

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР ЖЕЛТОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА НА КРАСИТЕЛЕ РОДАМИНЕ 6Ж С ВОЛОКОННЫМ ОПТИЧЕСКИМ УСИЛИТЕЛЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАТРИЕВЫХ “ЛАЗЕРНЫХ ОПОРНЫХ ЗВЕЗД”

© 2022 г. В. Е. Поляков¹, А. В. Емельянов^{1,*}, В. В. Ширококов¹, А. А. Закутаев¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского” Министерства обороны РФ, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: slash1@inbox.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.

После доработки 09.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Предложена активная среда для волоконных лазеров, сердцевина которой содержит эпоксидный олигомер, структурно-активированный молекулами органических красителей, и отвердитель. В качестве отвердителя используется мелкодисперсное стекло с химически активированной реакционно-способными группами поверхностью при следующем соотношении ингредиентов, в массовых частях (масс. ч.): органический краситель 0.0075–0.1; эпоксидный олигомер 8.0–31.5; мелкодисперсное стекло 68.4925–91.9. Технический результат заключается в обеспечении возможности регулирования величины показателя преломления сердцевины активного оптического волокна и, как следствие, подстройки длины волны излучения лазера до значения 589.6 нм для формирования натриевых “лазерных опорных звезд”.

Ключевые слова: эпоксидный олигомер, органический краситель, мелкодисперсное стекло, показатель преломления, натриевая “лазерная опорная звезда”

DOI: 10.31857/S0004629922120040

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на земной орбите находится множество объектов как естественного, так и техногенного происхождения. По различным оценкам их суммарное количество превышает 40 тысяч единиц. В связи с этим задача мониторинга околоземного космического пространства (наблюдение, идентификация и каталогизация малоразмерных малозаметных объектов) приобретает особую актуальность как с позиций защиты особо важных отечественных космических объектов от опасных сближений, так и с позиций экологической безопасности.

При наблюдении удаленных объектов в различных областях околоземного космического пространства наземными телескопами существует ряд технических ограничений, в частности, недостаточные разрешающая и проникающая способность телескопов, в первую очередь из-за влияния турбулентной атмосферы на принимаемый ими оптический сигнал. Этот факт вызвал большой интерес к разработке адаптивных оптических систем для телескопов с целью повышения качества получаемых изображений космических

объектов. Одним из способов, позволяющих учесть эти искажения, является создание искусственной “лазерной опорной звезды” в мезосфере – в натриевой оболочке толщиной около 10 км на высоте 90–100 км, окружающей Землю. Атомы естественного натрия могут быть возбуждены посредством воздействия лазерного излучения, настроенного на линию поглощения натрия D_2 (длина волны 589.6 нм), и излучать на той же длине волны в желтом диапазоне спектра. Естественная ширина линии поглощения D_2 определяется тепловым движением атомов натрия в атмосфере и сверхтонкой структурой самой линии D_2 , что составляет частоту около 3 ГГц [1].

Для создания натриевой “лазерной опорной звезды” могут использоваться импульсные и непрерывные лазеры. При этом в область наблюдения направляют мощный луч от лазера и создают опорный источник света [2]. Свет от этого источника, прошедший на обратном пути к Земле через слой атмосферы, содержит информацию об оптических искажениях, имеющих место в данный момент времени. Реконструированные таким об-

разом искажения улавливаются специальным сенсором (датчиком волнового фронта) и компенсируются корректором, в качестве которого часто используется деформируемое зеркало [3].

При этом к лазерному излучению предъявляется ряд повышенных требований по стабильности, мощности и т.д., что в настоящее время невозможно обеспечить в связи со слабым уровнем развития отечественных технологий изготовления лазерных устройств желтого спектрального диапазона. Необходимость разрешения указанной выше противоречия обуславливает новизну и актуальность настоящей работы.

2. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ СОЗДАНИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ НАТРИЕВЫХ ЛАЗЕРОВ

В настоящее время для создания натриевых звезд часто используют натриевые лазеры, которые примерно в 10 раз дороже равных по мощности рэлеевских лазеров, и к тому же недостаточно надежны. Для этих целей ранее использовались жидкостные лазеры на красителях, в которых излучающая среда содержит этанольный раствор органического красителя родамина 6Ж, оптически накачиваемый излучением с меньшей длиной волны от более мощного лазера. Такие лазеры весьма “капризны” и нуждаются в квалифицированном обслуживании [4, 5].

Известен твердотельный лазер желтого спектрального диапазона, включающий в себя неодимовый лазер накачки, удвоитель частоты в видимый диапазон и перестраиваемый лазер на органическом красителе в твердотельной матрице на основе полиметилметакрилата с длиной волны генерации, соответствующей желтому спектральному диапазону [6]. Подстройка дисперсионного элемента резонатора позволяет точно настроить длину волны лазера на резонансное возбуждение атомов натрия при создании адаптивных оптических систем телескопов с коррекцией атмосферных искажений по искусственной “лазерной опорной звезды”. В этом лазере органический краситель родамин 6Ж в виде молекулярного раствора внедрен в полиметилметакрилат, который со временем разлагается и подлежит замене. Кроме этого, твердотельная матрица на основе полиметилметакрилата имеет низкую теплопроводность и низкую лучевую прочность и не составляет альтернативу жидкостному лазеру на красителях.

Кроме того, известен твердотельный лазер желтого спектрального диапазона, выполненный на неодимовом лазере накачки и преобразователе частоты излучения на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) и удвоителе частоты,

обеспечивающий излучение в видимом диапазоне длин волн. Комбинация материалов лазера накачки и ВКР-преобразователя подбирается таким образом, чтобы попасть на требуемую частоту. В частности, неодимовый кристалл выполнен на кристалле гадолиний-галлиевого граната с ионами Nd^{3+} , а ВКР-преобразователь — на кристалле вольфрамата бария. Преобразователь на вынужденном комбинационном рассеянии и удвоитель частоты могут быть помещены в резонатор неодимового лазера. Предлагаемый лазер по сравнению с аналогами позволяет получать излучение на длине волны, соответствующей резонансному переходу атомов натрия с точностью до 0.1 см^{-1} , а также обладает меньшими пороговыми характеристиками и более высоким коэффициентом полезного действия (КПД) [7].

Вместе с тем число исследований за рубежом, направленных на разработку лазеров в желтом диапазоне длин волн, в последнее время значительно увеличилось. Так, группа Джемини (США) участвует в финансировании технологической программы по разработке высоконадежных твердотельных натриевых лазеров [8]. Научно-исследовательская лаборатория энергетического управления ВВС США совместно с предприятиями промышленности участвует в проекте по созданию натриевого лазера мощностью 75 Вт и более. В 2016 г. в обсерватории Серро-Параналь в Чили были проведены первые наблюдения с использованием четырех мощных волоконно-оптических лазеров, которые составляют основную часть системы телескопа VLT. Устройство Four Laser Guide Star Facility (4LGSF) выстреливает в небо четырем 22-ваттными лазерными лучами. В результате в мезосфере появляются 4 искусственные звезды, с помощью которых система адаптивной оптики способна компенсировать в реальном времени расплывание изображений под воздействием турбулентных потоков воздуха. Волоконно-оптическая рамановская лазерная технология, на которой базируется лазерная система 4LGSF, узлы оптических труб, которые расширяют лазерные пучки и направляют их в нужную точку неба, волоконные усилители большой мощности, пакет управляющих системных программ в совокупности в настоящее время представляют собой самую совершенную систему из действующих систем адаптивной оптики. Такие лазеры приобретены и для обсерватории Кека, их также планируется установить в будущем на телескопах обсерватории Джемини [8]. При всей привлекательности такой системы она не лишена недостатков: высокая стоимость системы и необходимость высококвалифицированного обслуживания уменьшают возможности ее серийного производства.

Более доступным оказался лазер третьего поколения – TopTika Photonics AG, который используется на основных оптических телескопах, содержащий полупроводниковый лазер – мощный диод, согласованный с оптическим волокном и рамановским волоконным усилителем.

3. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ СОВМЕСТНО С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ УСИЛИТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН

В настоящей работе приведены результаты исследований, направленные на создание альтернативных волоконных твердотельных лазеров с волоконно-оптическим усилителем на основе активных полимерных волокон, сердцевина которых содержит эпоксидный олигомер (реактопласт), структурно-активированный молекулами органических красителей (в частности, родамином 6Ж), и отвердитель – мелкодисперсное стекло, поверхность которого активирована реакционно-способными группами.

Волоконные лазеры обладают множеством преимуществ:

- значительное отношение площади резонатора к его объему, что обеспечивает качественное охлаждение;
- высокое оптическое качество излучения, так как генерация происходит прямо в волокне (в сердцевине);
- отсутствие необходимости юстировки резонатора;
- высокий КПД оптической накачки при использовании полупроводниковых лазеров и светодиодов;
- низкие массогабаритные характеристики волоконных лазеров по сравнению с твердотельными и газовыми лазерами, что обеспечивает их мобильность.

Использование волоконных лазеров (генераторов) вместе с волоконными усилителями позволяет управлять суммарной мощностью излучения в широком диапазоне. Принцип работы оптических волоконных усилителей основан на явлении вынужденной эмиссии в волокнах усиливающей среды, которая накачивается с помощью полупроводникового диодного лазера, причем почти во всех случаях излучение накачки проходит через сердцевину усилителя вместе с сигналом от волоконного лазера, который будет усилен.

По своей структуре сердцевина активного волокна на основе активированных красителями эпоксидных и циклоалифатических олигомеров и отвержденная мелкодисперсными стеклянными порошками представляет твердотельную статисти-

чески пространственную сетку, в которую квазирегулярно включены генерирующие центры (молекулы органических красителей). По своему физическому состоянию сердцевина является аморфным веществом. Использование в качестве отвердителей мелкодисперсных стекол с активной реакционно-способными группами поверхностью значительно увеличивает теплопроводность, лучевую прочность и позволяют регулировать величину показателя преломления сердцевины активного полимерного волокна.

Длина активного волокна может достигать десятки метров в одном волоконном лазере и в одном волоконном усилителе [9]. Оптический резонатор волоконного лазера содержит брэгговские решетки, а источник накачки – полупроводниковый лазер, что обеспечит высокий суммарный КПД накачки около 0.25–0.35. Оценочные расчеты показали, что мощность излучения в предлагаемом волоконном лазере на основе реактопластов с красителем родамином 6Ж (желтый диапазон длин волн с несущей длиной волны 585 нм и квантовым выходом люминесценции 0.9) совместно с однокаскадным волоконным усилителем может достигать 100 Вт и более (без деструкции красителя). Увеличения мощности излучения можно достичь за счет суммирования излучения нескольких волоконных лазеров, а также за счет использования нескольких (двух, трех и т.д.) каскадов оптических волоконных усилителей. Дисперсионный элемент резонатора волоконного лазера для точной настройки длины излучения лазера на резонансное возбуждение атомов натрия (589.6 нм) может быть выполнен также по технологии брэгговских решеток.

Перечисленные преимущества предлагаемого волоконного лазера и волоконного усилителя на реактопластах с красителями перед лазерами на термопластах [6] достигнуты за счет применения инновационной технологии изготовления сердцевины активного волокна. Основные технологические операции заключаются в следующем: молекулы органических красителей химически подшивают к макромолекуле эпоксидного или циклоалифатического олигомера в вязко-текучем агрегатном состоянии (обеспечивается более сильная химическая связь по сравнению с молекулярными растворами), что препятствует деградации красителей при высоких уровнях накачки.

Активные среды в вязко-текучем состоянии получают путем взаимодействия красителя соответствующего ряда с незамещенными амино- и карбоксильными группами с эпоксидным олигомером при молярном соотношении 1 : (1–5) в течение 2–48 ч при температуре 60–150°C [10].

Характерной особенностью синтезированных таким образом активных сред является высокая степень концентрации генерирующих центров,

которую определяют расчетным путем, т.к. масса эпоксиолигомера и органического красителя известна. Для приготовления сердцевины активной среды с нужной концентрацией ее предварительно рассчитывали из соотношения

$$C_{laz} = K_{\lambda} M / \sigma_{\lambda} N^A,$$

где C_{laz} – необходимая концентрация, в масс. ч.; K_{λ} – коэффициент поглощения органического красителя в эпоксиолигомерной матрице; σ_{λ} в единицах $[m^2]$ – сечение поглощения органического красителя; $N^A = 6.02 \times 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро; M – молекулярная масса модифицированного красителя. Затем рассчитали навеску концентрата A для приготовления лазерной концентрации, учитывая, что

$$A = HC_{laz} / C,$$

где H [г] – количество композиции, которое необходимо приготовить; C – концентрация концентрата; A – навеска концентрата.

Массу неактивированного олигомера B определяли как $B = H - A$. Активную среду готовили путем введения рассчитанной навески концентрата в неактивированный олигомер. Оптимальные концентрации модифицированных красителей в эпоксиолигомерных матрицах составляли величину $10^{-6} - 10^{-2}$ г см⁻³.

В технологии эпоксидных олигомеров для отверждения могут быть использованы отвердители кислотного и щелочного типов. Отвердители щелочного типа – это основания Льюиса, неорганические основания, первичные и вторичные амины и амиды. Отвердителями кислотного типа являются ангидриды карбоновых кислот, двухосновные органические кислоты, фенолы и кислоты Льюиса. Наиболее распространенными отвердителями для эпоксидных олигомеров являются ангидриды. Процесс этот сложен из-за протекания одновременно многих химических реакций, и до сих пор не существует единого описания механизма отверждения [11].

При использовании в качестве отвердителей аминов, обладающих большей основностью, чем красители, происходит практически полное разрушение “солевой” формы красителя. По мере расходования аминов в процессе отверждения “солевая” форма красителей может частично восстанавливаться.

Использование ангидридов поликарбоновых кислот для отверждения эпоксиолигомеров позволяет сохранять “солевою” форму красителя.

Красители, находящиеся не в “солевой” форме, могут участвовать в других реакциях, приводящих к их разрушению. Например, кумарины

могут присоединять по двойной связи ненасыщенные соединения – ангидриды. В этой связи выбор отвердителя в случае полимеризации активированных красителями эпоксиолигомеров является принципиальным вопросом. Исходя из указанных предпосылок был сделан вывод, что структурно-активированные олигомеры, содержащие в своем составе красители не в “солевой” форме, целесообразно полимеризовать отвердителями аминного типа, а олигомеры, содержащие красители в “солевой” форме, – ангидридами поликарбоновых кислот [12].

Оптимизация состава полимерной матрицы в условиях полимеризации позволила получить активные среды на базе эпоксиполимеров, в которых отсутствуют химические превращения красителей, связанные с разрушением хромофорной группы. Процессы полимеризации для структурно-активированных эпоксиолигомеров осуществлялись путем нагревания композиции, причем количество отвердителя определялось из условий стехиометрии с учетом количества эпоксидных групп. Так, например, при полимеризации активированного красителем родамином 6Ж эпоксиолигомера марки ЭД-24 количество отвердителя рассчитывалось с использованием стехиометрических коэффициентов следующим образом: $I_{steh} = 23.5 \times 3.86 = 90.71 = n_e \times 3.86$, где n_e – число эпоксидных групп, содержащееся в олигомере марки ЭД-24. Отсюда для обеспечения процесса полимеризации необходимо было взять на 100 массовых частей олигомера 72.67 массовых частей отвердителя (гексогидрофталевого ангидрида). Вместе с тем использование такой активной среды в качестве сердцевины волоконных лазеров связано со сложностью управления показателем преломления сердцевины и оболочки.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С СЕРДЦЕВИНОЙ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ И ЦИКЛОАЛИФАТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ, СТРУКТУРНО-АКТИВИРОВАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ОРГАНИЧЕСКИМИ КРАСИТЕЛЯМИ

В работе приведены результаты исследований, направленные на обеспечение возможности регулирования величины показателя преломления сердцевины активного волокна за счет уменьшения органической части ингредиентов сердцевины и замены ее неорганическими соединениями [13]. Предлагается, в частности, исключить органический отвердитель и использовать в качестве отвердителя мелкодисперсные стеклянные по-

рошки с молекулярно-освоенной реакционно-способными группами поверхностью.

В этом случае отвердитель в виде мелкодисперсных порошков с активированной поверхностью является одновременно и наполнителем синтезируемой сердцевины активного волокна. Для получения наполненных полимеров с высокими физико-механическими и оптическими свойствами оптимальным вариантом является создание химической связи между наполнителем и олигомером.

В качестве стекол с активированной поверхностью целесообразно использовать стеклообразующие системы оксидов следующих составов: $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--BaO--Na}_2\text{O--K}_2\text{O--As}_2\text{O}_3$; $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ или $\text{SiO}_2\text{--Li}_2\text{O}$.

Одним из важных требований, предъявляемых к составу стеклообразующих оксидов, является обеспечение возможностей управления и выравнивания показателя преломления мелкодисперсного стекла и показателя преломления эпоксидного полимера. Показатель преломления стекла регулируется за счет выбора концентрации оксидов его ингредиентов. Например, для получения стекла с показателем преломления $n = 1.501$ необходимо взять (в мол. частях) $\text{SiO}_2 - 72.6$; $\text{B}_2\text{O}_3 - 11.7$; $\text{BaO} - 2.1$; $\text{Na}_2\text{O} - 8.1$; $\text{K}_2\text{O} - 5.2$; $\text{As}_2\text{O}_3 - 0.3$ или $40 \text{ Mg}_2\text{O}$ и $60 \text{ P}_2\text{O}_5$; $17.6 \text{ Al}_2\text{O}_3$ и 82.4 SiO_2 ; $20.4 \text{ Li}_2\text{O}$ и 79.6 SiO_2 .

Мелкодисперсный стеклянный порошок получают путем первоначального дробления в ступке, последующего размалывания в шаровой мельнице и просеивания через сито с размером ячейки 10 мкм. Удельная поверхность полученного таким образом стекла составляет величину $50\text{--}100 \text{ см}^2/\text{см}^3$.

Поверхность полученного мелкодисперсного стекла осваивают (активируют) реакционно-способными группами: --COOH , --NH_2 , --NH , --ONTiCl_4 , которые обеспечивают полимеризацию эпоксидных олигомеров. Количество мелкодисперсного стекла рассчитывают из условия получения необходимой удельной активности поверхности, обеспечивающей высокую степень полимеризации активированного красителями эпоксиолигомера.

Активацию поверхности мелкодисперсного стекла проводят следующим образом. Порошок мелкодисперсного стекла вакуумируют при температуре $200\text{--}450^\circ\text{C}$ в течение 3–6 ч, а затем обрабатывают различными реагентами.

Для создания на поверхности групп $\text{=N}^{\text{H}}\text{--N}^{\text{H}}$ и =N--N стекло обрабатывают газообразным аммиаком при $t = 450^\circ\text{C}$ в течение 8–10 ч. Для создания на поверхности групп --COOH мелкодисперсное стекло обрабатывают щавелевой кислотой в по-

токе азота при $t = 180^\circ\text{C}$ в течение 6–8 ч. Для создания на поверхности подшитых групп --ONTiCl_4 стекло обрабатывают в потоке азота при $t = 180^\circ\text{C}$ в течение 8–10 часов.

Избыток реагентов, физически адсорбированных на поверхности стекла, удаляют дополнительным продувом чистым азотом при температуре $t = 100\text{--}200^\circ\text{C}$ в течение 2–3 ч.

Активации могут также подвергаться внутренние поверхности пор стеклянных пористых моноблоков [14]. Поверхность пористого стекла, освоенная (активированная) реакционно-способными группами --COOH , --NH_2 , ==NH , --ONTiCl_4 , обеспечивает полимеризацию эпоксидных олигомеров и выполняет функции отвердителей в составе ингредиентов сердцевины активных волокон на основе эпоксидных и циклоалифатических матриц.

Сердцевину на основе активированного красителями эпоксидного олигомера, отвержденного мелкодисперсным стеклом с активированной поверхностью, получают следующим образом. Предварительно получают структурно-активированный олигомер с большей концентрацией красителя. Полученный “концентрат” разбавляют неокрашенным олигомером до получения нужной концентрации. Затем рассчитывают количество отвердителя по стехиометрическим коэффициентам, исходя из количества эпоксидных групп в выбранном олигомере.

В отвердителе рассчитывают число реакционно-способных групп --COOH , --NH_2 , ==NH , --ONTiCl_4 и т.п., ответственных за образование сетчатого полимера. Далее рассчитывают количество мелкодисперсного стеклянного порошка таким образом, чтобы удельная поверхность его позволила подшить необходимое количество реакционно-способных групп. Подшивают к рассчитанному количеству стекла реакционно-способные группы в зависимости от типа и “солевой” формы красителя, которым активирован эпоксидный или циклоалифатический олигомер. Для красителей в “солевой” форме поверхность активируют группами --COOH или --ONTiCl_4 . Для красителей в не “солевой” форме аминогруппами --NH_2 или =NH . Стеклянный порошок с молекулярно-освоенной поверхностью смешивают со структурно-активированным олигомером. Полученную смесь ингредиентов интенсивно перемешивают и вакуумируют. После этого помещают в термостат, нагревают до $60\text{--}160^\circ\text{C}$ и полимеризуют в течение 2–10 ч.

5. ОПИСАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
СЕРДЦЕВИНЫ ДЛЯ АКТИВНОГО
ПОЛИМЕРНОГО ВОЛОКНА
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА
И СЕРДЦЕВИНЫ ВОЛОКОННОГО
УСИЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КРАСИТЕЛЯ
РОДАМИНА 6Ж

Технология включает в себя следующие операции. В олигомер марки УП-612 добавляют краситель родамин 6Ж в молярном соотношении 1 : (1–5), нагревают его до температуры 60–150°C и выдерживают 2–48 ч. В результате образуется концентрат, в котором родамин 6Ж химически подшит к макромолекуле олигомера следующим образом.

Полученный “концентрат” содержит 3.75×10^{-2} г (красителя)/г(олигомера). Затем путем подбора состава стеклообразующих окислов выбирают стекло с коэффициентом преломления, близким к коэффициенту преломления эпоксидного олигомера УП-612, у которого показатель преломления $n = 1.501$. Затем добавляют измельченное стекло, содержащее реакционно-способные группы –COOH. Полученную композицию вакуумируют при величине вакуума 0.1 бара в течение 30 мин при температуре 25°C [15].

ПРИМЕР 1. Для изготовления сердцевин активное волокна, содержащей 0.1 г родамина 6Ж и 8.0 г эпоксидного олигомера марки УП-612, берут навеску “концентрата” (концентрация $C = 3.75 \times 10^{-2}$ г(красителя)/г(олигомера)), равную 2.7 г, и добавляют неокрашенный олигомер УП-612 в количестве 5.4 г. Затем путем подбора состава стеклообразующих окислов выбирают стекло с коэффициентом преломления, близким к коэффициенту преломления эпоксидного олигомера УП-612, у которого показатель преломления $n = 1.501$. В данном примере взято стекло с содержанием ингредиентов (в процентах) SiO₂ – 72.6; B₂O₃ – 11.7; Ba₂O – 2.1; Na₂O – 8.1; K₂O – 5.2; As₂O₃ – 0.3; или 40 Mg₂O и 60 P₂O₅; 17.6 Al₂O₃ и 82.4 SiO₂; 20.4 Li₂O и 79.6 SiO₂. Коэффициент преломления стекла $n = 1.502$. Мелкодисперсный порошок получают путем первоначального дробления в ступке, последующего размалывания в шаровой мельнице и просеиванием через сито с размером ячейки 10 мкм. Удельная поверхность такого стекла составляет 100–200 см²/см³, что обеспечивает возможность подшивки необходимого количества реакционно-способных групп и высокую степень полимеризации активированного красителем эпоксиолигомера. Далее проводят химическую активацию поверхности стекла группами –COOH. Для этого стекло вакуумируют при давлении 0.1 бар и температуре 200°C в течение 3 ч. Затем через него пропускают ток азота

с парами шавелевой кислоты при 180°C в течение 6–8 ч. После этого порошок стекла охлаждают до 160°C и пропускают через него чистый азот в течение 2–3 ч для удаления физически адсорбированной кислоты [16].

Для отверждения активированного красителем родамином 6Ж эпоксиолигомера марки УП-612 берут 91.9 г полученного стекла, смешивают с олигомером и размещают внутри полой кварцевой трубки (преформы) в вязко-текучем состоянии (трубка используется также как волновод накачки), вакуумируют, нагревают полученную композицию до 160°C и проводят отверждение при этой температуре в течение 5 ч. Таким образом формируют сердцевину волокна, которая представляет собой термореактивное высокомолекулярное эпоксиполимерное соединение, образующее по своей структуре статистически пространственную сетку, в которой квазирегулярно размещены молекулы красителя [16]. Внутренний диаметр трубки преформы (сердцевин) может иметь традиционные для полимерных оптических волокон размеры 50, 62.5, 120 и 980 мкм при внешнем диаметре преформы (волновода накачки) 490 и 1000 мкм. Абсолютный показатель преломления сердцевин можно всегда сделать несколько выше показателя преломления оболочки, изменяя количество и состав ингредиентов мелкодисперсного стекла (отвердителя).

В предлагаемом волоконном лазере резонатор выполнен в виде волоконных брэгговских решеток, которые формируются на поверхности сердцевин с использованием импульсного наносекундного ультрафиолетового лазера посредством освещения волокна через некоторую фазовую маску. Изготовление решеток показателя преломления основано на явлении фоточувствительности, которое заключается в изменении показателя преломления сердцевин волокна под действием УФ-излучения определенных длин волн. Как правило, волоконные брэгговские решетки показателя преломления представляют собой отрезок сердцевин волокна с модуляцией показателя преломления в световедущей части с периодом порядка половины длины волны распространяющегося излучения. Левая входная брэгговская решетка имеет коэффициент отражения на длине волны генерации, близкий к 1, а коэффициент отражения правой существенно ниже и определяется величиной усиления и оптических потерь излучения в активном волокне. Брэгговские решетки могут быть созданы как непосредственно в активном волокне, так и в отрезке фоточувствительного волокна, который склеивается с активным. В качестве источника накачки используется полупроводниковый лазер с оптоволоконным выходом с длиной волны излучения 532 нм (зеленый спектральный диапазон). Излучение накачки осуществляется через волновод накачки из

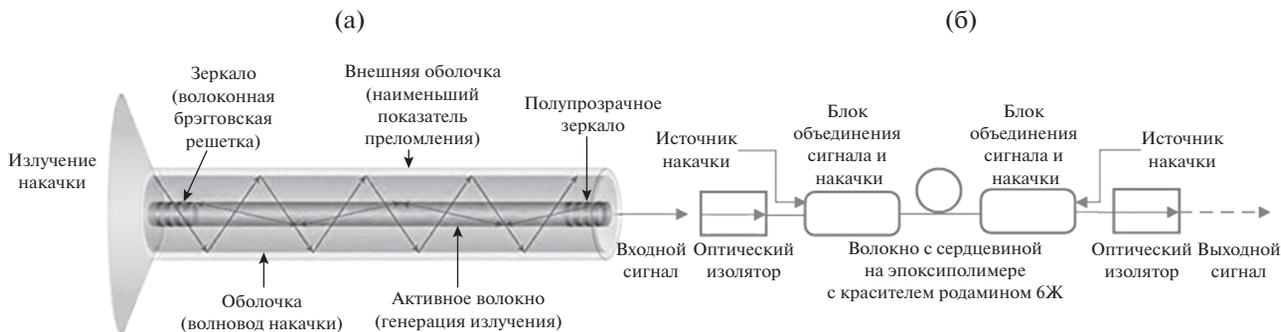


Рис. 1. Структурная схема волоконного твердотельного лазера на красителях (а) и волоконного усилителя (б), у которых сердцевина активного волокна синтезирована на реактопластах, активированных молекулами органических красителей, и полимеризованных мелкодисперсными стеклянными порошками, активированными реакционно-способными группами.

кварцевого стекла, внутри которого расположена сердцевина, а внешняя оболочка выполняется из полиметилметакрилата с наименьшим показателем преломления. Для увеличения мощности излучения в желтом диапазоне длин волн на выходе волоконного лазера установлен волоконный усилитель, у которого сердцевина синтезирована по такой же технологии, как и в волоконном лазере. Для объединения входного оптического сигнала от волоконного лазера и излучения накачки от полупроводникового лазера в усилителе используется мультиплексоры. Необходимыми элементами оптических усилителей являются оптические изоляторы — устройства, пропускающие световые сигналы только в одном направлении [15]. Оптические изоляторы устанавливаются в усилителе на входе и на выходе, что предотвращает попадание в усилитель паразитных искажений и шумов. Усилительной средой в предлагаемом усилителе, как и в волоконном лазере, является полимерное оптоволокно с сердцевиной, активированной красителем родамином 6Ж, и с оптимальной полосой поглощения 532 нм. В качестве источника накачки используется диодный лазер с длиной волны излучения 532 нм, причем могут быть реализованы схемы усилителя с попутной

накачкой, когда сигнал от волоконного лазера и излучение накачки распространяются в одном направлении со встречной накачкой, а также, когда накачка осуществляется сразу в двух направлениях двумя источниками накачки, что повышает суммарные мощность накачки и мощность стимулированного излучения.

Функциональная схема твердотельного волоконного лазера желтого спектрального диапазона, у которого сердцевина выполнена из реактопласта, с красителем родамином 6Ж и полимеризованная мелкодисперсным стеклянным порошком, поверхность которого активирована реакционно-способными группами, совместно с волоконным оптическим усилителем показана на рис. 1а и б.

Примеры, в которых сердцевину для активного волокна, содержащую родамин 6Ж, изготавливают по методике, аналогичной приведенному выше примеру, при разных соотношениях ингредиентов, представлены в табл. 1.

Оценочные генерационные характеристики лазера были измерены с использованием физической модели, представляющей плоскопараллельную пластинку размерами 3 × 10 × 25 мм с длиной резонатора 75 мм, образованного глухим зеркалом и клиновидной подложкой, с использова-

Таблица 1. Активные среды с различным содержанием ингредиентов и коэффициентов преломления отвержденных эпоксиполимеров, равные коэффициентам преломления мелкодисперсного стекла

Пример	Органический краситель		Эпоксидный олигомер		Стекло с химически активной поверхностью		nD
	Тип	Сод-е, масс. ч.	Тип	Сод-е, масс. ч.	Тип активатора	Сод-е, масс. ч.	
1	Родамин 6Ж	0.1	VII-612	8.0	-COOH	91.9	1.510–1.519
2	Родамин 6Ж	0.05375	VII-612	19.75	-COOH	80.19625	
3	Родамин 6Ж	0.0075	VII-612	31.5	-COOH	68.4925	

Примечание. nD — коэффициент преломления эпоксиполимера. “Сод-е” — содержание вещества в массовых частях на 100 массовых частей основы.

нием в качестве источника накачки лазера АИГ: Nd^{3+} с удвоителем частоты и модулятором добротности. Длина волны излучения источника накачки 532 нм, пороговая мощность накачки 0.15 МВт/см^2 , частота повторения импульсов накачки 12.5 Гц. Спектр широкополосной генерации составлял 15 нм с максимумом излучения на 586 нм. Мощность излучения в импульсном режиме составляла 10 МВт/см^2 . Следует отметить, что из всех органических красителей только родамин 6Ж эффективно излучает в непрерывном режиме с квантовым выходом люминесценции 0.9.

Экспериментальные значения хорошо согласуются с результатами расчетов, полученными путем численного решения системы скоростных балансных уравнений и не являются предельными.

Так, используя большую длину активного волокна и резонатора, накачку от полупроводникового лазера, применяя волоконные усилители, а также учитывая уникальные свойства сердцевинного лазера и сердцевинного усилителя и более эффективный режим вынужденного излучения, существует возможность разработки лазера для формирования натриевых опорных звезд мощностью 50 Вт и более.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что сердцевина активного волокна, содержащая в своем составе реактопласты, активированные молекулами органических красителей, и полимеризованная мелкодисперсными стеклянными порошками открывает новые возможности для создания твердотельных волоконных лазеров на красителях в видимом спектральном диапазоне длин волн.

Волоконный твердотельный лазер на красителях представляет собой четырехуровневую систему, у которой фотон накачки возбуждает переход из основного состояния S_0 в возбужденное состояние S_1 , а излучение связано с расселением уровня S_1 на уровень S_0 . Такой механизм вынужденного излучения хорошо работает при диодной накачке и приводит к высокой эффективности преобразования фотонов, а также к надежной и простой компоновке, в которой отсутствует дискретная оптика, требующая юстировки и выравнивания.

Сердцевина, обладающая трехмерной структурой, не способна плавиться, растворяться, обладает низким коэффициентом диффузии ($10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$), высокими адгезионными свойствами, что принципиально важно при формировании бездефектной границы раздела между сердцевиной и волноводом накачки.

Важным результатом исследований при разработке волоконных лазеров является возможность управления показателем преломления реактопласта и показателем преломления мелкодисперсного стеклянного порошка, активированного реакционно-способными группами, выбор которых осуществлен с учетом “солевой” формы красителя. Сердцевина предложенного состава обладает взаимной химической индифферентностью и характеризуется высокими значениями теплопроводности $0.71\text{--}0.75 \text{ Вт К}^{-1} \text{ м}^{-1}$ и лучевой прочности. Излучение имеет высокое оптическое качество. КПД преобразования источника накачки — полупроводникового лазера (электрический сигнал — в оптический, при длине волны излучения 532 нм) достигает величины $0.5\text{--}0.7$, при суммарном КПД накачки волоконного лазера $0.25\text{--}0.35$.

Волоконный твердотельный лазер на красителях может иметь большой диаметр сердцевинного порядка $50\text{--}980 \text{ мкм}$ и большой объем активной среды за счет длины волокна и резонатора, что позволит достигать значительных величин энергии и мощности. Длина активного волокна и оптического резонатора, построенного по технологии брэгговских решеток, может достигать нескольких десятков метров. Волоконный лазер на красителях эффективно работает в схеме: волоконный генератор — волоконный усилитель. Существует возможность использования нескольких волоконных лазеров с возможностью последующего суммирования их излучения, что важно для получения натриевой звезды большой яркости.

Стимулированное излучение твердотельного волоконного лазера на красителе родамине 6Ж имеет длину волны излучения 585 нм (желтый спектральный диапазон) при ширине спектра излучения на уровне 0.5 около $14\text{--}15 \text{ нм}$, что позволяет согласовать с высокой точностью длину волны излучения лазера с длиной волны резонансных переходов атомов натрия 589.6 нм.

Предлагаемый лазер может использоваться в составе адаптивных оптических систем наземных телескопов, предназначенных для реконструкции искажений волнового фронта за счет турбулентности атмосферы по следующей схеме: твердотельный волоконный лазер на родамине 6Ж, волоконный усилитель, блок коррекции атмосферных искажений, содержащий датчик волнового фронта Шэка-Гартмана, корректор волнового фронта, устройство для управления корректором волнового фронта (деформируемым зеркалом). При этом исполнительным элементом всей системы адаптивной оптики является деформируемое зеркало, изгибаемое с помощью пьезоэлектрических или механических приводов (актуаторов), которое по командам устройства управления получает, анализирует данные об ис-

кажениях от датчика волнового фронта и исправляет эти искажения за счет изменения формы отражающих поверхностей [17–19].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов технических наук (МК-2140.2022.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С. Э. Фриш, *Оптические спектры атомов* (М.: Ленинград, 1963).
2. И. Ю. Возмищев, В. В. Клейменов, Тр. Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского **671**, 254 (2019).
3. В. П. Лукин, *Оптика атмосферы и океана* **11**(5), 460 (1998).
4. Л. А. Больбасова, В. П. Лукин, *Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника* (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012).
5. X. Huo, Y. Qi, Y. Zhang, B. Chen, Z. Bai, J. Ding, Y. Wang, and Z. Lu, *Opt. Laser Eng.* **134**, id. 106207 (2020).
6. Я. В. Кравченко, А. А. Маненков, Г. А. Матюшин, *Квантовая электроника* **23**(12), 1075 (1996).
7. Т. Т. Басиев, М. Е. Дорошенко, П. Г. Зверев, А. М. Прохоров, *Твердотельный лазер желтого спектрального диапазона*, Патент РФ № 2178939, Бюл. № 3 (2002).
8. В. В. Клейменов, Е. В. Новикова, *Изв. ВУЗов. Приборостроение* **61**(10), 827 (2018).
9. А. Х. Султанов, Т. Я. Якубов, И. Л. Виноградова, *Волоконно-оптический усилитель*, Патент РФ № 2203502 (2003).
10. В. Е. Поляков, А. Ю. Смирнов, О. О. Карапетян, Ю. М. Парамонов, М. К. Пактер, Ю. С. Зайцев, С. М. Коломоец, *Активная среда для эпоксиполимерных лазеров на красителях*, Авт. свид. № 197764 от 1 февраля 1984 г.
11. В. И. Иржак, Б. А. Розенберг, И. С. Ениколонян, *Сетчатые полимеры* (М.: Наука, 1979).
12. А. В. Борткевич, С. А. Гейдур, О. О. Карапетян, А. Р. Кузнецов, С. М. Ланькова, А. Г. Морозов, В. Е. Поляков, В. П. Сидякова, *Журн. приклад. спектроскопии* **50**(2), 210 (1989).
13. Т. М. Брык, Н. Н. Баглей, Е. П. Смирнов, С. К. Гордеев, А. Ф. Бурбан, В. Б. Алесковский, *Докл. АН СССР* **272**(6), 1399 (1983).
14. Г. Б. Альтицлер, Е. Г. Дульнова, И. К. Мешковский, К. И. Крылов, *Журн. приклад. спектроскопии* **36**(4), 592 (1982).
15. В. Е. Поляков, А. В. Емельянов, А. А. Закутаев, В. В. Ширококов, *Журн. приклад. спектроскопии* **89**(1), 110 (2022).
16. В. Е. Поляков, В. Ю. Шосталь, А. А. Закутаев, В. В. Ширококов, *Активная среда для волоконных лазеров и способ ее изготовления*, Патент РФ № 2715085, Бюлл. № 6 (2020).
17. Д. Б. Шумкова, А. Е. Левченко, *Специальные волоконные световоды* (Изд-во Пермского НИПУ, 2011).
18. В. П. Лукин, *Успехи физ. наук* **184**(6), 599 (2014).
19. В. В. Клейменов, И. Ю. Возмищев, Е. В. Новикова, *Научно-техн. вестник информ. технологий, механики и оптики* **21**(4), 443 (2021).