

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С. Г. Казанцев

Дан краткий обзор передовых разработок в области создания лазерных систем космической связи. Представлено описание ключевых технологий, применяемых для создания излучателей систем космической связи на основе твердотельных ИК-лазеров с диодной накачкой. Приведены физико-химические характеристики наиболее широко применяемых активных сред твердотельных ИК-лазеров с обоснованием использования легирующих компонентов. Показаны основные технологические переделы и приведено краткое описание перспективной технологии получения оптической керамики для использования в качестве активной среды твердотельных лазеров. Дано описание конструкции нового типа лазеров на тонких дисках. Представлено технологическое оборудование и компетенции научно-технологического центра, созданного для разработки твердотельных ИК-лазерных систем с производством полного цикла, включающего участки для выпуска матричных диодов систем оптической накачки, лазеров на тонких дисках с использованием перспективной технологии создания активной среды на основе оптической керамики, разработки и изготовления высокоапертурных оптических систем (телескопов и коллиматоров). Показана принципиальная возможность создания лазерного портала для систем межспутниковой космической связи, используя преимущества перспективной технологии и конструкции лазеров на тонких дисках.

Ключевые слова: системы космической лазерной связи, скорость информационного потока, FSO-технология, твердотельный лазер, монокристаллическая матрица, редкоземельные элементы, энергетический уровень, оптическая лазерная керамика, нанокристаллические прекурсоры, дисковый активный элемент, наборные диодные решетки, лазерный квантрон.

Введение

В 1880 г. А. Белл запатентовал устройство, в котором луч солнечного света, отражённый от зеркала, модулировался голосом, передавался через атмосферу и поступал на твердотельный селеновый детектор. Дальность первой официально подтверждённой передачи составила 213 м. Так появился фотофон – предтеча современной FSO-технологии.

FSO-технология (free-space optics – оптика свободного пространства) – это вид оптической связи, использующий электромагнитные волны оптического диапазона, передаваемые через атмосферу, а также вакуум или космическое пространство. В большинстве реализованных систем FSO-технологии используется ближний ИК-диапазон (0,7 – 1,64 мкм), что обусловлено рабочей длиной волны наиболее перспективных из используемых на сегодняшний момент источников излучения (ИК-светодиодов и лазеров) и особенностями прохождения света в атмосфере. Очевидные успехи в разработке систем FSO-технологии нового поколения продемонстрировали возможность создания на их основе коммуникационных каналов со значительно более высокой пропускной способностью по сравнению с радиочастотными, а значительно меньшая расходимость и высокая когерентность лазерного излучения позволяют существенно снизить требования к мощности излучения передающего тракта и, как следствие, уменьшить энергопотребление и массогабаритные параметры системы приёма-передачи данных в целом [1, 2].

Это явилось предпосылкой для проведения интенсивных исследований по применению

FSO-технологии для создания систем космической лазерной связи, в результате которых показано, что данные системы смогут обеспечивать скорость информационного потока от 10 – 100 Мбит/с до 1 – 10 Гбит/с и выше.

Так, например, по сообщению агентства Space Daily [3], в Центре космических полётов Годдарда (Гринбелт, штат Мэриленд, США) специалисты NASA, совместно с сотрудниками Линкольнской лаборатории Массачусетского технологического института (MIT), в конце 2017 г. приступили к заключительному этапу тестирования лазерной системы связи (Laser Communications Relay Demonstratio – LCRD), предназначенной для более надёжной и быстрой передачи данных с космических аппаратов (КА) из дальнего космоса, марсоходов, МКС и КА из околоземного космического пространства на Землю и обратно (рис. 1). LCRD – первая система NASA для двусторонней передачи данных при помощи ИК-лазерного излучения. Ожидается, что за счёт большей пропускной способности LCRD обеспечит возможность приёма и передачи в 10 – 100 раз большего объёма данных за один сеанс, чем если бы это делалось по каналу радиосвязи (цитата): «Для передачи виртуальной карты поверхности Марса «Google» по существующей сегодня лучшей системе радиосвязи потребовалось бы около 9 лет. Благодаря LCRD мы могли бы сделать это за 9 недель».

К настоящему моменту проведены испытания оптического тракта, вибро-, термовакуумные (рис. 1). На 2018 – 2019 год намечены акустические и испытания на электромагнитную совместимость. Затем



Рис. 1. Тестирование оптического тракта (а), термовакuumные (б) и виброиспытания (в) лазерной системы связи LCRD (фото NASA) [3]

оборудование будет отправлено на борт МКС в рамках миссии ILLUMA-T. Оно будет располагаться около станции и обеспечивать двустороннюю связь с Землёй.

Следующее поколение аппаратуры приёма/передачи данных LCRD планируется установить на борту корабля Orion, предназначенного для доставки людей на Луну и Марс. Проект носит имя LEMNOS – Laser-Enhanced Mission and Navigation Operational Services [4].

В США проводится также ряд аналогичных экспериментов по созданию систем космической лазерной связи, в том числе с использованием МКС в качестве экспериментальной технологической площадки. К ним относится лазерная система OPALS (Optical Payload for Lasercomm Science) [5].



Рис. 2. Лазерная система OPALS (фото NASA) [5]

Конструктивно она представляет собой герметичный контейнер, в котором размещено электронное оборудование, связанное оптическим кабелем с лазерным приёмно-передающим устройством. В состав этого устройства входит лазерный коллиматор и приёмный оптический тракт, установленные на подвижной платформе (рис. 2).

Европейское космическое агентство (ESA) разрабатывает систему межспутниковой космической лазерной связи EDRS (European Data Relay System). Проект предусматривает создание группировки геостационарных КА, которые будут осуществлять передачу информации между низкоорбитальными КА, беспилотными летательными аппаратами и наземными станциями. EDRS будет использовать новую технологию лазерной связи LCT (Laser Communication Terminal), которая позволит передавать информацию со скоростью 1,8 Гбит/с (рис. 3). Ожидается, что технология LCT предоставит возможность КА системы EDRS передавать и получать порядка 50 Терабайт данных в день практически в режиме реального времени. Первый КА Eutelsat 9B был запущен с космодрома Байконур 29 января 2016 г. На Землю со спутника Eutelsat 9B сигнал передается по радиоканалу Ка-диапазона [6].

Для обеспечения обмена данными МКС с наземными пунктами со скоростью до 10 Гбит/с ESA и компанией Airbus в рамках коммерческого партнёрства создаётся система лазерной связи OSIRIS, которая будет смонтирована на платформе Bartolomeo. Планируется, что платформа Bartolomeo будет состоять из ряда отсеков, предназначенных для научного оборудования и различных технических средств. Платформа будет установлена на внешней стороне модуля Columbus. Ожидается, что система лазерной связи OSIRIS позволит передавать значительные объёмы информации, обеспечит прямой обмен данными на расстоянии около 1500 километров, при этом связь будет поддерживаться с несколькими наземными станциями. Запланированный срок

ввода в строй платформы Bartolomeo и системы OSIRIS – 2019 г. [7].

В России в 2011 – 2013 гг. в рамках Долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов на МКС проводился космический эксперимент (рис. 4, 5) с использованием лазерного канала связи для передачи информации с борта низкоорбитального космического аппарата (МКС) на наземный пункт (Станция оптических наблюдений «Архыз», Северный Кавказ) [8]. В процессе проведения 1 этапа эксперимента было выполнено более 100 сеансов передачи информации, которые позволили:

- отработать технологию прецизионного взаимного наведения бортового и наземного терминалов лазерной связи с погрешностью в единицы угловых секунд при угловых скоростях до 8 град./с в условиях как ночной, так и дневной связи;

- отработать технологию приёма-передачи больших объёмов информации, в том числе реальной научной, на скорости 125 Мбит/с с ошибкой до 10^{-9} бит⁻¹ и тестовой – на скорости 622 Мбит/с с ошибкой до 10^{-7} бит⁻¹;

- исследовать возможности и условия работоспособности лазерных линий связи «борт КА – наземный пункт» ночью и днём при различном состоянии атмосферы, в том числе при наличии дымки и облачности до 80%.

Учитывая, что энергоресурс канала имеет двукратный запас на передачу и трёхкратный – на приём, разработчики считают, что в дальнейшем возможно повышение скорости передачи информации до 3,5 Гбит/с и более, а объёма переданной информации за сеанс – до 100 ГБ и более (около 10 000 снимков с высоким разрешением).

Основные технические параметры терминала, созданного в АО «НПК «СПП» для проведения экспериментов по лазерной связи на трассе Борт – Земля для МКС [9]:

- длина трассы – до 2000 км;
- масса терминала с транспортной рамой – 80 кг;
- энергопотребление – 150 Вт;
- скорость передачи данных – до 600 Мбит/с;
- длина волны передатчика – 1550 нм;
- длина волны маяка – 810 нм;
- диаграмма передатчика – 50 угл. с.;
- точность наведения – 10 угл. с.

Успешное проведение первого этапа космического эксперимента создало предпосылки для перевода разработанного лазерного канала в опытную эксплуатацию и подтвердило наличие в России технологии лазерной космической связи, что стимулировало дальнейшее развитие работ по созданию высокоскоростных меж-

спутниковых лазерных систем передачи информации с использованием специализированного КА типа «Луч» на ГСО с бортовым терминалом межспутниковой лазерной системы передачи информации (рис. 6).

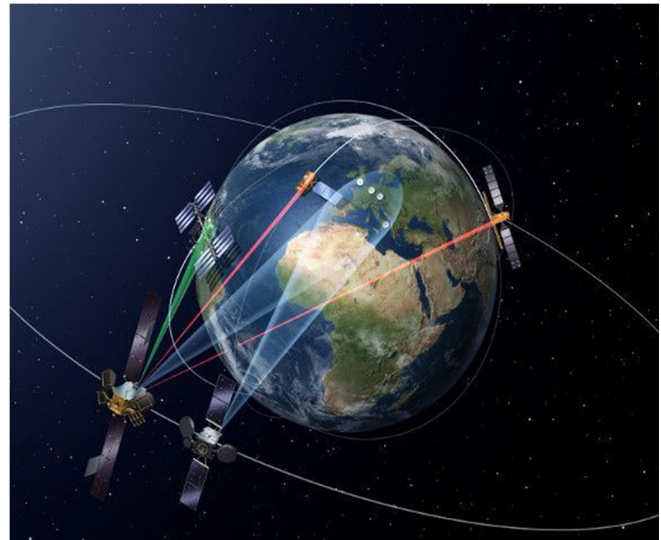


Рис. 3. Орбитальная группировка системы межспутниковой космической лазерной связи EDRS

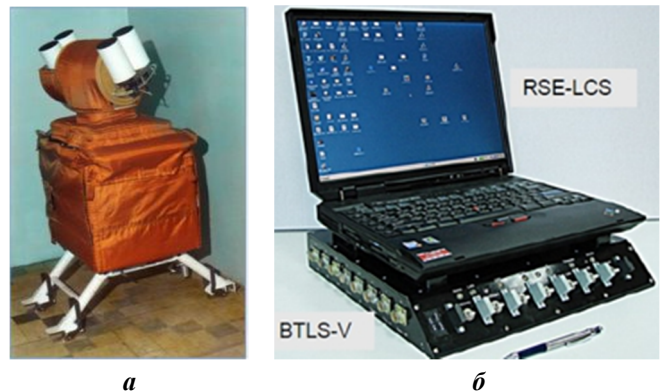


Рис. 4. Бортовой терминал лазерной связи (БТЛС): а – наружный блок БТЛС-Н; б – внутренний блок БТЛС-В с ноутбуком RSE-LCS [8, 9]

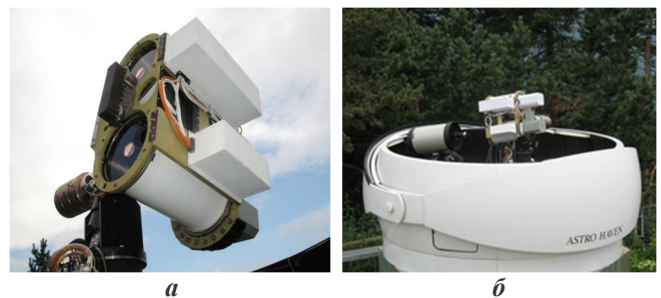
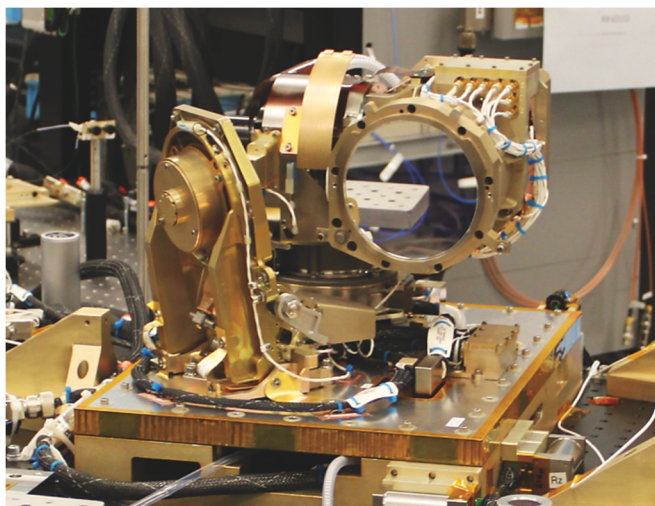


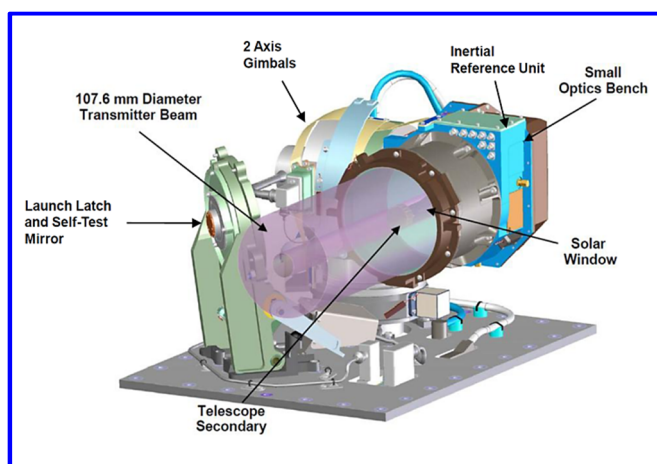
Рис. 5. Наземный терминал лазерной связи: а – приёмо-передающий блок; б – астропавильон с оптико-механическим блоком и юстировочным телескопом [8, 9]



Рис. 6. Схема функционирования межспутниковых лазерных систем передачи информации со скоростью до 600 Мбит/с и дальностью действия от 1 до 6 тыс. км по линии НКА – НКА и от 30 до 46 тыс. км по линии НКА – ГКА [9]



a



б

Рис. 7. Оптический модуль системы LLCD: *a* – фотоснимок (NASA); *б* – конструкция [11]

Кроме того, в России разрабатывается лазерная навигационно-связная система для КА «Глонасс-М». Ожидается, что её внедрение позволит достигнуть конкурентного превосходства в точности навигационных сигналов отечественной навигационной системы над зарубежными аналогами GPS и Galileo за счёт возможности более частой закладки на борт КА точных данных эфемерид, передаваемых по межспутниковым линиям связи, созданных на основе лазерных терминалов, которые обеспечат большую пропускную способность канала передачи информации и большую точность измерений расстояний между КА [9].

Рекордными на сегодняшний момент результатами в применении систем космической лазерной связи являются приём сигнала лазерного излучателя (ИК-неодимовый лазер с диодной накачкой) автоматической станции MESSENGER земным приемником на расстоянии 24 млн км [10] и испытание системы Лунной лазерной связи (Lunar Laser Communication Demonstration, LLCD). Скорость передачи данных на Землю с использованием LLCD составила 622 Мбит/с, а скорость приема на борт – 20 Мбит/с. КА передавал сигналы с лунной орбиты с помощью импульсного широкополосного ИК-лазера, которые были приняты станцией в Нью-Мексико. Внешний вид и конструкция LLCD приведены на рис. 7 [11].

Приведённый выше краткий обзор некоторых технологических приложений перспективных разработок в области создания систем космической лазерной связи свидетельствует об устойчивом общемировом тренде применения каналов лазерной связи, обусловленном значительными успехами в разработке ИК-лазерных систем передачи и обмена данными по линии связи «борт МКС – наземный пункт». При этом некоторое отставание в разработке систем для линий «борт КА – наземный пункт» и межспутниковой лазерной связи может объясняться, в том числе, ограничениями по энергопотреблению и массогабаритным параметрам, которые для МКС не столь критичны.

При этом для малых КА (МКА) данные ограничения принимают ещё большую остроту.

Таким образом, объективно возникло диалектическое противоречие между существующей тенденцией к уменьшению массогабаритных характеристик перспективных КА и МКА и, в первую очередь, КА ДЗЗ, телекоммуникационных и т. п., и необходимостью получения, передачи, обмена и ретрансляции всё больших объёмов информации.

Перспективные лазеры ближнего ИК-диапазона для телекоммуникационных систем МКА.

Тип и параметры активной среды

К настоящему времени создан широкий спектр твёрдотельных лазеров среднего ИК-диапазона для целого ряда научных и прикладных применений с самыми разнообразными оптико-физическими параметрами генерируемого излучения [12 – 16]. Однако из обширного по составу структур активной среды и легирующих компонентов перечня твёрдотельных лазеров наиболее полно требованиям по минимизации энергопотребления и массогабаритных характеристик при сохранении высокого оптического качества излучения отвечают лишь лазеры со следующими физико-химическими и конструктивными параметрами:

- матрица активной среды – монокристаллы гранатов, кварцевое стекло и кварцевое волокно;
- легирующие компоненты активной среды – редкоземельные элементы Nd, Yb, Er и некоторые другие;
- оптическая накачка активных элементов – наборными решётками лазерных диодов, либо диодными лазерными модулями с волоконным выводом;
- геометрия активных элементов – пластины, диски, волокна.

Принципиальная схема построения лазера определяется требуемыми параметрами, такими, как апертура, выходная мощность, стабильность характеристик генерируемого излучения и т. п.:

- задающий генератор – усилитель;
- высокоапертурный генератор с телескопическим резонатором;
- многоканальный излучатель с суммированием пучков на выходной апертуре;
- многоканальный излучатель с наведением каждого канала на цель;
- многоканальный излучатель с фазированием каналов.

Активные среды и легирующие компоненты. Естественные гранаты – это силикаты с общей химической формулой $M_3M_2[SiO_4]_3$, где M^{2+} – ионы Mg, Ca, Fe, а M^{3+} – Al, Fe, Cr, Ti. Вместо ионов Si^{4+} в соединениях, образующих структуру граната, могут участвовать ионы Al^{3+} , Ga^{3+} , Fe^{3+} . Эти соединения образуют кристаллы кубической сингонии (пространственная группа – $Ia\bar{3}d$, точечная группа – $m\bar{3}m$), состоящей из координационных многогранников, в центре которых находятся катионы, а в вершинах – ионы кислорода. Элементарная ячейка граната содержит восемь формульных единиц (160 ионов), в том числе M^{2+} – 24, M^{3+} – 16 и Si^{4+} – 24. Наиболее

совершенные монокристаллы граната выращивают методом Чохральского из расплава [17 – 20].

Все примеси, присутствующие в лазерных кристаллах, можно разделить на следующие группы:

- активаторы, определяющие основные оптико-физические параметры излучения, генерируемого кристаллическим активным элементом;
- соактиваторы, вводимые в кристалл как синхронизаторы для повышения эффективности генерации излучения, либо облегчающие процесс вхождения в кристалл активатора с целью повышения его концентрации;
- случайные примеси, неконтролируемо входящие в кристалл в процессе его роста.

Возможность вхождения примеси активатора в ионный кристалл с замещением ионом примеси иона матрицы определяется двумя основными факторами – зарядами ионов примеси и замещаемых ими ионов матрицы и соотношением ионных радиусов. Образование примесями твёрдых растворов в кристаллической матрице возможно только при сохранении кристаллом электронейтральности. Это правило является частным случаем общего принципа компенсации валентности. Вхождение неизовалентной примеси возможно только при компенсации возникающих при этом зарядов дефектами кристаллической решётки, искажающих, в свою очередь, кристаллическое поле и ухудшающих оптические характеристики ионов-активаторов. Поэтому активаторами могут быть только изовалентные примеси, заряд которых совпадает с зарядом замещаемого иона [18 – 20].

Для монокристаллов граната это, прежде всего, ионы Nd^{3+} , которые имеют систему энергетических уровней, образованную верхним состоянием 4F (спин $S = 3/2$ и орбитальный момент $L = 6$) и нижним 4I (спин $S = 3/2$ и орбитальный момент $L = 3$). Спин-орбитальное взаимодействие расщепляет эти состояния системы 4F и 4I уровней, отличающихся квантовым числом J и образующих уровни мультиплетов свободного иона (рис. 8) [18, 21]. Оптическая накачка переводит ионы Nd^{3+} из основного состояния ${}^4I_{9/2}$ в несколько относительно узких полос, играющих роль верхнего уровня. Эти полосы образованы рядом перекрывающихся возбуждённых состояний, их положения и ширина отличаются для различных видов гранатов. Из полос накачки осуществляется быстрая передача энергии возбуждения на метастабильный уровень ${}^4F_{3/2}$. Время жизни этого уровня составляет 0,2 мс в $Y_3Al_5O_{12}$ и 0,7 мс в стекле, легированном неодимом. Наибольшей вероятностью спонтанного излучения обладает переход ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ (генерация на волне $\lambda = 1,064$ мкм). На

переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ возможно получить генерацию с $\lambda = 1,319$ мкм, а энергетическая щель между состояниями ${}^4I_{11/2}$ и ${}^4I_{9/2}$, равная примерно $2 \cdot 10^3$ см⁻¹, обеспечивает четырёхуровневую генерацию излучения с $\lambda = 0,946$ мкм.

Значения длины волны генерации лазерного излучения для различных видов монокристаллов с соответствующими легирующими компонентами приведены в табл. 1.

Лазеры, использующие в качестве матрицы активной среды легированное кварцевое стекло, разрабатываются и активно применяются с 1960-х гг. За прошедший период была существенно улучшена

технология получения высокочистого стекла, повышения однородности распределения легирующей примеси в больших объёмах, разработаны различные системы оптической накачки [15, 21].

В качестве легирующих компонентов стёкол используются те же, что и для монокристаллов, редкоземельные элементы.

Основные преимущества стёкол перед монокристаллами:

- более технологичны в обработке, поэтому сравнительно просто получают заготовки активных элементов любой формы и больших размеров;
- дешевле;

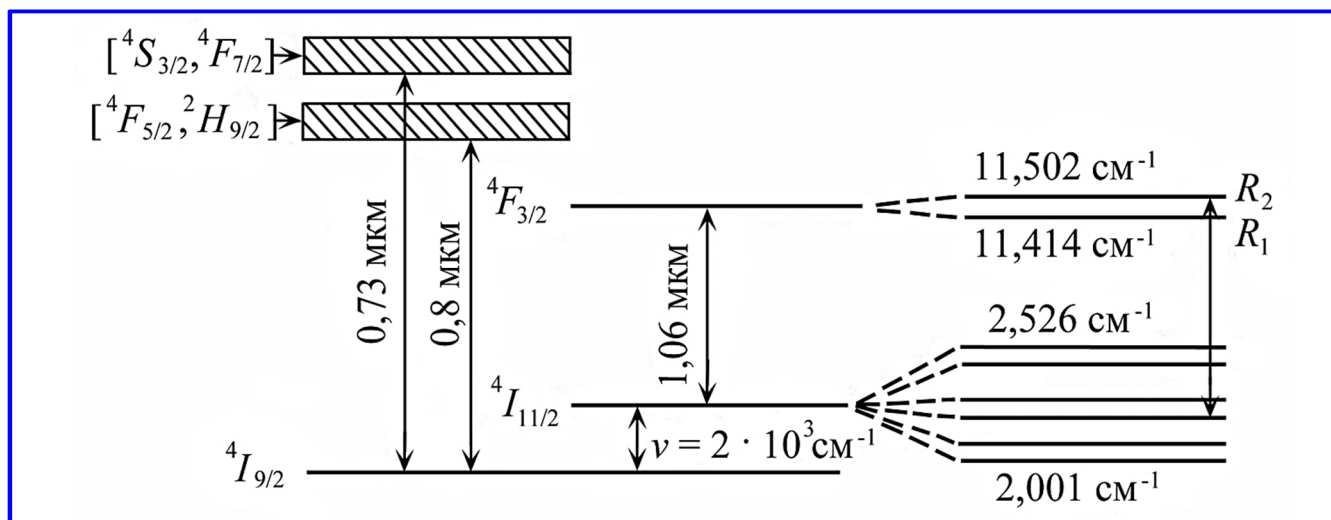


Рис. 8. Обобщённая схема уровней энергии иона Nd³⁺ в матрице иттрий-алюминиевого граната Y₃Al₅O₁₂

Таблица 1

Длина волны монохроматического излучения твёрдотельных лазеров с различными матрицами и легирующими компонентами активной среды

Монокристалл	Активатор: сенсibilизатор	Длина волны излучения, мкм
Иттрий-алюминиевый гранат (ИАГ) Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Nd ³⁺	1,064 (0,94; 1,32; 1,444)
	Yb ³⁺	1,030
	Er ³⁺	2,940
	Ho ³⁺ ; Tm ³⁺	2,098
Гадолиний-галлиевый гранат (ГГГ) Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂	Nd ³⁺ :Cr ³⁺	1,062
	Er ³⁺ :Cr ³⁺	2,790
Иттрий-скандий-галлиевый гранат (ИСГГ) Y ₃ Sc ₂ Ga ₃ O ₁₂	Nd ³⁺ :Cr ³⁺	1,058
	Er ³⁺ :Cr ³⁺	2,791
Гадолиний-скандий-галлиевый гранат (ГСГГ) Gd ₃ Sc ₂ Ga ₃ O ₁₂	Nd ³⁺ :Cr ³⁺	1,061
Алюминат иттрия YAlO ₃	Nd ³⁺	1,079
Калий-гадолиниевый вольфрамат KGd(WO ₄) ₂	Nd ³⁺	1,067
Ванадат иттрия YVO ₄	Nd ³⁺	1,064
Ванадат гадолиния GdVO ₄	Nd ³⁺	1,063
Тетрафторид иттрия-лития (ИЛФ) LiYF ₄	Nd ³⁺	1,047 (π)
		1,053 (σ)

– отработана технология получения образцов высокой однородности;

– благодаря значительному неоднородному уширению спектров проще организовать эффективную накачку.

Главные недостатки стёкол:

– меньшие значения эффективного сечения стимулированного излучения;

– низкая теплопроводность;

– хуже термостойкость.

Несмотря на ряд преимуществ стёкол, твёрдотельные лазеры на их основе уступают лазерам с матрицами из монокристаллических элементов по энергетической эффективности и массогабаритным характеристикам.

Идея создания волоконных лазеров была высказана в начале 1960-х гг. американским учёным Л. Спитцером.

Активная среда этих лазеров представляет собой световод диаметром 20 – 50 мкм из стекла, легированного трёхвалентными ионами редкоземельных элементов, таких как Yb^{3+} ($\lambda = 1080$ нм) или $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ ($\lambda = 1565$ нм). Активная среда окружена двумя прозрачными оболочками – волноводом для излучения накачки, поступающего по всей внешней поверхности оболочки от диодных лазерных линеек через специально нанесённые структуры типа брэгговских решёток [15, 22 – 25].

Основные преимущества волоконных лазеров:

– эффективный теплоотвод;

– высокое качество выходного излучения;

– высокая стабильность;

– эффективность накачки;

– компактность и малая масса.

Впервые сведения о создании твёрдотельного лазера с керамической активной средой были опубликованы еще в 1973 г. [26], однако полученные энергетические параметры выходного излучения оказались сравнительно низкими и лишь к 1995 г. удалось их существенно повысить [27 – 29].

Получение нового материала, пригодного для создания матрицы активной среды твердотельных лазеров ближнего ИК-диапазона – поликристаллической оптической лазерной керамики, явилось по существу альтернативой технологиям производства монокристаллов граната и кварцевого стекла. Во многих промышленно развитых странах развёрнуты работы по её технологическому и военному применению. Вот некоторые из них.

Оптическая лазерная керамика со структурой граната рассматривается в настоящее время в качестве ключевого компонента при создании сверх-

мощных твёрдотельных лазеров. Работы в указанном направлении проводятся в рамках программы министерства обороны США JHPSSL (Joint High Power Solid State Laser). Стоимость программы составляет 98 млн долларов США. Целью программы JHPSSL является создание твёрдотельного компактного лазера с полупроводниковой накачкой непрерывного излучения мощностью более 100 кВт как нового вида высокотехнологического оружия. В рамках программы по созданию сверхмощного твёрдотельного лазера боевого применения участвуют крупнейшие корпорации и исследовательские центры США: Northrop Grumman Corporation, Lawrence Livermore National Laboratory, Textron Systems (лазерная керамика на основе иттрий-алюминиевого граната с неодимом) [30].

На основе оптической лазерной керамики в Ливерморской Национальной Лаборатории (США) разработан и испытан одноканальный твёрдотельный лазер с полупроводниковой накачкой и выходной мощностью 67 кВт. Одновременно в рамках программы «Mercury» ведутся работы по созданию лазерного драйвера для гибридного реактора типа «fusion-fission» с целью запуска промышленной ядерной электростанции в 2020 г. В качестве перспективной лазерной среды драйвера рассматривается высокоапертурная оптическая лазерная керамика, активированная иттербием. При этом единственной компанией в мире, выпускающей высокоапертурную керамику, является Konoshima Chemical Co (Япония) [31 – 32].

Технология получения оптической лазерной керамики

Оптическая лазерная керамика обладает уникальным сочетанием теплофизических, оптических и физико-механических свойств [33 – 35]:

– высокой механической прочностью;

– высокой термостойкостью;

– высокой оптической однородностью;

– низким коэффициентом поглощения оптического излучения.

Физико-механические и оптико-физические свойства оптической лазерной керамики тождественны или превосходят свойства аналогичных монокристаллов (табл. 2), однако она обладает тем существенным преимуществом, что существующие технологии не позволяют синтезировать лазерные монокристаллы со световой апертурой 10×10 см² и более. В связи с этим оптическую лазерную керамику рассматривают как наиболее перспективный материал для элементов твёрдотельных лазеров [33 – 35].

Таблица 2

Термомеханические свойства монокристаллов и керамик

Материал матрицы		Температура плавления, °С	Теплопроводность, Вт/(м К)	Модуль Юнга, ГПа	Параметр теплового разрушения, Вт/м
YAG	монокристалл	1960	11 – 12	290	790
	керамика	1960	13 – 14	290	2400
Y ₂ O ₃	монокристалл	2430	10 – 15	230	700
	керамика	2430	25 – 40	250	2100

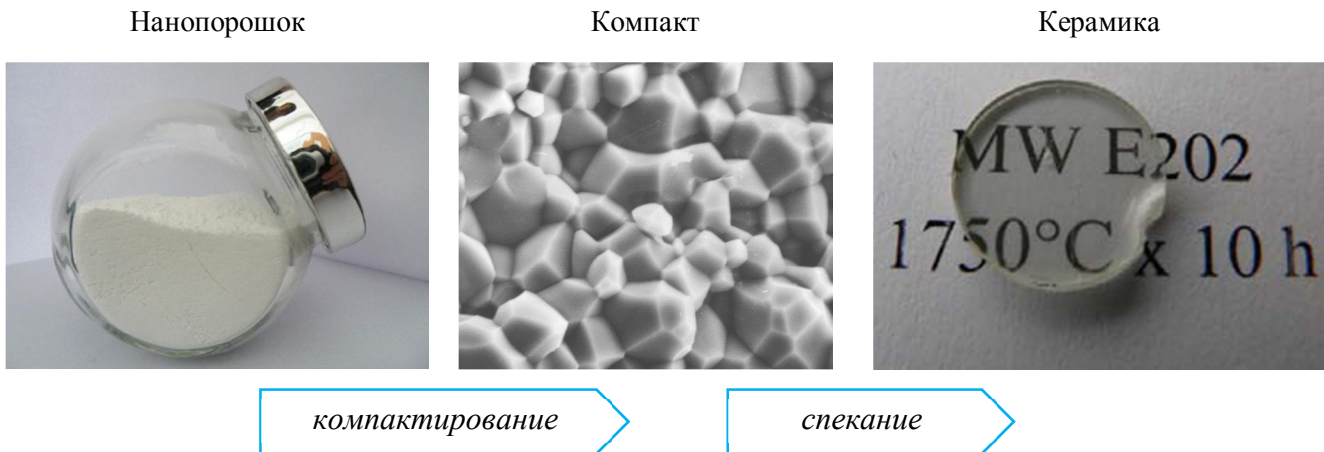


Рис. 9. Основные стадии процесса получения оптической лазерной керамики

Получение оптической лазерной керамики – это многостадийный технологический процесс с использованием нанотехнологий (рис. 9). Основой для создания оптической лазерной керамики являются агломерированные (предпочтительно – лазерно-синтезированные) нанопорошки на основе Al_2O_3 , Y_2O_3 , Nd_2O_3 и других окислов металлов и редкоземельных элементов. В настоящее время самые чистые наноразмерные порошки Al_2O_3 с однородным размером частиц (99,999% и 100 нм соответственно) производит компания Sumitomo Chemical (Япония) [33 – 40].

Отработка технологии получения оптической лазерной керамики интенсивно проводилась в течение более, чем двух десятилетий.

Синтез керамики для активной среды проводят при 1100 °С с добавлением тетраэтоксисилана. Керамику синтезируют в вакууме при 1700 – 1850 °С. Кристаллизация керамики начинается при 850 °С; формирующаяся промежуточная фаза превращается в гранат при 1050 °С [41 – 44].

Технология фирмы Konoshima Chemical Company включала процессы шликерного литья с последующим спеканием компакта в вакууме [34].

Такая методика не позволяла получать заготовки толщиной более 1 см. Однако этот недостаток был преодолен за счёт использования шликерного литья под давлением [45].

Попытки изготовления оптической керамики прессованием аморфного прекурсора без перевода его в кристаллическую форму [46] не позволили получить продукт для изготовления активных элементов твёрдотельных лазеров.

Наиболее совершенные образцы оптической лазерной керамики получают при использовании следующего технологического процесса.

На первой стадии производится получение нанокристаллических прекурсоров. Именно она определяет качество конечного продукта. Далее прекурсоры таблетуются методами сухого одноосного магнито-импульсного прессования при давлении 0,5 – 1,5 ГПа в однородные диски-компакты как правило диаметром 10 – 30 мм, толщиной 0,5 – 2,5 мм и плотностью 2,5 – 4,0 г/см³ (~50 – 70 % теоретической плотности). Для устранения органических включений, релаксации остаточных напряжений и формирования требуемой фазы прекурсоры подвергаются высокотемпературной (1500 – 1700 °С)

термообработке в вакууме. Процесс можно интенсифицировать различными способами, в том числе за счёт применения горячего прессования и использования импульсного постоянного тока (метод искрового плазменного спекания) [47]. Последней наиболее сложной, энергоёмкой и затратной стадией является изостатическое прессование при высоком давлении (200 МПа) и температуре (1750 °С), которое на сегодняшний момент даёт наилучшие результаты [35].

Дальнейшее совершенствование технологии получения оптической лазерной керамики связывают с заменой изостатического прессования на более дешёвое – одноосное или полным исключением этой стадии из технологического процесса.

Лазеры на тонких дисках

В 1992 г. был создан первый лазер на тонких дисках («Thin DiskLaser, TDL») – с помощью InGaAs-диодов была представлена эффективная накачка на волне $\lambda = 941$ нм монокристалла YAG:Yb³⁺ [48, 49]. Схематическое изображение резонатора TDL приведено на рис. 10. Его появление было обусловлено, прежде всего, тем, что термонаведённые оптические эффекты, такие как термодвулучепреломление и термолинза, явились наиболее существенными факторами, влияющими на качество выходного излучения и эффективность генерации твёрдотельных лазеров с диодной накачкой с традиционной конструкцией лазерного квантрона стержневых лазеров (рис. 11) [50, 51]. Конструкция TDL, основанная на применении охлаждаемого активного элемента в виде тонкого диска, позволяет обеспечить высокоэффективный теплоотвод от активной зоны за счёт большой площади её поверхности, поэтому в них практически не проявляется эффект термолинзы, характерный для стержневой и слэбовой («оптическая плита») геометрических форм активного элемента [49, 52, 53].

Степень влияния этих факторов значительно повышается с ужесточением требований к миниатюризации, обусловленным ограничениями по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению при разработке космических лазерных систем и, в частности, при создании лазерного портала систем межспутниковой связи.

Применение лазеров на тонких дисках с многозонной оптической накачкой, как, например, в [54], позволяет в существенной мере нивелировать влияние указанных факторов. При этом использование оптической керамики в качестве активной среды позволяет сохранить высокую энергоэффективность диодной накачки при меньшей стоимости и большей технологичности изготовления активного элемента [55].

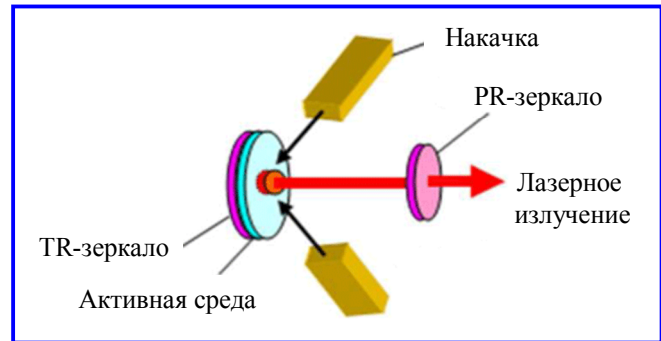


Рис. 10. Схематическое изображение лазера на тонких дисках

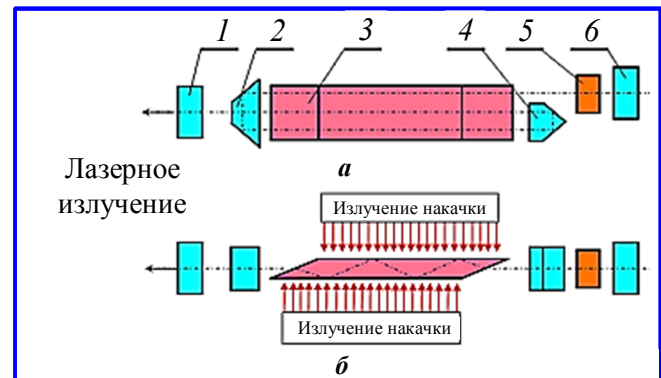


Рис. 11. Схема квантрона стержневого твёрдотельного лазера на основе монокристалла YAG:Nd³⁺ с накачкой линейками полупроводниковых лазерных диодов (а – вид сверху; б – вид сбоку): 1 – PR-зеркало; 2, 4 – поворотная призма; 3 – активный элемент; 5 – пассивный затвор; 6 – TR-зеркало [51]



Рис. 12. Фотоснимок поверхности Земли с МКС: яркое пятно синего цвета (в центре вверху) – первая удачная попытка связаться с астронавтами на МКС с помощью луча лазерной указки мощностью 1 Вт (фото НАСА)

По сравнению с монокристаллическими, а также волоконными лазерами они отличаются существенно более качественным излучением по параметру M^2 – безразмерной величине, которая называется параметром качества пучка и определяет, во сколько раз расходимость превышает дифракционный предел:

$$\Theta = M^2 \frac{4\lambda_{\text{изл.}}}{\pi w_0},$$

где Θ – полный угол расходимости пучка; w_0 – диаметр перетяжки пучка.

Для мощных систем киловаттного класса M^2 варьируется в пределах от 5 до 50, для лазеров мощностью менее 500 Вт получены значения расходимости, близкие к дифракционной ($M^2 < 1,1$).

Дальнейшее прогресс TDL лазеров связывают не только с увеличением средней мощности генерируемого излучения, но и со значительном повышением удельной импульсной мощности, что достигается за счёт генерации импульсов фемтосекундной длительности [56 – 60].

Высокое качество лазерного пучка является одним из основных условий для создания бортовых космических телекоммуникационных систем на основе лазерных порталов. При этом о порядке величины необходимой мощности лазерного излучения можно судить по факту успешного опыта связи с МКС, проведённого сотрудниками астрономической ассоциации Сан-Антонио (штат Техас, США) 3 марта 2012 г. совместно с членом экипажа МКС астронавтом Д. Петитом [61].

С помощью лазерной указки мощностью 1 Вт с лучом синего света с Земли на МКС был послан сигнал, который удалось зафиксировать с помощью фотоаппарата (рис. 12).

Как сообщил астронавт, при подготовке эксперимента наибольшей сложностью оказалось рассчитать диаметр и интенсивность светового пучка, его точное позиционирование на движущейся по небу станции, а также разработать методику фотосъёмки лазерной вспышки (из-за высокой скорости срабатывания затвора фотоаппарата).

Одним из основных направлений развития современной лазерной техники является разработка лазерных технологических комплексов на основе твёрдотельных лазеров мультикиловаттного класса.

Благодаря высокой эффективности генерации и высокого качества излучения, применение лазеров на тонких дисках в мультикиловаттном диапазоне мощностей даёт наиболее оптимальное решение для значительного ряда промышленных применений. Это обусловило активизацию работ по созданию лазеров этого типа мультикиловаттного клас-

са: стимулировало поиск новых сред для активных элементов, оптимизацию технологии их получения, совершенствование конструкции лазеров, разработку новых многопроходных оптических схем квантронов, создание новых систем накачки.

В частности, в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (Lawrence Livermore National Laboratory, Ливермор, штат Калифорния, США) разработан импульсный лазер на тонких дисках с активным элементом из керамики YAG:Nd³⁺ размером 100 × 100 × 20 мм (рис. 13) по схеме многоканального излучателя с суммированием пучков на выходной апертуре со следующими характеристиками [31]:

- апертура излучения – 100 × 100 мм²;
- резонатор – неустойчивый;
- расходимость излучения – 2 – 3 дифракционных предела;
- средняя выходная мощность излучения: 67 кВт (количество дисков – 5); 100 кВт (количество дисков – 9).

Накачка осуществляется четырьмя наборными диодными решётками со следующими параметрами:

- импульсная мощность – 75 кВт;
- длительность импульса накачки – 0,5 мс;
- энергия импульса накачки – 150 Дж;
- частота генерации – 200 Гц;
- длительность непрерывной работы – до 10 с;
- плотность излучения 0,8 – 1 кВт/см²;
- длина волны для различных сред: $\lambda = 808$ нм (для YAG:Nd³⁺); $\lambda = 940$ нм (для YAG:Yb³⁺); $\lambda = 976$ нм (для Y₂O₃:Yb³⁺); $\lambda = 967$ нм (для CaF₂:Yb³⁺);
- общее количество излучающих линеек – 720 шт.;
- размер одной линейки – 1 мкм × 10 мм;
- габариты диодной решётки – 90 × 100 мм.

В России работы над созданием мощных лазеров на тонких дисках с активными элементами из керамики работают многие научные коллективы как в академических, так и отраслевых организациях с широкой географией регионов страны, с разным уровнем достигнутых результатов и наличием потенциальных возможностей для разработок в этом направлении [62 – 65].

Учитывая совокупность научно-технических, технологических, конструкторско-производственных и логистических факторов, наиболее выигрышным для целей разработки и создания малогабаритных высокоэффективных излучателей для лазерных порталов систем космической лазерной связи представляется организация работ с использованием производственной базы и компетенций научно-технологического центра, созданного в ФКП «Государственный лазерный полигон «Радуга» им. И. С. Косьминова» (ЗАТО г. Радужный, Владимирская область, Россия).

Ключевым преимуществом в этом случае является объединение в одном конструкторско-технологическом

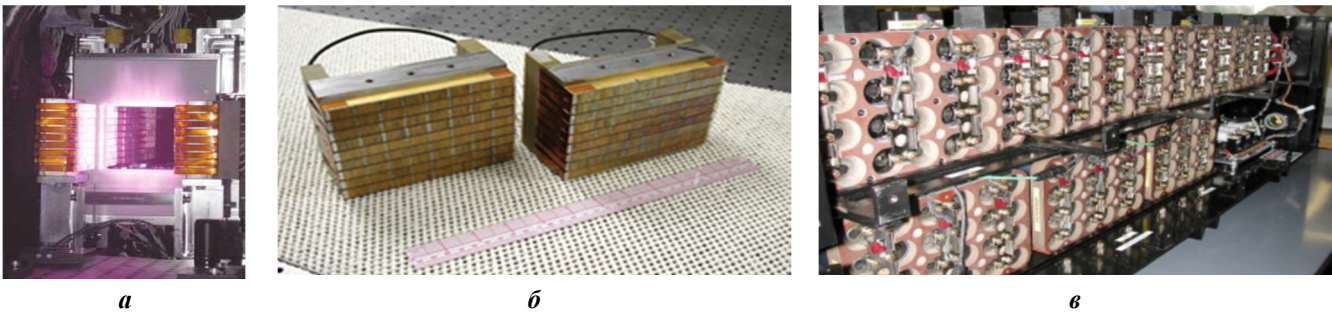


Рис. 13. Лазер на тонких дисках мультикиловаттного класса Ливерморской национальной лаборатории: а – выходная апертура лазера $100 \times 100 \text{ мм}^2$; б – наборные диодные решётки; в – источник электропитания на основе литий-ионных аккумуляторов

комплексе производственной базы для получения активных сред на основе оптической нанокерамики с заданными параметрами, производства полного цикла матричных диодов для полупроводниковых систем накачки под требуемый квантрон и активную среду, оптического и механообрабатывающего производств, а также полигонной инфраструктуры для проведения испытаний на приземных трассах.

**Производственно-технологическая база
ФКП «ГЛП «Радуга» для создания
твёрдотельных лазеров
Производство оптической керамики. В 2013 г.**

в ФКП «ГЛП «Радуга» была создана лаборатория «Лазерная керамика», в которой проводятся тематические НИР и ОКР по разработке технологии производства лазерной нанокерамики для изготовления активных сред твёрдотельных лазеров.

Для выполнения работ на всех технологических переделах при производстве активных элементов твёрдотельных лазеров создана производственная база, включающая все необходимые участки и лаборатории с обеспечением чистоты помещений категории 5 ИСО по ГОСТ ИСО 14644-1 (табл. 3).

На рис. 14 представлено основное оборудование, используемое при производстве оптической керамики

Таблица 3

Производственные участки переделов получения оптической керамики

Наименование производственного участка	Назначение
Участок синтеза наноразмерных порошков YAG:Nd^{3+}	Обеспечивает получение и складирование исходных и вспомогательных материалов; обеспечивает подготовку исходных и вспомогательных материалов; обеспечивает сушку при температуре до $850 \text{ }^\circ\text{C}$, отжиг при температуре до $1400 \text{ }^\circ\text{C}$
Участок подготовки наноразмерных порошков YAG:Nd^{3+} к спеканию	Обеспечивает размол (размер зёрен менее 300 нм) и одновременное перемешивание исходных и вспомогательных материалов, исключает агломерацию исходных и вспомогательных материалов, обеспечивает распылительную сушку (гранулирование) порошков и защиту подготовленных порошков от экспонирования на атмосферу (контейнеры со шликерами и пресспорошками не открываются)
Участок компактирования наноразмерных порошков YAG:Nd^{3+}	Обеспечивает загрузку пресс-порошков в пресс-формы в пылеулавливающем боксе; предварительное прессование наноразмерных порошков в стальных пресс-формах с рабочим давлением не менее 60 МПа на прессе одноосного прессования; помещение предварительно спрессованные формы заготовки в полимерные контейнеры; прессование наноразмерных порошков в полимерных пресс-формах с рабочим давлением до 280 МПа ; применение пресс-форм различных размеров
Участок спекания наноразмерных порошков YAG:Nd^{3+} и получения заготовок ВПНК	Обеспечивает вакуумное спекание при рабочей температуре до $1800 \text{ }^\circ\text{C}$; спекание в системе изостатического (газового) высокотемпературного пресса при температурах до $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении газа (аргон) до 250 МПа . Оборудование участка 4 размещается в помещении с ограниченным доступом персонала
Участок механической и оптической обработки	Обеспечивает огранку полученных заготовок ВПНК; шлифовку и полировку керамических заготовок активных элементов размером не менее $300 \times 100 \text{ мм}$; шлифовку и полировку керамических заготовок активных элементов с заданными оптическими характеристиками
Участок контроля качества технологического процесса и продукции	Контроль качества технологического процесса, в том числе качество исходных и вспомогательных материалов, контролирует параметры технологического процесса; контроль качества полученных керамических заготовок активных элементов, в том числе прочностных и энергетических характеристик



Отпускная печь PP 140/85



Печь камерная MS
15,5 – 16 × 16 × 16-1Z-OT



Программируемая шаровая
мельница WiseStir BML-2



Рабочее место подготовки
нанопорошков



Планетарная мельница



Печь газо-вакуумная
ВВТ 2200/В ВАК10-5
для спекания керамики



Пресс гидравлический



Холодный изостатический
пресс CP82466



Дилатометр



Горячий изостатический пресс QIN-21G

Рис. 14. Внешний вид основного оборудования производственных участков для получения оптической керамики

на участках синтеза, подготовки, компактирования и спекания наноразмерных порошков YAG:Nd³⁺.

На рис. 15 показаны образцы оптической нанокерамики для активных элементов лазеров на тонких дисках, полученной на производственно-технологической базе ФКП «ГЛП «Радуга».

Производство матричных диодов для накачки активных элементов твёрдотельных лазеров. Для изготовления матричных ди-

одов систем накачки твёрдотельных лазеров в ФКП «ГЛП «Радуга» создано производство полного цикла полупроводниковых матричных диодов. Общий вид участков, технологической линии и образцов выпускаемой продукции представлен на рис. 16.

Производство оптических элементов и высокоточная механообработка. В общий контур конструкторско-технологического комплекса вхо-

дит также оптическое и механообрабатывающее производство, оснащённое современным оборудованием и имеющее широкий спектр обработанных техпроцессов (рис. 17).

Подробное описание производственно-технологической и испытательной базы ФКП «ГЛП «Радуга» имеется на официальном сайте и рекламных проспектах предприятия [66, 67].

Заключение

По результатам рассмотрения ряда передовых разработок лазерных систем космической связи и технологий изготовления твёрдотельных лазеров необходимо отметить следующее.



Рис. 15. Образцы лазерной нанокерамики $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$ (толщина – 4 мм, диаметр – 19 мм)



а



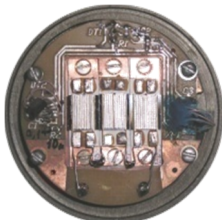
б



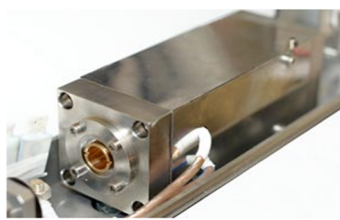
в



г



д



е



ж

Рис. 16. Основные производственные участки и образцы продукции: *а* – чистые помещения класса 10 000 (ИСО 7); *б* – участок монтажа – рабочие места класса 100 (ИСО 5); *в* – установка нанесения диэлектрических покрытий; *г* – общий вид технологической линии изготовления матриц лазерных диодов; *д* – матрица лазерных диодов (увеличено); *е* – лазерный квантрон (40 × 40 × 100 мм); *ж* – твёрдотельный лазер с блоком электропитания и управления

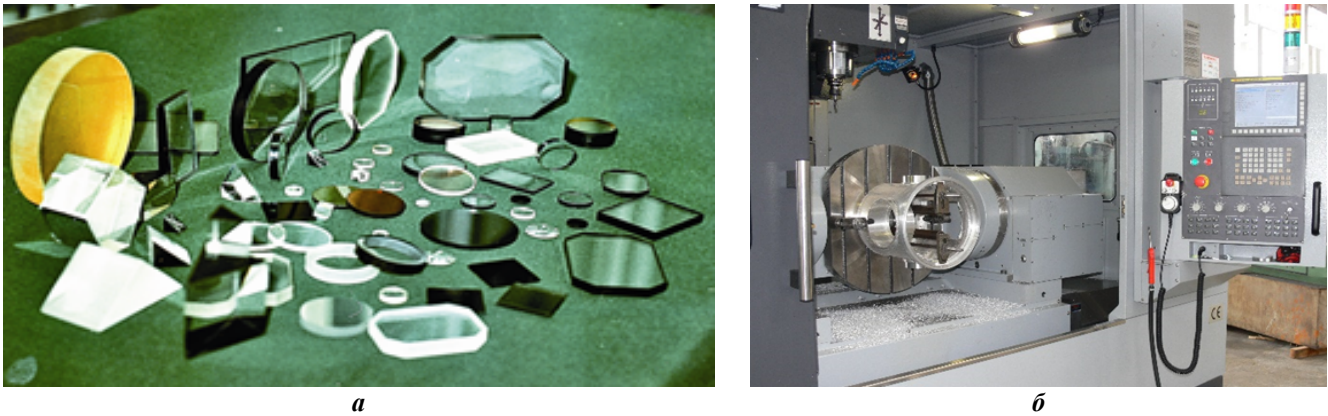


Рис. 17. Оптические элементы с защитными и просветляющими покрытиями, изготовленные в оптическом производстве (а); изготовление корпуса телескопа для оптико-электронной системы на одном из участков механообработки (б)

Во-первых, отчётливо прослеживается тенденция ко всё более широкому внедрению систем космической связи, имеющих лазерный портал, для обеспечения обмена информацией в каналах «борт КА – наземный пункт» и «борт КА – борт КА» со скоростью информационного потока до 1 – 10 Гбит/с и выше.

Во-вторых, создание и внедрение лазерных систем космической связи находится ещё на самом начальном этапе, поэтому рыночные ниши, связанные как с разработкой систем в целом, их элементов и инфраструктуры, так и сопутствующих направлений, например, предоставления коммерческих услуг по высокоскоростной передаче/трансляции информации и т. п., остаются незаполненными. Это справедливо как для мировой, так и для отечественной космонавтики.

В-третьих, налицо очевидный прогресс в разработке технологий создания маломассогабаритных высокоэнергетически эффективных твердотельных лазеров, которые могут быть успешно применены для создания лазерных порталов систем космической связи. При этом ускоренное развитие данного направления среди аналогичных перспективных разработок лазерной техники объективно сокращает сроки занятия свободных или ещё не полностью занятых рыночных ниш – совершенно очевидно, что компании, имеющие подобный технологический задел, будут иметь ощутимые конкурентные преимущества, и чем раньше этот задел будет создаваться и накапливаться, тем большим будет это преимущество.

В-четвёртых, в настоящее время среди отечественных предприятий-разработчиков лазерных систем, пригодных для использования в космических системах связи, сравнительно немного компаний, обладающих достаточно полным перечнем

компетенций, позволяющих создавать как отдельные составные части оптико-электронной аппаратуры, так и весь комплекс лазерной системы космической связи в целом.

Таким образом, при комплексном подходе к разработке системы космической связи с лазерным порталом, опирающемся на объединение преимуществ перспективной технологии получения оптической нанокерамики для активных сред и революционной конструкции лазеров на тонких дисках, в сочетании с рациональным использованием технологических возможностей предприятий отечественного ОПК, можно получить мультипликативный эффект, результатом которого будет создание телекоммуникационной платформы, размещаемой на борту МКА и предназначенной для более надёжной и быстрой передачи данных ДЗЗ.

В заключение автор выражает благодарность и признательность генеральному директору ФКП «Государственный лазерный полигон «Радуга» им. И. С. Косьминова» В. Н. Яценко и заместителю генерального директора по научно-исследовательской и испытательной работе В. Д. Булаеву за предоставленные материалы и полезные обсуждения.

Литература

1. Free-Space Optics: Propagation and Communication. – ISBN 978-1-905209-02-6.
2. Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks. – ISBN 067232248X.
3. NASA Laser Communication Payload Undergoing Integration and Testing. [Интернет-ресурс]: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-laser-communication-payload-undergoing-integration-and-testing>.
4. LEMNOS Exploration & SPACE Communications. [Интернет-ресурс]: <https://esc.gsfc.nasa.gov/lemnosc>.

5. Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS) – 12.06.17. [Интернет-ресурс]: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/861.html.
6. European Data Relay Satellite System (EDRS) Overview. [Интернет-ресурс]: <https://artes.esa.int/edrs/overview>.
7. First high capacity space-to-ground laser communications system for the new European external ISS Platform Bartolomeo. [Интернет-ресурс]: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/03/first-high-capacity-space-to-ground-laser-communications-system.html>.
8. Российский космический эксперимент «Система лазерной связи» (КЭ «СЛС»). [Интернет-ресурс]: https://vpk.name/news/97641_rossiiskii_kosmicheskii_eksperiment_sistema_lazernoi_svyazi_ke_sls.html.
9. Официальный сайт АО «НПК «СПП». [Интернет-ресурс]: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-svyaz.html>.
10. [Интернет-ресурс]: http://messenger.jhuapl.edu/news_room/details.php?id=118.
11. Lunar Laser Communication Demonstration. NASA's First Space Laser Communication System Demonstration. [Интернет-ресурс]: https://www.nasa.gov/sites/default/files/lldfactsheet.final_web.pdf.
12. Kazantsev S. G. Solid-state laser with diode pumping // VI Intern. Conf. «AMPL'2003». Abstracts. Tomsk, 15 – 19 September 2003. – Tomsk: IAO SB RAS, 2003. – P. 67.
13. Казанцев С. Г., Куфтерин В. А. Твердотельный YAG:Nd³⁺ лазер для генерации короткоимпульсного УФ-излучения // VI Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике «РПД-2003»: Тез. докл. Звенигород, 22 – 24 октября 2003. – М.: МГТУ, 2003. – С. 28.
14. Казанцев С. Г. Стойкость оптических элементов с защитными и просветляющими покрытиями к воздействию лазерного излучения с $\lambda \sim 266$ нм – 10,6 мкм // Тезисы докладов симпозиума «Лазеры на парах на парах металлов – 2002». – Лоо, 24 – 26 сентября 2002 г. – Ростов-на-Дону: РГУ, 2002. – С. 42.
15. Миногин В. Г. Физика лазеров: Учебное пособие. – М.: МФТУ, 2010. – 336 с. (Версия 16.02.2010).
16. Казанцев С. Г. Проподная оптика мощных широкоапертурных импульсных лазеров среднего ИК-диапазона // Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. – М.: МИСиС, 2002. – 242 с.
17. Блистанов А. А., Бондаренко В. С., Чкалова В. В. и др. Акустические кристаллы: справочник. – М.: Наука, 1982. – 632 с.
18. Блистанов А. А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. – М.: МИСИС, 2000. – 432 с.
19. Бокий Г. Б., Кравченко В. Б. Спектроскопия кристаллов: сборник. – Л.: Наука, 1973. – С. 7 – 15.
20. Багдасаров Х. С., Карпов И. И., Гречушников Б. Н. Выращивание монокристаллов иттрий-алюминиевого граната: Обзоры по электронике. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1976. – 96 с. – Сер. 10. – Вып. 1.
21. Зверев Г. М., Голяев Ю. Д. Лазеры на кристаллах и их применение. – М.: Радио и связь, 1994. – 312 с.
22. Лазер. [Интернет-ресурс]: <https://bigenc.ru/physics/text/4341828>.
23. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 272 с. – (ISBN 978-5-8114-1028-6).
24. Вудс С., Дака М., Флин Г. Волоконные лазеры средней мощности и их применение // Фотоника. – 2008. – № 4. – С. 6 – 10.
25. Дианов Е. М., Прохоров А. М. Лазеры и волоконная оптика // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 148. – Вып. 2. – С. 289 – 311. – DOI:10.3367/UFN. 0148.198602c.0289.
26. Greskovich C., Chernoch J.P. // J. Appl. Phys. – 1973. – V. 44. – № 10. – P. 4599 – 4606.
27. Ikesue A. et al. // J. Am. Ceram. Soc. – 1995. – V. 78. – № 1. – P. 1033 – 1040.
28. Ikesue A. et al. // J. Am. Ceram. Soc. – 1995. – V. 78. – № 4. – P. 225 – 228.
29. Ikesue A., Yoshida K. Influence of pore volume on laser performance of Nd:YAG ceramics // J. Mater. Sci. – 1999. – V. 34. – P. 1189 – 1195.
30. Directed Energy Weapons. JHPSSL (Joint High Power Solid State Laser). [Интернет-ресурс]: http://www.thelivin-moon.com/45jack_files/03files/JHPSSL_Joint_High_Power_Solid_State_Laser.html.
31. Solid-State Heat-Capacity Laser. [Интернет-ресурс]: <https://lasers.llnl.gov/science/photon-science/directed-energy/sshcl>.
32. Mercury: A Diode-Pumped Solid-State Laser. [Интернет-ресурс]: <https://lasers.llnl.gov/science/photon-science/highpowered-lasers/mercury>.
33. Гусев А. И., Ремпель А. А. Нанокристаллические материалы. – М.: Физматлит, 2000. – 222 с.
34. Lu J., Ueda K., Yagi H. Neodymium doped yttrium aluminum garnet (Y₃Al₅O₁₂) nanocrystalline ceramics – a new generation of solid-state laser and optical materials // J. Alloys Comp. – 2002. – V. 341. – P. 220 – 225.
35. Sanghera J., Shaw B., Kim W. Ceramic Laser Materials // Proc. SPIE. – 2011. – V. 7912. – P. 79121Q-1.
36. Осипов В. В. и др. // Известия РАН., 1999. – Т. 63. – № 10. – С. 1968 – 1971. – (Сер. Физическая).
37. Котов Ю. А. и др. // ЖТФ. – 2002. – Т. 72. – Вып. 11. – С. 76 – 82.
38. Котов Ю. А. и др. // ЖТФ, 2004. – Т. 74. – Вып. 3. – С. 72 – 77.
39. Osipov V. V. et al. // Laser Phys. – 2006. – V. 16. – N. 1. – P. 116 – 125.
40. Фёдоров П. П., Маслов В. А., Усачёв В. А., Кононенко Н. Э. Синтез лазерной керамики на основе нанодисперсных порошков алюмоиттриевого граната Y₃Al₅O₁₂ // ISSN 0236-3933. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – С. 28 – 44. – (Сер. Приборостроение).
41. Su C., Zhang H., Han H. Preparation of Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet Transparent Ceramics by Homogeneous Precipitation Method // J. Rare Earths. – 2005. – V. 23. – № 6. – P. 716 – 720.
42. Lee Sang-Ho, Kochawattana S., Messing G. L. Solid-State Reactive Sintering of Transparent Polycrystalline Nd:YAG Ceramics // J. Amer. Ceram. Soc. – 2006. – V. 89. – Issue 6. – P. 1945 – 1950.

43. Zhang Huashan, Jing Min, Su Chunhui. Application of Stereology on Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet (Nd:YAG) Transparent Ceramics // *J. Rare Earths*. – 2006. – V. 24. – Issue 5. – P. 538–542 // ISSN 0236-3933. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2012. – 44 с. – Сер. Приборостроение.
44. Zhang Huashan, Hui Han, Su Chunhui, Zhang Hongbo. Effect of heat treatment on crystallization of Nd:YAG ceramics // *Journal of Wuhan University of Technology – Mater. Sci. Ed.* – 2007. – V. 22. – Issue 2. – P. 333–336.
45. Kaminsky A. A., Kravchenko V. B., Kopylov Y. L. Novel polycrystalline laser material: Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂ ceramics fabricated by the high-pressure colloidal slip casting (HPCSC) method // *Phys. Stat. Sol. (a)*. – 2007. – V. 204. – № 7. – P. 2411–2415.
46. Sellappan P., Jayaram V., Chokshi A. H., Divakar C. Synthesis of bulk, dense, nanocrystalline yttrium aluminum garnet from amorphous powders // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 2007. – V. 90. – Issue 11. – P. 3638–3641.
47. Hreniak D., Gierlotka S., Lojkowski W. High-pressure induced structural decomposition of RE-doped YAG nanoceramics // *Solid State Phenomena Journal*. – 2005. – V. 106. – P. 17–22.
48. Giesen A., Hugel H., Voss A., Wittig K., Brauch U., OPOWER H. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state laser // *Appl. Phys.*, 1994. – V. 58. – P. 365–372.
49. Giesen A., Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: Results and scaling laws // *IEEE Journal of Sel. Topics in Quantum Electronics*. – 2007. – V. 13. – P. 598.
50. Bufetova G. A., Nikolaev D. A., Tsvetkov V. B., Shcherbakov I. A. Raspredelenie temperatury v diskovykh aktivnykh elementakh lazerov s prodol'noi diodnoi nakachkoi [The temperature distribution in the disk active elements of lasers with longitudinal diode pumping] // *Kratkie soobshcheniia po fizike*. – 2008. – № 4. – P. 25–28.
51. Казанцев С. Г., Куфтерин В. А. Диодная накачка в твердотельном лазере на основе монокристаллов YAG:Nd³⁺ // Тезисы докладов 2-й Международной конференции по росту и физике кристаллов. – 28–30 октября 2003. – М.: МИСиС, 2003. – С. 224.
52. Boeing fires new thin-disk laser at high average power and beam quality. – *Laser Focus World*. – 2008, June.
53. Speiser J. Scaling of thin-disk lasers – influence of amplified spontaneous emission // *Journal of Optical Society of America B*. – 2009. – V. 26. – P. 26.
54. Николаев Д. А., Пивкина М. Н., Цветков В. Б. Дисковый ND:GGG лазер с многопучковой оптической накачкой // *Прикладная фотоника*. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 44–52.
55. Багаев С. Н., Осипов В. В., Иванов М. Г., Соломонов В. В. и др. Высокопрозрачная керамика на основе Nd³⁺:Y₂O₃ // *Фотоника*. – 2007. – Вып. 5.
56. Larionov M., Giesen A. 50-kHz, 400-μJ, sub-100-fs pulses from a thin disk laser amplifier // *Photonics West*. – 2009.
57. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. // *Optics Communications*. – 1985. – V. 56. – P. 219.
58. Keller U., Weingarten K., Kaertner F. et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers // *IEEE J. Sel. Top. Quant.* – 1996. – V. 2. – P. 435.
59. Marchese S., Baer C., G. Engqvist A. et al. Femtosecond thin disk laser oscillator with pulse energy beyond the 10microjoule level // *Opt. Express*. – 2008. – V. 16. – P. 6397.
60. Neuhaus J., Bauer D., Zhang J. et al. Subpicosecond thin-disk laser oscillator with pulse energies of up to 25.9 microjoules by use of an active multipass geometry // *Opt. Express*. – 2008. – V. 16. – P. 20530.
61. Фанаты» связались с МКС с помощью лазера и фонаря. [Интернет-ресурс]: <http://www.laserportal.ru/content/971>.
62. Снетков И. Л., Палашов О. В., Осипов В. В., Мухин И. Б., Максимов Р. Н., Шитов В. А., Лукьяшин К.Е. Исследование характеристик отечественной лазерной Yb:YAG-керамики // *Квантовая электроника*, 2016. – Т. 46. – № 7. – С. 586–588.
63. Аполлонов В. В. Дисковые лазеры: преимущества и перспективы [Интернет-ресурс]: <http://www.unionexpert.ru/index.php/news/item/447diskovihe-lazerih-pre-imu-thestva-i-reg>.
64. Мухин И.Б., Хазанов Е.А. Использование тонких дисков в изоляторах Фарадея для лазеров с высокой средней мощностью // *Квантовая электроника*. – 2004. – Т. 34. – № 10. – С. 973–978.
65. В России создан мощный керамический лазер. [Интернет-ресурс]: <https://hightech.fm/2016/07/18/ceramic-laser>.
66. Официальный сайт ФКП «ГЛП «Радуга». <http://trassa.org/index.php/o-predpriatii>.
67. Рекламный проспект ФКП «ГЛП «Радуга».

Поступила в редакцию 28.02.2018

Сергей Геннадьевич Казанцев, доктор технических наук, начальник отдела, т. (495) 366-71-89, e-mail: sg.kazantsev@gmail.com. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

LASER TECHNOLOGIES FOR TELECOMMUNICATIONS PLATFORM OF SMALL SPACECRAFT

S. G. Kazantsev

The article gives a brief review of the latest developments in the field of space laser communications system. The description of the key technologies applied for creation of space communications system radiators on the basis of the diode-pumped solid-state IR lasers is given.

The article presents the physicochemical characteristics of the most widely used active mediums of the solid-state IR lasers with justification of use of the alloying components. The main process stages and a brief description of the advanced optical ceramics technology for application as a solid-state lasers active medium are provided. The innovative thin-disk laser concept is described. The article presents the technological equipment and competencies of the research and technology center created for the development of the solid-state IR laser systems with complete manufacturing cycle including locations for production of the matrix diodes of the optical pumping systems, thin-disk lasers with the use of advanced optical ceramics technology concept, the development and manufacturing of the high-aperture optical systems (telescopes and collimators). The article shows the possibility of creation a laser portal for the systems of satellite-to-satellite space communications using the advantages of the advanced technology and the structure of the thin-disk lasers.

Key words: space laser communications systems, data flow rate, FSO technology, solid-state laser, single-crystal matrix, rare earth elements, energy level, optical laser ceramics, nanocrystal precursors, disk active element, stacked diode arrays, laser head.

References

1. Free-Space Optics: Propagation and Communication. – ISBN 978-1-905209-02-6.
2. Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks. – ISBN 067232248X.
3. NASA Laser Communication Payload Undergoing Integration and Testing. [Internet resource]: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-laser-communication-payload-undergoing-integration-and-testing>.
4. LEMNOS Exploration & SPACE Communications. [Internet resource]: <https://esc.gsfc.nasa.gov/lemnos>.
5. Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS) – 12.06.17. [Internet resource]: https://www.nasa.gov/mision_pages/station/research/experiments/861.html.
6. European Data Relay Satellite System (EDRS) Overview. [Internet resource]: <https://artes.esa.int/edrs/overview>.
7. First high capacity space-to-ground laser communications system for the new European external ISS Platform Bartolomeo. [Internet resource]: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/03/first-high-capacity-space-to-ground-laser-communications-system-.html>.
8. Russian space experiment 'Laser communications system' (SE 'LCS'). [Internet resource]: https://vpk.name/news/97641_rossiiskii_kosmicheskii_eksperiment_sistema_lazernoi_svyazi_ke_sls.html.
9. Official website of the NIIPP Precision Instrument Research Institute ('NPK SPP' JC). [Internet resource]: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-svyaz.html>.
10. [Internet resource]: http://messenger.jhuapl.edu/news_room/details.php?id=118.
11. Lunar Laser Communication Demonstration. NASA's First Space Laser Communication System Demonstration. [Internet resource]: https://www.nasa.gov/sites/default/files/llcdfactsheet.final_web_.pdf.
12. Kazantsev S. G. Solid-state laser with diode pumping // VI Intern. Conf. 'AMPL 2003'. Abstracts. Tomsk, 15 – 19 September 2003. – Tomsk: IAO SB RAS, 2003. – P. 67.
13. Kazantsev S. G., Kufferin V. A. YAG:Nd³⁺ solid-state laser for generation of the short-pulse UV light // The VI International Symposium on Radiation Plasma Dynamics 'RPD-2003': Rep. abstract. Zvenigorod, October 22 – 24, 2003. – M.: MSTU, 2003. – P. 28.
14. Kazantsev S. G. Resistance of the optical elements with protective and anti-reflection coatings to the laser impact within the wavelength (λ) range of ~ 266 nm to $10.6 \mu\text{m}$ // Report abstracts of the 'Metal Vapour Lasers – 2002' Symposium. – Loo, September 24 – 26, 2002. – Rostov-on-Don: RSU, 2002. – P. 42.
15. Minogin V. G. Laser Physics: Textbook. – M.: MIPT, 2010. – 336 p. (Revision 16.02.2010).
16. Kazantsev S. G. Pass-through optics of the high-energy large-aperture pulse lasers of the mid-IR range // Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D.). – M.: MISIS, 2002. – 242 p.
17. Blistanov A. A., Bondarenko V. S., Chkalova V. V., et. al. Acoustic crystals: book of reference. – M.: Nauka, 1982. – 632 p.
18. Blistanov A. A. Crystals of quantum and nonlinear optics. – M.: MISIS, 2000. – 432 p.
19. Bokii G. B., Kravchenko V. B. Spectroscopy of crystals: collected volume. – L.: Nauka, 1973. – Pp. 7 – 15.
20. Bagdasarov Kh. S., Karpov I. I., Grechushnikov B. N. Growth of yttrium aluminium garnet crystals: Electronics reviews.– M.: CRI 'Electronics', 1976. – 96 p. – Ser. 10. – Iss. 1.
21. Zverev G. M., Goliaev Iu. D. Crystal lasers and their application. – M.: Radio and svyaz, 1994. – 312 p.
22. Laser. [Internet resource]: <https://bigenc.ru/phy-sics/text/4341828>.
23. Skliarov O. K. Fiber-optic networks and communication systems: Textbook. – Issue No. 2, ster. – SPb.: Lan', 2010. – 272 p. – (ISBN 978-5-8114-1028-6).
24. S. Woods, M. Duka, G. Flinn. Medium power fiber lasers and their application. // Photonics. – 2008. – No. 4. – Pp. 6 – 10.
25. Dianov E. M., Prokhorov A. M. Lasers and fiber optics // Advances in Physical Sciences. – 1986. – V. 148. – Iss. 2. – Pp. 289 – 311. – DOI:10.3367/UFNr.0148.198602c.0289.
26. Greskovich C., Chernoch J.P. // J. Appl. Phys. – 1973. – V. 44. – No. 10. – Pp. 4599 – 4606.
27. Ikesue A. et al. // J. Am. Ceram. Soc. – 1995. – V. 78. – No. 1. – Pp. 1033 – 1040.
28. Ikesue A. et al. // J. Am. Ceram. Soc. – 1995. – V. 78. – No. 4. – Pp. 225 – 228.
29. Ikesue A., Yoshida K. Influence of pore volume on laser performance of Nd:YAG ceramics // J. Mater. Sci. – 1999. – V. 34. – Pp. 1189 – 1195.
30. Directed Energy Weapons. JHPSSL (Joint High Power Solid State Laser). [Internet resource]: http://www.TheIvinn-moon.com/45jack_files/03files/JHPSSL_Joint_High_Power_Solid_State_Laser.html.

31. Solid-State Heat-Capacity Laser. [Internet resource]: <https://lasers.llnl.gov/science/photon-science/directed-energy/sshcl>.
32. Mercury: A Diode-Pumped Solid-State Laser. [Internet resource]: <https://lasers.llnl.gov/science/photonscience/highpowered-lasers/mercury>.
33. Gusev A. I., Rempel A. A. Nanocrystalline materials. – M.: Physmatlit, 2000. – 222 p.
34. Lu J., Ueda K., Yagi H. Neodymium doped yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) nanocrystalline ceramics – a new generation of solid-state laser and optical materials // *J. Alloys Comp.* – 2002. – V. 341. – Pp. 220 – 225.
35. Sanghera J., Shaw B., Kim W. Ceramic Laser Materials // *Proc. SPIE.* – 2011. – V. 7912. – P. 79121Q-1.
36. Osipov V. V., et. al. // *Izvestia of the Russian academy of Science (RAS)*, 1999. – V.63. – No. 10. – Pp. 1968 – 1971. – (Ser. Physics).
37. Kotov Iu. A., et. al. // *JTP.* – 2002. – V. 72. – Iss. 11. – Pp. 76 – 82.
38. Kotov Iu. A. et. al. // *JTP*, 2004. – V. 74. – Iss. 3. – Pp. 72 – 77.
39. Osipov V. V. et. al. // *Laser Phys.* – 2006. – V. 16. – N. 1. – Pp. 116 – 125.
40. Fedorov P. P., Maslov V. A., Usachev V. A., Kononenko N. E. Laser ceramics synthesis based on the yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) nanodispersed powders // *ISSN 0236-3933. Vestnik of the Bauman MSTU.* – 2012. – C. 28 – 44. – (Ser. Instrument engineering).
41. Su C., Zhang H., Han H. Preparation of Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet Transparent Ceramics by Homogeneous Precipitation Method // *J. Rare Earths.* – 2005. – V. 23. – No. 6. – P. 716 – 720.
42. Lee Sang-Ho, Kochawattana S., Messing G. L. Solid-State Reactive Sintering of Transparent Polycrystalline Nd:YAG Ceramics // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 2006. – V. 89. – Issue 6. – P. 1945 – 1950.
43. Zhang Huashan, Jing Min, Su Chunhui. Application of Stereology on Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet (Nd:YAG) Transparent Ceramics // *J. Rare Earths.* – 2006. – V. 24. – Issue 5. – P. 538 – 542 // *ISSN 0236-3933.*
44. Zhang Huashan, Hui Han, Su Chunhui, Zhang Hongbo. Effect of heat treatment on crystallization of Nd:YAG ceramics // *Journal of Wuhan University of Technology – Mater. Sci. Ed.* – 2007. – V. 22. – Issue 2. – Pp. 333 – 336.
45. Kaminsky A. A., Kravchenko V. B., Kopylov Y. L. Novel polycrystalline laser material: $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ ceramics fabricated by the high-pressure colloidal slip casting (HPCSC) method // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 2007. – V. 204. – No. 7. – Pp. 2411 – 2415.
46. Sellappan P., Jayaram V., Chokshi A. H., Divakar C. Synthesis of bulk, dense, nanocrystalline yttrium aluminum garnet from amorphous powders // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 2007. – V. 90. – Issue 11. – Pp. 3638 – 3641.
47. Hreniak D., Gierlotka S., Lojkowski W. High-pressure induced structural decomposition of RE-doped YAG nanoceramics // *Solid State Phenomena Journal.* – 2005. – V. 106. – Pp. 17 – 22.
48. Giesen A., Hugel H., Voss A., Wittig K., Brauch U., Opower H. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state laser // *Appl. Phys.*, 1994. – V. 58. – P. 365 – 372.
49. Giesen A., Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: Results and scaling laws // *IEEE Journal of Sel. Topics in Quantum Electronics.* – 2007. – V. 13. – P. 598.
50. Bufetova G. A., Nikolaev D. A., Tsvetkov V. B., Shcherbakov I. A. Raspređenje temperatury v diskovykh aktivnykh elementakh lazerov s prodol'noi diodnoi nakachkoi [The temperature distribution in the disk active elements of lasers with longitudinal diode pumping] // *Kratkie soobshcheniia po fizike.* – 2008. – No. 4. – Pp. 25 – 28.
51. Kazantsev S. G., Kuferin V. A. Diode pumping in solid-state laser on the basis of $YAG:Nd^{3+}$ single crystals // *The abstracts of reports from the 2nd International Conference on Crystals Growth and Physics.* – October 28 – 30, 2003. – M. : MISIS, 2003. – P. 224.
52. Boeing fires new thin-disk laser at high average power and beam quality. – *Laser Focus World.* – 2008, June.
53. Speiser J. Scaling of thin-disk lasers – influence of amplified spontaneous emission // *Journal of Optical Society of America B.* – 2009. – V. 26. – P. 26.
54. Nikolaev D. A., Pivkina M. N., Tsvetkov V. B. Disk ND: GGG laser with multiple-beam optical pumping // *Applied photonics.* – 2015. – V. 2. – No. 1. – Pp. 44 – 52.
55. Bagaev S. N., Osipov V. V., Ivanov M. G., Solomonov V.V., et. al. Highly transparent $Nd^{3+}:Y_2O_3$ ceramics // *Photonics.* – 2007. – Iss. 5.
56. Larionov M., Giesen A. 50-kHz, 400- μ J, sub-100-fs pulses from a thin disk laser amplifier // *Photonics West.* – 2009.
57. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. // *Optics Communications.* – 1985. – V. 56. – P. 219.
58. Keller U., Weingarten K, Kaertner F., et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers // *IEEE J. Sel. Top. Quant.* – 1996. – V. 2. – P. 435.
59. Marchese S., Baer C., G. Engqvist A. et al. Femtosecond thin disk laser oscillator with pulse energy beyond the 10microjoule level // *Opt. Express.* – 2008. – V. 16. – P. 6397.
60. Neuhaus J., Bauer D., Zhang J. et al. Subpicosecond thin-disk laser oscillator with pulse energies of up to 25.9 microjoules by use of an active multipass geometry // *Opt. Express.* – 2008. – V. 16. – P. 20530.
61. 'Fans' get in touch with ISS using a laser and a torch. [Internet resource]: http://www.laserportal.ru/content_971.

62. Snetkov I. L., Palashov O. V., Osipov V. V., Mukhin I. B., Maksimov R. N., Shitov V. A., Lukiashin K. E. Research on generative characteristics of domestic laser Yb:YAG-ceramics // Quantum electronics, 2016. – V. 46. – No. 7. – Pp. 586 – 588.
63. Apollonov V. V. Disk lasers: advantages and prospects [Internet resource]: <http://www.unionexpert.ru/index.php/news/item/447diskovihe-lazerih-pre-imu-thestva-i-per>.
64. Mukhin I.B., Khazanov E. A. Application of thin disks in Faraday isolators for high average lasers. // Quantum electronics. – 2004. – V. 34. – No. 10. – Pp. 973 – 978.
65. High-power ceramics laser has been developed in Russia. [Internet resource]: <https://hightech.fm/2016/07/18/ceramic-laser>.
66. Official website of the ‘Raduga’ Federal State Laser Test Center (FKP ‘GLP Raduga’). <http://trassa.org/index.php/o-predpriyatii>.
67. Promotional brochure of the ‘Raduga’ Federal State Laser Test Center (FKP ‘GLP Raduga’).

*Sergey Gannadevich Kazantsev, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Head of Department,
tel.: +7 (495) 366-71-89, e-mail: sg.kazantsev@gmail.com.
(JC «VNIEM Corporation»).*