Твердотельный органический лазер с диапазоном перестройки длины волны излучения 78 нм

Е.Н.Тельминов, А.Х.Якуб, Т.А.Солодова, Е.Н.Никонова, Т.Н.Копылова

Приведены результаты исследований генерационных характеристик органического твердотельного перестраиваемого лазера с матрицей из полиметилметакрилата, допированой красителями Хромен 3, Пирроментен 567 и Пирроментен 597. Отмечены особенности генерации при использовании селективного и неселективного резонаторов. Получена перестройка длины волны генерации со спектральной шириной линии 0.018 нм в интервале 550 – 628 нм на трех полимерных лазерно-активных средах, излучающих в желтой и красной областях спектра.

Ключевые слова: *лазеры на красителях, органический твердотельный лазер, твердотельные лазерно-активные среды, перестройка длины волны излучения.*

1. Введение

Перестраиваемые органические лазеры на красителях нашли широкое применение в науке и технике благодаря уникальным параметрам выходного излучения: высокой импульсной мощности, широкому диапазону перестройки длины волны и узкой линии генерации. К основным преимуществам перестраиваемых лазеров на красителях относятся относительная простота конструкции и большое разнообразие органических лазерно-активных сред (ЛАС), а также возможность направленного изменения структуры и свойств для конкретных условий накачки. Кроме того, технологические условия создания ЛАС на основе красителей существенно проще и дешевле, чем для создания нелинейных сред, используемых в параметрических генераторах света, которые являются прямыми конкурентами лазеров на красителях. Однако применение перестраиваемых лазеров на красителях ограничено их главным недостатком – ЛАС представляет собой жидкий раствор. Созданные в последнее время твердотельные органические среды на основе красителей, способны преобразовывать излучение накачки с высокими энергией и мощностью в когерентное излучение и имеют эффективность и ресурс работы, не уступающие их жидкостным аналогам, что стимулирует развитие работ в данном направлении [1, 2].

Для реализации конкретного варианта твердотельного перестраиваемого лазера нужно обеспечить согласование параметров ЛАС, которые в основном определяют характеристики прибора, с выбором схемы накачки и схемы селективного резонатора. При разработке эффективных органических ЛАС необходимо решить ряд задач: выбрать краситель и полимер, которые должны хорошо совмещаться друг с другом и быть коммерчески доступными; обеспечить совпадение полос поглощения активных сред с длиной волны излучения накачки; подобрать соединения с низким уровнем наведенного поглощения.

В настоящее время среди твердотельных сред наибольшее распространение получили ЛАС с использованием полиметилметакрилата (ПММА), допированого различными красителями. Несмотря на то что имеется достаточно много работ, посвященных твердотельным ЛАС, конкретно реализованных конструкций твердотельных перестраиваемых лазеров на красителях практически не представлено. В наших предыдущих исследованиях была показана перспективность применения твердотельных ЛАС на основе известных красителей: Пирроментена 567 (PM567), Пирроментена 597 (PM597), Хромена 3 (Ch3) в ПММА [3, 4]. В случае неселективного резонатора достигнуты высокие КПД преобразования (более 80%) и высокий ресурс работы (более 10^5 импульсов генерации при накачке в одну область твердотельного лазерного оптического элемента). Кроме того, при создании перестраиваемого лазера на красителях немаловажное значение имеет выбор схемы накачки ЛАС. Широко распространены три схемы накачки: продольная, квазипродольная и поперечная [5, 6]. Последняя позволяет накачивать значительные объемы ЛАС, что важно для достижения высоких энергий и мощностей излучения.

Цель настоящей работы заключалась в реализации варианта перестраиваемого твердотельного органического лазера на основе созданных эффективных твердотельных ЛАС и в исследовании особенностей генерационных характеристик лазера при изменении параметров селективного резонатора.

2. Экспериментальная установка

Важным фактором, определяющим рабочие характеристики перестраиваемого лазера, является выбор эффективной схемы селективного резонатора. Из многочисленных вариантов дисперсионных резонаторов с дифракционными решетками (ДР) наиболее привлекателен вариант со

Е.Н.Тельминов, А.Х.Якуб, Т.А.Солодова, Е.Н.Никонова, Т.Н.Копылова. Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; e-mail: telminov@ngs.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2021 г., после доработки – 20 октября 2021 г.

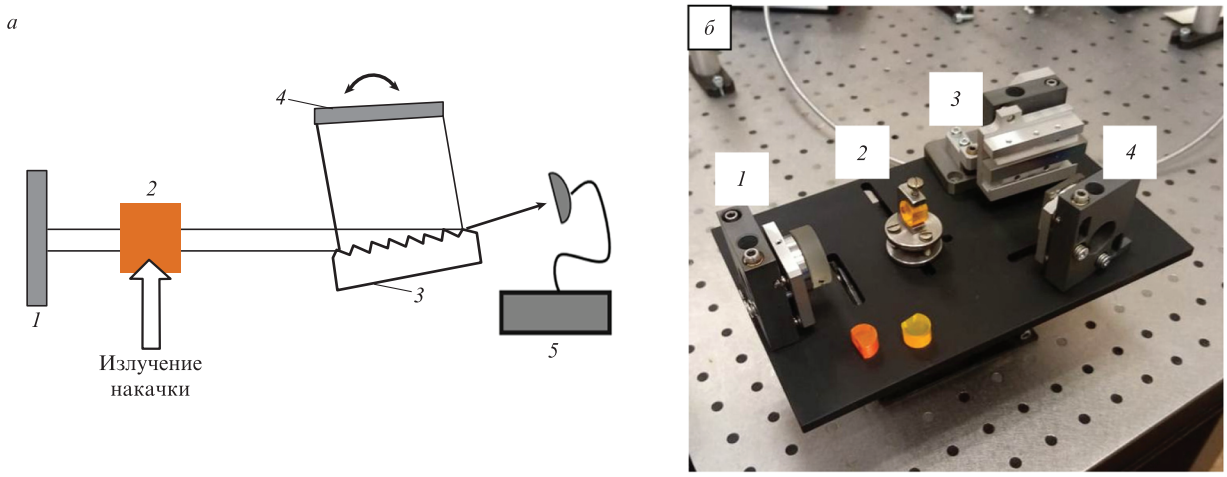

Рис.1. Схема перестраиваемого твердотельного лазера на красителях (*а*) и фотография макета (*б*):
1 – глухое зеркало; *2* – ЛАС; *3* – ДР; *4* – поворотное перестроечное зеркало (или ДР в автоколлимационном режиме); *5* – спектрометр; накачка осуществлялась YAG : Nd^{3+}-лазером (LQ-529B).

скользящим падением излучения на ДР (угол падения 86° – 89°) [7, 8]. При такой конфигурации резонатора дисперсия ДР увеличивается по сравнению с дисперсией в автоколлимационном режиме. С увеличением угла падения свыше 89° происходит экранирование соседних штрихов решетки предыдущими и эффективность решетки резко снижается. Полоса пропускания резонатора при работе решетки в скользящем режиме будет определяться выражением

$$\delta\lambda_{\rm res} \approx \frac{\lambda^2 \cos\beta}{w_0 X(1+\sin\beta)},$$

где β – угол дифракции; w_0 – радиус перетяжки гауссова пучка; X – телескопичность ДР; λ – длина волны излучения [9]. При этом ДР совмещает функции дисперсионного элемента и одномерного телескопа, что в значительной степени уменьшает длину резонатора и повышает КПД преобразования. Для управления перестройкой длины волны генерации используется дополнительное поворотное зеркало. Выходным излучением является пучок, отраженный от ДР в нулевом порядке. Дисперсия резонатора в данном случае определяется выражением

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial\lambda}\right)_{\lambda_0} \approx \frac{2}{\lambda_0(\pi/2-\psi)},$$

где ψ – угол падения излучения на ДР, и в диапазоне спектра 550 – 600 нм может составлять $\sim$0.2 нм$^{-1}$. При этом ширина линии излучения достигает $\sim$0.002 нм [10]. В литературе такая схема известна как схема Литтмана.

Совместное использование описанной выше схемы резонатора и поперечной схемы накачки значительно упрощает и удешевляет конструкцию лазера, т. к. отпадает необходимость в дихроичном зеркале, которое применяется в продольной схеме накачки. Его назначение, как известно, беспрепятственно пропускать излучение накачки и быть широкополосным со 100%-ным отражением на длине волны генерации во всей полосе перестройки. В квазипродольной схеме дихроичное зеркало отсутствует, но малая длина селективного резонатора затрудняет применение такого варианта. В поперечной схеме достаточно использовать дешевое широкополосное глухое алюминиевое зеркало.

Выбранный вариант схемы перестраиваемого твердотельного лазера на красителях и фотография его макета представлены на рис.1. Резонатор перестраиваемого лазера состоял из ДР (1200 штрих./мм), нормаль к которой составляла угол 86° – 89° с осью падающего пучка, и двух глухих алюминиевых зеркал обратной связи, одно из них являлось перестроечным, установленным в первом порядке дифракции решетки скользящего падения. Вывод излучения осуществлялся из нулевого порядка дифракции решетки. В ряде экспериментов поворотное перестроечное зеркало заменялось ДР (1200 штрих./мм) обратной связи, работающей в автоколлимационном режиме. Конструкция лазера позволяла изменять длину резонатора примерно на 50% путем увеличения расстояния между поворотным перестроечным зеркалом и ДР скользящего падения.

Для измерения энергетических характеристик твердотельных ЛАС использовались измерители энергии Ophir Nova II и Gentec. Спектры регистрировались оптоволоконным спектрометром AvaSpec-ULS2048. Профиль интенсивности выходного излучения лазера измерялся с помощью профилометра Spiricon L11059M.

3. Результаты и их обсуждение

Твердотельные ЛАС были синтезированы по методике, описанной в работе [11]. Отметим, что соединение Ch3 в промышленности известно под названием Solvent red 197 и широко применяется в качестве красителя для различных полимерных материалов, а PM567 и PM597 известны как эффективные лазерные красители. Структурные формулы соединений ЛАС и фотография твердотельных активных элементов представлены на рис.2.

Лазерные элементы изготавливались в виде усеченного по боковой поверхности цилиндра диаметром 10 мм и длиной 10 мм с толщиной образца в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, 7 мм. Затем проводилась ручная полировка торцов элемента и плоской грани. После изготовления все лазерные элементы исследовались на генерационную эффективность в случае неселективного резонатора. Схема установки приведена на рис.3.

Накачка образцов ЛАС осуществлялась второй гармоникой излучения неодимового лазера с длиной волны

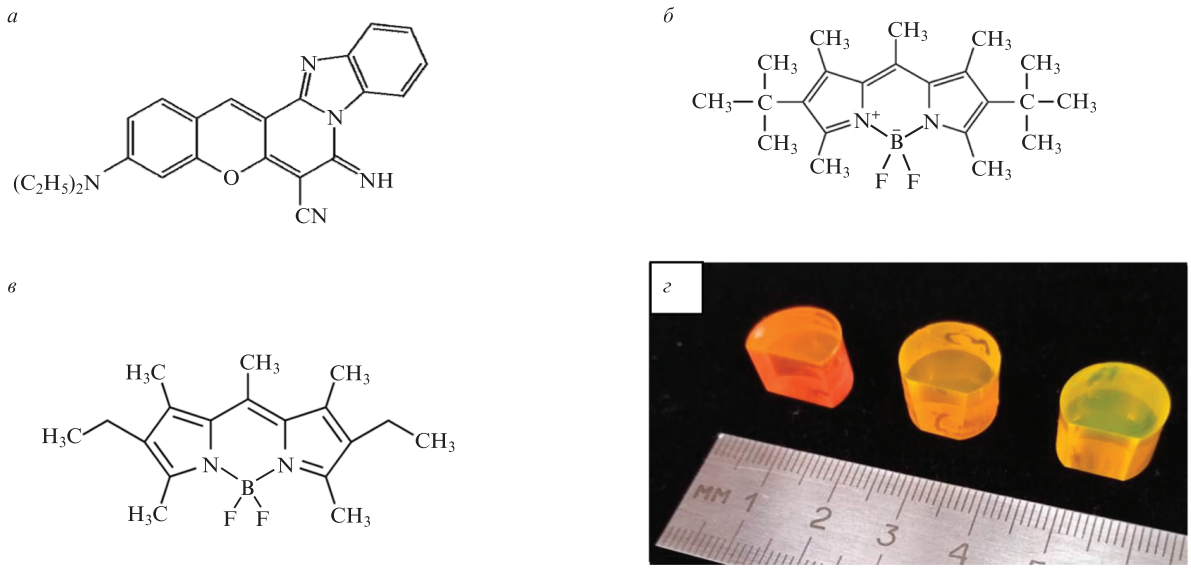

Рис.2. Структурные формулы соединений ЛАС: 3-диэтиламино-7-имино-7Н-хромен[3′,2′-3,4] пиридо[1,2-а]-бензимидазол-6-карбонитрил (Ch3) (*а*), 1,3,5,7,8-пентаметил-2,6-ди-третбутилпиррометен-дифторборатный комплекс (PM597) (*б*) и 1,3,5,7,8-пентаметил-2,6-диэтил пиррометен-дифторборатный комплекс (PM567) (*в*), а также фотография активных элементов (*г*).

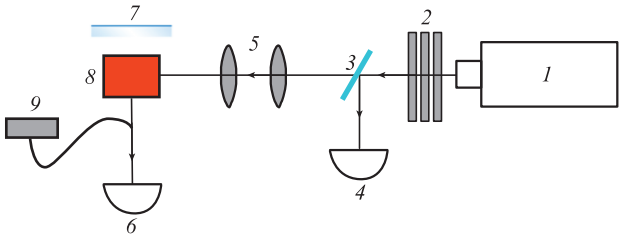

Рис.3. Схема установки для измерения спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик ЛАС:
1 – YAG:Nd^{3+}-лазер (LQ-529B); *2* – система нейтральных светофильтров; 3 – светоделительная пластина; *4* – измеритель энергии Gentec; *5* – система скрещенных цилиндрических линз; *6* – измеритель энергии Ophir Nova II; *7* – глухое зеркало; *8* – ЛАС; *9* – спектрометр Avantes.

532 нм импульсами с энергией до 30 мДж и длительностью 12 нс в поперечной схеме возбуждения. Геометрия пучка накачки в поперечном сечении, представляющем собой прямоугольник размером 10 × 0.5 мм, формировалась двумя скрещенными цилиндрическими линзами. Резонатор был образован наружной торцевой гранью лазерного элемента и плоским алюминиевым зеркалом со 100%-ным отражением. Основные спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики лазерных элементов, полученные с использованием неселективного резонатора, приведены в табл.1. Для изменения интенсивности излучения накачки применялась система нейтральных светофильтров. В ранее выполненных нами работах было показано, что в случае поперечной схемы возбуждения оптимальной с точки зрения ресурса и эффективности преобразования является интенсивность накачки 9–11 МВт/см^2 в зависимости от используемого красителя.

В табл.1 представлены генерационные характеристики изготовленных образцов с двумя концентрациями красителей (10^{-3} и 5×10^{-4} М). Несмотря на то что эффективность образцов с концентрацией красителя 10^{-3} М выше, чем у образцов с концентрацией 5×10^{-4} М, в предлагаемом варианте лазера использовались об-

Табл.1. Спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики лазерных элементов при интенсивности излучения накачки 9 МВт/см^2 и числе импульсов свыше 10^5.

ЛАС	Концентрация красителей (М)	КПД (%)	λ_{gen} (нм)	$\Delta\lambda_{lum}$ (нм)
Ch3 в ПММА	5×10^{-4}	49	605	52
Ch3 в ПММА	10^{-3}	53	606	52
PM567 в ПММА	5×10^{-4}	60	563	60
PM567 в ПММА	10^{-3}	67	563	60
PM597 в ПММА	5×10^{-4}	23	566	26
PM597 в ПММА	10^{-3}	27	566	26

разцы с меньшей концентрацией красителя. Оказалось, что при установке образцов с концентрацией красителя 10^{-3} М в селективный резонатор полоса перестройки значительно сужается по сравнению с таковой для образцов с концентрацией красителя 5×10^{-4} М. Данный эффект обусловлен появлением паразитного усиленного спонтанного излучения в максимуме полосы люминесценции ЛАС при перестройке длины волны линии генерации на 5–8 нм от длины волны максимума. При этом реализуется режим двухполосной генерации, а при дальнейшей перестройке происходит срыв генерации на перестраиваемой линии.

Для твердотельного образца на основе PM567 исследованы влияние изменения в пределах 86°–88° угла падения излучения на ДР, работающую в скользящем режиме, на ширину линии генерации и влияние длины резонатора на КПД преобразования при заданной полуширине линии генерации. В качестве перестроечного зеркала использовалось алюминиевое зеркало со 100%-ным отражением или ДР (1200 штрих./мм), работающая в автоколлимационном режиме. Полуширины линии генерации и КПД преобразования представлены на рис.4,*а*. В резуль-

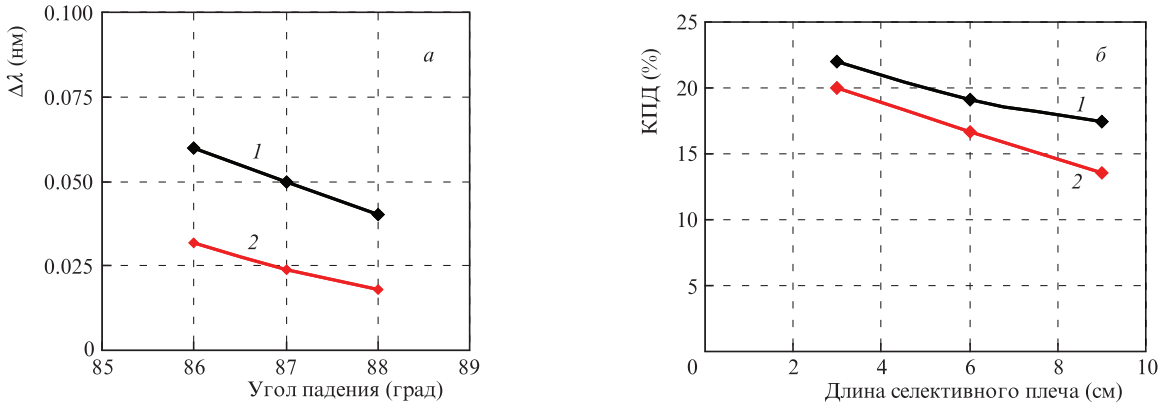

Рис.4. Зависимости полуширины линии генерации от угла падения на ДР (*а*), а также КПД лазера с селективным резонатором от расстояния между перестроечным зеркалом и ДР скользящего падения (длина селективного плеча) (*б*) при использовании в качестве перестроечного зеркала алюминиевого зеркала (*1*) и ДР (*2*).

тате замены алюминиевого зеркала со 100%-ным отражением автоколлимационной решеткой удалось получить в два раза более узкую линию генерации (меньше 0.02 нм) при угле падения 88°, КПД преобразования в этом случае составляет 20%.

При увеличении общей длины резонатора на 46% (от 11 до 19 см) КПД преобразования уменьшается на 6% при достигнутом максимальном значении 20% в случае короткого резонатора. При замене зеркала решеткой общий КПД генератора снижается незначительно (на 2%).

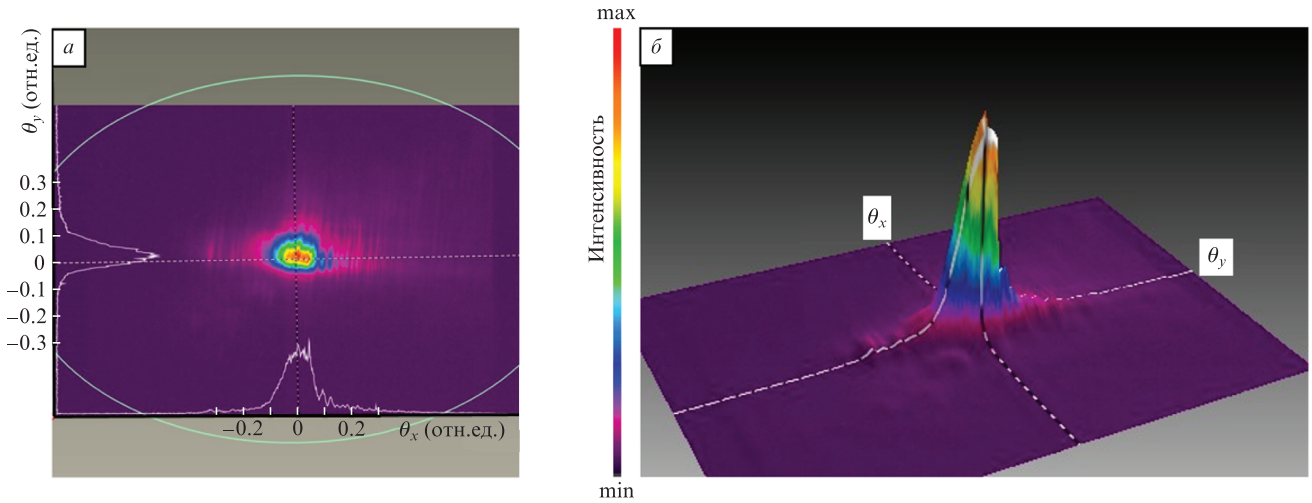

Рис.5. Распределение интенсивности излучения твердотельной ЛАС на основе PM567 в дальней зоне (*а*) и трехмерный вид этого распределения (*б*). Энергия импульса излучения 5 мДж, длина волны 560 нм, ширина линии 0.018 нм. Излучение накачки лазера распространяется параллельно оси абсцисс. Распределение получено с помощью профилометра Spiricon L11059M. Зеленый овал на рис.5,*а* – граница области регистрации профилометра.

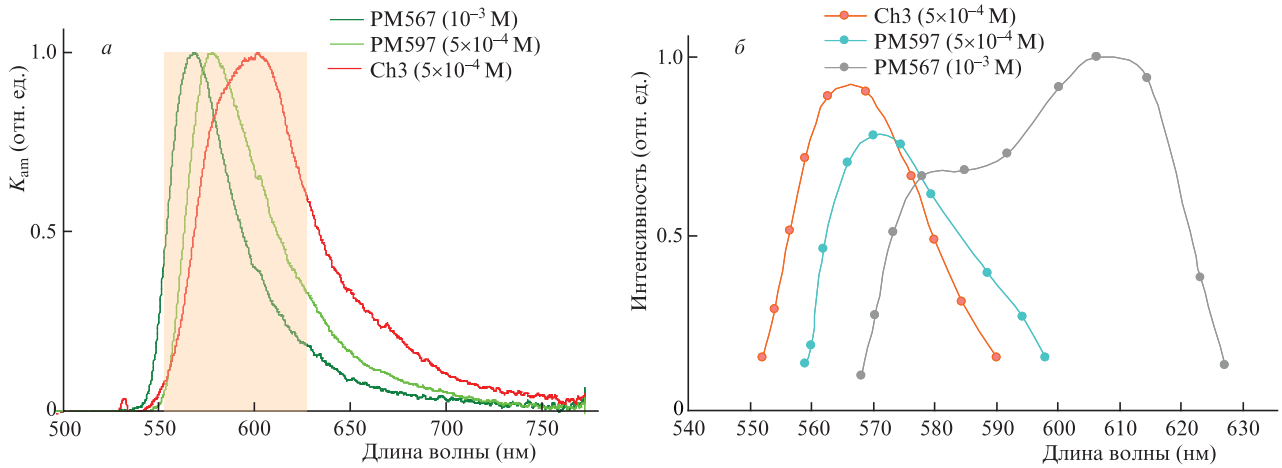

Рис.6. Нормированные контуры усиления твердотельных ЛАС на основе красителей Ch3, PM567 и PM597 (*а*), а также перестроечные характеристики этих ЛАС (*б*).

Для примера на рис.5 приведено типичное распределение интенсивности излучения ЛАС на основе PM567, которое довольно симметрично относительно центра пятна и близко к гауссову.

На рис.6,*а* представлены нормированные контуры усиления исследованных ЛАС. Заштрихованная часть показывает суммарную область перестройки длины волны генерации. На рис.6,*б* показаны перестроечные характеристики ЛАС в селективном резонаторе. Максимальный диапазон перестройки достигнут для Ch3 и составляет 52 нм. Отличие формы кривой перестройки от кривой усиления объясняется тем, что спектр спонтанного излучения Ch3 состоит из трех полос, причем максимальную интенсивность имеет средняя полоса. Красители PM567 и PM597 позволяют расширить диапазон перестройки в сторону коротких длин волн. Для обоих красителей он равен 25 нм.

4. Заключение

В настоящей работе приведены результаты исследований генерационных характеристик органического твердотельного перестраиваемого лазера на основе ПММА, допированного красителями Ch3, PM597 и PM567, при накачке второй гармоникой излучения YAG:Nd^{3+}-лазера (532 нм). Отмечены особенности генерации при использовании неселективного и селективного резонаторов. Исследованы влияние угла падения излучения на ДР, работающую в режиме скользящего падения, на ширину линии генерации, а также влияние длины резонатора на КПД преобразования при заданной полуширине линии генерации. Установлено, что замена алюминиевого зеркала со 100%-ным отражением автоколлимационной ДР позволяет получить в два раза более узкую линию генерации (меньше 0.02 нм) при угле падения 88°. КПД преобразования в данном случае составляет 20%. Для трех органических ЛАС в желтой и красной областях спектра ширина линии генерации равна 0.018 нм, а суммарный диапазон перестройки составляет 78 нм. Полученные результаты показали, что синтезированные твердотельные органические среды перспективны для создания твердотельных перестраиваемых лазеров на красителях с использованием схемы скользящего падения. При этом реализуется простая и технологичная конструкция перестраиваемого лазера с характеристиками излучения, не уступающими его жидкостным аналогам.

1. Costela A. et al. *Laser Chem.*, **18**, 63 (1998).
2. Копылова Т.Н., Ануфрик С.С., Майер Г.В., Солодова Т.А., Тельминов Е.Н., Дегтяренко К.М., Самсонова Л.Г., Гадиров Р.М., Никонов С.Ю., Понявина Е.Н., Тарковский В.В., Сазонко Г.Г. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **55** (10), 32 (2012).
3. Valiev R.R., Telminov E.N., Solodova T.A., Ponyavina E.N., Gadirov R.M., Mayer G.V., Kopylova T.N. *Chem. Phys. Lett.*, **588**, 184 (2013).
4. Minaev B.F., Valiev R.R., Nikonova E.N., Gadirov R.M., Solodova T.A., Kopylova T.N., Tel'minov E.N. *J. Phys. Chem. A*, **119** (10), 1948 (2015).
5. *Элементная база оптико-электронных приборов.* Под общей ред. В.Е.Зуева, М.В.Кабанова (Томск: МП «РАСКО», 1992).
6. Bornemann R., Thiel E., Bolívar P.H. *Opt. Express*, **19** (27), 26382 (2011).
7. Копылова Т.Н. и др. *Квантовая электроника*, **20** (7), 657 (1993) [*Quantum Electron.*, **20** (7), 657 (1993)].
8. Baraulya V.I., Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Sorokin V.B. *Proc. SPIE*, **4071**, 219 (2000).
9. Анохов С.П., Марусий Т.Я., Соскин М.С. *Перестраиваемые лазеры*. Под ред. М.С.Соскина (М.: Радио и связь, 1982).
10. Копылов С.М., Лысой Б.Г., Серегин С.Л., Чередниченко О.Б. *Перестраиваемые лазеры на красителях и их применения* (М.: Радио и связь, 1991).
11. Аймуханов А.К. и др. *Оптика атмосферы и океана*, **26** (10), 871 (2013).