

## АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ И ТЕХНОЛОГИЯ ЕЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В. Е. Поляков, А. В. Емельянов\*, А. А. Закутаев, В. В. Ширококов

УДК 621.373.82:535.3

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-1-110-117>

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского Министерства обороны РФ,  
Санкт-Петербург, Россия; e-mail: slash1@inbox.ru

(Поступила 2 сентября 2021)

Предложена активная среда для волоконных лазеров, которая содержит структурно-активированный эпоксидный олигомер с молекулами органических красителей и отвердитель. В качестве отвердителя используется мелкодисперсное стекло с химически активированной реакционноспособными группами поверхностью при следующем соотношении ингредиентов (в массовых частях): органический краситель 0.0075-0.1, эпоксидный олигомер 8.0-31.5, мелкодисперсное стекло с химически активированной поверхностью 68.4925-91.9. Показана возможность регулирования показателя преломления сердцевины активного волокна.

**Ключевые слова:** эпоксидный олигомер, органический краситель, активное волокно, мелкодисперсное стекло, показатель преломления.

*Invention relates to laser equipment. Active medium for fiber lasers contains a structurally-activated epoxy oligomer with molecules of organic dyes and a hardener. Curing agent used is finely dispersed glass with chemically activated reactive groups on the surface with the following ratio of ingredients pts.wt.: organic dye 0.0075-0.1; epoxy oligomer 8.0-31.5; fine-dispersed glass with chemically activated surface 68.4925-91.9. Technical result consists in enabling adjustment of the value of the refractive index of the active fibre core.*

**Keywords:** epoxy oligomer, organic dyes, active medium, finely dispersed glass, refractive index.

**Введение.** При производстве оптических волокон (гибких волноводов оптического диапазона) наиболее часто используют кварцевое стекло в чистом виде или с примесями. Большинство активных оптических волокон (волоконных лазеров) имеют сердцевину, показатель преломления которой больше, чем у внешнего слоя (оболочки). Разница показателей преломления сердцевины и оболочки определяет числовую апертуру.

Свет, введенный в волокно, распространяется главным образом в сердцевине и удерживается в волокне за счет полного внутреннего отражения на границе областей с разными показателями преломления [1]. Для удержания света в волокне также могут использоваться свойства брэгговских структур и фотонных кристаллов, способных образовывать запрещенную зону. Такая зона реализуется за счет концентрических колец с различными показателями преломления, образуя двухмерное брэгговское (диэлектрическое) зеркало, свернутое в трубку.

Один из наиболее распространенных типов активных волокон (волоконных лазеров) — волокна из кварцевого стекла, легированные ионами  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  и др. Рабочий спектральный диапазон, например, в эрбиевом волокне 1530—1565 нм (ИК-область). При изготовлении активного волокна используются преформы в башне для вытяжки волокна. Преформа — стеклянный стержень диаметром 1—10 см и длиной ~1 м. Вдоль оси преформы расположена область с увеличенным показателем

---

## ACTIVE MEDIUM FOR FIBRE LASERS AND TECHNOLOGY FOR PRODUCTION THEREOF

V. E. Polyakov, A. V. Emelyanov\*, A. A. Zakutaev, V. V. Shirobokov (A. F. Mozhaisky Military Space Academy of Ministry of Defense of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia; e-mail: slash1@inbox.ru)

преломления. Когда заготовка нагревается до температуры плавления в печи башни волокнообразования, из нее формируется сердцевина волокна. Тонкое волокно выводят из нижней части заготовки и перед выходом волокна из башни его покрывают полимерным покрытием [2]. Типичные материалы для покрытия — акрилат, силикон и полиамид. В процессе создания волокна в них формируют брэгговские решетки с помощью импульсного наносекундного УФ-лазера, освещающего волокно через некоторую фазовую маску.

Волоконные лазеры обладают множеством преимуществ: значительное отношение площади резонатора к его объему позволяет обеспечить качественное охлаждение; излучение имеет высокое оптическое качество, так как генерация происходит прямо в волокне (сердцевине); во многих случаях не требуется юстировка резонатора; высокий КПД оптической накачки при использовании полупроводниковых лазеров и светодиодов; малые габариты и масса волоконных лазеров по сравнению с твердотельными и газовыми лазерами. Оптические волокна (пассивные и активные) по виду применяемого материала можно разделить на волокна из органического и неорганического стекол. Несмотря на значительный прогресс в производстве волокон высокой прочности из неорганических стекол, их небольшое относительное удлинение при разрыве ограничивает диаметр волокна, исходя из практических требований к радиусу изгиба. Для волоконных лазеров из неорганических стекол существует опасность возникновения нелинейных эффектов рассеяния из-за высокой плотности излучения в сердцевине при небольшой площади поперечного сечения, что может привести к ограничению мощности излучения. Возникают технологические трудности при выборе показателей преломления сердцевины и оболочки волокна. Оптические волокна из органических стекол (в большей степени пассивные) изготавливаются для систем транспортировки оптического излучения в контрольно-измерительных приборах [3], в системах лазерной оптической и космической связи.

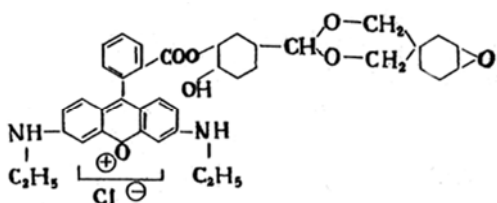
**Эксперимент.** *Технология изготовления активной среды для волоконных лазеров.* Из существующих типов органических оптических волокон наибольшее применение нашли волокна из метилметакрилата, поликарбоната, полистирола, показатель преломления у которых изменяется от 1.32 для материалов на основе акрилатов со значительными добавками фтора до 1.6 для некоторых фенольных смол. Пластиковое волокно может быть получено из заготовок путем простого технологического процесса, который часто применяется и для стекла, но с меньшей температурой (200 °С). Заготовку изготавливают из полой трубки материала оболочки или из кварцевого стекла (материала волновода накачки), которая заполняется жидкой смесью мономеров и некоторых реагентов для сердцевины. Пластиковое волокно имеет минимум потерь в видимом диапазоне длин волн, обычно многомодовое с большим диаметром сердцевины и высокой числовой апертурой. Пластиковые волокна производят с диаметрами сердцевины 50, 62.5, 120 и 980 мкм при диаметрах оболочки 490 и 1000 мкм [4].

Известен опыт использования полиметилметакрилата (ПММА), в котором генерирующими центрами являются молекулы органических красителей (твердотельный перестраиваемый лазер на красителях). Недостатком активной среды на основе ПММА, активированного представителями ксантоновых, оксазиновых и кумариновых красителей, является то, что в оптоволокне термопласты имеют более низкий показатель преломления по сравнению со стеклами, из которых практически всегда изготавливают волновод для транспортировки света накачки, что также вызывает трудности в обеспечении более высокого показателя преломления в сердцевине волокна.

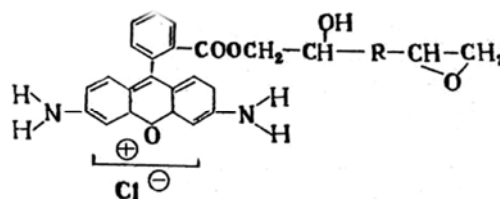
Управление показателем преломления в лазерной технике — важная и сложная задача. Так, в твердотельных лазерах на красителях с распределенной обратной связью выравнивание показателей преломления активной призмы и активной среды осуществлено за счет того, что активная призма изготовлена из неактивированного эпоксидного полимера, а активная среда — из активированного красителями эпоксидного полимера [5]. Для реализации выравнивания показателей преломления в сердцевине твердотельных волоконных лазеров на красителях требуется более сложное техническое решение. Особые сложности возникают при изготовлении сердцевины из термопластичных полимерных материалов. Принципиально важный параметр термопластов (с учетом высокой плотности излучения в сердцевине волокна) — низкая температура плавления (~75 °С).

Количество материалов, применяемых при изготовлении полимерных оптических волокон, достаточно велико, поэтому волокно часто изготавливают путем комбинирования материалов: один используют для получения сердцевины, а другой — оптической оболочки. В настоящее время единой системы выбора материалов для полимерных волокон не существует. Упорядоченная систематизация активных сред для лазеров на красителях и родственных соединений приведена в каталоге [6]. Большинство исследований, связанных с внедрением красителей в полимерные матрицы, направлены

на разработку не волоконных, а широкополосных перестраиваемых твердотельных лазеров и лазеров на красителях, например, путем модификации ПММА [7]. Известна также активная среда для твердотельных перестраиваемых лазеров, в которой полимерная матрица содержит эпоксидиановый или циклоалифатический реакционноспособные олигомеры, активированные молекулами органических красителей [8]. Предварительно активную среду синтезируют в вязко-текучем состоянии путем взаимодействия красителя соответствующего ряда с незамещенными amino- и карбоксильными группами с эпоксидным олигомером при молярном соотношении 1: (1—5) в течение 2—48 ч при температуре 60—150 °С. В качестве примеров приведем структурно-активированные олигомеры — эпоксиолигомер марки УП-612, активированный родамином 6Ж, и олигомер марки ЭД-24, активированный родамином 110:



Эпоксиолигомер марки УП-612,  
активированный родамином 6Ж



Олигомер марки ЭД-24,  
активированный родамином 110

Твердотельную активную среду изготавливают следующим образом: определяют условия химического взаимодействия молекул красителя с молекулами олигомера, а затем химически подшивают структурно-активированный компонент композиции к формирующейся полимерной сетке трехмерного полимера введением отвердителя. Структурное активирование приводит к квазирегулярному распределению молекул органических красителей в олигомере [9]. Для синтезируемых таким образом активных сред в вязко-текучем состоянии характерна высокая концентрация молекул красителя, которую определяют расчетом ( $C = 3.75 \cdot 10^{-2}$  г кр./г олиг., массы эпоксиолигомера и красителя известны). Для приготовления лазерной концентрации ее предварительно рассчитывали из соотношения  $C_{\text{лаз}} = K_{\lambda} M / \sigma_{\lambda} N_A$ , где  $C_{\text{лаз}}$  — необходимая концентрация в массовых частях (мас. ч.);  $K_{\lambda}$  — коэффициент поглощения красителя в полимерной матрице,  $\sigma_{\lambda}$  — сечение поглощения красителя,  $N_A$  — число Авогадро ( $N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>),  $M$  — молекулярная масса красителя. Затем рассчитывали навеску концентрата  $A = H C_{\text{лаз}} / C$ , где  $H$  — количество композиции, которое необходимо приготовить (г),  $C$  — концентрация концентрата. Количество неактивированного олигомера  $B$  определяли как  $B = H - A$  (г). Активная среда получена путем введения рассчитанной навески концентрата в неактивированный олигомер. Типичная лазерная концентрация красителей в полимерной матрице  $10^{-6}$ — $10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>. Для полимеризации активированной красителями олигомерной матрицы используют отвердитель, количество которого рассчитывают из стехиометрических коэффициентов. Например, при полимеризации активированного красителем эпоксиолигомера марки ЭД-24 количество отвердителя: 1 стех =  $23.5 \cdot 3.86 = 90.71 = n_{\text{э.ч.}} \cdot 3.86$  ( $n_{\text{э.ч.}}$  — количество эпоксидных групп в олигомере), т. е. для обеспечения полимеризации необходимо взять на 100 мас. ч. олигомера 72.67 мас. ч. отвердителя (например, фталиевого ангидрида). Важен выбор отвердителя. Так, при использовании в качестве отвердителей аминов, обладающих большей основностью, чем красители, происходит полное разрушение солевой формы красителя. Использование ангидридов поликарбоновых кислот позволяет сохранять солевую форму красителя. Отсюда вывод, что структурно-активированные олигомеры, содержащие в составе красители в несольевой форме, целесообразно полимеризовать отвердителями аминного типа, а олигомеры, содержащие красители в солевой форме, — ангидридами поликарбоновых кислот. По структуре синтезированные твердотельные активные среды на основе активированных красителями эпоксиполимеров (реактопласты) представляют собой статистически пространственную сетку, в которую квазирегулярно включены генерирующие центры (молекулы красителей), по физическому состоянию активные среды — аморфные вещества.

*Полимеризация реактопластов, активированных красителями, дисперсными стеклянными порошками с молекулярно-освоенной поверхностью (технология изготовления сердцевины твердотельных волоконных лазеров на красителях).* Настоящее исследование направлено на уменьшение некоторых ингредиентов органической природы из состава сердцевины [10] и замены их на неорга-

нические соединения. Предлагается исключить органический отвердитель и использовать в качестве отвердителя мелкодисперсные стеклянные порошки с поверхностью, активированной реакционно-способными группами [11]. В качестве стекол целесообразно использовать стеклообразующие системы оксидов составов:  $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--BaO--Na}_2\text{O--K}_2\text{O--As}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2\text{--Li}_2\text{O}$  и др. Одним из важных требований, предъявляемых к составу стеклообразующих оксидов, является обеспечение возможностей управления и выравнивания показателей преломления мелкодисперсного стекла и эпоксидного полимера. Показатель преломления стекла обеспечивается за счет выбора концентрации его ингредиентов, например, для получения стекла с показателем преломления  $n = 1.501$  необходимо (в мол. %):  $\text{SiO}_2$  72.6,  $\text{B}_2\text{O}_3$  2.1,  $\text{Na}_2\text{O}$  8.1,  $\text{K}_2\text{O}$  5.2 или  $\text{AsO}_3$  0.3, 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  $\text{SiO}_2$ ; 20.4  $\text{Li}_2\text{O}$  и 79.6  $\text{SiO}_2$ . Стекло синтезируют из указанных ингредиентов в платиновом тигле. Увеличения удельной площади поверхности стекол добиваются путем первоначального дробления и последующего размалывания образца, после чего стекло просеивают через сито с размером ячейки 10 мкм. Удельная плотность поверхности полученного стекла 100—200  $\text{см}^2/\text{см}^3$ . При необходимости использования стекол с большей удельной плотностью поверхности целесообразно изготавливать измельченные пористые стеклянные порошки [12]. Поверхность полученного мелкодисперсного стекла активируют реакционноспособными группами  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{NH}$ ,  $-\text{ONTiCl}_4$ , которые способны вызывать полимеризацию эпоксидных олигомеров. Количество мелкодисперсного стекла рассчитывают из условия получения необходимой удельной поверхности, обеспечивающей высокую степень полимеризации активированного красителями эпоксидолигомера. Мелкодисперсное стекло с активированной поверхностью получают следующим образом: вакуумируют при 200—450 °С в течение 3—6 ч, а затем обрабатывают различными реагентами. Для создания на поверхности групп  $\text{NH}_2$  и  $\text{NH}$  стекло обрабатывают газообразным аммиаком при  $t = 450$  °С в течение 8—10 ч, для создания групп  $\text{COOH}$  — щавелевой кислотой в потоке азота при  $t = 180$  °С в течение 6—8 ч. Для создания на поверхности подшитых групп  $\text{ONTiCl}_4$  стекло обрабатывают в потоке азота при  $t = 180$  °С в течение 8—10 ч. Избыток реагентов, физически адсорбированных на поверхности стекла, удаляют дополнительным продувом чистого азота при 100—200 °С в течение 2—3 ч. Мелкодисперсное стекло, активированное реакционноспособными группами, выполняет функцию отвердителя в составе ингредиентов сердцевин активных волокон на основе эпоксиполимерных матриц.

Сердцевину активного волокна на основе активированного красителями эпоксидолигомера, отвержденного мелкодисперсным стеклом с активированной реакционноспособными группами поверхностью, получают следующим образом. Предварительно изготавливают структурно-активированный олигомер с большой концентрацией красителя. Полученный концентрат разбавляют неокрашенным олигомером до необходимой концентрации, обеспечивающей инверсную населенность, приводящую к возникновению вынужденного излучения. Затем рассчитывают количество отвердителя по стехиометрическим коэффициентам исходя из количества эпоксидных групп в выбранном олигомере. Для отвердителя рассчитывают число реакционноспособных групп  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{NH}$ ,  $-\text{ONTiCl}_4$ , ответственных за образование сетчатого полимера. Количество мелкодисперсного стекла выбирают таким образом, чтобы его удельная поверхность позволила подшить необходимое количество реакционноспособных групп. Подшивают к рассчитанному количеству стекла реакционноспособные группы в зависимости от типа красителя, которым активирован эпоксидный или циклоалифатический олигомер. Для красителей в солевой форме поверхность активируют группами  $\text{COOH}$  или  $\text{ONTiCl}_4$ , для красителей в несольевой форме — аминоклассами  $\text{NH}_2$  или  $\text{NH}$ . Стекло с молекулярно-освоенной поверхностью смешивают со структурно-активированным молекулами красителя олигомером. Полученную смесь ингредиентов интенсивно перемешивают и вакуумируют, после чего помещают в термостат в трубке из кварцевого стекла, нагревают до 60—160 °С и отверждают в течение 2—10 ч. В общем виде соотношение ингредиентов сердцевини твердотельного волоконного лазера на красителях (в мас. ч.) можно представить как органический краситель 0.0075-0.1; эпоксидный (циклоалифатический) олигомер, активированный молекулами красителей 8.0-31.5; мелкодисперсное стекло с активированной реакционноспособными группами поверхностью 68.4925-91.9. Приведем несколько примеров практической реализации технологии формирования сердцевини оптического активного волокна на основе реактопластов с различными красителями (для волоконных лазеров).

Пример 1. Для формирования сердцевини, содержащей 0.1 г родамина 6Ж и 8.0 г эпоксидного олигомера марки УП-612, берут навеску концентрата ( $C = 3.75 \cdot 10^{-2}$  г кр./г олиг.) 2.7 г и добавляют неокрашенный олигомер 5.4 г. Подбором состава стеклообразующих оксидов выбирают стекло с коэффициентом преломления, близким коэффициенту преломления эпоксидного олигомера УП-612

$n = 1.501$ . В данном примере взято стекло с содержанием ингредиентов (в мол. %):  $\text{SiO}_2$  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  $\text{SiO}_2$ ; 20.4  $\text{Li}_2\text{O}$  и 79.6  $\text{SiO}_2$ . Коэффициент преломления подобранного стекла  $n = 1.502$ . Мелкодисперсный порошок получают путем дробления в ступке, последующего размалывания в шаровой мельнице и просеивания через сито с размером ячейки 10 мкм. Удельная поверхность полученного таким образом стекла 100—200  $\text{см}^2/\text{см}^3$ . Далее проводится химическая активация выбранной поверхности стекла реакционноспособной группой  $-\text{COOH}$ . Для этого стекло вакуумируют при давлении 0.1 бар и температуре 200 °С в течение 3 ч. Затем через него пропускают поток азота с парами щавелевой кислоты при температуре 180 °С в течение 6—8 ч. После чего порошок стекла охлаждают до 160 °С и пропускают через него чистый азот в течение 2—3 ч для удаления физически адсорбированной кислоты. Для отверждения активированного красителем родамином 6Ж эпоксиолигомера марки УП-612 берут 91.9 мас. ч. подготовленного стекла, смешивают с олигомером и размещают внутри полой трубки в вязко-текучем состоянии. Смесь вакуумируют, нагревают до 160 °С и проводят отверждение при этой температуре в течение 5 ч. Таким образом формируют сердцевину волокна, которая представляет собой терморезистивное высокомолекулярное соединение, образующее статистическую пространственную сетку, в которой квазирегулярно размещены молекулы красителей. Внутренний диаметр трубки (заготовки), в которой формируется сердцевина волокна, может иметь традиционные размеры 50, 62.5, 120 и 980 мкм при оболочке диаметрами 490 и 1000 мкм. Показатель преломления сердцевины можно сделать больше показателя преломления оболочки, изменяя количество и состав оксидов мелкодисперсного стекла (отвердителя). В предлагаемом активном волокне резонатор выполнен в виде волоконных брэгговских решеток, в качестве источника накачки использован полупроводниковый лазер с диодной накачкой с  $\lambda = 532$  нм. Излучение накачки осуществляется через волновод из кварцевого стекла, внешняя оболочка выполнена из ПММА с наименьшим показателем преломления. Стимулированное излучение волоконного лазера имеет  $\lambda = 585$  нм (желтый спектральный диапазон). Схема волоконного твердотельного лазера на красителях приведена на рис. 1. Новизна предлагаемого технологического решения заключается в том, что волновод накачки выполнен как одна деталь, содержащая собственно волновод и преформу из кварцевого стекла в виде полой трубки, внутри которой формируется сердцевина волокна, обладающая высокими адгезионными свойствами.

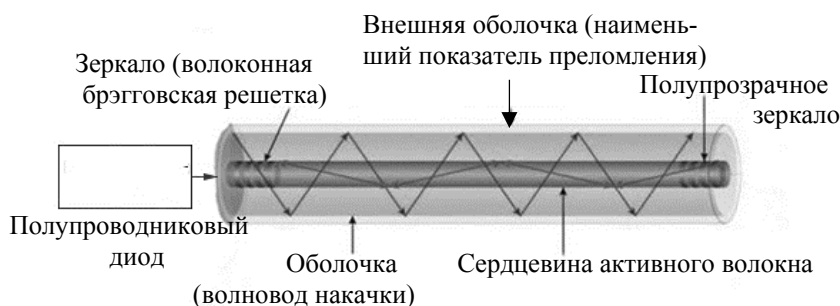


Рис. 1. Схема волоконного твердотельного лазера на красителях

**П р и м е р 2.** Для формирования сердцевины оптического волокна, содержащей 0.05 г родамина С и 19.75 г эпоксидного олигомера марки ЭД-24, берут навеску концентрата ( $C = 3.75 \cdot 10^{-2}$  г кр./ г олиг.) 1.44 г и добавляют неокрашенный олигомер ЭД-24 в количестве 18.36 г. Затем вводят мелкодисперсное стекло, содержащее компоненты  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$ , поверхность которого активирована группами  $-\text{ONTiCl}_4$ . Порошок стекла вакуумируют при температуре 200 °С в течение 3 ч, затем обрабатывают хлористым титаном в потоке азота при температуре 180 °С и атмосферном давлении в течение 8 ч. После этого убирают избыток сорбированного хлористого титана пропусканием чистого азота в течение 2—3 ч при температуре 80 °С. После ввода стекла смесь тщательно перемешивают, вакуумируют и отверждают при температуре 100 °С в течение 8 ч.

**П р и м е р 3.** Для формирования сердцевины оптического волокна, содержащей 0.1 г кумарина 120 и 8 г эпоксидного олигомера марки УП-612, берут навеску концентрата 2.7 г, содержащую компоненты  $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO--Na}_2\text{O--K}_2\text{O--As}_2\text{O}_3$ , и добавляют эпоксидный олигомер в количестве 5.5 г. Затем добавляют мелкодисперсное стекло, поверхность которого активируют группами  $-\text{NH}_2$  следу-

ющим образом: порошок стекла вакуумируют при температуре 450 °С и давлении 0.1 бар в течение 3 ч, затем обрабатывают газообразным аммиаком при температуре 450 °С и атмосферном давлении в течение 8 ч. После этого снимают физически сорбированный на поверхности аммиак пропусканьем чистого азота при температуре 100 °С в течение 2—3 ч. Композицию интенсивно перемешивают, вакуумируют и отверждают при температуре 100 °С в течение 8 ч.

**Результаты и их обсуждение.** В табл. 1 приведены основные спектральные оптические и генерационные характеристики сердцевин активного волокна на основе реактопластов, активированных красителями и полимеризованных мелкодисперсными стеклянными порошками. Для сравнения приведены характеристики термопласта (ПММА с родамином 6Ж). Генерационные характеристики измерены с использованием физической модели сердцевин, представляющей собой плоскопараллельную пластину размерами 3×10×25 мм, с длиной резонатора 75 мм, образованного глухим зеркалом и клиновидной подложкой. Предлагаемая сердцевина может иметь различную степень усиления в зависимости от степени активации сердцевин красителями, а также от длины волокна. Вместе с тем полученные результаты относятся не столько к волоконным лазерам, сколько (в большей степени) к инновационной технологии синтеза сердцевин принципиально нового твердотельного волоконного лазера на красителях, обладающей множеством преимуществ.

В табл. 2 представлены примеры формирования активных сред с различным содержанием ингредиентов и коэффициентами преломления отвержденных эпоксиполимеров, равными коэффициентам преломления мелкодисперсного стекла.

Сердцевина активного волокна, содержащая реактопласты, активированные молекулами органических красителей, и полимеризованная мелкодисперсными стеклянными порошками, активированными реакционноспособными группами, открывает новые возможности для создания твердотельных волоконных лазеров на красителях в видимом спектральном диапазоне. Волоконный лазер на красителях представляет собой квазичетырехуровневую систему, у которой фотон накачки возбуждает переход из основного состояния  $S_0$  в возбужденное  $S_1$ , 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 с трехмерной структурой не способна плавиться, растворяться, имеет низкий коэффициент диффузии ( $10^{-10}$  см<sup>2</sup>/с) и обладает высокими адгезионными свойствами, что принципиально важно при формировании бездефектной границы раздела между сердцевиной и волноводом накачки. Важный результат исследований — возможность управления показателем преломления реактопласта и показателем преломления мелкодисперсного порошка, активированного реакционноспособными группами, с учетом солевой формы красителя. Сердцевина предложенного состава обладает взаимной химической индифферентностью и характеризуется высокими теплопроводностью 0.51—0.75 Вт·К<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> и лучевой прочностью. Излучение имеет высокое оптическое качество, так как вынужденное излучение

**Т а б л и ц а 1. Основные оптические и генерационные характеристики сердцевин активного волокна на основе реактопластов, активированных красителями и полимеризованных мелкодисперсными стеклянными порошками**

Состав твердотельной сердцевин	$\lambda_{\text{погл}}$ , нм	$\Delta\lambda_{\text{погл}}$ , нм	$\lambda_{\text{люм}}$ , нм	$\Delta\lambda_{\text{люм}}$ , нм	$\lambda_{\text{ген}}$ , нм	$\Delta\lambda_{\text{ген}}$ , нм	$n$	$dn/dt$ , К <sup>-1</sup>	$\Delta\lambda_t$ , Вт·К <sup>-1</sup> ·м <sup>-1</sup>
Р6Ж+циклоалифатическая смола тип УП-612	534	37	564	48	585	14	1,52	(6—8)·10 <sup>-5</sup>	0.76
РС+эпоксидиановая смола ЭД-24	550	35	583	42	610	13	1.55	(6—8)·10 <sup>-5</sup>	0.73
Р6Ж+ПММА	532	42	553	46	560	15	1.488	(8.5—9)·10 <sup>-5</sup>	0.184

**П р и м е ч а н и е.**  $\lambda_{\text{погл}}$ ,  $\lambda_{\text{люм}}$ ,  $\lambda_{\text{ген}}$  — максимумы полосы поглощения, люминесценции и генерации соответственно;  $\Delta\lambda_{\text{погл}}$ ,  $\Delta\lambda_{\text{люм}}$ ,  $\Delta\lambda_{\text{ген}}$  — полуширины спектра поглощения, люминесценции и генерации соответственно;  $n$  — коэффициент преломления;  $dn/dt$  — температурный коэффициент показателя преломления;  $\Delta\lambda_t$  — коэффициент теплопроводности.

**Т а б л и ц а 2. Активные среды с различным содержанием ингредиентов и коэффициентами преломления отвержденных эпоксиполимеров**

Органический краситель		Эпоксидный олигомер		Стекло с химически активной поверхностью		Коэффициент преломления эпоксиполимера
Тип	Содержание, мас. ч.	Тип	Содержание, мас. ч.	Тип активатора	Содержание, мас. ч.	$n_D$
Родамин 6Ж	0.1	ВП-612	8.0	-COOH	91.9	1.510—1.519
Родамин 6Ж	0.05375	ВП-612	19.75	-COOH	80.19625	
Родамин 6Ж	0.0075	ВП-612	31.5	-COOH	68.4925	
Родамин 110	0.1	ЭД-24	8.0	-COOH	91.90	1.586—1.591
Родамин 110	0.05	ЭД-24	19.75	-COOH	80.20	
Родамин 110	0.0075	ЭД-24	31.5	-COOH	68.4925	
Родамин С	0.1	ЭД-24	8.0	-ОНTiCl <sub>4</sub>	91.90	
Родамин С	0.05	ЭД-24	19.75	-ОНTiCl <sub>4</sub>	80.20	
Родамин С	0.0075	ЭД-24	31.5	-ОНTiCl <sub>4</sub>	68.4925	
Кумарин 120	0.1	ВП-612	8.0	-NH <sub>2</sub>	91.90	1.510—1.519
Кумарин 120	0.05	ВП-612	19.75	-NH <sub>2</sub>	80.20	
Кумарин 120	0.0075	ВП-612	31.5	-NH <sub>2</sub>	68.4925	

происходит прямо в сердцевине. Суммарный КПД накачки полупроводниковым лазером достигает 25—35 % [13]. Волоконный твердотельный лазер на красителях может иметь большой диаметр сердцевины и объем активной среды, что позволит достигать в излучении значительных энергии и мощности. Активное волокно и оптический резонатор, построенный по технологии брэгговских решеток, могут иметь длину несколько метров. Волоконный лазер на красителях эффективно работает в схеме волоконный генератор—волоконный усилитель. Существует возможность использования нескольких волоконных лазеров с последующим суммированием их излучения известным образом.

**Заключение.** Предлагаемые твердотельные волоконные лазеры на красителях могут эффективно использоваться в различных спектральных лазерных приборах, волоконных лазерах с распределенной обратной связью и лазерных СВИП-генераторах, в системах оптической лазерной воздушной и космической связи, а также при решении некоторых проблем в астрономии, например при формировании искусственных лазерных опорных звезд в мезосфере [14] с использованием волоконного лазера на родамине 6Ж, излучение которого близко к резонансному поглощению атмосферного натрия. При решении такой задачи перестройка дисперсионного элемента резонатора лазера, сформированного по технологии брэгговских решеток, позволяет точно настроить длину волны излучения желтого лазера с несущей частотой 585 нм (при полуширине спектра излучения лазера, равной 14 нм) на резонансное возбуждение атомов натрия 589.6 нм, что обуславливает возможность применения предлагаемого лазера при создании адаптивных систем астрономических телескопов с коррекцией атмосферных искажений по искусственной натриевой звезде.

[1] А. С. Курков, Е. М. Дианов. Журн. квант. электрон., **34**, № 2 (2004) 881—900

[2] Технология производства оптоволокна; [https://pikabu.ru/story/tekhologiya\\_proizvodstva\\_optovolokna\\_6303882](https://pikabu.ru/story/tekhologiya_proizvodstva_optovolokna_6303882) (дата обр.: 20.05.2021)

[3] С. В. Плетнев, А. И. Потапов, А. П. Марков. Волоконно-оптические методы и средства дефектоскопии: науч.-метод. и справоч. пособие, СПб, ЛИТА (2001) 22—35

[4] Ю. Т. Ларин, В. А. Нестерко. Полимерные оптические волокна, <https://hyperline.ru/learn/teoriya-i-praktika-montazha-kabelnykh-sistem/polimernye-opticheskie-volokna/> (дата обр.: 20.05.2021)

[5] Ю. В. Костенич, А. Н. Рубинов, М. К. Пактер, Ю. М. Парамонов, В. Е. Поляков, Т. Ш. Эфендиев. Перестраиваемый лазер с распределенной обратной связью на основе эпоксидной смолы, активированной красителем, кн. 4, Всесоюз. конф. “Перестраиваемые по частоте лазеры”, Новосибирск (1983) 296—297

[6] Каталог активных сред на основе растворов органических красителей и родственных соединений, под ред. акад. Б. И. Степанова, Минск, ИФ АН БССР (1977) 237

- [7] **Б. А. Константинов, А. Г. Климашин, В. Е. Мнускин.** Тез. докл. X Сиб. совещ. по спектроскопии, 16—18 сентября 1981 г., Томск, изд-во Томского ун-та (1981) 24
- [8] **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. прикл. спектр., **50**, № 2 (1989) 210—216 [A. V. Bortkevich, S. A. Geidur, O. O. Karapetyan, A. R. Kuznetsov, S. M. Lan'kova, A. G. Morozov, V. E. Polyakov, V. P. Sidiyakova. J. Appl. Spectr., **50** (1989) 146—150]
- [9] **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, а. с. № 197764 (1984)
- [10] **Т. М. Брык, Н. Н. Баглей, Е. П. Смирнов, С. К. Гордеев, А. Ф. Бурбан, В. Б. Алесковский.** Докл. АН СССР, **272**, № 6 (1983) 1399—1402
- [11] **В. Е. Поляков, В. Ю. Шосталь, А. А. Закутаев, В. В. Ширококов.** Активная среда для волоконных лазеров и способ ее изготовления, патент РФ № 2715085, бюл. № 6 (2020)
- [12] **T. S. Efendiev, Y. V. Kostenich, A. N. Rubinov, G. V. Altshuler, E. G. Dulneva, I. K. Meshkovscii.** Appl. Phys. B, **33** (1984) 167—169
- [13] Иттербиевый волоконный лазер: устройство, принцип работы, мощность, производство, применение, <https://fb.ru/article/246675/itterbievyiy-volokonnyiy-lazer-ustroystvo-printsip-raboty-i-moschnost-proizvodstvo-primenenie> (дата обр.: 20.05.2021)
- [14] Лазерные опорные звезды, <https://astronet.ru/db/msg/1205112/part4/lgs.html> (дата обр.: 20.05.2021)