдасаров Х.С., Горяинов Л.А.* Развитие горизонтальной направленной кристаллизации тугоплавких диэлектрических материалов // *Инженерно-физический журнал*. – 1998. – Т. 71, № 2. – С. 248-253.
6. *Sun C., Xue D.* Crystal growth and design of sapphire: Experimental and calculation studies of anisotropic crystal growth upon pulling directions // *Crystal Growth and Design*. – 2014. – № 14 (5). – P. 2282-2287.
7. *Багдасаров Х.С.* Высокотемпературная кристаллизация из расплава. – М.: Физматлит, 2004. – 160 с.
8. *Клунникова Ю.В.* Модель влияния параметров технологического процесса получения сапфира на качество кристаллов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2010. – № 7 (108). – С. 198-203.
9. *Малюков С.П., Стефанович В.А., Лебедев Г.А.* Метод оптимизации управления технологическим процессом выращивания кристаллов лейкосапфира // *Известия ТРТУ*. – 2006. – № 5 (60). – С. 210-214.
10. *Suzuki T., Shiotsuki K., Taishi T., Hoshikawa K.* Contact angle of sapphire melt and bubble generation on crucible material // *Journal of Crystal Growth*. – 2014. – No. 401. – P. 508-510.
11. *Соколов Ю.А.* Автоматизация процесса литья изделий с направленной и монокристаллической структурой // *Приборы и системы. Управление, контроль диагностика*. – 2003. – № 4. – С. 27-28.
12. *Borodin A.V., Frantsev D.N.* Development of a start-to-finish automation system for shaped sapphire crystals growth // *Journal of Crystal Growth*. – 2004. – Vol. 275. – P. 2089-2097.
13. *Лебедев Г.А., Малюков С.П., Стефанович В.А., Чередниченко Д.И.* Теплофизические процессы при получении кристаллов лейкосапфира методом горизонтальной направленной кристаллизации // *Кристаллография*. – 2008. – Т. 53, № 2. – С. 356-360.

14. Лебедев Г.А., Малюков С.П., Чередниченко Д.И. Исследование модели жидкофазной рекристаллизации слоя поликремния на сапфировой подложке // Кристаллография. – 2009. – Т. 54, № 3. – С. 553-558.
15. Малюков С.П., Нелина С.Н., Стефанович В.А. Физико-технологические аспекты изготовления изделий из сапфира. – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 164 с.
16. Grin L.A., Budnikov A.T., Sidelnikova N.S., Adonkin G.T., Baranov V.V. Optimization of temperature conditions for the growth of large-size sapphire crystals by the method of horizontally directed crystallization // Functional Materials. – 2013. – № 20 (1). – P. 111-117.
17. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Nano- and Piezoelectric Technologies, Materials and Devices (chapter in book) // New York: Nova Science Publishers, 2013. – P. 133-150.
18. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Advanced Materials (chapter in book) // Springer Proceedings in Physics. – 2014. – Vol. 152. – P. 55-69.
19. Малюков С.П., Клунникова Ю.В. Информационная и экспертная системы оптимизации производства сапфира // Программные продукты и системы. – 2013. – № 2. – С. 240-243.
20. Малюков С.П., Клунникова Ю.В. Программа расчета и выбора параметров роста монокристаллов лейкосапфира / Св. об офиц. рег. прогн. для ЭВМ № 2008612944. 2008.
21. Гаскаров Д.В. Интеллектуальные информационные системы: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2003. – 431 с.
22. Кольцова Э.М., Шилов Н.И., Василенко В.А. Алгоритмическое и программное обеспечение для процессов массовой кристаллизации из растворов // Программные продукты и системы. – 1997. – № 1. – С. 37-43.
23. Иванян А.Ю. Исследование и оптимизация основных показателей систем механической обработки // Известия ТРТУ. – 2004. – № 3 (38). – С. 288-289.
24. Akselrod M.S., Bruni F.J. Modern trends in crystal growth and new applications of sapphire // Journal of Crystal Growth. – 2012. – No. 360 (1). – P. 134-145.
25. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Advanced Materials – Studies and Applications (chapter in book). – New York: Nova Science Publishers, 2015. – P. 65-76.

REFERENCES

1. Bagdasarov Kh.S., Goryainov L.A. Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизации [Heat and mass transfer in growing single crystals of directional solidification]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 224 p.
2. Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pishchik V. Sapphire: material, manufacturing, applications. US: Springer, 2009, 362 p.
3. Nizhankovskiy S.V., Tanko A.V., Sidelnikova N.S., Adonkin G.T. Formation of longitudinal aggregation of inclusions in bulk sapphire and yttrium-aluminum garnet grown by horizontal directed crystallization method, *Crystal Research and Technology*, 2015, No. 50 (3), pp. 223-229.
4. Rogov V.V. Physicochemistry in processes of the formation of functional surfaces of glass and sapphire (α -Al₂O₃) components for electronics and optical systems in tribochemical polishing, *Journal of superhard materials*, 2009, No. 3, Vol. 3, pp. 74-83.
5. Bagdasarov Kh.S., Goryainov L.A. Razvitiye gorizontallyy napravlennoy kristallizatsii tugoplavkikh dielektricheskikh materialov [The development of horizontal directional solidification of refractory dielectric materials], *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1998, Vol. 71, No. 2, pp. 248-253.
6. Sun C., Xue D. Crystal growth and design of sapphire: Experimental and calculation studies of anisotropic crystal growth upon pulling directions, *Crystal Growth and Design*, 2014, No. 14 (5), pp. 2282-2287.
7. Bagdasarov Kh.S. Vysokotemperaturnaya kristallizatsiya iz rasplava [High-temperature crystallization from the melt]. Moscow: Fizmatlit, 2004, 160 p.
8. Klunnikova Yu.V. Model' vliyaniya parametrov tekhnologicheskogo protsessa polucheniya sapfira na kachestvo kristallov [Model of the sapphire growth technological process parameters influence on crystals quality], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7 (108), pp. 198-203.
9. Malyukov S.P., Stefanovich V.A., Lebedev G.A. Metod optimizatsii upravleniya tekhnologicheskimi protsessami vyrashchivaniya kristallov leykosapfira [Method of optimization of control of technological process of growing sapphire crystals], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 5 (60), pp. 210-214.

10. Suzuki T., Shiotsuki K., Taishi T., Hoshikawa K. Contact angle of sapphire melt and bubble generation on crucible material, *Journal of Crystal Growth*, 2014, No. 401, pp. 508-510.
11. Sokolov Yu.A. Avtomatizatsiya protsessa lit'ya izdeliy s napravlennoy i monokrystallicheskoy strukturoy [Automation of the casting process products with directional and single-crystal structure], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol' diagnostika* [Instruments and systems. Management, control, diagnostics], 2003, No. 4, pp. 27-28.
12. Borodin A.V., Frantsev D.N. Development of a start-to-finish automation system for shaped sapphire crystals growth, *Journal of Crystal Growth*, 2004, Vol. 275, pp. 2089-2097.
13. Lebedev G.A., Malyukov S.P., Stefanovich V.A., Cherednichenko D.I. Teplofizicheskie protsessy pri poluchenii kristallov leykosapfira metodom gorizontallyy napravlennoy kristallizatsii [Thermal processes for the production of crystals of sapphire by horizontal directed crystallization], *Kristallografiya* [Crystallography], 2008, Vol. 53, No. 2, pp. 356-360.
14. Lebedev G.A., Malyukov S.P., Cherednichenko D.I. Issledovanie modeli zhidkofaznoy rekristallizatsii sloya polikremniya na sapfirovoy podlozhke [Study of liquid-phase recrystallization of a polysilicon layer on a sapphire substrate], *Kristallografiya* [Crystallography], 2009, Vol. 54, No. 3, pp. 553-558.
15. Malyukov S.P., Nelina S.N., Stefanovich V.A. Fiziko-tekhnologicheskie aspekty izgotovleniya izdeliy iz sapfira [Physico-technological aspects of manufacturing products from sapphire]. Germaniya: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012, 164 p.
16. Grin L.A., Budnikov A.T., Sidelnikova N.S., Adonkin G.T., Baranov V.V. Optimization of temperature conditions for the growth of large-size sapphire crystals by the method of horizontally directed crystallization, *Functional Materials*, 2013, No. 20 (1), pp. 111-117.
17. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Nano- and Piezoelectric Technologies, Materials and Devices (chapter in book), *New York: Nova Science Publishers*, 2013, pp. 133-150.
18. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Advanced Materials (chapter in book), *Springer Proceedings in Physics*, 2014, Vol. 152, pp. 55-69.
19. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Informatsionnaya i ekspertnaya sistemy optimizatsii proizvodstva sapfira [Information and expert systems to optimize the production of sapphire], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2013, No. 2, pp. 240-243.
20. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Programma rascheta i vybora parametrov rosta monokristallov leykosapfira [The calculation program and selection of parameters of growth of mono-crystals of leucosapphire], *Sv. ob ofits. reg. progr. dlya EVM № 2008612944. 2008* [Certificate of official registration program for computer No. 2008612944. 2008].
21. Gaskarov D.V. Intel'lectual'nye informatsionnye sistemy: ucheb. dlya vuzov [Intelligent information systems: textbook for universities]. Moscow: Vyssh. shk., 2003, 431 p.
22. Kol'tsova E.M., Shilov N.I., Vasilenko V.A. Algoritmicheskoe i programnoe obespechenie dlya protsessov massovoy kristallizatsii iz rastvorov [Algorithms and software for the processes of mass crystallization from solutions], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 1997, No. 1, pp. 37-43.
23. Ivanyan A.Yu. Issledovanie i optimizatsiya osnovnykh pokazateley sistem mekhanicheskoy obrabotki [Study and optimization of the main parameters of systems of mechanical treatment], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 2004, No. 3 (38), pp. 288-289.
24. Akselrod M.S., Bruni F.J. Modern trends in crystal growth and new applications of sapphire, *Journal of Crystal Growth*, 2012, No. 360 (1), pp. 134-145.
25. Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V. Advanced Materials – Studies and Applications (chapter in book). New York: Nova Science Publishers, 2015, pp. 65-76.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Клунникова Юлия Владимировна – Южный федеральный университет; e-mail: yvklunnikova@sfnu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корпус «Е»; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Klunnikova Yulia Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: yvklunnikova@sfnu.ru; 347900, Russia, Taganrog, Shevchenko street 2, building “E”; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; associate professor.