

*М.И. ДЗЮБЕНКО, д-р физ.-мат. наук, С.В. НИКОЛАЕВ, канд. физ.-мат. наук,
В.В. ПОЖАР, К.С. НИКОЛАЕВ*

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЯХ С ДИСПЕРСИОННЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Введение

Принципиальная возможность сужения и перестройки спектра генерации является одним из наибольших преимуществ лазеров на красителях (ЛК). К настоящему времени основные физические принципы управления спектром генерации лазеров на красителях хорошо изучены, а также определены наиболее пригодные схемы селективных резонаторов с использованием дисперсионных элементов разного типа [1 – 3]. Поэтому работа в этом направлении уже давно перешла в практическую плоскость и связана, в большинстве случаев, с последующим усовершенствованием и промышленным воплощением ЛК с перестраиваемым спектром. Однако это касается, преимущественно, лазеров на традиционных жидких растворах красителей. Для твердотельных лазеров на красителях, активная среда которых по своим оптическим, теплофизическими и фотохимическими качествами отличается от жидкого раствора, исследование особенностей формирования генерационных характеристик в дисперсионных резонаторах разного типа остается актуальным.

Цель работы – исследования возможностей использования внутрирезонаторных дисперсионных элементов с разным типом селекции для сужения и перестройки спектра генерации твердотельных лазеров на красителях (ТЛК) на основе новых полиуретановых сред.

Методика эксперимента

Для проведения запланированных исследований активных сред на основе полиуретана был изготовлен соответствующий набор матриц разного типа и размера. В качестве твердой основы использовались испытанные раньше эластичные полиуретаны Т-809/Т-863 и Т-813/Т-863 и твердый полиуретан Crystal Clear, – 204, активированные красителями Родамин 6G, Сульфородамин 101, Оксазин 17 и Оксазин 1 [4].

Эластичные полиуретаны вводились в кварцевые цилиндрические оболочки длиной $l = 10$ мм, $l = 20$ мм и радиусом 10 мм с плоско-параллельными торцами. Из твердого полиуретана были изготовлены лазерные матрицы двух типов: с кварцевой оболочкой и безоболочечные цилиндрические матрицы разных размеров. В последнем случае использовались отливные формы из фторопласта или полиэтилена, из которых полимеризовавшиеся образцы легко вынимались. Оптическое качество торцов этих матриц достигалось путем полирования. Поскольку, кроме оптического качества, существенное влияние на эффективность генерации имеет концентрация красителя в активном элементе, то в набор были включены матрицы с разным содержанием красителей: от 10^{-4} до 10^{-3} моль/л.

В качестве углового селектора использовалась дифракционная решетка из 1200 штр./мм, установленная в автоколлимационном режиме. Перестройка полосы пропускания резонатора осуществлялась изменением угла наклона решетки относительно его оси.

Амплитудными селекторами служили интерференционно-поляризационные фильтры с пластинами разной толщины, расположенные под углом Брюстера к оси резонатора. Спектр перестраивался путем поворота пластин вокруг их оси.

Накачка полиуретановых матриц осуществлялась поперечным способом излучением жидкостных лазеров на красителях (ЖЛК) [5]. Рабочими веществами лазеров накачки служили этанольные растворы красителей Родамин незамещенный ($\lambda = 560$ нм), Родамин 6G ($\lambda = 590$ нм) и Оксазин 17 ($\lambda = 665$ нм). Родамин незамещенный использовался для накачки матриц со всеми исследованными красителями, Родамин 6G – для возбуждения Сульфородамина 101 и Оксазина 1, а Оксазин 17 – для накачки активных элементов на Оксазине 1.

Спектры генерации регистрировались при помощи спектрографа на базе камеры УФ-90 с дифракционной решеткой 1200 штр./мм. Энергии накачки и генерации ТЛК измерялись калориметрическими измерителями энергии ИМО-2Н.

Спектры генерации полиуретановых матриц в селективном резонаторе с дифракционной решеткой.

Главными преимуществами дифракционных решеток является высокая селективная способность, большая область свободной дисперсии, линейность перестроечной характеристики, простота осуществления перестройки и возможность создания компактного резонатора. Поэтому дифракционные решетки являются наиболее распространенным типом дисперсионных элементов.

В эксперименте использовался дисперсионный резонатор с решеткой, установленной в автоколлимационном режиме. Положение решетки выбиралось с учетом особенностей характеристик излучения полиуретановых матриц. Так, величина угловой расходимости излучения в плоскости дисперсии решетки влияет на селективную способность, а состояние поляризации – на дифракционную эффективность. Селективная способность выше при меньшей расходимости излучения, а дифракционная эффективность решетки больше для излучения, поляризованного ортогонально к рискам решетки. Ранее было показано, что минимальное расхождение излучения матриц наблюдается в плоскости, ортогональной оси пучка накачки [5]. Кроме того, излучение матрицы является частично поляризованным даже при возбуждении неполяризованным светом [6]. При этом электрический вектор подавляющей поляризации тоже является ортогональным к оси пучка возбуждения. Поэтому самым выгодным является такое положение решетки, при котором риски ориентированы параллельно оси возбуждающего пучка.

Эксперименты показали, что степень сужения, а также диапазон перестройки спектров генерации существенно зависел от длины и оптического качества матриц, концентрации красителя и добротности резонатора, а также состояния поляризации возбуждающего излучения.

На рис. 1 показана перестройка спектров генерации матриц на Родамине 6G ($C = 10^{-3}$ моль/л в полиуретане Т-813; $l = 10$ мм) и Оксазине 17 ($C = 1,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л в полиуретане Т-809; $l = 20$ мм), полученные при накачке неполяризованным излучением ЖЛК с постоянной энергией. Сверху приведены спектры генерации этих матриц в широкополосном резонаторе.

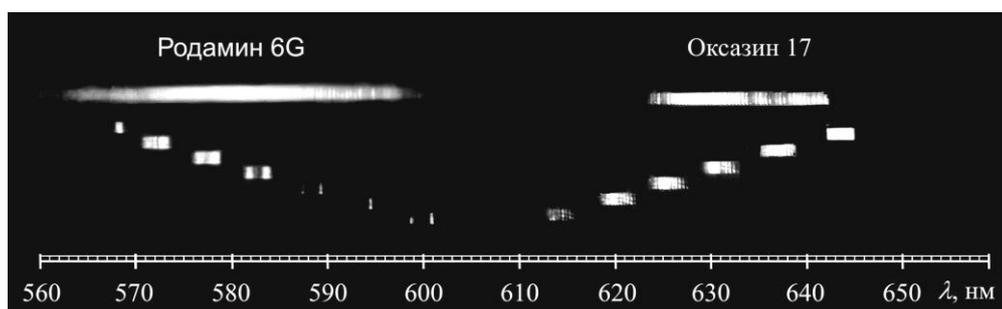


Рис. 1

Видно, что при этих условиях возникает существенное сужение спектров генерации и достигается их перестройка практически во всей полосе усиления красителей. Возможность дальнейшего сужения ограничивается большой угловой расходимостью излучения, а также значительным превышением накачкой порогового значения, особенно вблизи максимума контура усиления.

Так как угловая расходимость излучения матриц существенно зависит от концентрации красителя, то этот фактор также имеет существенное влияние на степень сужения спектра в дисперсионном резонаторе с дифракционной решеткой. Для исследования характера этого влияния была исследована перестройка спектров генерации двух матриц на Сульфородамине 101. Одна из них имела концентрацию $C = 3 \cdot 10^{-4}$ моль/л, а вторая – $C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Эти матрицы возбуждались поляризованным излучением ЖЛК на Родамине 6G. Зарегистрированные спектры показаны на рис. 2: *a* – для $C = 3 \cdot 10^{-4}$ моль/л и *б* – для $C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

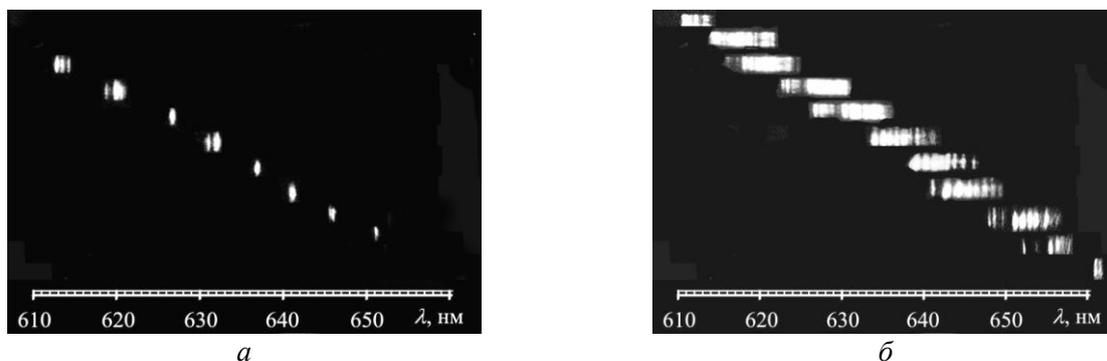


Рис. 2

Следует отметить, что матрица с концентрацией красителя $C = 3 \cdot 10^{-4}$ моль/л имела лучшее оптическое качество, что тоже уменьшало расходимость излучения. Эти результаты свидетельствуют, что при одинаковых условиях спектр генерации матрицы, которая обеспечивает лучшую направленность излучения, сужается значительно эффективнее.

Управление спектрами генерации полиуретановых матриц с помощью интерференционно-поляризационных фильтров

В отличие от дифракционных решеток, интерференционно-поляризационные фильтры (ИПФ) выгодно отличаются небольшой чувствительностью к расходимости лазерного излучения. Другими их преимуществами являются малые нерезонансные потери и высокая лучевая стойкость. К недостаткам можно отнести небольшую контрастность полосы пропускания, ограниченную область свободной дисперсии и критичность к наведенной анизотропии резонатора. Тем не менее ИПФ достаточно успешно применяются в лазерах с широкими спектрами линии усиления при длительности генерации, которая превышает длительность процесса естественного сужения спектра. Дополнительное расширение области свободной дисперсии и повышения контраста полосы пропускания возможно обеспечить применением в одном фильтре набора кристаллических пластинок разной толщины в соединении с дополнительными стеклянными пластинками-поляризаторами [3].

В экспериментах использовались как самые простые ИПФ, то есть одиночные пластины из кристаллического кварца, так и ИПФ, в состав которых входили несколько пластин разной толщины. Пластины закреплялись в держателе, который обеспечивал возможность юстировки плоскости пластин и их вращение в этой плоскости вокруг оси. С учетом того, что излучение матриц имеет собственную поляризацию, плоскость пластин ИПФ ориентировалась так, чтобы вектор этой собственной поляризации совпадал с вектором поляризации, обусловленной пластинами. Перестройка полосы пропускания резонатора осуществлялось, как обычно, возвращением пластин ИПФ вокруг оси. Для улучшения энергетической эффективности все элементы резонатора располагались на минимально возможных расстояниях, а накачка осуществлялась линейно поляризованным излучением.

Как и в экспериментах с дифракционной решеткой, использовались матрицы на Родамине 6G, Сульфородамине 101 и Оксазине 17, а также на Оксазине 1. В качестве селекторов

испытывались одиночные пластины толщиной 1 и 2 мм, ИПФ из трех пластин толщиной 2 мм, и комбинированный фильтр из двух пластин толщиной 1 и 2 мм.

Опыты показали, что для фильтров с малой областью свободной дисперсии возникает многополосная генерация, особенно при мощностях возбуждения, которые значительно превышают пороговую. Это демонстрирует рис. 3, где показана перестройка спектров генерации матрицы на Оксазине 17 с концентрацией $C = 2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л с помощью одиночной двухмиллиметровой пластины (а) и фильтра из трех таких же пластин (б).

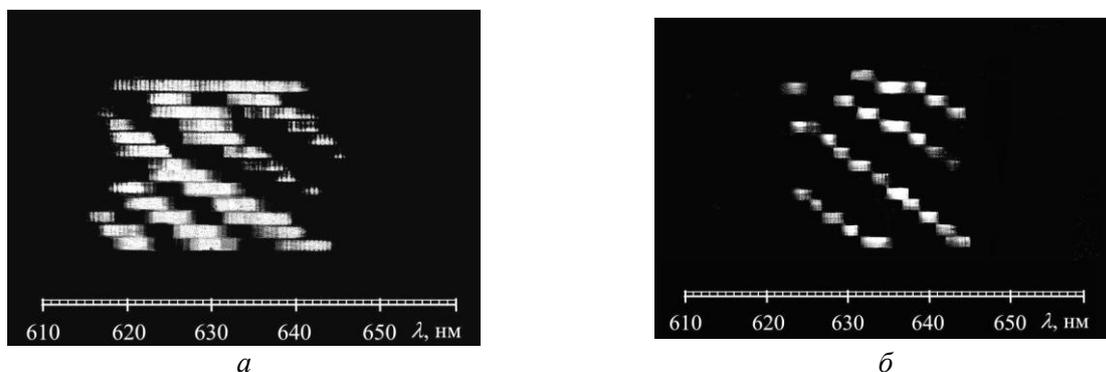


Рис. 3

Возникновение многополосной генерации обусловлено периодичностью функции пропускания отдельной пластины. Для пластины толщиной 2 мм в спектральный контур усиления матрицы на Оксазине 17 в условиях данного эксперимента укладывалось три максимума пропускания фильтра, что при мощном возбуждении приводило к многополосной генерации. Увеличение количества пластин одинаковой толщины сужает полосу пропускания каждого из максимумов, но не расширяет область свободной дисперсии. В этом случае тоже наблюдалась многополосная генерация, но ширина полос уменьшилась.

Большую область свободной дисперсии, но при более широкой полосе пропускания, имеют пластины толщиной 1 мм. Применяв такую пластинку в качестве ИПФ, мы получили однополосную, перестраиваемую по спектру, генерацию на нескольких образцах матриц. На рис. 4 показаны спектры излучения матриц на Родамине 6G при $C = 10^{-3}$ моль/л (а) и Оксазине 1 при $C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л (б).

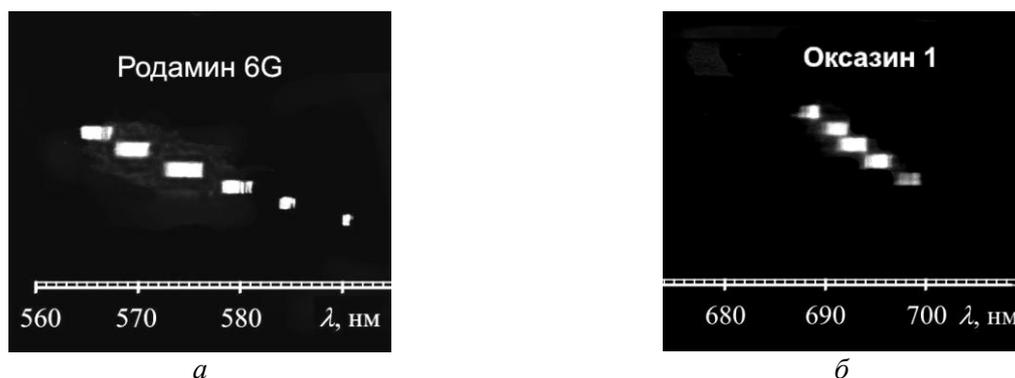


Рис. 4

Расширить область свободной дисперсии и сузить полосу пропускания резонатора можно с помощью ИПФ, составленного из пластин разной толщины. Результат применения ИПФ из двух пластин с толщинами 1 и 2 мм для сужения и перестройки спектра генерации матрицы на Сульфородамине 101 ($C = 2 \cdot 10^{-4}$ моль/л) демонстрирует рис. 5. В этом случае получено сужение спектра ≤ 1 нм и его перестройка в полосе ~ 16 нм.

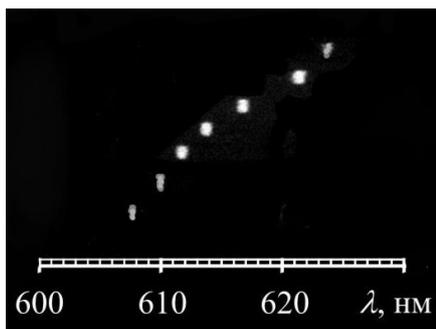


Рис. 5

Лабораторный макет широкодиапазонного твердотельного лазера-преобразователя.

Результаты проведенных исследований были использованы для создания действующего макета компактного узкополосного лазера-преобразователя с перестройкой длины волны генерации, способного излучать в значительной части оптического спектра. При этом изменение диапазона излучения такого ТЛК можно осуществить простой заменой лазерных матриц, активированных разными красителями. На рис. 6 показана фотография лабораторного макета лазера с дисперсионным резонатором на основе ИПФ. Резонатор лазера образован двумя плоско-

параллельными зеркалами 3. Спектральная селекция обеспечивается интерференционно-поляризационным фильтром 2, установленным под углом Брюстера к оси резонатора. Лазерная матрица 1 закрепляется в универсальном держателе и может быть легко заменена на сменные матрицы 5.

Фокусировка излучения накачки осуществляется цилиндрической линзой 4. В качестве активных элементов лазера-преобразователя были испытаны матрицы с двумя длинами: 10 и 20 мм. При этом матрицы длиной 10 мм накачивались ЖЛК с диаметром кюветы 7 мм, который возбуждался линейными лампами ИФП-1200 и генерировал излучение с энергией ~180 мДж, а для накачки матриц длиной 20 мм применялся ЖЛК на коаксиальной лампе ИНК – 13/150 с диаметром кюветы 13 мм и энергией генерации ~300 мДж. Длительность импульсов накачки, в зависимости от типа ЖЛК, составляла 2,5 – 4 мкс на уровне 0,5 интенсивности. Соответственно длительность импульсов генерации твердых матриц находилась в пределах 1,5 – 2,0 мкс.

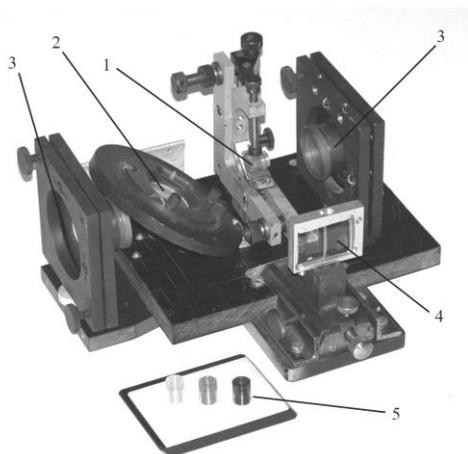


Рис. 6

В результате испытаний созданного ТЛК на сменных полиуретановых матрицах была получена узкополосная, перестраиваемая в широком диапазоне видимого спектра лазерная генерация. Зарегистрированные спектры излучения представлены на рис. 7

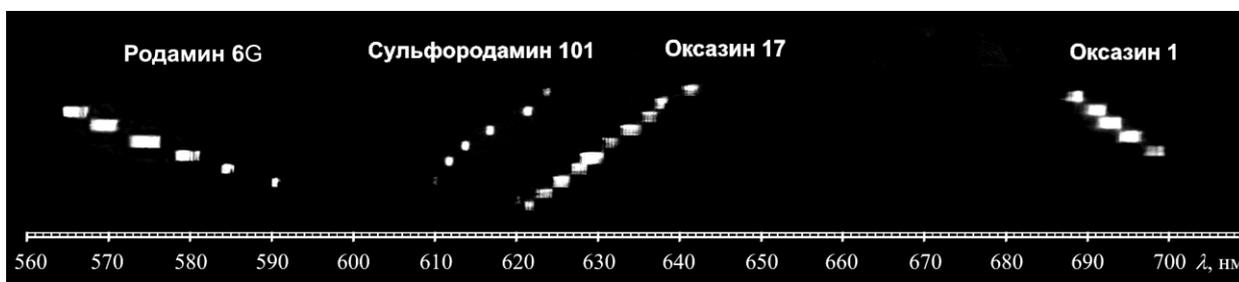


Рис. 7

Выводы

Таким образом, исследованы возможности сужения и перестройки спектров генерации полиуретановых матриц в дисперсионных резонаторах с угловым и амплитудным типом селекции. Выяснено влияние особенностей излучения полиуретановых матриц на формиро-

вание спектров генерации в дисперсионных резонаторах на основе дифракционной решетки и интерференционно-поляризационных фильтров. При возбуждении этих матриц излучением жидкостных лазеров на красителях получена эффективная, перестраиваемая по длине волны, узкополосная генерация лазерного излучения микросекундной длительности.

Изготовлен и испытан макет твердотельного лазера на красителях со сменными полиуретановыми лазерными элементами, активированными разными красителями, обеспечивающий генерацию плавно перестраиваемого лазерного излучения в спектральном диапазоне 565 – 700 нм.

Список литературы: 1. *Копылов, С.М., Лысой, Б.Г., Серегин, С.Л., Чередниченко, О.Б.* Перестраиваемые лазеры на красителях и их применение. М.: Радио и связь, 1991. 240 с. 2. *Тихонов, Е.А. Шпак, М.Т.* Нелинейные оптические явления в органических соединениях. – Киев : Наук. думка, 1979. – 384 с. 3. *Анохов, С.П., Марусий, Т.Я., Соскин, М.С.* Перестраиваемые лазеры. – М. : Радио и связь, 1982. – 360 с. 4. *Николаев, С.В., Пожар, В.В., Дзюбенко, М.И.* Исследование новых твердотельных активных сред на основе промышленных полиуретановых компаундов, активированных красителями // Радиофизика и электроника. – 2012. – Т.3(17), № 2. – С.80 – 86. 5. *Николаев, С.В., Пожар, В.В., Дзюбенко, М.И.* Исследование особенностей генерации твердотельных лазеров на красителях при поперечном способе возбуждения // Радиофизика и электроника. – 2011. – Т.2(16), № 2. – С. 55 – 62. 6. *Николаев, С.В., Пожар, В.В., Дзюбенко, М.И.* Влияние анизотропии показателя преломления на оптические и генерационные характеристики лазерных матриц на основе активированных красителями полиуретанов // Радиофизика и электроника. – 2014. – Т.5(19), № 3. – С.55 – 60.

*Институт радиофизики и электроники
имени А.Я. Усикова НАН Украины*

Поступила в редколлегию 12.06.2015