

**Т.Н. Копылова, Г.В. Майер**

## **РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ НА КРАСИТЕЛЯХ С НАКАЧКОЙ ЭКСИМЕРНЫМИ ЛАЗЕРАМИ**

Обсуждаются проблемы, связанные с преобразованием мощного излучения эксимерных лазеров с помощью лазеров на красителях. Разработаны новые лазерно-активные среды, генерирующие в диапазоне 330–800 нм, оригинальные конструкции кювет жидкостных лазеров и схем их возбуждения. Испытаны макеты мощных жидкостных лазеров с системой регенерации лазерно-активной среды.

Появление мощных УФ-эксимерных лазеров [1, 2] в значительной мере стимулировало направление, связанное с созданием мощных перестраиваемых лазеров на красителях, прогресс в развитии которых во многом связан с уникальными параметрами импульсов возбуждения эксимерных лазеров – высокой мощностью излучения, высокой энергетичностью кванта, крутизной переднего фронта и др. Возможность достижения высоких скоростей повторения импульсов в эксимерных лазерах делают их перспективными при решении задач мониторинга атмосферы и моря.

Лазерные системы с накачкой эксимерными лазерами, обеспечивающие получение излучения в диапазоне 430–550 нм, имеют пиковую мощность, большую чем лазерные системы с YAG-накачкой в 3 раза, среднюю мощность, большую в 5 раз, и поэтому они широко используются в ДПР-лидарах [3]. Недостатком таких систем является необходимость частой замены лазерного красителя, испытывающего фото-химические превращения в процессе облучения мощным ультрафиолетовым излучением. Однако есть пути устранения этого недостатка. В этом направлении достигнуты некоторые успехи, о которых будет сказано ниже.

Проблема преобразования мощного излучения эксимерных лазеров сложна не только в плане необходимости создания фотостабильных, высокоэффективных лазерно-активных сред. Требуются оригинальные оптические схемы лазеров на красителях, а также конструкции кювет жидкостных лазеров, так как в традиционных оптических схемах с использованием цилиндрических линз для фокусировки излучения накачки на прямоугольные кюветы последние разрушаются: при входной мощности ~ 40 МВт и площади падающего пучка  $10 \times 2 \text{ мм}^2$  достигается внутррезонаторная плотность мощности ~ 250 МВт/см<sup>2</sup>, что является порогом разрушения оптических элементов из кварца.

В последние годы нами накоплен некоторый опыт преобразования мощного излучения эксимерных лазеров с энергией в импульсе до 10 Дж при частоте повторения импульсов до 1 Гц [4].

Нашли разрешение две главные задачи, возникающие при этом: разработаны, изготовлены и испытаны оригинальные конструкции жидкостных кювет лазеров и созданы фотостабильные лазерно-активные среды, генерирующие в сине-зеленом диапазоне спектра с ресурсом до  $5 \div 10 \text{ МДж/л}$  (энергия, вкачанная в 1 л раствора до падения КПД лазера в 2 раза).

### **Лазерно-активные среды**

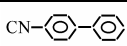
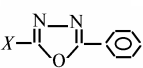
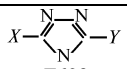
Комплексное (теоретическое и экспериментальное) исследование спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик органических молекул различных классов, установленные закономерности в изменении этих характеристик в зависимости от строения молекул позволили нам разработать и создать совместно с химиками-синтетиками новые органические соединения, перспективные для использования в качестве лазерно-активных сред в лазерах на красителях с накачкой мощными эксимерными лазерами. В результате этого возможно получение вынужденного излучения с высокой эффективностью как в малоосвоенных диапазонах спектра (ближний УФ- и ИК-диапазоны), так и в сине-зеленом диапазоне спектра, что позволяет получить генерации красителей в диапазоне 322–800 нм. Разработанные новые активные среды приведены в табл. 1.

В ближнем УФ-диапазоне спектра получено наиболее коротковолновое излучение на растворах органических соединений (столбец 1, табл. 1,  $\lambda_{\text{ген}} = 322$  нм) при накачке излучением лазера на Krf\* с энергией импульса ~ 40 мДж. Открыт новый класс соединений, растворимых в этаноле и способных заполнить излучением диапазон 322–400 нм. Это важно в связи с тем, что число молекул, генерирующих в указанном диапазоне, ограничено (паратерфенил, некоторые производные оксазола), причем они недостаточно растворяются в этаноле, хотя это имеет большое значение для получения генерации в УФ-диапазоне, так как этанол прозрачен в этом диапазоне спектра.

Перспективно соединение ООІ, растворимое в воде, являющейся дешевым и пожаробезопасным растворителем. Соединения, излучающие в УФ-диапазоне и растворимые в воде, очень редки. Получена генерация и на новом классе – замещенных триазола. Несмотря на невысокие КПД преобразования красителей в ближнем УФ-диапазоне спектра получение генерации без использования нелинейных эффектов предпочтительнее в силу простоты и экономичности лазерных систем. В сине-зеленом диапазоне спектра генерируют производные кумарина, слабым местом которых является низкая фотостабильность. Оптимизация их структуры позволила получить соединения, значительно фотостабильнее известных. На основе оксазола синтезированы соединения, растворимые в ацетонитриле с водой, также обеспечивающие получение стабильного излучения в сине-зеленом диапазоне спектра.

Таблица 1

Новые лазерно-активные среды мощных лазеров на красителях с накачкой эксимерными лазерами

Соединение	Растворитель, с, моль/л	$\lambda_{\text{ген}}$ , нм	КПД, %	Ресурс, Дж/см <sup>3</sup>	Лазер накачки		
	этанол, $5 \times 10^{-3}$	332	1		Krf*-лазер		
	этанол, $2 \times 10^{-3}$	322	2	1000	-		
		323	3		-		
		351	6		-		
		340	6		-		
		401	2,5		-		
		346–360	9,5		ХеCl*-лазер		
0,01	пентан, $3,5 \times 10^{-3}$	327	3,6		-		
 T698	24 соединения этанол, этанол+толуол	347÷443	3,5÷18	100÷1000	-		
		этанол, $8 \times 10^{-3}$	497	32	850	-	
		этанол, $8 \times 10^{-3}$	485	24	900	-	
		-	501	17	1500	-	
		-	480	30	860	-	
		-	496	25	950	-	
		вода, $8 \times 10^{-3}$	513	3	680	-	
		ацетонитрил+вода, $8 \times 10^{-3}$	505	10	620	-	
			525	9	800	-	
			522	14	800	-	
			0010	ацетонитрил, $4 \times 10^{-3}$	679	19	860
				675	23	810	-
		0020	этанол, $2 \times 10^{-3}$	712	14	1000	-
		0018	ацетонитрил, $4 \times 10^{-3}$	709	10	1000	-
0016	-	706	14	1000	-		
12Б	ацетонитрил, $7 \times 10^{-3} + \text{H}_2\text{O}$	704	16	1000	-		
20Б	ацетонитрил, $5 \times 10^{-3}$	730	12	1000	-		
ЛК 790	ацетонитрил, $2 \times 10^{-3}$	785	26	516	-		
ЛК 800	-	783	19	1300	-		
ЛК 840	-	823	18	1000	-		
Феналемин 512	этанол, $8 \times 10^{-3}$	625	16,5	1000	-		
М 316	-	718	14	560	-		
ДСМ-1	этанол, $5 \times 10^{-3}$	630	12	850	-		
ДСМ-2	-	630	20	555	-		
Родамин 6Ж	этанол, $2 \times 10^{-3}$	583	25	165	-		
Полиметиновый краситель 450IV	-	783	13,6	40	-		
Оксазин-1	-	782,6	22	84	-		
Оксазин-17	-	665	15	1100	-		

Примечание. Представленные в таблице активные среды защищены авторскими свидетельствами и патентами.

Эксимерные лазеры – универсальные источники накачки, способные возбудить соединения, излучающие от УФ- до ИК-диапазона. Однако многие из известных красителей, генерирующих в ИК-диапазоне спектра, испытывают значительные фотохимические превращения при возбуждении мощным УФ-излучением. Так, широко известный родамин 6Ж в этаноле при накачке излучением лазера на хлориде ксенона имеет ресурс 165 Дж/см<sup>3</sup>, а один из полиметиновых красителей 450IV – 40 Дж/см<sup>3</sup>, и только оксазин-17 имеет достаточно высокий ресурс работы – 1000 Дж/см<sup>3</sup>. В табл. 1 приведены новые активные среды, обеспечивающие получение излучения в этом диапазоне спектра и имеющие высокую фотостабильность. Возможности ингибирования процессов фотораспада лазерно-активных сред и создания многокомпонентных композиций на основании знания механизмов этих процессов продемонстрированы в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Лазерно-активные среды сине-зеленого диапазона спектра с повышенной фотостабильностью

Лазерно-активная среда	$\lambda_{ген}$ , нм	кпд, %	Ресурс, Дж/см <sup>3</sup>
Кумарин 102 в этаноле+ДАВСО	476	33 (32)	1700 (300)
АС 3F в этаноле+ДАВСО	497	31 (31)	3000 (1700)
Т698 в этаноле+ДАВСО	497	31 (32)	3200 850
МК 4871 в этаноле+ДАВСО	480	30 (30)	8600 (860)

Примечание. В скобках данные в этаноле без ингибиторов фотораспада.

Таким образом, к настоящему времени создан целый ряд новых активных сред, обеспечивающих получение вынужденного излучения при накачке излучением эксимерных лазеров в диапазоне 322–823 нм.

## 2. Лазеры на красителях

Новые активные среды используются в разработанных мощных лазерах на красителях с накачкой эксимерными лазерами. Изготовлены и испытаны три лабораторных макета лазера: <МЖЛ-01>, <МЖЛ-02> и <МЖЛ-03>. Как говорилось выше, для преобразования мощного излучения эксимерных лазеров с энергией в импульсе 1 Дж требуются специальные кюветы, которые не разрушались бы от излучения накачки. Такие кюветы разработаны, изготовлены и используются во всех макетах. Прямоугольная разборная кювета из кварцевых блоков толщиной 20 мм, уплотняемых силиконовой резиной, закрепленная в металлическом корпусе при условии <мягкой> фокусировки излучения накачки, способна преобразовывать излучение с энергией в импульсе более 1,5 Дж. Кювета – прокачная, поэтому возможна работа в режиме повторения импульсов до 50 Гц.

Кювета-призма не требует фокусировки излучения накачки. Она выполнена в виде прямоугольной кварцевой призмы, в которой просверлена полость для раствора красителя. Используется явление полного внутреннего отражения, за счет которого излучение накачки четырьмя световыми потоками поступает в полость с раствором красителя, обеспечивая равномерную накачку и однородное излучение на выходе при оптимальной концентрации среды. Эффективность преобразования такой кюветы близка к эффективности преобразования прямоугольной кюветы (~ 25 ÷ 30%), однако при условии плотности мощности накачки на ней более 2 МВт/см<sup>2</sup>.

Кювета-конус представляет собой усеченный кварцевый конус с полостью для раствора красителя по оси либо усеченный металлический конус с высокой степенью отражения поверхности, на оси которого размещена кювета с красителем. Используется известное свойство аксионового отражателя фокусировать излучение накачки на оси, при этом обеспечивается круговая накачка прокачивающегося раствора красителя. Остротой фокусировки можно управлять путем изменения размеров полости (его диаметра). Эффективность преобразования при этом достигает 30% при высокой однородности выходного излучения.

Оптические схемы мощного жидкостного лазера <МЖЛ-01> и <МЖЛ-03> представлены на рис. 1, 2. Схема <МЖЛ-02> подобна <МЖЛ-03>. <МЖЛ-01> предназначен для преобразования излучения эксимерных лазеров с прямоугольным сечением пучка (энергия до 1,5 Дж) и широкоапертурного излучения (диаметр пучка до 150 мм, поэтому лазер работает в 2-х режимах. В первом – излучение накачки с энергией до 1,5 Дж <мягко> фокусируется на прямоугольную разборную кювету, резонатор образован глухим и выходным зеркалами, либо дифракционной решеткой, работающей в режиме скользящего падения, и выходным зеркалом, при этом ширина линии излучения равна  $\sim 0,1$  нм. Предусмотрена возможность двусторонней накачки для обеспечения большей однородности выходного излучения. Во втором режиме излучение накачки падает на кювету-конус. Резонатор образован глухим зеркалом и кварцевой пластиной, являющимися окнами кюветы-конуса. При энергии импульса накачки 10 Дж в режиме моноимпульса получено излучение с раствора красителя (кумарина 102 в этаноле с  $\lambda_{\text{ген}} = 475$  нм) с энергией  $\sim 2,5$  Дж.

Необходимость получения мощного узкополосного излучения красителей обусловили выбор схемы <МЖЛ-02> и <МЖЛ-03>: используется схема <задающий генератор> – <предусилитель> – <усилитель>. Излучение красителя с шириной полосы излучения  $\sim 0,01$  нм формируется в задающем генераторе, резонатор которого образован двумя дифракционными решетками и выходным зеркалом, одна из решеток обеспечивает ширину выходного излучения и работает в режиме скользящего падения, а вторая – в автоколлимационном режиме и обеспечивает долговременную стабильность выходного излучения. В каскаде усилителей использованы кюветы-призмы полного внутреннего отражения.

Конструктивно излучатель выполнен на монолитной плите, на которой крепятся все держатели оптических элементов. На передней панели излучателя имеется отверстие для выхода излучения, на задней панели – ручка плавной перестройки длины волны и окно счетчика длины волны. Излучение задающего генератора с нулевого порядка дифракционной решетки, работающей в режиме скользящего падения, подается с помощью зеркала на световод измерителя длины волны.

В лазере предусмотрена независимая прокачка растворов задающего генератора, предусилителя и усилителя. Блок прокачки скомпонован из трех емкостей по 1,5 л каждая, выполненных из нержавеющей стали с кварцевым покрытием. Система прокачки обеспечивает прокачку растворов через кюветы с расходом 12 мл/с. Предусмотрено подключение параллельно основному каналу прокачки системы регенерации активной среды.

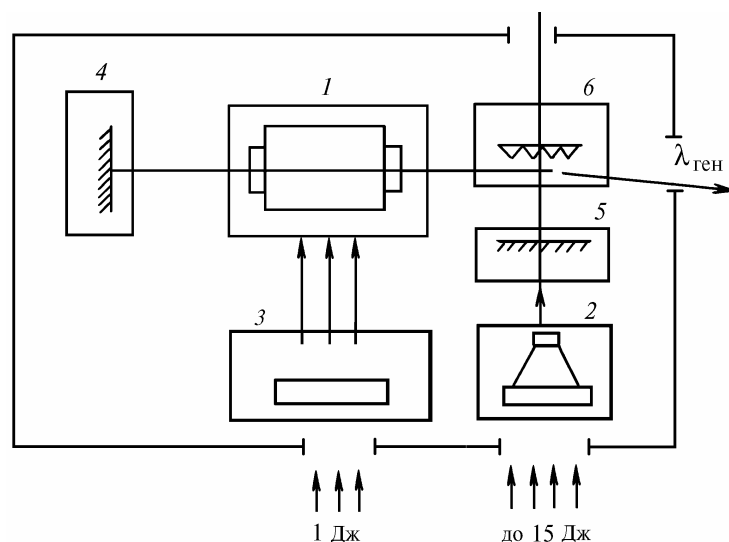


Рис. 1. Блок-схема мощного жидкостного лазера <МЖЛ-01>: 1 – кювета с раствором красителя; 2 – кювета-конус; 3 – цилиндрическая линза; 4, 5 – зеркала; 6 – дифракционная решетка

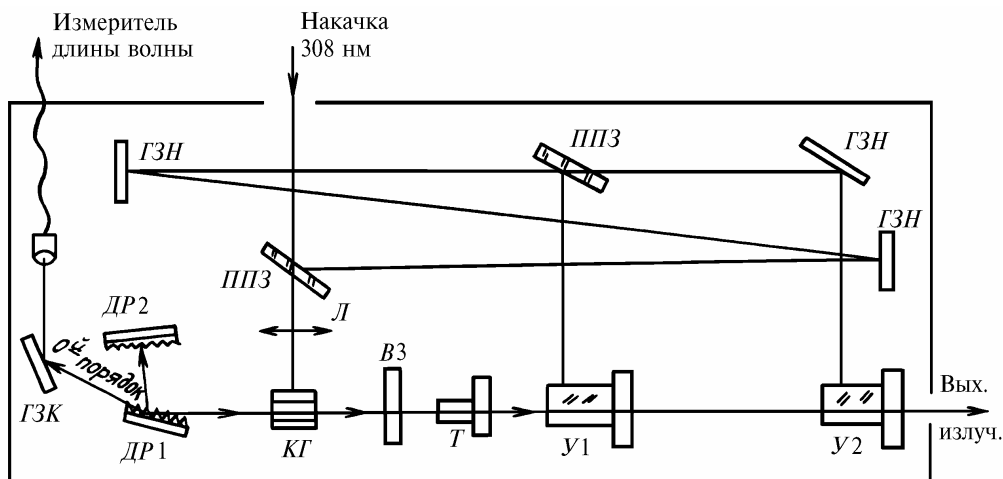


Рис. 2. Блок-схема мощного жидкостного лазера <МЖЛ-03>: ППЗ – полупрозрачные зеркала для транспортировки излучения накачки; ГЗН – глухие (100% отражения) зеркала для излучения накачки; ДР1, ДР2 – дифракционные решетки; ВЗ – выходное зеркало в резонаторе задающего генератора (коэффициент отражения на длине волны генерации красителя 20%); Л – цилиндрическая линза; КГ – кювета задающего генератора; Т – телескоп; У1, У2 – усилители; ГЗК – глухое зеркало для вывода излучения красителя

Созданный мощный перестраиваемый лазер <МЖЛ-03> может использоваться в качестве излучателя в экологических ДПР-лидарах дальнего действия. Ниже приводятся основные технические данные лазеров.

#### <МЖЛ-01>

Спектральный диапазон, нм	330–800
Ширина линии лазерного излучения, нм	
а) неселективный резонатор	15
б) селективный	0,1
Расходимость лазерного излучения, мрад	3
Частота повторения импульсов, Гц	10
Длительность импульсов, нс	40±200
Энергия импульсов выходного излучения, Дж	2±2,5
Средняя мощность выходного излучения, Вт	2
Габаритные размеры, мм <sup>3</sup>	
излучатель	400×400×350
блок прокачки	410×410×140
Масса не более, кг	
излучатель	20
система прокачки	8

#### <МЖЛ-03>

Диапазон генерации, нм	330–830
Ширина линии лазерного излучения, нм	0,01
Расходимость лазерного излучения, мрад	2,0
Частота повторения импульсов, Гц	до 20
Длительность импульсов, нс	50
Энергия импульса излучения, мДж	до 200
Максимальная пиковая плотность мощности выходного излучения, МВт/см <sup>2</sup>	30
Габаритные размеры:	
излучатель, мм <sup>3</sup>	1300×600×220
система прокачки	∅ 270×300
источник питания	320×350×120
Масса, кг	
излучатель	50
система прокачки	15
источник питания	6

1. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Молчанов Д.Н. и др. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. N 12. С. 1452–1459.
2. Тарасенко В.Ф., Панченко А.Н., Мельченко С.В. и др. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. N 12. С. 2450–2451.
3. Hung N.D., Brechignac P. // Appl. Opt. 1988. V. 27. P. 1906.
4. Кабанов М.В., Тринчук Б.Ф., Копылова Т.Н. и др. // Тр. 5 Международной конф., Байкал, 20–22 сентября 1989. Ч. 1. Новосибирск, 1990. С. 272–276.

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова  
при Томском госуниверситете

Поступила в редакцию  
21 декабря 1992 г.

T.N. Korylova, G.V. Mayer. **Development and Design of Powerful Excimer Laser-Pumped Dye Lasers.**

This paper deals with the problem on frequency conversion of a powerful excimer laser radiation using dye lasers. New lasing media capable of producing laser generation in the spectral region from 330 to 800 nm, and original constructions of the dye cells and optical arrangements of their excitation are developed. Some models of high-power lasers with a system for a laser active medium regeneration have been already tested.