

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И СРЕДСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.373.826

*М.И. ДЗЮБЕНКО, д-р физ.-мат. наук, С.Н. КОЛПАКОВ,
ПЕЛИПЕНКО В.П., канд. физ.-мат. наук*

ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЯХ С ПЛОСКИМ ПРИЗМЕННЫМ РЕЗОНАТОРОМ И ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ

Введение

Среди лазеров на растворах органических соединений, генерирующих мощное когерентное перестраиваемое в широком спектральном диапазоне излучение, особое место занимают лазеры на красителях с немонохроматической (ламповой) накачкой. Благодаря большому объему активной среды они могут генерировать импульсы излучения микросекундной длительности с энергией несколько десятков джоулей, а в импульсно-периодическом режиме средняя мощность их излучения может составлять десятки ватт. Лазеры этого класса выгодно отличаются от других источников когерентного света в тех приложениях, где необходимо спектрально-селективное взаимодействие и высокие энергия или средняя мощность излучения: дистанционное зондирование, спектроскопия, фотохимия, медицина, и т.д. [1 – 3].

Одним из существенных недостатков лазеров этого типа является высокая расходимость их излучения, обусловленная оптическими искажениями жидкой активной среды в результате теплового и гидравлического воздействия на нее со стороны источника накачки [4]. Кроме того, на направленность излучения лазера существенно влияют лучи френелевского типа, возникающие при отражении на стенках кюветы [5].

Для уменьшения термооптических искажений, возникающих в активной среде, в работе [7] использовался водный раствор красителя. Вода, как известно, обладает наилучшими среди органических растворителей теплофизическими свойствами. Применение в лазерах на красителях водных растворов обеспечивает существенное снижение угловой расходимости излучения, но при этом также резко снижается и эффективность генерации лазера по сравнению со спиртовым раствором. Это обусловлено образованием димеров активных молекул и тушением люминесценции, низкой растворимостью красителей и т.п. Агрегацию красителей в водных растворах можно подавить добавлением поверхностно-активных веществ [8]. Так, добавление одного из них в водный раствор родамина 6Ж позволило значительно снизить порог генерации и увеличить более чем в два раза энергию излучения по сравнению с чистым водным раствором при расходимости 0,2 мрад [8]. Использование в качестве активной среды комплексов включения некоторых красителей с β -циклодекстрином (β -CD), обладающих достаточной растворимостью в воде, позволило получить высокую направленность излучения при сохранении энергии такой же как и у спиртовых растворов [9]. Авторы работы [10] получили высокие энергетические и пространственно-угловые характеристики излучения лазера на спирто-водном растворе родамина 6Ж. С целью улучшения направленности и обеспечения высокой угловой яркости излучения лазеров на красителях с ламповой накачкой в [6] предложен и реализован угловой селектор, предотвращающий существование замкнутых лучевых траекторий с френелевским отражением. В работе [11] для уменьшения расходимости излучения лазеров на красителях использовался неустойчивый несимметричный конфокальный резонатор, образованный двумя вогнутыми зеркалами, имеющими стопроцентное отражение. В фокальной плоскости резонатора, под углом 45° к его оси, размещалось выводное зеркало с отверстием. Данная схема резонатора позволила уменьшить расходимость излучения более чем в пять раз.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований лазера на красителях с ламповой накачкой и плоским призмным резонатором с целью улучшения его пространственно-угловых и эксплуатационных характеристик.

Экспериментальная установка и методы измерения

За основу экспериментальной установки был взят ранее разработанный импульсно-периодический лазер на красителях с накачкой линейной трубчатой импульсной лампой [12]. Данный излучатель был выбран как наиболее эффективный и достаточно надежный вариант лазерной системы. Возбуждение красителя осуществлялось в одноэллипсном осветителе с зеркальной отражающей поверхностью. Параметры эллипса рассчитывались из условия максимального использования излучения лампы накачки при заданных поперечных размерах плазменного шнура и кюветы с раствором красителя [13]. В фокальных осях эллиптического цилиндра располагались линейная трубчатая импульсная лампа типа ИНП-5/250 и цилиндрическая кварцевая кювета, с внутренним диаметром 6 или 3 мм, через которую прокачивалась активная жидкость. Кроме того, такая конструкция позволяет отдельно охлаждать лампу и активное тело и обеспечивает сравнительно равномерную оптическую накачку активного элемента. В экспериментах были использованы спиртовые или спирто-водные растворы красителя родамин 6Ж.

Для получения активной среды хорошего качества необходима большая скорость прокачки. При высоких скоростях прокачки трудно обеспечить строго ламинарный поток жидкости в кварцевой кювете, где неизбежно возникают турбулентные завихрения (особенно на вводе). Этому способствует и неоднородность профиля по длине каналов доставки активной жидкости до кюветы. Для уменьшения влияния этих эффектов нами была разработана и изготовлена кювета с особой конструкцией системы ввода и вывода жидкой активной среды лазера. Ее конструкция изображена на рис. 1. Корпус 2 и штуцер 1 узла ввода активного раствора выполнены из нержавеющей стали, а кварцевая кювета 3 и окошко 4 клеены в корпус. Для устранения мелких пузырьков воздуха, приводящих к рассеянию излучения, в системе прокачки активной жидкости устанавливался жидкостный волоконный фильтр с толщиной фильтрации 5 мкм. Фильтр одновременно служил и дополнительным демпфером, стабилизирующим поток раствора красителя. Применение данной системы позволило получить ламинарный поток и прокачивать раствор красителя со скоростью более 6 л/мин.

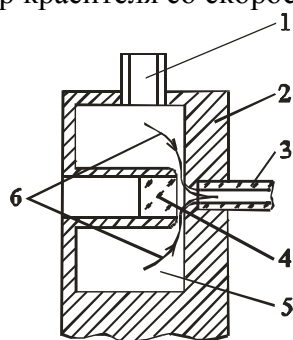


Рис.1

Для поддержания нормальной температуры поверхности лампы накачки и осветителя охлаждающая жидкость (обычно дистиллированная вода) прокачивалась через соответствующие каналы осветителя тоже с достаточно большой скоростью. Импульсная лампа помещалась в кварцевую трубку с зазором около 1 мм, через который прокачивалась охлаждающая жидкость со скоростью ≈ 5 л/мин. Система прокачки и охлаждения была двухконтурная. Первый контур имел два резервуара-теплообменника емкостью по 3 л каждый, для отдельного охлаждения активной и охлаждающей жидкостей. Во втором контуре системы охлаждения через теплообменник прокачивалась вода из водопроводной сети для стабилизации температуры раствора красителя и охлаждающей жидкости первого контура.

Электрическая схема питания лампы накачки включала в себя последовательно соединенные накопительный конденсатор, емкостью 1 мкФ, высоковольтный разрядник, типа РУ-65 и импульсную лампу. Система питания обеспечивала длительность светового импульса до 2 мкс при энергии разряда до 200 Дж. В лазере, работающем с частотой повторения импульсов около 10 Гц, был использован дежурный разряд с силой тока 1,5 А [14]. Разработанные конструкции излучателя, систем питания и прокачки обеспечивали квазинепрерывную работу лазера в течение 15 мин с частотой повторения импульсов до 10 Гц.

Для температурной стабилизации длины и механической устойчивости лазерного излучателя юстировочные узлы зеркал, квантрон и дополнительные элементы резонатора крепились на трех инваровых стержнях диаметрами 20 мм. Вся конструкция имела вибразщиту от насосов прокачки активной и охлаждающей жидкостей, а также других источников вибрации. На рис. 2 показана схема резонатора, которая использовалась нами в экспериментах. Здесь представлены кварцевая кювета с активным веществом 4, прямая трубчатая импульсная лампа накачки 5, плоское выходное зеркало 1, стопроцентный отражатель резонатора 2, поворотная девяностоградусная призма 3. В качестве глухого отражателя в наших экспериментах использовались плоское зеркало с отражением 99,9 % или призма-крыша. Поворотная призма была применена для уменьшения габаритных размеров резонатора, что также повышало виброустойчивость системы. В плече между элементами 2 и 3 могут устанавливаться дисперсионные элементы для сужения и перестройки спектра лазерного излучения.

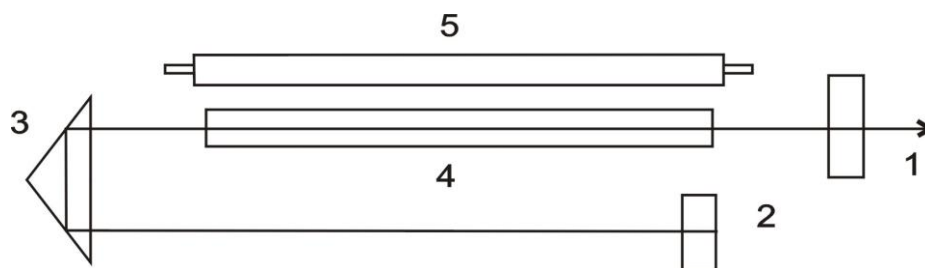


Рис. 2

Среди всех элементов, входящих в лазерный резонатор, наибольшей оптической неоднородностью обладает активный элемент, оптическая неоднородность которого, в свою очередь, существенно влияет на модовый состав излучения [15]. На рис. 3 приведена фотография выходного торца кюветы, полученная при возбуждении спиртового раствора родамина бЖ слабой концентрации в отсутствие резонатора. На фото показано распределение интенсивности излучения накачки по сечению кюветы в одноэллипсном осветителе (лампа накачки расположена сверху кюветы), из которого достаточно хорошо видна фокусировка излучения накачки в центр кюветы, что говорит об удовлетворительном расчете эллипсоида, удачном конструкторском решении и качественном изготовлении его отражающей поверхности. Но, как видно, сектор, противоположный лампе, имеет недостаточное освещение. Неравномерное освещение активной среды лазера приводит к неоднородному распределению температуры по сечению кюветы и, как результат, к оптическим искажениям, а это, в свою очередь, – к большой расходимости лазерного луча. Наличие неоднородной активной среды побудило нас провести исследования пространственно-угловых и энергетических характеристик излучения лазеров на красителях с ламповой накачкой, имеющих различные резонаторы. В работе изучались неустойчивый резонатор и плоско параллельный резонатор, образованный плоским выходным зеркалом и девяностоградусной призмой-крышей. Известно [16], что колебания в таких резонаторах устанавливаются намного быстрее, чем в плоском, за счет механизма принудительного «перемешивания» излучения по сечению резонатора. Для сравнения мы провели исследования резонатора, образованного плоскими зеркалами.

Неустойчивый резонатор был образован плоским выходным зеркалом и сферическим зеркалом с коэффициентом отражения 99,9 % и отрицательным радиусом кривизны. Результаты исследования показали некоторое улучшение распределения излучения в центральной области кюветы (селекцию меридиональных лучей) и увеличение направленности излучения. Однако значительного подавления саггитальных лучей не произошло. Кроме того, было установлено, что применение неустойчивого резонатора в лазерах на красителях затруднено из-за необходимости проводить дополнительную юстировку или подбирать сферическое зеркало с другим радиусом кривизны и длину резонатора всякий раз при изменении уровня энергии накачки или концентрации красителя в активном растворе.



Рис. 3

Для измерения пространственно-угловых характеристик лазерного пучка в работе использовался метод, предложенный Хирдом [17]. Схема измерения расходимости лазерного излучения приведена на рис. 4. Здесь показаны: фокусирующая линза – 1; матовый экран – 2; набор ослабляющих светофильтров – 3; цифровой фотоаппарат – 4. Лазерное излучение фокусировалось на матовый экран тонкой длиннофокусной линзой с $f = 500$ мм. Применение тонкой линзы с большой апертурой уменьшает различного рода aberrации. Излучение с экрана 2, расположенного в фокальной плоскости линзы, регистрировалось цифровым фотоаппаратом, который устанавливался на определенном расстоянии от экрана.

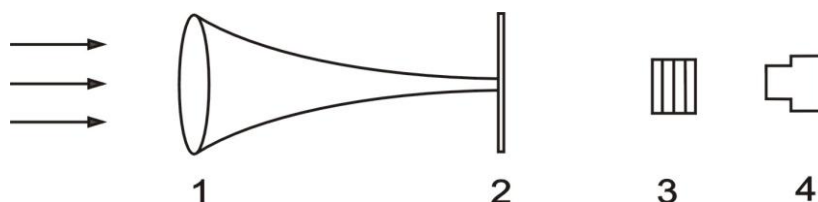


Рис. 4

Такая схема измерения допускает перемещение камеры по направляющей к экрану и изменение масштаба изображения. Интенсивность излучения ослаблялась нейтральными светофильтрами до уровня близкого к насыщению матрицы фотоаппарата. Характерной чертой всех цифровых камер с регистрирующей матрицей является довольно большой диапазон линейности. Для используемой нами фотокамеры динамический диапазон составлял порядка 1:800 в линейном обозначении. Матовый экран имел сетку с шагом 10 мм, поэтому, регистрируя в одинаковых условиях (с увеличением изображения, равным $\times 16$), мы могли провести калибровку нашей измерительной системы и получить численное значение размера пятна в дальней зоне излучения лазера, как в линейных значениях, так и в угловых. Зная фокусное расстояние линзы 1 и шаг сетки на экране 2, можно записать следующее выражение для расходимости

$$\theta = D_{\text{сетки}}/f,$$

где $D_{\text{сетки}}$ – размер элемента сетки, мм; f – фокусное расстояние линзы (в нашем случае оно составляло 500 мм). Угол, под которым видно 10 мм сетки, равен 20 мрад. На фотоизображении 10 мм сетки экрана соответствует 16,64 мм, что дает цену деления 1,2 мрад/мм.

Результаты и их обсуждение

Из всего разнообразия конструкций резонаторов чаще применяются резонаторы с плоскими (плоскопараллельный) и сферическими зеркалами (конфокальный или полуконфокальный). Следует отметить, что в плоских резонаторах наиболее сильно проявляется влияние различных оптических неоднородностей по сечению луча. Как было показано [5], даже в режиме одиночных импульсов угловая расходимость лазерного излучения может сильно изменяться в процессе генерации. Практически это приводит к тому, что в плоских резонаторах в процессе возбуждения активной среды возбуждаются поперечные моды высшего порядка, которые как бы сводят к минимуму потери излучения на оптических неоднородностях среды.

На рис. 5 представлены далекополюсные картины излучения лазера, которые были получены в плоском резонаторе длиной 580 мм для различных энергий накачки и концентраций раствора красителя родамина 6Ж. Энергия накачки составляла: 1 – $U = 50$ Дж; 2 – $U = 72$ Дж; 3 – $U = 98$ Дж; 4 – $U = 128$ Дж; 5 – $U = 162$ Дж. Концентрация красителя варьировалась следующим образом: а – $C = 4,0 \cdot 10^{-4}$ моль/л; б – $C = 2,0 \cdot 10^{-4}$ моль/л; в – $C = 1,0 \cdot 10^{-4}$ моль/л; г – $C = 0,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

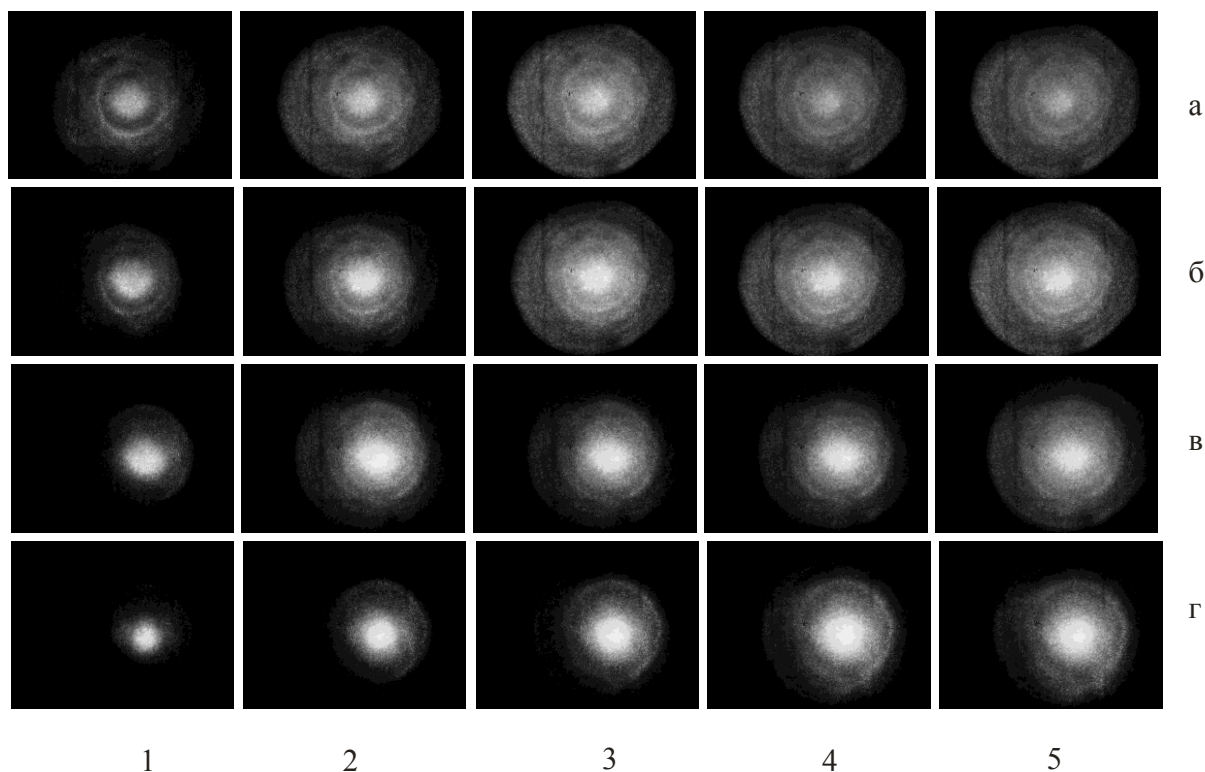


Рис. 5

Как видно из фотографий, почти на всех картинах во всем диапазоне используемых нами энергий накачки и концентраций красителя, наряду с параксиальными типами колебаний (центральное яркое пятно) существуют волноводные типы колебаний (рефракционные лучи и колебания с френелевским отражением от стенок кюветы) [4, 5]. С уменьшением концентрации красителя происходит перераспределение интенсивности излучения по сечению луча и увеличение доли излучения в центральном пятне. Надо полагать, что с уменьшением концентрации красителя улучшаются условия накачки по сечению кюветы и увеличивается время жизни параксиальных типов колебаний. Последнее подтверждается измерениями временных разверток далекополюсных картин излучения лазера.

На рис. 6 показаны нормированные кривые распределения интенсивности излучения лазера, полученные путем обработки изображений в дальней зоне. Здесь представлены распределе-

ния, полученные при одной и той же энергии накачки но разных концентрациях раствора красителя (кадры а-3 – $C_{p6ж} = 4,0 \cdot 10^{-4}$ моль/л и г-3 – $C_{p6ж} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; рис. 5). По оси X отложено значение расходимости в мрад (одно большое деление соответствует 7 мрад). Такая обработка далекопольной картины излучения лазера дает наглядное представление о пространственно-угловом распределении интенсивности излучения лазера. Измеряя ширину кривой на любом уровне и зная цену деления, полученную с помощью градуировочной сетки, можно получить оценочное значение расходимости лазерного излучения. Так, величина расходимости на уровне 0,5 от максимального значения интенсивности излучения в рассмотренном случае составляет $\theta = 18,7$ мрад (а) и $\theta = 12,12$ мрад (б) при энергии генерации $E_{ген} = 370$ мДж и $E_{ген} = 352$ мДж соответственно. Энергия генерации лазера изменилась на $\approx 5\%$ при уменьшении расходимости в 1,5, что привело к увеличению угловой яркости излучения более чем в 2,5 раза.

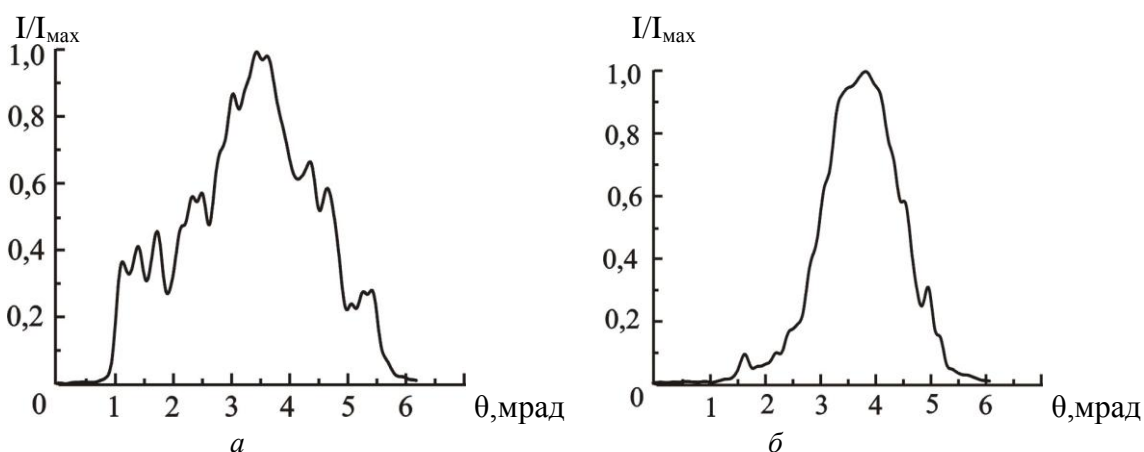


Рис. 6

Рассматривая распределение накачки внутри активного элемента рис. 3, видно, что энергия накачки сосредоточена вблизи стенок кюветы и в ее центре. В резонаторе с такой неоднородной средой, как показал анализ [5], одновременно существуют меридиональные лучи, лежащие в плоскости, содержащей геометрическую ось кюветы и саггитальные лучи, траектории которых образуют винтовую линию вдоль стенок кюветы. С целью выяснения возможности подавления волноводных колебаний нами был испытан резонатор, образованный выходным зеркалом и призмой-крышей. Плоское зеркало имело коэффициент пропускания 40 %, а призма-крыша служила в качестве 100 % отражателя резонатора. Кювета и лампа накачки располагались в вертикальной плоскости (лампа сверху). Для увеличения длины резонатора со стороны глухого зеркала применялась дополнительная призма полного внутреннего отражения (ПВО), с помощью которой осуществлялся излом оси резонатора.

Исследования такой системы были проведены в двух вариантах: первый – ребро при девяностоградусном угле призмы располагалось параллельно плоскости кювета-лампа накачки, при этом предполагалось «перемешивание» колебаний, возникающих возле стенок кюветы в горизонтальном направлении; второй – ребро при девяностоградусной вершине призмы располагалось перпендикулярно плоскости кювета-лампа. При этом происходил обмен между сильно и слабо возбужденными областями кюветы (рис. 3).

Распределение интенсивности излучения лазеров, имеющих различные типы резонаторов, представлены на рис. 7. Концентрация спиртового раствора красителя 6Ж составляла $0,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; энергия накачки $E = 128$ Дж. Угловое распределение излучения лазера в дальней зоне: а – для резонаторов длиной 580 мм; б – для резонаторов длиной 885 мм; 1 – резонатор образован плоскими зеркалами; 2 – резонатор с призмой ПВО (грань при вершине расположена параллельно плоскости лампа – кювета). 3 – резонатор с призмой ПВО (грань при вершине расположена перпендикулярно плоскости лампа – кювета).

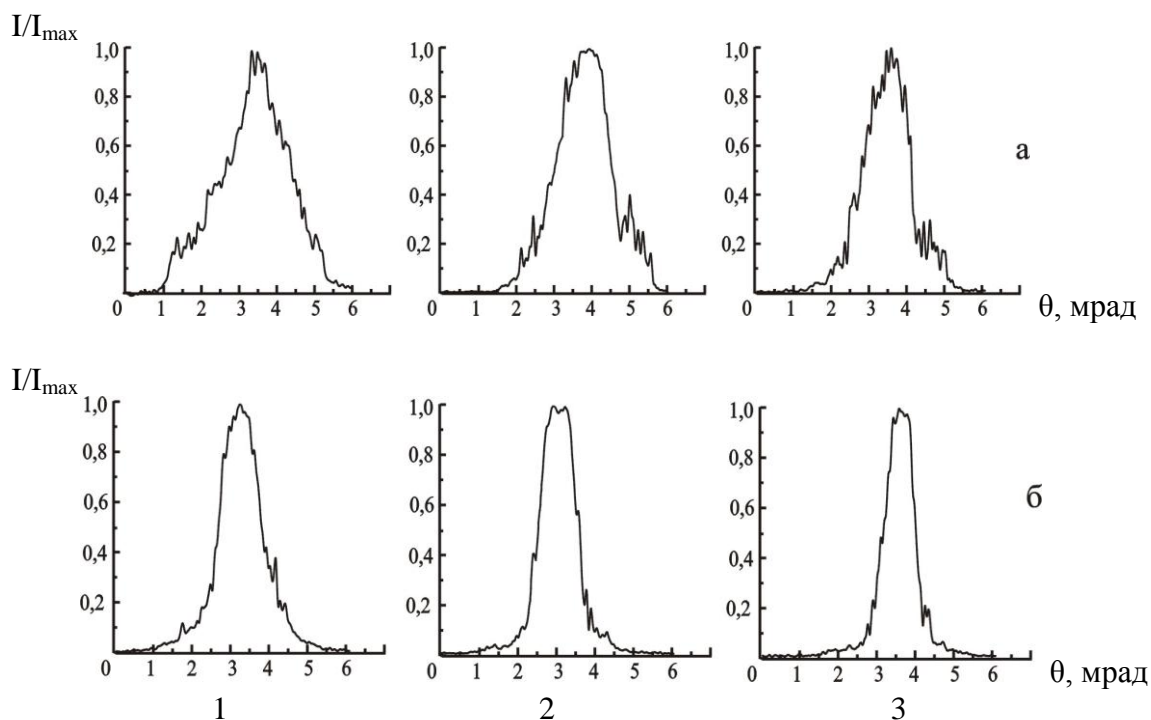


Рис. 7

В таблице представлены результаты, характеризующие пространственно-угловые и энергетические характеристики излучения исследованных систем, где приведены полная энергия генерации лазера $E_{ген}$ и расходимость излучения θ , измеренная на половинном уровне. Измерения проводились по нормированным кривым, представленным на рис. 7. Энергия накачки и концентрация красителя составляли $E_{нак.} = 128$ Дж и $C_{Р6Ж} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л соответственно. Из таблицы видно, что при малых концентрациях красителя в длинных резонаторах расходимость несколько ниже для всех исследованных вариантов, что согласуется с результатами проведенных ранее работ [18, 19].

Тип резонатора	$L_{рез} = 580$ мм		$L_{рез} = 885$ мм	
	$E_{ген}$, Дж	θ , мрад	$E_{ген}$, Дж	θ , мрад
плоский	270	14,7	125	8,5
призма параллел.	221	11,4	112	8,0
призма перпенд.	217	10,2	95	6,6

На рис. 8 показано распределение излучения в дальних зонах для лазера на спиртовом растворе для двух концентраций родамина 6Ж с плоско-призменным резонатором. Как видно, в обоих случаях на диаграммах направленности практически отсутствуют боковые лепестки. Если сравнивать кривые пространственно-углового распределения рис.6, а и рис.8, а, полученные при одной и той же энергии накачки, и концентрации красителя $C_{Р6Ж} = 4,0 \cdot 10^{-4}$ моль/л для плоскопараллельного и призменного резонаторов, то можно говорить о достаточно сильной селекции типов колебаний, которые образуют боковые лепестки. Также улучшается пространственно-угловое распределение и для малых концентраций красителя.

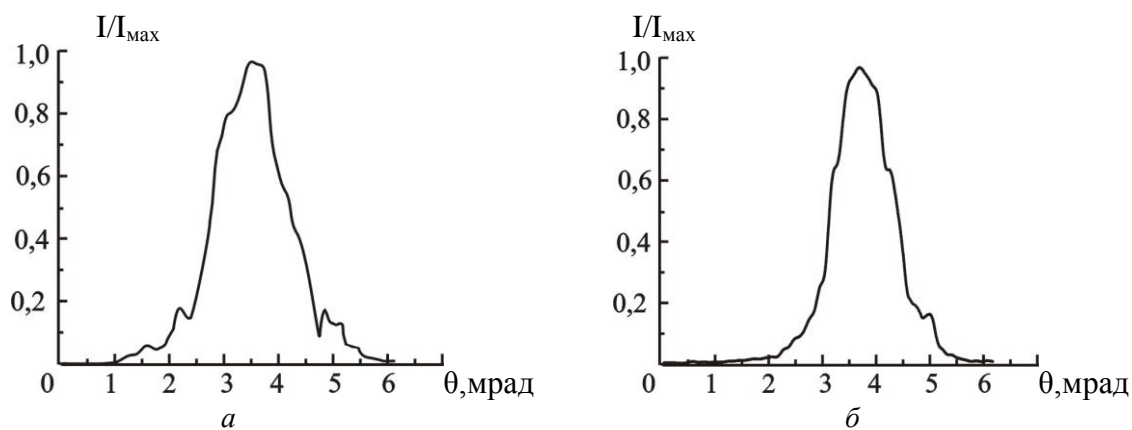


Рис. 8

Сравнивая эти два варианта расположения призм, можно видеть, что несколько меньшая расходимость наблюдалась во втором случае, когда призмы установлены таким образом, что их ребра при вершинах прямых углов ортогональны, причем одна из призм служит для излома оси резонатора рис. 2, а вторая – выполняет роль 100 % отражающего зеркала. Ребро при вершине отражающей девяностоградусной призмы перпендикулярно плоскости, содержащей лампу накачки и активный элемент. По сравнению с классической схемой линейного призмного резонатора, в котором чувствительность к разъюстировкам в плоскости, содержащей ребро при вершине прямого угла, столь же велика, как и в плоском резонаторе, в исследованной схеме изогнутого резонатора чувствительность к потерям в данной плоскости примерно на порядок ниже [20]. Такая схема резонатора показала достаточно высокие эксплуатационные характеристики – хорошую устойчивость к температурным колебаниям окружающей среды и к небольшим неточностям настройки элементов резонатора.

С целью улучшения направленности излучения были изучены энергетические и пространственно-угловые характеристики излучения лазера на спирто-водных растворах (процентное соотношение 40 : 60) родамина 6Ж. Измерения проводились для двух типов резонаторов: плоского, образованного двумя плоскими зеркалами (длина $L = 580$ и $L = 885$ мм), и призмного резонатора, у которого девяностоградусная грань отражающей призмы была перпендикулярна плоскости лампы-кювета (длина резонатора $L = 885$ мм). Как и следовало ожидать, с применением водно-спиртового раствора, подавление мод высоких порядков излучения наблюдалось при больших концентрациях красителя и при больших энергиях накачки, чем для спиртовых растворов красителя. Величина углового распределения уменьшилась по сравнению со спиртовыми растворами в два раза, но при этом и энергия излучения лазера уменьшилась примерно во столько же. В случае применения селективных элементов в призмном резонаторе и спирто-водного раствора красителя энергия генерации уменьшалась примерно на 15 – 20 %, в то время как для спиртового раствора она уменьшалась более чем в два раза.

Выводы

Предложена, разработана и исследована конструкция узла ввода активной жидкости в кювету, которая позволила существенно увеличить скорость прокачки красителя без нарушения ламинарности потока. Предложена и исследована конструкция резонатора с поворотной призмой, которая уменьшила габаритные размеры резонатора и снизила чувствительность к механическим вибрациям и неточности юстировки его элементов. Экспериментально изучены пространственно-угловые характеристики излучения лазера на красителях с ламповой накачкой в плоско-параллельных и призмных резонаторах. Установлено, что меньшей расходимостью обладают длинные резонаторы с поворотной призмой и с девяностоградусной призмой-крышей. Исследована генерация спиртовых и спирто-водных растворов родамина 6Ж в этих типах резонаторов. Показано, что для создания узкополосных перестраиваемых

мых лазеров наиболее подходящими являются призмные резонаторы и спирто-водные растворы красителей, которые могут обеспечить малую расходимость лазерного излучения.

Список литературы: 1. Gittins C.M. Measurements of major species in a high pressure gas turbine combustion simulator using Raman scattering / Gittins C.M., Shenoy S.U., Aldag H.R., Pacheco D.P., Miller M.F., Allen M.G. // 38th AIAA Aerospace Sciences, Meeting & Exhibit, January 2000. – Reno, NV: American Institute of Aeronautics and Astronautics. – Paper No 2000-0772. – P. 1 – 15. 2. Lempert W.R. Flow tagging velocimetry using caged dye photoactivated fluorophores / Lempert W.R., Harris S.R. // Meas. Sci. Technol., 2000. – V. 11. – P. 1251-1258. 3. Bjerring P. The Flashlamp-pumped Dye Laser and Dermabrasion in Psoriasis – Further Studies on the Reversed Kobner Phenomenon / Bjerring P., Zachariae H., Sogaard H. // Acta dermato-venereologica, 1997. – V.77, №1. – P. 59-61. 4. Burlamacchi P. Self-guiding flashlamp-pumped dye laser/ Burlamacchi P., Pratesi R., Ronchi L // Appl. Opt. – 1975. – V. 14, N 1. – P. 79 – 93. 5. Науменко И.Г. Эволюция пространственно-угловых характеристик лазеров на красителях с ламповой накачкой / Науменко И.Г., Пелипенко В.П., Дзюбенко М.И., Шевченко В.В. // Квант. электроника. – 1993. – Т.20, №2. – С. 123 – 128. 6. Смольская Т.И. Влияние поперечного распределения накачки на энергетику и профиль термооптических искажений лазера на родамине 6Ж / Смольская Т.И., Рубинов А.Н. // Журн. прикл. спектроскопии. – 1972. – Т. 16, № 4. – С. 618 – 626. 7. Дзюбенко М.И. Многокаскадный лазер на красителе с ламповой накачкой / М.И.Дзюбенко, И.Г.Науменко, В.П. Пелипенко // Квант. электроника. – Киев : Наук. думка, 1987. – Вып. 32. – С. 13 – 25. 8. Dzyubenko M.I. Laser and spectral characteristics of some laser dyes and their complexes with cyclodextrine / Dzyubenko M.I., Maslov V.V., Nikitchenko V.M., Plipenko V.P., Chuev V.P., Shevchenko V.V. // Functional Materials, 1996. – V. 3, № 4. – P. 525 – 528. 9. Бесецкий В.Л. Лазер с ламповой накачкой повышенной яркости излучения на водно-спиртовом растворе родамина 6Ж./ Бесецкий В.Л., Зарудный А.А. // Радиотехника. – 2006. – Вып.145. – С.27 – 33. 10. А.С. № 1549439 СССР, МК³: G01R 61/90. Лазер на растворах органических соединений и устройство для его осуществления / В.П. Пелипенко, М.И. Дзюбенко, И.Г. Науменко, В.В. Шевченко // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 9. – С. 271. 11. Алексеев В.А. Особенности неустойчивого резонатора в лазерах на растворах органических соединений с ламповой накачкой / В.А.Алексеев, Б.Ф.Тринчук, А.В. Шуленин // Журн. прикл. спектроскопии. – 1984 – 41, №1. – С.28 – 33. 12. Дзюбенко М.И. Импульсно-периодические лазеры на красителях с ламповой накачкой / Дзюбенко М.И., Маслов В.В., Пелипенко В.П., Шевченко В.В. // Квантовая электрон. – 1995. – 22, №5. – С. 436-438. 13. Микаэлян А.Л. Оптические квантовые генераторы / Микаэлян А.Л., Тер-Микаэлян М.Л., Турков Ю.Г. – М. : Сов. радио, 1967. – 384 с. 14. Дзюбенко М.И. Исследование влияния дежурного разряда на эффективность импульсно-периодических лазеров на красителях с ламповой накачкой / Дзюбенко М.И., Маслов В.В., Пелипенко В.П., Шевченко В.В. // Оптика и спектроскопия. – 1995. – 78, №4. – С.700 – 703. 15. Стрижнев В.С. Влияние равномерности распределения накачки на энергетические и угловые характеристики генерации раствора родамина 6Ж в этаноле при ламповом возбуждении / Стрижнев В.С. // Журн. прикл. спектроскопии. – 1975 – 23, №5. – С.784 – 790. 16. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения / Ананьев Ю.А. – М. : Наука, 1979. – 328с. 17. Хирд Г. Измерение лазерных параметров / Хирд Г. – М. : Мир, 1970. – 539 с. 18. Алексеев В.А. Расходимость излучения лазеров на красителях с ламповой накачкой / В.А.Алексеев, А.В. Шуленин // Обзоры по электронной технике. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1989 – 1495, № 7. – С.46 – 49. 19. Левин М.Б. Угловое распределение энергии в излучении лазера на спиртовых и водно-мицеллярных растворах родамина 6Ж с ламповой накачкой / М.Б. Левин, А.С. Черкасов // Опт. и спектроскопия. – 1986. – 61, вып.4. – С.866 – 870. 20. Старощук О.С. Высокоэффективный неохлаждаемый импульсно-периодический лазер на активном элементе из кристалла KGd(WO₄)₂: Nd³⁺ с повышенной частотой следования импульсов излучения [Электронный ресурс]: Электрон. журнал. / Старощук О.С // Исследовано в России. – 2002. – С.671 – 681.

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

Поступила в редколлегию 14.10.2014