

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ СИТАЛЛА НА ПРИМЕРЕ ТРАВЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ МОНОБЛОКА КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРА

А.С. Болотнов

electsab@gmail.com

П.В. Слитиков

pvs@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

На примере технологических процессов изготовления базовой детали кольцевого лазера — ситаллового моноблока — рассмотрены основные этапы производства и химической обработки литий-алюмосиликатного ситалла СО-115М. Проанализированы оптимизация состава и способ получения ситалла, изучено влияние различных компонентов (стеклообразователей, модификаторов, осветлителей) на оптико-эксплуатационные характеристики готового изделия. Описаны последовательность действий по основным операциям обработки моноблока — травлению, а также очистки, включающей в себя процессы обезжиривания, ультразвуковой обработки, промывки и сушки. Опробован оригинальный состав химического травителя и приведен расчет скорости травления при его использовании. Подобран раствор для ультразвуковой очистки изделия и дана оценка качества получаемой после процедуры поверхности

Ключевые слова

Ситалл, химическое травление, очистка поверхности, оптические приборы

Поступила 19.11.2019

Принята 05.12.2019

© Автор(ы), 2020

Введение. Развитие прецизионного и оптического приборостроения предъявляет серьезные требования к точности изготовления оптических деталей. В процессе технологической обработки последних должны быть точно выполнены не только их геометрические линейные и угловые размеры, но и обеспечен высокий класс оптической чистоты их поверхностей. Этого можно достичь шлифованием свободным абразивом с последующим полированием водным раствором специально приготовленного полирита [1, 2]. Неотъемлемой частью технологического процесса производства является межоперационная химическая обработка материала, а именно травление деталей после механической обработки и промывка [3].

Перечень оптических материалов достаточно широк. Особое место в нем занимает группа ситаллов — стеклокристаллических материалов

с низкими значениями температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Кроме того, ситаллы обладают высокой механо- и жаропрочностью, твердостью, термической и химической стойкостью и другими ценными свойствами [4–6]. Ситаллы находят применение в различных отраслях приборостроения (оптические, радиоэлектронные и электротехнические приборы, работающие в широком температурном диапазоне [7, 8]), а также там, где требуется металлозамещение [9]. Конкретный пример применения ситаллов — инерциальные навигационные системы на базе кольцевого лазерного гироскопа, являющегося прецизионным оптическим прибором, удовлетворяющего высочайшим техническим требованиям к механике и оптике [10].

Материалы и методы решения задач. Моноблок кольцевого лазера гироскопа изготавливают из ситалла СО-115М — оптического материала с ТКЛР в диапазоне $1,09...1,5 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале значений температуры $213...573 \text{ К}$. Выбор материала определен необходимостью работы лазера в таком широком температурном диапазоне с минимальным увеличением длины оптического резонатора. В качестве основы для составов оптических ситаллов используют оксиды лития, алюминия и кремния ($\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-n\text{SiO}_2$, где $n = 1-5$), которые вводятся в состав стекла в соотношениях, необходимых для обеспечения кристаллизации фазы с нулевым или отрицательным значением ТКЛР всего состава. Как правило, перечисленные оксиды образуют кристаллический цепочечный силикат лития-алюминия с β -сподуменной структурой. Для кристаллизации необходимого вида, а следовательно, для получения указанных выше технических свойств, в качестве катализатора кристаллообразования использован оксид титана TiO_2 [11].

В процессе производства ситалла, используемого для изготовления моноблока и его последующего травления, для интенсификации процесса фазового разделения на стадии формирования центров кристаллизации введены второй стеклообразователь — оксид фосфора (V) P_2O_5 , а в качестве модифицирующих добавок — щелочно-земельные компоненты в виде оксидов (MgO , BaO , CaO) [12]. Последние снижают вязкость стеклообразующего расплава при варке литий-алюмосиликатного стекла и регулируют термические характеристики остаточной стеклофазы и кристаллической фазы [13].

Оксиды сурьмы, мышьяка и церия используют в качестве осветлителей в авиационных стеклах [14]. В рассматриваемом случае при изготовлении ситалла в шихту введен оксид мышьяка (III) As_2O_3 в количестве до

1,0 % (масс.). Установлено, что дальнейшее увеличение его содержания не приводило к существенному улучшению однородности стекла. Наиболее ярко действие As_2O_3 как осветлителя зафиксировано при значениях температуры 1150...1450 °С. Наряду с функцией осветлителя оксид мышьяка As_2O_3 , имеющий низкую температуру плавления (310 °С), выполнял сопутствующую функцию плавня, разжижающего стекломассу. При этом не отмечено его влияния на кристаллизацию и термические характеристики стекла.

В результате разработки состава, условий термообработки шихты и ее предварительного помола в шаровой мельнице с последующей варкой в тиглях получают стекла оптического качества, выработанные в виде блоков-отливок диаметром до 30 мм. Как правило, заготовки формируют с припуском по 2...3 мм на каждую сторону, чтобы при дальнейшей обработке избежать сколов от резки. Основным параметром, показывающим степень кристаллизации материала и контролируемым при получении заготовки, является двулучепреломление — значение 4 нм/см. Двулучепреломление и наличие свилей по всей толщине материала контролируют с помощью полярископа [15, 16].

Перед шлифовкой и полировкой полуфабрикат моноблока подвергался химическому травлению для снятия микросколов и микротрещин в отверстиях, полученных в процессе механической обработки алмазным инструментом. Шероховатость внутренних каналов после механической обработки $Ra \sim 0,63$ мкм, глубина нарушенного слоя примерно 12...20 мкм. Необходимость травления вызвана в первую очередь тем, что в этих полостях могут оставаться частички инородного материала, попавшие в рабочие зоны отверстий в процессе обработки блока, а также пузырьки воздуха, трудно выводимые другими способами обработки, кроме как травлением. Оставшиеся в боковых каналах микрочастицы могут существенно ухудшить качество выходного сигнала лазера вплоть до его исчезновения, поэтому основной целью травления блока после механической обработки является его химическая очистка и уменьшение газоотделения с внутренних полостей.

Технология проведения эксперимента. Перед травлением моноблок подвергался обезжириванию и промывке в ацетоне (ГОСТ 2603–79) при комнатной температуре под действием ультразвука в течение 7...10 мин. Затем осуществлялась промывка детали проточной деионизированной водой в течение 2...3 мин, после чего моноблок сушили и механически прочищали каналы ватной палочкой, смоченной ацетоном.

Перед началом травления все поверхности моноблока, кроме отверстий и каналов, защищали самоклеящейся пленкой. Такая пленка является пассивной к воздействию смеси используемых при травлении кислот. Общий вид моноблока с защитной пленкой и его чертеж приведены на рис. 1.

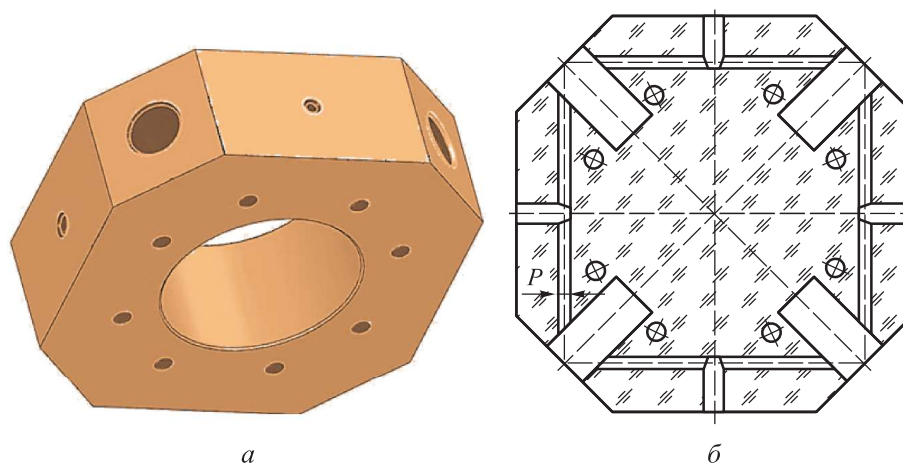
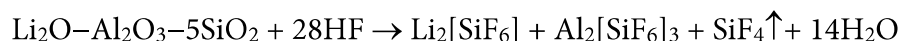


Рис. 1. Общий вид моноблока с защитной пленкой (а) и его чертеж (б)

Для определения скорости травления ситалла перед химической обработкой измеряли начальный диаметр d_1 канала P (рис. 1, б), после чего погружали изделие в травильный раствор, состоящий из равных (по объему) частей (% масс.): H_2SO_4 (96); HF (45–47); глицерин.

Основной реактив для травления ситалла — плавиковая (фтороводородная) кислота HF. Реакция протекает с выделением газообразного фторида кремния SiF_4 и образованием хорошо растворимых гексафторсиликатов:



Время проведения процедуры $\tau = 5$ мин в интервале значений температуры 18...25 °С. После этого моноблок промывали в проточной деионизированной воде при температуре 40...45 °С в течение 2...3 мин, высушивали и выполняли измерение диаметра d_2 канала P (рис. 2).

Травление осуществляли в несколько этапов до получения требуемых размеров, указанных в техническом задании. В общей сложности за все этапы травления необходимо стравить 100...120 мкм.

На основании полученных результатов измерения диаметров канала рассчитывали скорость травления v каналов и время $\tau_{тр}$, необходимое для стравливания оставшегося слоя материала.

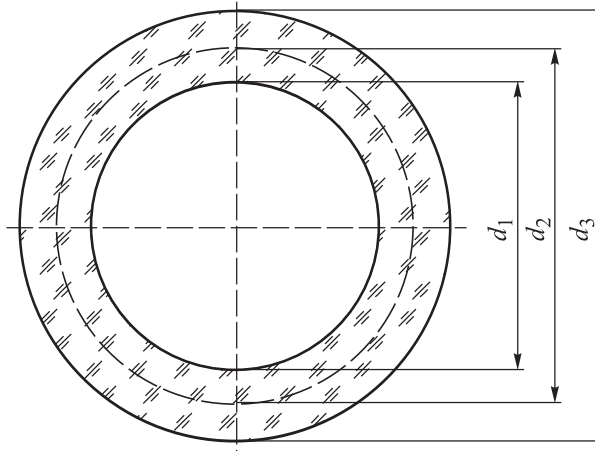


Рис. 2. Геометрические параметры отверстия моноблока

Скорость травления канала моноблока, мкм/мин:

$$v = \frac{d_2 - d_1}{2\tau} = \frac{d_2 - d_1}{10},$$

где τ — время первого травления, $\tau = 5$ мин; d_2 — диаметр канала заготовки моноблока после первого травления, мкм; d_1 — начальный диаметр канала заготовки моноблока, мкм.

Время, необходимое для стравливания оставшегося слоя материала, мин:

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{d_3 - d_2}{2v},$$

где d_3 — диаметр канала моноблока (согласно конструкторской документации) с нижним полем допуска, мкм.

В общем случае скорость травления блока может изменяться в зависимости от партий ситалла и кислот. В результате удалось стравить до 120 мкм слоя, т. е. в 5–7 раз больше глубины нарушенного слоя. Такой запас брался для окончательного исключения внутренних остаточных напряжений. Чистое время травления без учета времени обезжиривания и контроля может достигать 30 мин.

После травления и контроля внутренних полостей защитная пленка удаляется, полуфабрикат блока обезжиривается, покрывается защитным оптическим лаком и поступает на участок оптической обработки.

Технология химической очистки оптических деталей лазерного гироскопа должна обеспечивать максимальное удаление загрязнений, которые могут ухудшать рабочие характеристики приборов при их длитель-

ной эксплуатации. Качество химической очистки оптических деталей влияет в первую очередь на постоянство газовой смеси активной среды и на состояние поверхностей призм полного внутреннего отражения.

Химическая очистка детали включает в себя процессы обезжиривания, ультразвуковой очистки, промывки проточной деионизированной водой и окончательной сушки в термостате.

Обезжиривание проводили ацетоном, как это было описано выше. Большие трудности представляет очистка поверхностей стеклянных и кварцевых элементов, так как на этих поверхностях хорошо адсорбируются пары, воды и другие загрязнения. Для удаления загрязнений проводили очистку деталей в хромовой смеси (раствор дихромата калия $K_2Cr_2O_7$ в концентрированной серной кислоте, содержащей избыток оксида хрома (VI) CrO_3). Процесс осуществляют на водяной бане при температуре 60...70 °С в течение 60 мин.

После обработки в хромовой смеси детали подвергают тщательной промывке в проточной водопроводной воде, а затем — в проточной деионизированной воде.

Для более эффективной очистки применяют ультразвуковые колебания, позволяющие интенсифицировать различные процессы химической очистки, а также существенно улучшить качество очистки изделий, особенно сложной конфигурации с глубокими каналами и узкими отверстиями. Для очистки деталей, имеющих различные отверстия и каналы, наиболее эффективно использование низких частот (20...25 кГц). На эффективность ультразвуковой очистки большое влияние также оказывают физико-химические характеристики используемого раствора.

Для обеспечения высокого качества ультразвуковой очистки экспериментально подобран перекисно-аммиачный раствор, состоящий из водного раствора пероксида водорода H_2O_2 и гидрата аммиака $NH_3 \cdot H_2O$. При температуре 60...70 °С пероксид (H_2O_2) разлагается с образованием атомарного кислорода и окисляет органические и неорганические загрязнения, а слабое основание ($NH_3 \cdot H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$) ускоряет реакцию разложения пероксида, омыляет и эмульгирует жиры, а также связывает в хорошо растворимые комплексы ионы некоторых металлов.

Чистоту очистки поверхности проверяли на разрыв водяной пленки методом погружения деталей в чистую воду. Поверхность, свободная от жировых загрязнений, вследствие адгезии способна удерживать сплошную пленку воды. Жировые загрязнения делают поверхность гидрофобной и нарушают целостность пленки. Время, необходимое для разрыва пленки,

характеризует степень загрязненности поверхности детали. Так, если содержание органических загрязнений превышает 10 мкг/см^2 , то водная пленка разрывается мгновенно: 5 мкг/см^2 — через 5...7 с, 3 мкг/см^2 — через 60 с.

Указанным методом проводилась проверка чистоты деталей при различном соотношении компонентов в составе перекисно-аммиачного раствора, а также при использовании других реактивов, заменяя действие гидрата аммиака соляной и азотной кислотами. Такая замена используется нечасто, только при наличии сильных загрязнений, поскольку использование бескислотного раствора для очистки деталей имеет следующие преимущества: минимальная опасность при работе с токсичными веществами; содержание загрязнений на очищенной поверхности менее 3 мкг/см^2 , так как поверхность пленки не нарушается в течение 70 с.

Завершающим этапом очистки деталей от различных загрязнений является процесс сушки, при котором достигается практически полное удаление солевых загрязнений с поверхностей деталей.

Выводы. На основе результатов анализа химического состава ситалла СО-115М и основ химико-технологических процессов описана оригинальная технология травления и промывки моноблока кольцевого лазера. В виду простоты и технологичности приведенных процессов химической обработки описанные процедуры могут быть использованы в массовом и серийном производстве изделий из ситалла и других оптических материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клуникова Ю.В. Исследование влияния абразивной обработки на процесс образования дефектов в кристаллах сапфира. *Инженерный вестник Дона*, 2016, № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3519>
- [2] Ходаков Г.С., Кудрявцева Н.Л. Физико-химические процессы полирования оптического стекла. М., Машиностроение, 1985.
- [3] Окатов М.А., ред. Справочник технолога-оптика. СПб., Политехника, 2004.
- [4] Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В. и др. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники. *Стекло и керамика*, 2012, № 4, с. 7–11.
- [5] Beall G.B. Refractory glass-ceramics based on alkaline earth aluminosilicates. *J. Eur. Ceramic Soc.*, 2009, vol. 29, iss. 7, pp. 1211–1219.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.08.010>
- [6] Саркисов П.Д., Орлова Л.А., Попович Н.В. и др. Современное состояние вопроса в области технологии и производства ситаллов на основе алюмосиликатных систем. Стеклообразование, кристаллизация и фазообразование при

получении стронцийанортитовых и цельзиановых ситаллов. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2011, № 8, с. 17–24.

[7] Чайникова А.С., Орлова Л.А., Попович Н.В. и др. Дисперсно-упрочненные композиты на основе стекло/стеклокристаллических матриц: свойства и области применения. *Авиационные материалы и технологии*, 2014, № 3, с. 45–54.

[8] Мананков А.В., Гасанова Э.Р., Быкова В.В. Физико-химические и технологические аспекты разработки ситаллов нового класса. *Вестник ВГУИТ*, 2018, т. 80, № 1, с. 211–222. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-1-211-222>

[9] Чайникова А.С., Воропаева М.В., Алексеева Л.А. и др. Современное состояние разработок в области радиопрозрачных кордиеритовых ситаллов. *Авиационные материалы и технологии*, 2014, № S6, с. 45–51.

[10] Ус Н.А., Задорожний С.П. Кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом: особенности конструктивно-технологического решения. *Вестник ВГТУ*, 2016, т. 12, № 2, с. 65–71.

[11] Weaver P.T., van Aken D.C., Smith J.D. The role of TiO₂ and composition in the devitrification of near-stoichiometric cordierite. *J. Mat. Sci.*, 2004, vol. 39, iss. 1, pp. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000007727.10682.b6>

[12] Игнатов А.Н., Савинков В.И., Сигаев В.Н. и др. Способ получения оптического ситалла. Патент РФ 2569703. Заявл. 19.06.2014, опубл. 27.11.2015.

[13] Пузанова Е.Г., Мартюхова Д.А., Сигаев В.Н. и др. Ионообменное упрочнение оптических ситаллов литийалюмосиликатной системы. *Успехи химии и химической технологии*, 2016, т. 30, № 7, с. 93–95.

[14] Мартюхова Д.А., Галиева Г.Р., Михайленко Н.Ю. Влияние осветлителей на дегазацию авиационного и тарного стекла. *Успехи в химии и химической технологии*, 2016, т. 30, № 7, с. 69–71.

[15] Казьмина О.В., Беломестнова Э.Н., Дитц А.А. Химическая технология стекла и ситаллов. Томск, Изд-во ТПУ, 2011.

[16] Рожков С.А., Бражник Д.А., Серов А.В. Проблемы автоматизированного контроля дефектов стеклоизделий. *Проблемы региональной энергетики*, 2006, № 1, с. 113–125. URL: <http://journal.ie.asm.md/en/contents/elektronnyj-zhurnal-n-1-2006>

Болотнов Альберт Сергеевич — студент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Слитиков Павел Владимирович — д-р хим. наук, доцент, профессор кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Болотнов А.С., Слитиков П.В. Технология обработки ситалла на примере травления и очистки моноблока кольцевого лазера. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 1 (130), с. 4–14.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-4-14>

**SITALL GLASS-CERAMIC TREATMENT TECHNOLOGY
FOR THE CASE OF ETCHING AND CLEANING
OF A RING LASER MONOLITHIC CRYSTAL**

A.S. Bolotnov

electsab@gmail.com

P.V. Slitikov

pvs@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper uses production of the main part of a ring laser, that is a monolithic sitall crystal, as an example to describe the main stages of manufacturing and chemical processing of the SO-115M lithium aluminosilicate sitall glass-ceramic material. We analysed composition optimisation and glass-ceramic production methods and investigated the effects of various components (such as glass formers, modifiers, and clarifiers) on the optical performance of the finished article. We describe the sequence of main monolithic crystal processing operations: etching and cleaning, which includes degreasing, ultrasonic treatment, rinsing and drying. We tested an original etchant formulation and present an etching rate calculation for it. We selected a solution for ultrasonic cleaning of the article and assessed the resulting surface finish quality

Keywords

Sitall glass-ceramic, chemical etching, surface cleaning, optical instruments

Received 19.11.2019

Accepted 05.12.2019

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Klunnikova Yu.V. Research of abrasive treatment influence on process of defects formation in sapphire crystals. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2016, no. 2 (in Russ.).
Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3519>
- [2] Khodakov G.S., Kudryavtseva N.L. *Fiziko-khimicheskie protsessy polirovaniya opticheskogo stekla* [Physical-chemical processes of polishing optical glass]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985.
- [3] Okatov M.A., ed. *Spravochnik tekhnologa-optika* [Handbook of optician technologist]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2004.
- [4] Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., et al. Constructional glass and ceramic matrix high temperature composites for advanced aviation systems. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2012, no. 4, pp. 7–11 (in Russ.).
- [5] Beall G.B. Refractory glass-ceramics based on alkaline earth aluminosilicates. *J. Eur. Ceramic Soc.*, 2009, vol. 29, iss. 7, pp. 1211–1219.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.08.010>

- [6] Sarkisov P.D., Orlova L.A., Popovich N.V., et al. Modern status of technology and production of glass ceramics based on aluminosilicate systems. Vitrification, crystallization, and phase formation during production of Sr anortite and celsian glass ceramics. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopedic Reference Manual], 2011, no. 8, pp. 17–24 (in Russ.).
- [7] Chaynikova A.S., Orlova L.A., Popovich N.V., et al. Dispersion reinforced composites based on glass/glass-ceramics matrixes: properties and possible applications (review). *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2014, no. 3, pp. 45–54 (in Russ.).
- [8] Manankov A.V., Gasanova E.R., Bykova V.V. Physico-chemical and technological aspects of the development of new class sitalls. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2018, vol. 80, no. 1, pp. 211–222 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-1-211-222>
- [9] Chaynikova A.S., Voropaeva M.V., Alekseeva L.A., et al. Functional composites based on glass/glass-ceramics matrixes and discrete fillers: properties and possible applications. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2014, no. S6, pp. 45–51 (in Russ.).
- [10] Us N.A., Zadorozhniy S.P. Ring packaged gyroscope with a semiconductor laser diode: features of constructive and technological solutions. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Voronezh State Technical University], 2016, vol. 12, iss. 2, pp. 65–71 (in Russ.).
- [11] Weaver P.T., van Aken D.C., Smith J.D. The role of TiO₂ and composition in the devitrification of near-stoichiometric cordierite. *J. Mat. Sci.*, 2004, vol. 39, iss. 1, pp. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000007727.10682.b6>
- [12] Ignatov A.N., Savinkov V.I., Sigaev V.N., et al. Sposob polucheniya opticheskogo sitalla [Method for obtaining optical sitall]. Patent RF 2569703. Appl. 19.06.2014, publ. 27.11.2015 (in Russ.).
- [13] Puzanova E.G., Martyukhova D.A., Sigaev V.N., et al. Ion-exchange strengthening of optical glass-ceramics las system. *Uspekhi khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2016, vol. 30, no. 7, pp. 93–95 (in Russ.).
- [14] Martyukhova D.A., Galieva G.R., Mikhaylenko N.Yu. The impact on the clarifiers degassing aviation and container glass. *Uspekhi khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2016, vol. 30, no. 7, pp. 69–71 (in Russ.).
- [15] Kaz'mina O.V., Belomestnova E.N., Ditts A.A. Khimicheskaya tekhnologiya stekla i sitallov [Chemical technology of glass and sitalls]. Tomsk, Izd-vo TPU Publ., 2011.
- [16] Rozhkov S.A., Brazhnik D.A., Serov A.V. Some problems of automatic control of defects of glassworks references. *Problemy regional'noy energetiki* [Problems of the Regional Energetics], 2006, no. 1, pp. 113–125 (in Russ.).
Available at: <http://journal.ie.asm.md/en/contents/elektronnyj-zhurnal-n-1-2006>

Bolotnov A.S. — Student, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Slitikov P.V. — Dr. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Bolotnov A.S., Slitikov P.V. Sital glass-ceramic treatment technology for the case of etching and cleaning of a ring laser monolithic crystal. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 1 (130), pp. 4–14 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-4-14>



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов
Е.А. Микрина, М.В. Михайлова

**«Ориентация, выведение, сближение
и спуск космических аппаратов
по измерениям от глобальных
спутниковых навигационных систем»**

Рассмотрены задачи координатно-временного обеспечения космического аппарата, решаемые аппаратурой спутниковой навигации, а именно: формирование бортовой шкалы времени; определение ориентации; навигация при сближении и спуске космического аппарата в атмосфере, а также навигация средств выведения. Для студентов и аспирантов авиа- и ракетостроительных специальностей высших технических учебных заведений, научных работников и инженеров, занимающихся разработкой, проектированием и испытаниями навигационных систем космических аппаратов.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
<http://baumanpress.ru>