

особенно в коротковолновой части спектра излучения импульсных ламп. Влияние осветителей на характеристики излучения импульсных источников накачки рассмотрено в работе [120].

Для уменьшения скорости фотодеградации красителя целесообразно использовать жидкостные или стеклянные светофильтры, поглощающие жесткое ультрафиолетовое излучение.

3.2 НАКАЧКА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Преимуществами лазеров на красителях с *лазерной накачкой* являются лучшие пространственно-угловые характеристики излучения, меньшая скорость фотодеградации красителя и возможность работы с твердотельными активными элементами, использование которых при ламповой накачке затруднительно.

Вопрос о величине коэффициента полезного действия системы в целом требует отдельного обсуждения. Наиболее подходящими по этому параметру источниками лазерной накачки для импульсных лазеров на красителях в заданном диапазоне энергий являются твердотельные *лазеры на кристаллах или стеклах*, активированных ионами неодима, или *электроразрядные ХеСl-лазеры*. В случае твердотельных лазеров в зависимости от выбранного красителя, излучающего в заданном диапазоне длин волн, для накачки может быть использовано либо основное излучение (длина волны около 1,06 мкм), либо одна из его гармоник. Рассмотрим эти варианты более подробно.

3.2.1. Твердотельные лазеры на кристаллах и стеклах, активированных ионами неодима

За последние десятилетия твердотельные лазеры прошли большой путь развития. Прогресс в их энергетических характеристиках был связан прежде всего с улучшением основных элементов лазеров, в особенности активных сред — их оптических и спектральных характеристик (квантового выхода люминесценции, неактивных потерь в среде), и созданием новых активных сред. В качестве последних могут выступать, например, кристаллы ГСГГ: Nd³⁺ [110] или кристаллы KGd(WO₄)₂: Nd³⁺. И те, и другие обладают хорошими энергетическими характеристиками при низких уровнях накачки. Для повышения КПД твердотельных лазеров разработаны новые отражающие, просветляющие и селективные покрытия.

Большое время жизни излучательных уровней иона неодима (сотни микросекунд) в активных элементах твердотельных лазеров, в отличие от молекул лазерных красителей (наносекунды), позволяет использовать для их накачки импульсные лампы, работающие в не столь жестких режимах, какие приходится использовать при ламповой накачке лазеров на красителях. Это дает возможность значительно увеличить электрическую энергию разряда и давление ксенона в лампе и обеспечить оптимальную температуру плазмы в разряде (около 10^4 К), при которой максимален КПД излучения лампы.

По оценкам авторов работы [157], потери энергии, определяющие КПД лазеров на неодимовом стекле распределяются следующим образом:

- потери в электрическом контуре (при правильном выборе параметров электрического контура и импульсных ламп эти потери могут составлять не более 15 %);

- потери на преобразование электрической энергии в световую (в зависимости от режима и геометрии лампы эти потери составляют от 15 % до 20 % в основном в стенках колбы лампы и на электродах);

- потери света в системе накачки (эти потери связаны с теми спектральными компонентами излучения накачки, которые либо не попадают в полосы поглощения активной среды, либо слабо поглощаются активатором и «теряются» в системе накачки при многократных проходах, составляют в балансе энергии от 45 % до 60 %;

- полезные потери на поглощение накачки ионами активатора (с учетом стоксовых потерь в активной среде доля полезно поглощаемой энергии обычно не превосходит 5 %).

Отсюда следует, что особенно большие резервы роста энергетики лазеров скрыты в той области, которая соответствует бесполезным потерям спектральных компонент накачки, не поглощаемых активной средой в системе накачки лазера. На реализацию этих резервов была направлена идея «светового котла» [158, 203]. Идеальный световой котел в общем случае характеризуется двумя основными условиями:

- 1) максимальным полезным использованием излучения накачки в пределах собственного спектра поглощения активной среды;

- 2) преобразованием в плазме без существенных потерь той части спектра накачки, которая непосредственно не поглощается активной средой, в спектральную область поглощения среды.

Для реализации первого условия необходима минимизация всех источников бесполезных потерь энергии накачки в лазере и такой выбор геометрии осветителя, при котором путь световых лучей в активной среде максимален. Большую роль, в частности, играет коэффициент отражения отражателя. Проведенный в [157] расчет показал, что умень-

шение коэффициента отражения со 100 % до (90÷95) % приводит к падению КПД лазера на стекле с неодимом на 40 % и более. Существенное значение имеет конфигурация осветителя и активного элемента.

Для реализации второго условия в работе [29] был успешно опробован метод нанесения на колбу лампы селективных диэлектрических покрытий, отражающих внутрь лампы излучение с длинами волн короче 0,4 мкм и длиннее 0,9 мкм и пропускающий весь спектр излучения между этими длинами волн в систему накачки (неодимовый лазер). Выигрыш в энергии генерации при этом составил 60 %.

Другим способом использовать коротковолновую часть спектра лампы является его преобразование с помощью люминесцирующих материалов, например тех же растворов красителей. В работе [75] сообщается об увеличении энергии генерации лазера на неодимовом стекле в 2 раза при использовании раствора родамина 6Ж в качестве люминесцентного преобразователя УФ части излучения лампы накачки в видимую область.

Реализация одного лишь первого из названных условий позволила авторам работы [157] изготовить лазер на неодимовом стекле с малым уровнем вредных потерь. Активный элемент был изготовлен из стекла марки ГЛС-22 в виде полого цилиндра с наружным диаметром 35 мм. Диаметр внутреннего отверстия элемента, в котором размещалась лампа, был равен 21 мм, длина элемента 480 мм. Оптические потери в элементе на длине волны генерации составляли $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$.

Специально разработанное диффузное покрытие на наружной поверхности активного элемента обеспечивало коэффициенты отражения $\approx 0,98$ в спектральном интервале 0,4 мкм ÷ 1,5 мкм. В качестве иммерсионной среды между лампой и внутренней стенкой активного элемента использовалась тяжелая вода D₂O. Накачка осуществлялась прямоугольным импульсом длительностью 1,1 мс, потери в электрическом контуре составляли 11 %. Максимальный достигнутый КПД составил 8 % при электрической энергии, запасенной в конденсаторах 6,1 кДж (КПД по вложенной в плазму энергии 9 %). При этом, по мнению авторов, имеющиеся резервы повышения КПД не были полностью реализованы. В частности, существенным фактором, ограничивающим КПД, являются наведенные накачкой оптические потери в активном элементе [78].

Этот пример показывает, что при достаточной проработке лазера на стекле с неодимом может быть получен КПД (6÷8) % в режиме свободной генерации на основной частоте излучения 1,06 мкм. Теоретическая оценка предельного КПД такого лазера без применения преобразователей излучения лампы накачки дает величину около 20 % [203]. Следует заметить, что для работы твердотельных лазеров

в режиме модуляции добротности, необходимым для накачки лазеров на красителях, приходится использовать более короткую, чем время жизни излучательного уровня ионов неодима ($0,25 \text{ мс} \div 0,3 \text{ мс}$) длительность импульса лампы накачки.

Переход от режима свободной генерации к режиму с модуляцией добротности, более подходящему для накачки лазеров на красителях, приводит к снижению КПД приблизительно вдвое, то есть, до величины ($3 \div 4$) %.

Дальнейшие потери КПД связаны с генерацией гармоник излучения. Данные работы [3] показывают, что КПД генерации второй гармоники (530 нм) излучения лазера на неодимовом стекле может составлять ($60 \div 80$) % от основной частоты. В работах [223, 290] КПД преобразования от 50 % до 90 % были достигнуты при генерации второй, третьей и четвертой гармоник интенсивного излучения на кристалле КДП и его аналогах.

Наконец, КПД преобразования излучения лазерной накачки в излучение лазеров на красителях также составляет несколько десятков процентов, в зависимости от используемой активной среды и режима работы лазера. Для нашей оценки можно принять часто встречающуюся в литературе величину 50 % (см., например, [52]).

Суммируя перечисленные потери, можно придти к заключению, что КПД лазеров на красителях с накачкой излучением гармоник лазеров на неодимовом стекле может быть близок к их КПД при ламповой накачке.

Недостатком лазеров на неодимовом стекле является малая частота повторения импульсов излучения ввиду трудности теплосъема с активного элемента, ограниченного низкой теплопроводностью стекла. В этом случае могут быть использованы лазеры на активированных ионами неодима кристаллах, например, иттрий-алюминиевом гранате, которые позволяют получать достаточно большие энергии излучения [13].

В работе [138] описаны импульсные лазеры иттрий-алюминиевом гранате с неодимом, имеющие КПД генерации излучения второй гармоники равный 1 %. Авторы работы [88] сообщают о лазере на кристалле КГВ с неодимом. Размеры пластины кристалла $90 \times 37 \times 8 \text{ мм}^3$. В режиме свободной генерации лазер позволяет получать энергию импульса излучения 60 Дж при частоте следования импульсов 2 Гц и дифференциальном КПД 2,5 %.

3.2.2. Газоразрядные ХеСl-лазеры

Экимерные лазеры являются наиболее мощными источниками когерентного излучения в УФ области спектра. Энергия генерации

ношению к запасенной в конденсаторах энергии может достигать 6,5 %.

Преимуществом накачки лазеров на красителях излучением ХеСl-лазеров перед накачкой импульсными лампами является также меньшая длительность импульса накачки (десятки или сотни нс [110]), позволяющая избежать возникновения во время импульса термооптических и акустооптических искажений в активной среде лазера на красителе. Кроме того, при такой накачке отсутствует жесткое УФ излучение, особенно эффективно разрушающее лазерные красители.

Этого преимущества лишен другой эксимерный лазер, работающий на молекулах КгF, поэтому он редко используется для накачки лазеров на красителях. По сообщению авторов работы [184], КПД этого лазера, реализованный экспериментально, достигает 9 %.

Более подходящей длиной волны излучения (430,5 нм) для накачки лазеров на красителях видимого диапазона спектра обладает Хе-Sr-H₂-лазер, теоретически возможный КПД которого, по мнению авторов работы [126], составляет 3 %. Мы не располагаем сведениями, реализована ли такая возможность на практике.

Таким образом, можно сделать вывод, что при использовании энергии газового разряда в виде организованного излучения ХеСl-лазеров для накачки лазеров на красителях имеется ряд преимуществ перед использованием теплового излучения газового разряда импульсных ламп. Единственным, но немаловажным преимуществом накачки импульсной лампой являются относительная простота и компактность устройства.

ГЛАВА 4. ТЕХНИКА ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ НА КРАСИТЕЛЯХ С ЭНЕРГИЕЙ 1-3 ДЖ

4.1 ЛАЗЕРЫ С АКТИВНЫМИ СРЕДАМИ НА ЖИДКИХ РАСТВОРАХ

Основным преимуществом лазеров с активными средами на жидких растворах красителей является возможность использования системы циркуляции активной среды. Такая возможность позволяет решить главные проблемы, стоящие перед твердотельными лазерами на красителях. В первую очередь, это проблема теплосъема с активного элемента в режиме повторяющихся импульсов излучения. Роль теплоносителя здесь может выполнять сам раствор красителя. Во-вторых, это проблема фотодеградации красителя.

Система циркуляции позволяет увеличить ресурс работы лазера путем увеличения объема раствора красителя, а также путем его очистки от продуктов фотораспада, накопление которых приводит к снижению эффективности генерации (см. главу 6). В случае необходимости, возможно восполнение разложившегося красителя из специального депо, устройство которого может быть различным, в зависимости от вида лазера и условий его работы.

Кроме того, далеко не все лазерные красители хорошо растворяются в твердых матрицах. Жидкие растворители предоставляют здесь более широкий выбор. Хорошее оптическое качество твердотельного лазерного элемента и его поверхностей также часто представляет определенную проблему, в то время как стеклянные или кварцевые окна кюветы с раствором красителя легко могут быть изготовлены с высоким оптическим качеством, а оптическая однородность самого раствора может быть восстановлена после каждого импульса с помощью правильно организованной циркуляции.

Наконец, в случае ламповой накачки проблемы использования твердотельных лазерных элементов на красителях вырастают в такой степени, что в этом варианте используются практически только жидкие растворы лазерных красителей. В то же время в большинстве

работ с лазерной накачкой исследуются твердотельные лазеры на красителях.

4.2 ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ

После основополагающих работ конца 60-х годов прошлого столетия по лазерам на красителях с ламповой накачкой [153, 239, 240, 295, 300, 301] это направление привлекло к себе внимание исследователей. Лазеры на красителях были тогда единственным типом лазеров, позволяющих осуществлять перестройку длины волны излучения в широком диапазоне спектра в УФ, видимой и ближней ИК области спектра [153], а ламповая накачка была единственным способом, позволявшим рассчитывать на получение больших энергий в импульсе излучения.

Пик работ по лазерам на красителях с ламповой накачкой пришелся на 70-е и 80-е годы прошлого столетия. С появлением новых неорганических кристаллов, позволяющих получать перестраиваемое по длине волны излучение, интерес к мощным лазерам на красителях с ламповой накачкой стал постепенно спадать.

Энергетические и временные характеристики жидкостных лазеров на красителях с ламповой накачкой

Одна из наиболее удачных ранних конструкций лазера на красителях с ламповой накачкой, описана в работе [55]. В качестве источника накачки использована серийная коаксиальная лампа марки *Candela CL-625*, установленная последовательно с коаксиальным конденсатором емкостью 1,5 мкФ фирмы *Hi Voltage Components* внутри алюминиевого цилиндрического стакана. Таким образом, получается полностью коаксиальная конструкция. Детали оптического резонатора устанавливаются непосредственно на корпусе лампы перед монтажом ее на конденсаторе. Для заполнения без пузырей канала лампы диаметром 18 мм расход раствора красителя должен составлять около 4 л/мин. Очистка раствора производится с помощью фильтра, установленного между насосом и импульсной лампой и позволяющего удалять из раствора все рассеивающие частицы размером более 2 мкм.

Время нарастания импульса лампы составляет 400 нс, длительность — 2 мкс. Время нарастания лазерного импульса равно 50 нс при

длительности около 0,6 мкс. Для раствора родамина 6G выходная энергия составляет 6,82 Дж при энергии накачки 600 Дж, что соответствует КПД преобразования 1,1 %.

Этот результат получен при концентрации красителя в растворе $1,5 \cdot 10^{-4}$ М и концентрации триплетного тушителя, циклооктатетраена, $2 \cdot 10^{-4}$ М с использованием описанного выше фильтра. Коэффициент отражения выходного зеркала равен 29 %. Соответствующие характеристики в случае использования 7-диэтиламин-4-метилкумарина таковы: максимальная энергия выходного импульса 4,18 Дж, КПД преобразования 0,7 %, концентрация красителя $2,5 \cdot 10^{-4}$ М, коэффициент отражения выходного зеркала 26 %. Фильтрация раствора давала увеличение энергии генерации на 70 %, добавка циклооктатетраена – еще на 60 %.

Лазер на этанольном растворе родамина 6Ж с энергией генерации 12 Дж при КПД 1,1 % описан в работе [99]. Длительность импульса накачки на половине высоты равна $3 \div 4$ мкс. При использовании красителя 4-метилумбеллиферон получена энергия генерации 12,5 Дж при КПД 1,25 % и длине волны генерации 455 нм.

Конструкции лазеров на красителях с ламповой накачкой описаны в ряде работ 1970-х годов [14, 17, 24, 83, 165, 170, 194, 209, 210, 218, 264, 265, 293]. Наиболее характерными параметрами излучения лазеров этих конструкций являются: энергия генерации от 1 Дж до 10 Дж при КПД от 0,1 % до 1 % и длительности импульса генерации от 1 мкс до 100 мкс. Несмотря на приемлемые параметры, эти лазеры, в отличие от маломощных непрерывных или импульсных лазеров на красителях, не получили широкого распространения.

Причина этого в том, что всякое устройство может быть практически использовано для каких-либо приложений (то есть в качестве прибора) лишь в том случае, если его обслуживание не требует слишком большого расхода рабочего времени и квалификации обслуживающего персонала, и если его выходные параметры стабильны в течение длительного времени.

На решение этих задач были направлены усилия авторов работы [130]. Ими были изготовлены и испытаны три различные конструкции лазеров. Их характеристики при использовании в качестве активной среды раствора родамина 6Ж в изопропанолe приведены в табл. 8.

Лазер Л1 отличается максимальной простотой геометрии. Источником накачки в нем служат две стандартные импульсные лампы ИФП-1200 (см. главу 3, табл. 6 и 7), помещенные вместе с цилиндрической кюветой в осветитель с конфигурацией плотной упаковки. Лазер имеет малогабаритную систему питания.

Характеристики лазеров на красителях

Параметр	Л1	Л2	Л3
Тип лампы	ИФП-1200-2	ИФП-5000	Коаксиальная
Количество ламп	2	8	1
Максимальная энергия накачки, кДж	0,5	10	3
Длительность импульса накачки по уровню 0,5 от максимума, мкс	13	50	4
Максимальная энергия генерации, Дж	1	2,5	8
Длительность импульса генерации по уровню 0,5 от максимума, мкс	10	8	4
КПД генерации, %	0,20	0,025	0,27
Размеры кюветы, мм	Ø7×120	4×80×250	Ø8×320
Объем кюветы, см ³	4,6	80	16
Коэффициент отражения выходного зеркала, %	47	40	4
Емкость конденсаторов, мкФ	6	800	8
Напряжение на конденсаторах, кВ	13	5	27
Материал отражателя	Алюминий	Алюминий	Оксид магния

Лазер Л2 имеет плоскую геометрию и большой объем кюветы с раствором красителя. Для накачки здесь также использованы стандартные импульсные лампы. Низкий КПД этого лазера обусловлен большой длительностью импульса накачки (длительность импульса генерации много короче). Кроме того, плоская геометрия боковых стенок кюветы способствует увеличению амплитуды их колебаний под действие импульса накачки, сопровождающихся акустооптическими искажениями в лазерной жидкости.

В лазере ЛЗ источником накачки служит откачиваемый коаксиальный разрядный промежуток между двумя кварцевыми трубками, окруженный снаружи спрессованным порошком оксида магния. Малая индуктивность промежутка и схемы питания и небольшой объем внутри отражателя позволяют достичь высокой плотности мощности накачки и, следовательно, больших значений энергии генерации при неплохом КПД. Угловая расходимость излучения лазера составляет около 10^{-2} рад.

Давление ксенона в лампах накачки лазеров Л1 и Л2 было равно 300 Торр, а в случае лазера ЛЗ изменялось в пределах от 15 Торр до 50 Торр. При повышении давления в этих пределах энергия генерации возрастала примерно на 10 %.

Резонаторы всех лазеров образованы плоскими диэлектрическими зеркалами, причем в лазерах Л1 и Л3 зеркала могут служить одновременно и окнами кюветы. Одно из зеркал резонатора — «глухое», а оптимальные коэффициенты отражения выходного зеркала приведены в табл. 8. Используя выносные зеркала и варьируя их коэффициент отражения, можно управлять пространственно-угловыми характеристиками лазерного излучения за счет снижения энергии генерации.

Во всех трех типах лазеров растворы красителей находятся в кварцевой или стеклянной кювете. Для лазера Л1 оптимальная концентрация раствора родамина 6Ж составляет 10^{-4} М, а для лазера ЛЗ — $(2\div 4) \cdot 10^{-4}$ М. В случае кварцевой кюветы между ней и лампами накачки помещается жидкостный фильтр, служащий как для исключения ультрафиолетовой части спектра излучения накачки, так и для охлаждения системы между импульсами. В случае стеклянной кюветы используется дистиллированная вода, служащая только для охлаждения. В качестве жидкостных фильтров используются водные растворы медного купороса, нитрата натрия, железосинеродистого калия и др. После каждого импульса раствор красителя и жидкостный фильтр прокачиваются в замкнутых контурах индивидуальными системами прокачки.

Основными элементами каждой системы прокачки являются сильфонный насос производительностью 0,5 л/мин, приводимый в действие электродвигателем РД-09 (редукция 1/137), система обратных клапанов и резервуар объемом 1000 см³. Для исключения попадания микроскопических примесей растворы прокачивались через фильтр из пористой нержавеющей стали с размером пор около 4 мкм. Как в системе прокачки, так и в конструкциях лазеров используются только материалы, не вносящие загрязнений в растворы — нержавеющая сталь, тефлон, кварц, стекло и силиконовая резина.

Применение системы прокачки позволяет стабильно получать максимальную энергию генерации при частоте повторения 1 импульс

за 5 минут, но позволяет работать и с частотой 1 импульс в 15 секунд ценой некоторого уменьшения энергии генерации и увеличения угловой расходимости излучения.

По мнению авторов, стабильная долговременная (несколько тысяч импульсов) работа без смены раствора в случае родамина 6Ж обеспечивается выполнением следующих основных условий:

1) использование стеклянной кюветы для фильтрации части УФ излучения накачки;

2) применение в качестве растворителя для родамина 6Ж изопропилового спирта (данные о преимуществе изопропанола перед этанолом другими авторами не подтверждаются);

3) специальная очистка самого родамина 6Ж.

Авторы приводят использованную ими технологию этой очистки. Контрольные опыты показали, что генерационные характеристики растворов очищенного по этой технологии красителя, как минимум, не уступают генерационным характеристикам растворов красителя *Rhodamin 6G* фирмы *Eastman Kodak*.

Приводятся также данные о зависимостях энергии генерации от различных параметров и от числа импульсов срабатывания с использованием различных светофильтров. Показано, что применение фильтров, поглощающих УФ часть излучения накачки, более чем на порядок увеличивает время жизни родамина 6Ж в изопропаноле. При этом энергия генерации (в первом импульсе) практически та же, что и при возбуждении полным светом импульсных ламп.

Разработанные лазеры в течение длительного времени использовались в различных экспериментах [56, 132], в частности, при поиске новых лазерных красителей. В результате этих исследований был найден новый большой класс эффективных лазерных красителей — керамидонинов [56].

Другая группа авторов, разрабатывающая мощные лазеры на красителях с ламповой накачкой, в 1980 году сообщила о новом классе красителей — производных 2-иминобензопирана, излучающих в диапазоне 490 нм ÷ 530 нм, отличающихся высокой фотоустойчивостью и по эффективности не уступающих родамину 6Ж [96]. В работе детально описана конструкция разработанной авторами коаксиальной лампы-кюветы и приводятся характеристики разрядного контура, а также структурные формулы красителей. Кювета (диаметр 10,5 мм, длина облучаемой области 280 мм) располагалась в плоском резонаторе (диэлектрическое зеркало с коэффициентом отражения 98 % и стеклянная пластина).

На лучшем по эффективности красителе получена энергия генерации 10,5 Дж при КПД 1,2 % и длине волны излучения 531 нм. В тех

же условиях на растворе родамина 6Ж получена энергия генерации 9,8 Дж при длине волны излучения 588 нм.

Раствор другого красителя обладал меньшим КПД (0,6 %), но имел более высокую фотостабильность. Энергия генерации этого красителя снижалась на 30 % после дозы облучения 120 кДж на литр раствора без каких-либо мер по фильтрации УФ части излучения накачки. В тех же условиях фотостабильность раствора родамина 6Ж была примерно на порядок величины ниже.

В работе [100] той же группы авторов представлены параметры разрядного контура, энергия накачки $E_{\text{нак}}$, энергия $E_{\text{ген}}$ и длина волны $\lambda_{\text{ген}}$ генерации лазеров с различными системами возбуждения (табл. 9).

Авторы отмечают, что энергия генерации лазера на родамине 6Ж была практически постоянной при изменении концентрации раствора красителя от 10^{-5} М до $2 \cdot 10^{-4}$ М. Разработанная для этого случая система накачки, по мнению авторов, может быть использована при разработке лазера с лампой-кюветой, содержащей два одинаковых последовательно расположенных коаксиальных разрядных промежутка, общую внутреннюю кварцевую трубу и два одинаковых разрядных контура [179]. Авторы считают, что в такой системе можно получить энергию генерации около 100 Дж при энергии накачки около 10 кДж.

Лазер с такой энергией генерации, но с меньшим КПД был разработан ранее другой группой авторов [27]. В работе детально описана конструкция коаксиальной лампы. Концентрация спиртового раствора родамина 6Ж в кювете подбиралась такой, чтобы его коэффициент поглощения на длине волны 530 нм составлял 6 см^{-1} . Резонатор был образован одним из торцов кюветы и зеркалом с диэлектрическим покрытием с коэффициентом отражения на длине волны 590 нм равным 99,5 %. Выходная энергия генерации составляет 110 Дж, что соответствует пиковой мощности излучения 5,5 МВт. КПД генерации составил 0,31 %, длина волны генерируемого излучения 590 нм, ширина линии генерации 20 нм. Длительность импульса накачки по уровню 0,5 от максимума составляет 50 мкс, длительность импульса генерации – 20 мкс.

Приведенные примеры показывают, что в режиме редко повторяющихся импульсов получение энергии генерации от 1 Дж до 3 Дж в жидкостных лазерах на красителях с ламповой накачкой может быть достигнуто достаточно простыми средствами.

В заключение этого раздела остановимся на работах [274, 275, 297], авторам которых удалось получить импульсы генерации лазеров на красителях длительностью свыше ста микросекунд.

В работе [297] длительность импульса накачки трапециевидной формы составляла на половине высоты 550 мкс. Для исключения на-

Характеристики активных веществ

Параметры контура		Характеристики активного вещества		Энергетические параметры		
Емкость, мкФ	Индуктивность, мкГн	Краситель	$\lambda_{\text{ген}}, \text{нм}$	$E_{\text{нак}}, \text{Дж}$	$E_{\text{ген}}, \text{Дж}$	КПД, %
1	0,2	Родамин 6Ж	590	200	2,6	1,3
1	0,2	Производное бензопирена	620	200	1,35	0,67
1	0,2	Оксазин 17	665	162	0,95	0,59
1	0,85	Родамин 6Ж	590	40	0,19	0,50
1	0,85	Иминокумарин	530	98	0,78	0,79
1	0,85	4-метилумбеллиферон	460	162	0,54	0,34
3	0,16	Родамин 6Ж	590	384	3,14	0,82
3	0,16	Иминокумарин	530	600	2,4	0,40
3	0,16	4-метилумбеллиферон	460	938	11,0	1,17
12	0,55	Родамин 6Ж	590	1014	10,6	1,05
12	0,55	Оксазин 17	590	600	4,8	0,8
2×3	0,16	4-метилумбеллиферон	460	1876	24,0	1,28
2×1	0,2	Родамин 6Ж	590	400	4,0	1,0
2×12	0,55	Родамин 6Ж	590	2000	19,5	0,97
24	0,3	Родамин 6Ж	590	3675	40,6	1,1

копления молекул лазерного красителя (родамин 6Ж) в триплетном состоянии использовалось насыщение раствора молекулярным кислородом, который, как известно, является эффективным тушителем триплетных состояний молекул красителей. Это позволило получить длительность импульсов генерации равную 140 мкс.

Авторы работ [274, 275] использовали в качестве тушителей триплетных состояний родамина 6Ж циклооктатетраен и циклогептатриен. В работе [274] максимальная длительность импульса генерации составляла 600 мкс при длительности импульса накачки на половине высоты равной 650 мкс. В течение импульса наблюдался дрейф длины волны генерации в сторону более коротких длин волн. В этом эксперименте использовался спиртовой раствор родамина 6Ж с концентрацией $5 \cdot 10^{-5}$ М. Концентрация циклооктатетраена составляла $5 \cdot 10^{-3}$ М. В качестве светофильтра, поглощающего УФ излучение лампы накачки, использовался водный раствор K_2CrO_4 .

На основании полученных результатов авторы поставили под сомнение влияние термооптических искажений на эффективность генерации лазеров на красителях с ламповой накачкой. Однако КПД генерации в их экспериментах составлял всего несколько сотых долей процента, а пространственно-угловые характеристики излучения не исследовались.

Пространственно-угловые характеристики излучения жидкостных лазеров на красителях с ламповой накачкой

Большая угловая расходимость излучения лазеров на красителях с ламповой накачкой сильно ограничивает области их применения, поэтому с самого начала исследователи пытались улучшить этот параметр. Для этого необходимо выявить основные причины его ухудшения [82, 189, 296].

Авторы работы [18] обсуждают два механизма образования неоднородностей в кюветах с растворами красителей под действием импульса накачки. Один из них обусловлен неравномерным тепловыделением в результате поглощения излучения лампы накачки в растворе красителя. При этом в жидкости образуются градиенты температуры и возмущения плотности, распространяющиеся в виде термоакустических волн, что приводит к изменению начального показателя преломления жидкости. Другой механизм образования неоднородностей связан с возникновением и распространением в жидкости акустических волн, формирующихся при деформации стенки кюветы в процессе электрического разряда в лампе накачки.

В работе [31] методами скоростной киносъемки голограмм, теневых и интерференционных картин, а также акустическим методом, исследована динамика развития оптических неоднородностей в жидкой активной среде лазера на красителе с коаксиальной лампой накачки с целью реализации двухимпульсного режима его работы без прокачки активной среды, который впоследствии был осуществлен [189]. Лазер на красителе представлял собой кювету с этанольным раствором радмина 6Ж длиной 750 мм и внутренним диаметром 60 мм, помещенную в коаксиальную лампу накачки [27]. Длительность светового импульса накачки составляла 20 мкс.

Скоростная киносъемка теневых картин показала, что сразу после начала светового импульса накачки от стенок кюветы начинает распространяться акустическая волна. Ее скорость не зависит от энергии импульса накачки и равна скорости звука в этаноле (около 1,2 км/с). При этом изменение показателя преломления в среде за фронтом акустической волны на несколько порядков превышает изменения, обусловленные неоднородностью тепловыделения в растворе красителя.

Этот результат подтверждает сделанное нами ранее заключение о необходимости короткой длительности импульса накачки, при которой акустическая волна проходит в активной среде расстояние много меньшее поперечного размера активной зоны.

Еще одна причина большой угловой расходимости излучения лазеров на красителях с ламповой накачкой – френелевское отражение на границе между раствором красителя и стенкой кюветы [186, 282]. Она не может быть устранена уменьшением длительности импульса накачки. Одним из путей уменьшения влияния этого фактора является подбор состава растворителя, показатель преломления которого близок к показателю преломления материала стенки кюветы.

В работах [173, 174] проведен теоретический анализ пространственно-угловых характеристик лазеров на красителях с накачкой коаксиальными импульсными лампами. Для этого случая применимой оказалась модель аксиально-симметричной неоднородной активной среды.

Результаты анализа показали, что угловая расходимость лазерного излучения в общем случае определяется одновременным существованием в резонаторе двух видов лучевых траекторий: рефракционных, обусловленных аксиальной неоднородностью активной среды вследствие термоискажений, и траекторий с френелевским отражением на стенках кюветы.

В свою очередь, каждая из них может быть образована меридиональными лучами, лежащими в плоскости, содержащей геометрическую ось кюветы, и сагитальными лучами, образующими винтовые линии. При

этом все виды траекторий нестационарны: они изменяются в течение импульса накачки, а также взаимно влияют друг на друга, что в некоторых случаях может приводить к конкуренции мод.

Эволюция пространственно-угловых характеристик может протекать двумя качественно различными путями в зависимости от характера нестационарной тепловой линзы, возникающей в активном элементе вследствие поглощения энергии накачки. Положительная тепловая линза образуется при относительно высоких концентрациях молекул лазерного красителя, когда плотность энергии объемного тепловыделения максимальна вблизи цилиндрической поверхности кюветы и монотонно убывает к ее центру.

Такие условия обычно реализуются, если выполняется неравенство $\alpha R > n_0$, где R — радиус кюветы, α и n_0 соответственно коэффициент поглощения и показатель преломления раствора. Отрицательная тепловая линза обычно реализуется в противоположном случае.

Эффективные лазеры на красителях, как правило, работают в условиях положительной нестационарной тепловой линзы, когда заведомо выполняется условие $\alpha R > n_0$. Анализ характеристик такого резонатора, произведенный известным методом лучевых матриц [11] для параксиальных лучей меридионального типа показал, что его свойства могут быть описаны эквивалентным пустым сферическим резонатором, радиусы кривизны зеркал и длина которого изменяются в течение импульса накачки. При этом растущие со временем термооптические искажения могут приводить к неустойчивому состоянию резонатора.

В работе [174] приводятся условия, определяющие границы устойчивости такого резонатора и предельную угловую расходимость излучения. Показано, что в этом случае большую роль может играть френелевское отражение от стенок кюветы, даже при небольшой разнице в показателях преломления раствора красителя и стенок кюветы.

В случае отрицательной тепловой линзы, которая образуется при низких концентрациях раствора красителя, угловая расходимость лазерного излучения, обусловленная рефракционными лучевыми траекториями, подобна расходимости плоского или слабонеустойчивого нестационарного резонатора. Приводятся результаты численного расчета эволюции угловой расходимости для различных концентраций красителя при нескольких уровнях накачки.

Для экспериментальной проверки результатов проведенного ими теоретического анализа авторы работы [174] провели исследование пространственно-угловых характеристик лазеров на красителях с коаксиальной лампой накачки с различными конструкциями кюветы и различными концентрациями лазерного красителя.

Излучателем в этих экспериментах служила разборная лампа-кювета, конструкция которой описана в работе [96], с плоскими внешними зеркалами ($R_1 = 100\%$, $R_2 = 16\%$). Электрическая схема питания лампы включала в себя накопительный конденсатор емкостью 3 мкФ и обеспечивала длительность световых импульсов до 4,5 мкс при электрической энергии разряда до 600 Дж. Минимальная длина резонатора составляла 475 мм.

Эксперименты проводились с тремя типами цилиндрических кювет, изготовленных из стандартных кварцевых трубок с внутренним диаметром 11,6 мм:

А — трубки с естественно полированными внутренними и внешними стенками;

Б — трубки с матированными внутренними стенками;

В — трубка с прозрачным винтовым выступом, нанесенным на внутреннюю поверхность кюветы.

Два последних типа применялись для уменьшения добротности замкнутых лучевых траекторий с участием френелевского отражения на стенках кюветы. Размеры винтового выступа в третьем случае выбирались из условия подавления генерации меридиональных лучей при их однократном френелевском отражении за один проход резонатора.

Эксперименты проводились со спиртовыми растворами родамина 6Ж в диапазоне концентраций от $2 \cdot 10^{-3}$ М до $6 \cdot 10^{-6}$ М при различных уровнях накачки.

В работе представлены хронограммы пространственно-угловых характеристик излучения лазера в дальней зоне генерации для всех трех типов кювет. Их анализ показал хорошее соответствие между выводами теории и экспериментом.

Основные результаты, характеризующие пространственно-угловые и энергетические характеристики излучения исследованных систем, представлены в табл. 10, где приведены полная энергия генерации E , угловая расходимость излучения 2θ , измеренная по уровню $0,5E$, а также яркость B , полученные при энергии накачки 600 Дж с различными концентрациями красителя C .

Из табл. 10 видно, что использование кюветы с профилированными стенками позволяет увеличить яркость излучения в несколько раз по сравнению с обычной гладкостенной кюветой. Яркость излучения в случае кюветы с матированными стенками занимает промежуточное положение. Во всех случаях максимальная яркость излучения достигается при меньших концентрациях лазерного красителя, чем концентрации, при которых достигается максимальная энергия.

Авторы работы [174] делают следующие выводы:

Пространственно-угловые и энергетические характеристики излучения лазера в дальней зоне генерации для различных типов кювет

С, моль/л	Гладкостенная кювета			Матированная кювета			Профилированная кювета		
	Е, Дж	2θ, мрад	В, Гвт/ см ² ·ср	Е, Дж	2θ, мрад	В, Гвт/ см ² ·ср	Е, Дж	2θ, мрад	В, Гвт/ см ² ·ср
10 ⁻⁵	1,55	10	5,2	1,7	6,8	12,4	1,4	5,1	19,7
2,5·10 ⁻⁵	2,75	16	3,6	2,5	9,8	8,8	2,4	6,2	21,4
5,0·10 ⁻⁵	3,7	26	1,9	2,8	12,0	6,6	3,6	8,7	16,1
10 ⁻⁴	4,9	37	1,2	4	15,8	4,6	4,8	12,2	11,3
2,0·10 ⁻⁴	4,8	50	0,7	3,35	24,0	2,0	4,8	33,0	1,4
5,0·10 ⁻⁴	3,2	58	0,3	2,45	41,0	0,5	4,1	46,0	0,7
10 ⁻³	2,3	60	0,2	1,9	45,0	0,3	2,1	47,0	0,3

– пространственно-угловые характеристики лазеров на красителях с накачкой коаксиальными импульсными лампами в основном определяются одновременным существованием и конкуренцией рефракционных лучевых траекторий, обусловленных термооптическими искажениями активной среды, и замкнутых траекторий с френелевским отражением от стенок кюветы. Эволюция угловой расходимости и модового состава лазерного излучения при этом связана с нестационарным характером этих искажений;

– при разработке эффективных лазеров на красителях с ламповой накачкой, обладающих высокой направленностью излучения, необходимо обеспечить, с одной стороны, подавление генерации на замкнутых лучевых траекториях с френелевским отражением от стенок кюветы, а с другой – минимально возможные термооптические искажения активной среды. Такие условия можно реализовать в кювете с профилированными стенками при невысокой концентрации красителя. При этом с целью обеспечения достаточно высокой эффективности лазера необходимо увеличивать длину активного элемента.

В работе [98] изучено влияние растворителя и концентрации красителя на пространственно-угловое распределение излучения лазеров при ламповой накачке. Исследовались этанольные растворы красителя кумарин 120, водные растворы его комплекса включения с β-циклодекстрином, а также растворы иминокумарина G-283, родамина бЖ и других красителей в этаноле и смесях воды с этиленгликолем.

Авторы пришли к выводу, что при концентрациях красителя, при которых выполняется условие $\alpha R \approx n_0$ (см. выше), пространственно-угловое распределение излучения слабо зависит от вида растворителя, так как в этом случае обеспечивается достаточно однородное по сечению кюветы тепловыделение. Повышение концентрации красителя приводит к увеличению яркости излучения только в случае водных растворов и в меньшей степени в случае смесевых (вода — этиленгликоль).

При переходе к режиму с более высокой частотой повторения термооптические искажения в жидкости накладывают дополнительные ограничения на энергетические и пространственно-угловые характеристики жидкостных лазеров.

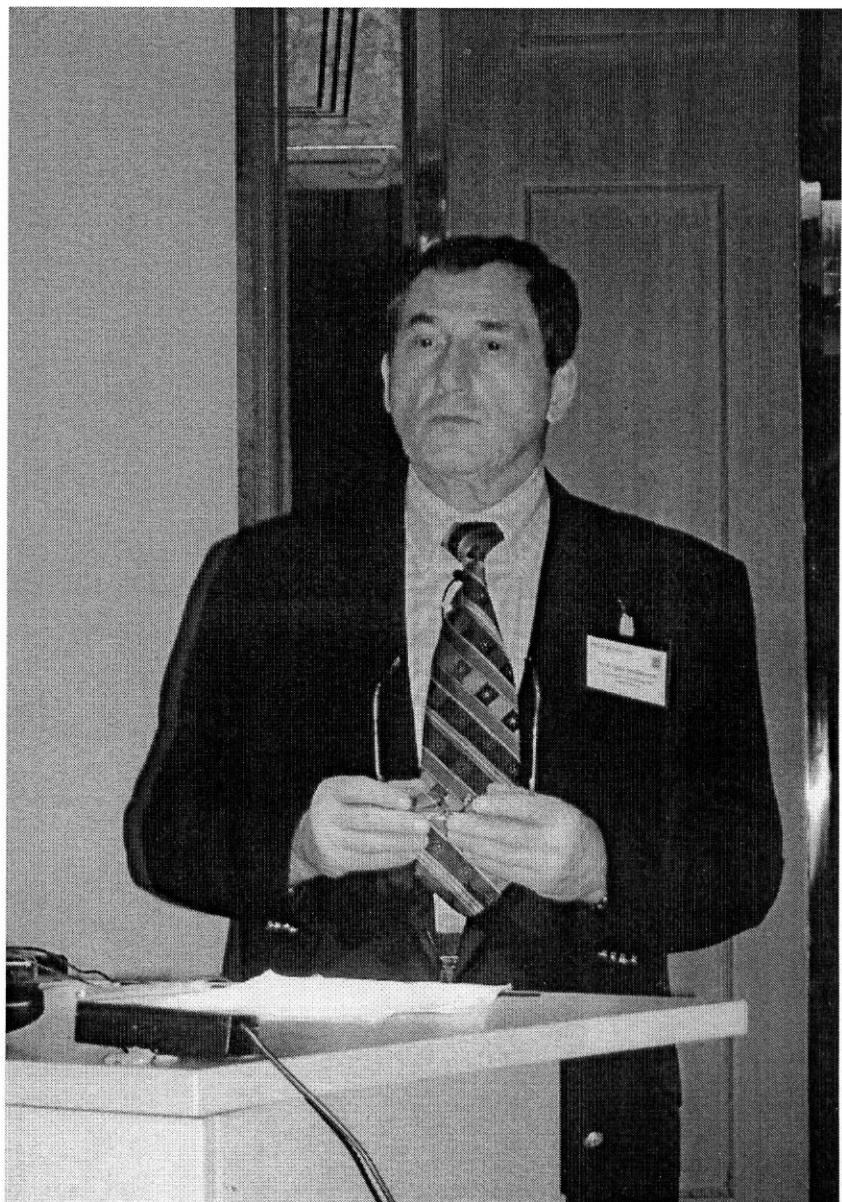
В работе [97] измерялись основные генерационные характеристики лазера на красителях с ламповой накачкой, работающего как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов до 10 Гц. Максимальная электрическая энергия накачки составляла 200 Дж.

Исследования ряда производных кумарина показали, что наилучшими характеристиками обладают водные растворы комплексов включения кумарина 120 с β -циклодекстрином (средняя длина волны генерации около 447 нм). Эффективность генерации и фотостабильность этих растворов не уступают соответствующим величинам, характеризующим растворы кумарина 120 в этаноле при тех же концентрациях. При этом в отличие от этанольных растворов, увеличение концентрации водных растворов практически не приводит к увеличению угловой расходимости лазерного излучения.

Это позволило реализовать эффективную работу лазера с водным раствором комплекса включения кумарина 120 с β -циклодекстрином в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 10 Гц. В этом режиме при энергии разряда 128 Дж была получена средняя мощность излучения более 1 Вт, а угловая расходимость излучения не превышала 3 мрад без применения дополнительных селекторов.

4.3 ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ С ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

Для лазерной накачки как жидкостных, так и твердотельных лазеров на красителях может быть использована как продольная, так и поперечная схема накачки. В чисто продольной схеме выходное диэлектрическое зеркало лазера накачки изготавливается с оптимальным коэффициентом отражения на длине волны излучения накачки



Профессор Игорь Касьянович Мешковский

и близким к 100 % коэффициентом отражения в области генерации лазера на красителе [153]. Выходное зеркало лазера на красителе может быть также диэлектрическим со своей спектральной характеристикой коэффициента отражения.

На практике, однако, чаще применяется более простой вариант, когда выходным зеркалом служит стеклянная пластина. Более простой модификацией продольного способа накачки является так называемая квазипродольная накачка, при которой между осями резонаторов лазера накачки и лазера на красителях имеется небольшой угол, минимально допустимый конструкцией резонаторов. В этом случае, как и при поперечной накачке, имеется возможность обойтись без системы специальных зеркал, которые должны выдерживать мощное излучение возбуждающего лазера [153].

Продольный и квазипродольный варианты накачки близки по эффективности и предпочтительнее поперечного варианта [153], особенно в случае твердотельных лазеров на красителях и в случае, если излучение накачки неполяризовано. В случае поляризованного излучения накачки целесообразно расположить кювету под углом (например, углом Брюстера) к направлению накачки. При этом из-за дисперсии раствора красителя ось резонатора лазера на красителе располагается под углом к оси резонатора лазера накачки, что позволяет естественным образом использовать квазипродольную схему накачки [153]. В случае накачки излучением эксимерных лазеров чаще применяется поперечная схема накачки.

В работе [151] исследовалась эффективность преобразования излучения эксимерных ХеСl-лазеров с различными энергиями и длительностями импульсов в растворах ряда органических соединений, генерирующих излучение в области 390 нм + 400 нм. В качестве источников возбуждения использовались эксимерные лазеры ЭЛАН (энергия импульса от 20 мДж до 70 мДж, длительность импульса 10 нс), ЛИДА-КТ (энергия импульса от 200 мДж до 600 мДж, длительность импульса 40 нс) и ЛУФИ (энергия импульса от 80 мДж до 100 мДж, длительность импульса 80 нс). Длина волны излучения всех лазеров накачки 308 нм. Накачка производилась в поперечном варианте.

В табл. 11 приведены средняя длина волны генерации λ и КПД различных растворов красителей при накачке различными лазерами при указанных в таблице концентрациях. Структурные формулы красителей, стоящих в табл. 11 под номерами, приведены в работе [151]. Значения КПД для кумариновых красителей дают представление о величине КПД лазеров на красителях с накачкой излучением эксимерных лазеров. Примерно такие же КПД получаются при использовании более мощных ХеСl-лазеров.

Характеристики различных растворов красителей

Краситель	10 ³ С, моль/л	Растворитель	λ, нм	КПД, %		
				ЭЛАН	ЛИДА-КТ	ЛУФИ
№1	0,5	этанол	398	16	3,0	1
№1	2	этанол	398	15,3	8,0	
№2	2	этанол	400	17	4,5	
№2	4	этанол	400	22	8,0	
№3	1	этанол-толуол (1:1)	397	15	2,5	
№4	1	толуол	390	20,4	22,3	
№4	1	этанол-толуол (3:7)	390	22,1	22,5	11
№5	1	толуол	398	24,1	6	
№5	1	этанол-толуол (1:1)	396	18	5,8	4
№6	1	толуол	392	23,4	13	
№6	1	этанол-толуол (2:3)	389	20	11	
№7	1	толуол	390	26,9	16,5	
№7	1	этанол-толуол (9:1)	386	22	16,5	
№8	1	этанол-толуол (1:1)	400	20	7,5	
Кумарин 2	2	этанол	449	30	28	20
Кумарин 102	2	этанол	473	33	32	27

Те же авторы в работе [151] исследовали квантовые выходы фотопревращений и ресурс работы активных сред на основе 2-(4-пиридил) 5 фенилоксазола (4РyP0) и одного из замещенных дипиразолинилбензола (PDPDP) в зависимости от концентрации раствора, длины активной среды и параметров излучения импульса ХеСl-лазера, служащего источником накачки (использовались лазеры ЭЛАН и ЛИДА-КТ, см. выше). Типичные величины квантовых выходов фотораспада составляли десятые доли процента.

Ресурс работы раствора определялся, как удельная поглощенная в растворе энергия накачки, после которой происходило падение КПД на 50 %. Эта величина изменялась от нескольких десятков до нескольких сотен Дж/см³, в зависимости от концентрации красителя и плотности мощности накачки.

Исследованию генерационных характеристик различных лазерных красителей при накачке излучением ХеСl-лазеров посвящены работы [139, 140].

Значительно более мощный лазер на красителе с накачкой излучением ХеСl-лазера описан в работе [92]. В качестве активных сред использовались растворы кумарина 102 и аминокумарина УК15 с закрепленной аминогруппой в этиловом спирте. Были испытаны два типа конструкции кюветы. Прямоугольная разборная кювета с кварцевыми окнами толщиной 20 мм, которые уплотняются прокладками из силиконовой резины, была закреплена в металлическом корпусе и снабжена системой циркуляции раствора лазерного красителя. Глубина активной зоны составляет 3-4 мм. Кювета не разрушается под действием ударной волны мощного импульса накачки благодаря большой толщине кварцевых окон и демпфирующему действию резиновых прокладок.

Испытания проводились при накачке излучением ХеСl-лазеров с энергией в импульсе около 100 Дж, длительностью импульса на полувывоте 200 нс, диаметром пучка выходного излучения 220 мм (лазер «Элон-1М» [259]) и с энергией 8 Дж, длительностью импульса на полувывоте 100 нс и апертурой пучка выходного излучения 130×100мм² [124]. В работе не указано, какой вариант накачки был использован, однако, судя по конструкции кюветы накачка была квазипродольная.

Испытания показали, что эффективность преобразования при повышении плотности мощности накачки резко падает (например, для кумарина 102 от 27 % при 2 МВт/см² до 3 % при 35 МВт/см²). Авторы связывают это с термооптическими искажениями раствора, однако, причина, по-видимому, в крайне неудачной геометрии кюветы. Более эффективными оказались кюветы с круговой накачкой, своеобразным вариантом поперечной накачки.

В работе приводятся результаты исследований преобразования излучения ХеСl-лазера «Элон-1М» с помощью кюветы-конуса. В ее конструкции использовано свойство аксикона фокусировать падающее излучение в протяженный объем [292]. В качестве активной среды был использован раствор кумарина 102 в этиловом спирте. Кювета представляет собой усеченный конус из оптического кварца с отверстием по оси для раствора красителя. Диаметр основания конуса 90 мм, диаметр отверстия 8 мм.

При плотности мощности накачки на растворе красителя 1 МВт/см² получен КПД генерации 31 %±36 %. Максимальная энергия импульса генерации красителя равна 3,2 Дж при высокой однородности выходного излучения. При использовании кюветы-конуса большего диаметра, конусный отражатель которой был выполнен из алюминия, а кварцевая цилиндрическая кювета располагалась на оси конуса, была получена энергия импульса генерации 10 Дж при КПД 31%. Резонатор был образован призмой полного внутреннего отражения и выходным окном кюветы, которая была снабжена системой циркуляции раствора красителя.

Приведенные примеры показывают, что с учетом высокого КПД ХеСl-лазеров КПД лазеров на красителях с накачкой излучением этих лазеров может быть несколько выше, чем при ламповой накачке. При этом пространственно-угловые характеристики излучения лазеров на красителях с лазерной накачкой лучше, чем с ламповой. При ламповой накачке, однако, устройство в целом получается более простым и компактным.

4.4 ЛАЗЕРЫ С АКТИВНЫМИ СРЕДАМИ НА РАСТВОРАХ В ПОЛИМЕРАХ

Первые работы с использованием полиметилметакрилата (ПММА), активированного красителями, для генерации вынужденного излучения были выполнены еще в 1967–1969 годах [143, 175, 278, 299], однако фотохимическая и лучевая стойкость этих материалов оказались существенно ниже, чем жидких сред. Поэтому в последующее десятилетие развивались в основном жидкостные системы, в которых фотохимическая нестабильность и термооптические искажения снижались за счет циркуляции активной среды.

В этот период по полимерным лазерным средам появляются лишь эпизодические работы [225, 252, 272, 283, 305, 306]. При этом существенный вклад в понимание механизма повреждения полимер-

ных материалов лазерным излучением был сделан авторами работ [60, 64, 66]. В 1980-е годы снова возобновился интерес к созданию полимерных лазерных элементов и лазеров на их основе [41, 52, 72, 85, 86, 91, 94, 106, 107, 144, 146, 182, 245]. Продолжались исследования механизма лазерного повреждения прозрачных полимеров [59, 63, 67]. Группа исследователей из Института физики АН УССР работала над полимерными лазерными элементами на основе эластичного полимера — полиуретанакрилата [35, 37, 38, 43—45, 47—50, 73].

Отдельные работы были посвящены исследованию лазерных элементов на основе эпоксиполимеров [41, 52]. Однако наиболее широко используемыми матрицами оставались ПММА и его сополимеры.

Лазеры с полимерными активными элементами отличаются от жидкостных систем способом замены рабочего участка активной области. Смена генерирующей области применяется для увеличения ресурса работы, ограничиваемого фотохимическим распадом красителя, а также с целью увеличения средней мощности генерации, ограничиваемой наведенными накачкой термооптическими неоднородностями в матрице.

Наиболее простым вариантом является вращение в резонаторе плоскопараллельного полимерного диска. При этом скорость вращения при заданной частоте импульсов должна выбираться из условия получения максимальной сканируемой площади и максимального интервала времени между двумя повторными попаданиями в одну и ту же область. Такой способ увеличения ресурса полимерных лазеров на красителях позволил выпустить в СССР в 1985 году первые лазеры на красителях в твердой матрице ЛКИ-301 [116] и ЛКИ-301-1 с накачкой безжидкостным лазером на гранате ЛТИ-404.

Спектральный диапазон от 550 нм до 750 нм перекрыт с помощью красителей родамина 6Ж изобутирата (максимальный КПД 37 %), родамина С (КПД до 29 %), оксазина 17 (КПД до 3,3 %) и оксазина 1 (КПД до 10 %). Нарботка на отказ на родамине 6Ж изобутирате в ПММА без замены вращающегося активного элемента равна 10^5 импульсов. Частота повторения — 25 Гц. Возбуждение осуществляется по квази-продольной схеме.

С использованием аналогичной оптической схемы авторы работы [35] исследовали энергетические и спектральные характеристики полимерных лазеров на основе полиуретанакрилата, представляющего собой эластичный полимерный материал. Лазерные элементы на его основе представляют собой триплексы или мультиплексы, в которых один или несколько слоев полимера находятся между плоскопараллельными пластинами из стекла или кварца. Для увеличения теплопроводности элемента с целью уменьшения термооптических искажений могут при-

меняться пластины из прозрачных кристаллических материалов, обладающих высоким коэффициентом теплопроводности, например, сапфира. Полимер обладает хорошей адгезией к поверхности пластин.

В работе определены эксплуатационные характеристики (зависимость КПД генерации от количества импульсов накачки и времени наработки полимерных лазерных элементов с феноленовыми красителями Ф1-Ф5 при средней плотности мощности накачки излучением второй гармоники лазера на АИГ:Nd³⁺ 20 МВт/см²).

Результаты испытаний показали, что эти красители в полиуретанакрилате имеют больший ресурс работы, чем родамин 6Ж в той же матрице. Особенно большим ресурсом (более 10⁶ импульсов) обладает полимерный элемент на основе красителя Ф1 (6-аминофеноленон). Спектральный диапазон перестройки этого красителя (560 нм+660 нм) в 1,5–2 раза больше, чем для родамина 6Ж в аналогичных условиях. КПД генерации в максимуме перестроечной кривой для всех красителей (в том числе и родамина 6Ж) близок к 30 %.

Для генерации излучения в области 720 нм+900 нм подходят фотостойкие, высокоэффективные (КПД 40 %-50 %) полимерные лазерные среды на основе индолениновых красителей ПК 686, ПК 698 и ПК 742 [95]. Среди родаминовых красителей наибольшей фотостабильностью в полиуретанакрилате обладает родамин 101. Он более чем на порядок фотостабильнее родамина 6Ж.

Авторы работы [52] исследовали полимерные активные элементы на основе эпоксидных полимеров. Генерационные исследования проводились в плоском резонаторе с коэффициентами отражения зеркал 99,5 % и 16 %. Накачка осуществлялась по квазипродольной схеме излучением второй гармоники неодимового лазера с длительностью импульса 50 нс и плотностью энергии от 0,5 Дж/см² до 10 Дж/см².

Объектами исследований служили активные элементы на основе матриц УП-612+ГФА и ЭАО+ПБ, окрашенных родамином 6Ж или родамином С. Толщина образцов варьировалась от 3 мм до 12 мм, оптическая плотность – от 2 до 20 при световом диаметре не менее 10 м. Зависимость КПД генерации от плотности энергии накачки для образцов с родамином 6Ж имеет максимум при 1 Дж/см² (43 %). Для родамина С КПД равен 20 %. В работе не приводятся данные о ресурсе работы исследованных элементов. Очевидно, он не высок, поскольку эпоксидные полимеры должны обладать низкой лучевой стойкостью при многократном воздействии лазерного излучения.

В работе [86] исследовались генерационные характеристики лазеров на красителях ксантенового ряда, отличающихся типом аниона в молекуле (родамин 6Ж хлорид, родамин 6Ж перхлорат, краситель 11Б), а также на основе оксазина 17, внедренных в модифицирован-

ный полиметилметакрилат. Накачка осуществлялась второй гармонической излучения неодимового лазера на стекле (длина волны излучения 530 нм) с длительностью импульса 50 нс, а генерация наблюдалась в диапазонах 560 нм+570 нм и 620 нм+640 нм соответственно в лазерах ксантенового ряда и оксазине 17.

Активные полимерные элементы имели форму цилиндра диаметром 20 мм и толщиной от 10 мм до 30 мм и изготавливались путем прецизионной механической обработки торцевых поверхностей [85]. Концентрация красителей варьировалась от 10^{-5} М до $3 \cdot 10^{-5}$ М. Рабочий диаметр зоны возбуждения элементов составлял 8 мм. Высокая лучевая стойкость элементов обеспечивалась введением в полимер соответствующих модифицирующих добавок [85, 106].

При многократном облучении с плотностью энергии в импульсе 2 Дж/см² повреждения элементов не наблюдалось при воздействии 10^4 импульсов. Ресурс стабильной работы определялся как количество импульсов $N_{кр}$, после которого происходило падение КПД на 20 %. Эксперименты показали, что ресурс стабильной работы элемента существенно зависит как от типа аниона, так и от состава полимерной матрицы. Приводится характер зависимости КПД от числа импульсов генерации. При $N < N_{кр}$ КПД остается практически постоянным, после чего происходит его резкое падение с дальнейшим ростом числа импульсов.

Авторы объясняют это накоплением в полимерной матрице в процессе облучения неких продуктов, которые существенно ускоряют процесс фоторазложения красителя. Более вероятной причиной такого вида зависимости КПД от числа импульсов представляется постепенный расход растворенного в полимерной матрице молекулярного кислорода на фотосенсибилизированное окисление полимера, после чего начинается эффективное фотовосстановление красителя. Ресурс стабильной работы элемента возрастает с увеличением концентрации красителя.

При исследовании зависимости ресурса стабильной работы элементов от интенсивности излучения накачки было установлено, что в диапазоне плотностей энергии импульса W от 0,5 Дж/см² до 1,4 Дж/см² величина $N_{кр}$ обратно пропорциональна W . При более высоких значениях W наблюдается резкое уменьшение $N_{кр}$ вплоть до $N_{кр} = 1$, когда происходит практически полная фотодеструкция красителя за один импульс облучения с плотностью энергии $W = W_{кр}$.

Для родамина 6Ж хлорида $W_{кр} = 1,6$ Дж/см², а для наиболее стойкого красителя 11Б $W_{кр} = 10$ Дж/см². Из полученных зависимостей следует, что фотодеструкция красителей ксантенового ряда в полимерах происходит главным образом при их двухступенчатом возбуждении на высшие электронные уровни так же, как это имеет место в жид-

Генерационные характеристики твердотельных элементов на основе модифицированного ПММА с различными красителями

Краситель	КПД, %	$N_{кр}$ при $W = 1 \text{ Дж/см}^2$
Родамин 6Ж хлорид	28	180
Родамин 6Ж перхлорат	50	50
Родамин 111	48	1100
Краситель 11Б	52	> 2000
Оксазин 17	8	> 1000

костях [19]. Генерационные характеристики твердотельных элементов на основе модифицированного ПММА с различными красителями приведены в табл. 12.

Авторы отмечают, что краситель 11Б более чем в 10 раз устойчивее также и к действию излучения импульсных ламп накачки, чем родамин 6Ж хлорид.

В 1990-е годы работы по усовершенствованию полимерных лазерных элементов на красителях продолжались [36, 94, 206, 207, 208, 213, 222, 230, 232, 241, 249, 255, 267, 272, 273, 281, 227, 309]. Исследования были направлены на повышение лучевой стойкости полимерных матриц и поиск новых полимеров и красителей. Появились новые красители для полимерных матриц [144, 206, 227, 281].

В настоящее время твердотельные элементы приблизились к жидкостным по генерационным характеристикам и фотостабильности при лазерной накачке. Одним из преимуществ лазеров на красителях с твердотельными, в том числе и полимерными, активными элементами перед жидкостными является отсутствие проблем при работе в условиях невесомости [52].

4.5 ЛАЗЕРЫ С АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ КРАСИТЕЛЕЙ, ВНЕДРЕННЫХ В СИЛИКАТНЫЕ ПОРИСТЫЕ МАТРИЦЫ

Активные лазерные элементы на красителях в твердотельных матрицах позволяют сочетать достоинства лазеров на органических красителях, такие как высокий квантовый выход, широкая полоса генерации и большой спектральный диапазон поглощения накачки, с технологическими преимуществами твердотельных лазеров а также