

ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИ-НЕОДНОРОДНЫХ АКТИВНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОКОМПОЗИТОВ “ПОЛИУРЕТАН-КРАСИТЕЛЬ”

Введение

Для целенаправленного синтеза новых лазерно-активных сред необходимо дальнейшее углубление представлений о строении материалов и природе процессов, происходящих в них. Это возможно лишь на основании решения фундаментальных задач, одна из которых – изучение закономерностей распространения электромагнитного излучения оптического диапазона и его взаимодействия с веществом. Данная проблема имеет ряд аспектов, среди которых можно выделить изучение процессов, обусловленных возникновением инверсии населенности энергетических уровней молекул красителя при резонансном поглощении мощного излучения.

Большинство теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованиям нелинейных явлений в активных средах на молекулах органических красителей, были выполнены для традиционных жидких двухкомпонентных систем "растворитель – краситель" [1, 2].

Твердые активные среды, допированные красителями, значительно отличаются от традиционных жидких растворов по своему агрегатному состоянию, составу и структуре. Интерес к исследованиям, направленным на создание эффективных твердотельных активных сред на красителях в последнее время значительно вырос. Это обусловлено практическими потребностями в твердотельных лазерах с управляемым спектром, особенно в твердотельных лазерах на красителях (ТЛК), которые рассматриваются как удачная альтернатива традиционным жидкостным лазерам на красителях (ЖЛК) с точки зрения компактности конструкций, а главное экологической и пожарной безопасности [3 – 5].

Принципиальная возможность использования полиуретана в качестве твердой основы для твердотельных лазерно-активных сред была продемонстрирована в работах [6 – 8], в которых сообщалось о создании и исследовании при наносекундной длительности возбуждения работоспособных лазерных матриц на основе прозрачного полиуретана и полиуретана-акрилата. Предпосылками к этому стали результаты проведенных ранее исследований механизма лучевого разрушения полимерных матриц. Они позволили сделать вывод о необходимости использования эластичных материалов, имеющих значительные упругие деформации в широком диапазоне рабочих температур [9]. В дальнейшем были выполнены исследования, направленные на создание лазерных сред на основе полиуретана, способных работать в условиях мощной накачки микросекундной длительности [10 – 12]. При этом было показано, что главным недостатком полиуретановых сред является невысокое оптическое качество, что ограничивало их применение в квантовой электронике.

Цель работы – изучение влияния состава и структуры полиуретановых лазерно-активных сред на их оптические характеристики и исследование процессов, связанных с резонансным взаимодействием мощного излучения с вновь созданными средами, а именно, возникновение и усиление вынужденного излучения, развитие суперлюминесценции и возникновения лазерной генерации при лазерном возбуждении импульсами микросекундной длительности.

Оптические свойства полиуретановых матриц

Известно, что особенностью структуры аморфных полимеров, таких, как полиметилметакрилат и полиуретан, есть наличие надмолекулярных образований в виде доменов [13].

Макромолекулы полимера в таком домене взаимно упорядочены, что обуславливает локальную анизотропию домена. Если макрообразования распределены хаотически, то это не приводит к анизотропии среды в целом. Но под воздействием различных внешних факторов, связанных с условиями изготовления полимерных образцов, может возникать упорядоченная ориентация доменов, которая приводит к появлению анизотропии оптических характеристик образцов. Главной причиной ориентированного состояния полимера является деформация растяжения (сжатия) под воздействием сил внутреннего и поверхностного взаимодействия молекул между собой и материалом формы. Для полиуретана эти силы являются достаточно значительными, о чем свидетельствует наличие “усадки” объемных образцов. Оптическая анизотропия может проявляться в наличии локального двулучепреломления и дихроизма поглощения плоскополяризованного света. Еще одним важным фактором является степень однородности показателя преломления в объеме образца. Неоднородность показателя преломления может проявляться в виде оптических “свилей”, форма и размер которых зависит от условий и способа изготовления образца. Наличие свилей приводит к локальной рефракции направленного излучения, которое распространяется в образце, что эквивалентно его рассеиванию.

Полиуретановые матрицы изготавливались по методикам, описанным в работах [10 – 12]. В процессе изготовления опытных образцов было обнаружено, что оптическое качество, получаемое в конечном итоге, значительно зависит от многих факторов. К ним, в первую очередь, относится температура, длительность приготовления смеси, время и степень дегазации, материал и размеры формы, в которой происходит полимеризация, и другое. С целью получения наилучшего оптического качества экспериментальным путем определялись наиболее приемлемая методика изготовления образцов. При этом оптическое качество полученных активных сред исследовалось теневым и поляризационно-оптическим методами.

На рис. 1 представлена оптическая схема установки для визуализации свилей, которые отражают оптическое качество исследуемых образцов. Световой пучок, сформированный лазерным источником света 1, поворотным зеркалом 2 и телескопической системой 3 и 4, облучал исследуемый образец 5. Оптической системой 6,7 высокого качества формировались в плоскости экрана расфокусированное 8 и сфокусированное 9 изображения образца 5. Данные изображения регистрировались цифровой камерой 10. Расфокусированное изображение отображало вторую производную показателя преломления образца и визуализировало оптические свили.

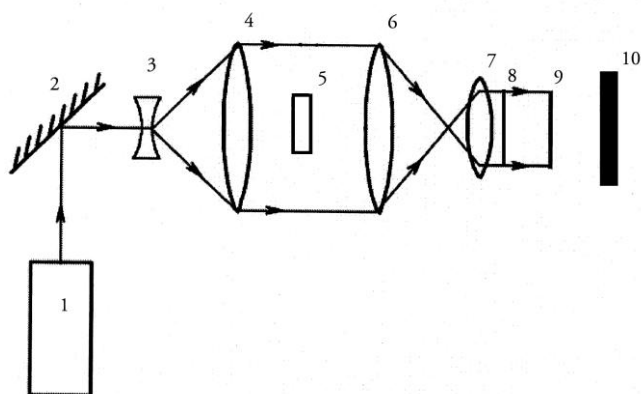


Рис. 1

Возможный характер оптических искажений, которые возникают в процессе формирования образцов, демонстрируют представленные на рис. 2 фотографии теневых картин для трех образцов матриц, изготовленных разными способами. Образец № 1 – это частично заполненная полиуретановой средой с Сульфородамином 101 цилиндрическая матрица в

кварцевой оболочке с плоско-параллельными торцами. Ее диаметр равнялся 10 мм. Образец № 2 – тоже оболочечная матрица цилиндрической формы, но полностью заполненная тем же веществом, что и образец № 1. Диаметр этого образца составлял 20 мм. Образец № 3 – это безоболочечная матрица цилиндрической формы из полиуретана, активированного Родамином 6G, изготовленная путем заливания преполимера и последующей его полимеризации в вертикально установленной полиэтиленовой трубке диаметром 10 мм. Оптическое качество торцов обеспечивалось их полированием.

Видно, что в матрицах с кварцевой оболочкой, с которой адгезия полиуретановой среды очень сильная, формируются достаточно упорядоченные свили. По своей форме они совпадают с завихрениями, которые возникают во время заливания жидкого преполимера. В изготовленном по другой методике образце № 3 оптическая неоднородность распределена в поперечном сечении хаотически. Наличие подобных свилей свидетельствует о том, что увеличение вязкости среды в процессе полимеризации мешает выравниванию плотности вещества в объеме образца. Эти исследования также выявляют зависимость оптического качества образцов от способа их изготовления. Последующие эксперименты показали, что за счет подбора температурного режима процесса, материала и геометрии формы, а также способа заливки, можно значительно улучшить оптическое качество среды.



Рис. 2

Как уже отмечалось, возникновение ориентированного состояния полимера обуславливает локальную оптическую анизотропию образца, которая приводит к появлению эффекта двулучепреломления. Этот эффект можно наблюдать, изучая прохождение сквозь среду плоско поляризованного света. Если поместить образец между поляризатором и анализатором, то можно создать условия, необходимые для интерференции когерентных обыкновенного и необыкновенного лучей, которые возникают при двулучепреломлении. Поэтому при наблюдении через анализатор поверхности такого образца можно увидеть систему темных и светлых интерференционных полос. Темные полосы получили название изохром. По виду изохром можно судить о распределении ориентированных доменов в образце, поскольку каждая изохрома проходит через точки с одинаковой их ориентацией.

Для исследования собственного двулучепреломления в полиуретановых образцах использовалась та же экспериментальная установка, которая показана на рис. 1, но изображения образца регистрировались через поляризационный фильтр, скрещенный с направлением поляризации зондирующего луча лазера. На рис. 3 представлены интерференционные картины для тех же образцов № 1 – 3. Эти картины подтверждают, что степень и характер анизотропии полиуретановых сред зависят, главным образом, от способа изготовления образца. Так, на деформационную ориентацию среды в образце № 1 влияет наличие отрицательного мениска в незаполненной зоне матрицы. При этом, поскольку все поверхности, а следовательно, и существующие на них силы притяжения, симметричны относительно вертикальной оси, то и распределение анизотропных зон симметрично. В полностью заполненном образце № 2 можно было ожидать симметричного относительно центральной оси цилиндра распределения, но наличие на поверхности кварцевой оболочки расположенного сверху отверстия

нарушает однородность границы полиуретан-стекло и делает интерференционную картину по симметрии подобной образцу № 1. И, наконец, при отсутствии адгезии полиуретана с материалом отливной формы, как для образца № 3, интерференционная картина приближается к крестообразной, что свидетельствует о преимущественной ориентации молекул в направлении оси цилиндра.

Сопоставляя картины на рис. 2 и 3 можно предположить, что наличие свилей вызывает частичную деполяризацию зондирующего излучения и тоже делает вклад в итоговую интерференционную картину.

Для оценки оптического качества сред, которого удалось достичь за счет оптимизации процесса изготовления, провели измерение коэффициента потерь за проход для двух стержней длиной 120 мм, активированных Родамином 6G. Стержень № 1 с концентрацией красителя $1,0 \cdot 10^{-4}$ Моль/л, не имел кварцевой оболочки, а № 2 был изготовлен в кварцевой оболочке и имел большую концентрацию красителя – $2,0 \cdot 10^{-4}$ Моль/л. Коэффициент потерь ρ рассчитывался по формуле [14]

$$\rho = 100 \ln \left(\frac{(1-r)^2}{T} \right),$$

где T – коэффициент пропускания образца, r – коэффициент отражения. В результате были получены значения: для стержня № 1 – $\rho = 2,15$ %, для стержня № 2 – $\rho = 1,23$ %. Сравнение этих величин с данными о коэффициентах потерь для стержней из ПММА, приведенных в работе [20], показывает, что коэффициенты потерь для исследованных полиуретановых сред почти в два раза больше, чем для матриц из ПММА. Это может значительно затруднить получение генерации при ламповом возбуждении, но для мощной лазерной накачки этого качества должно быть вполне достаточно.

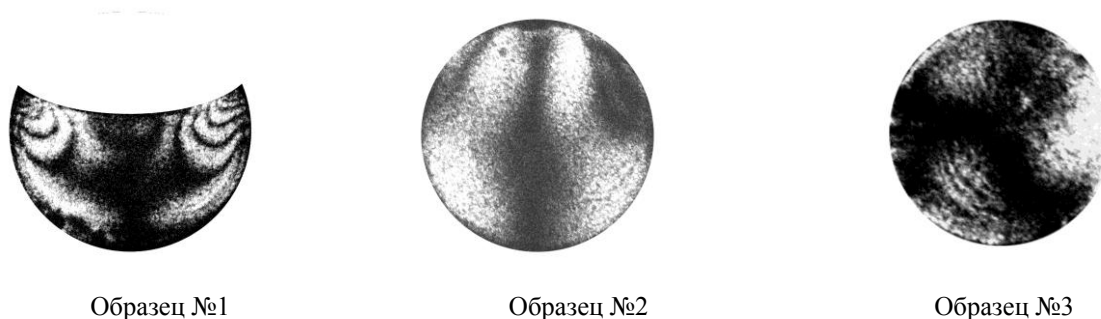


Рис. 3

Излучение полиуретановых сред

Излучение инвертированных активных сред на органических красителях, как известно, по своим характеристикам может быть условно разделено на суперлюминесцентное и генерационное. И то, и другое возникает в результате усиления собственной спонтанной люминесценции среды. При этом суперлюминесценция наблюдается в условиях отсутствия эффективной обратной связи, когда коэффициент потерь в среде превышает коэффициент усиления. Если же эти коэффициенты выравниваются, то в среде возникает генерация. Как правило, суперлюминесцентное излучение имеет более широкий спектр и худшую направленность, чем генерационное и по этим параметрам их можно отличить экспериментально. К тому же, суперлюминесценция значительно уступает генерации по мощности.

Эффект возникновения генерации носит пороговый характер. Энергетический порог генерации в значительной мере зависит от спектроскопических и оптических свойств среды. Поэтому, исследуя энергию, спектр, направленность излучения, и определяя энергетический

порог генерации активных сред при разных условиях возбуждения, можно прийти к выводу относительно влияния состава и структуры активной среды на процессы его взаимодействия с потоками оптического излучения. Кроме того, изучение поляризационных и пространственно-угловых характеристик позволит обнаружить характер изменений свойств материальной среды, которые возникают под действием мощного излучения.

Излучение полиуретановых сред при некогерентном возбуждении.

Исследование характеристик излучения активированных красителями полиуретановых сред при мощном широкополосном облучении проводилось на образцах, активированных красителями Родамин 6G и Оксазин 17 и имеющих форму цилиндрических стержней длиной 120 мм. Для возбуждения стержней использовались 2 трубчатые импульсные лампы ИНП 2-7/120. Источник питания обеспечивал энергию разряда от 50 до 600 Дж при длительности импульсов от 3 до 5 мкс. В ходе экспериментов в первую очередь регистрировались спектры излучения и его направленность. Исследования этих характеристик показали, что для большинства стержней порог генерации при ламповом возбуждении не достигается. Излучение имеет характеристики, типичные для суперлюминесценции. На рис. 4 приведены спектры излучения (кривые 1) стержней на Родамине 6G (рис. 4, а) и Оксазина 17 (рис. 4, б). Там же для сравнения показаны спектры спонтанной флуоресценции (2). Видно, что спектры суперлюминесценции, как и положено, находятся на длинноволновом крыле спектра флуоресценции и имеют меньшую ширину.

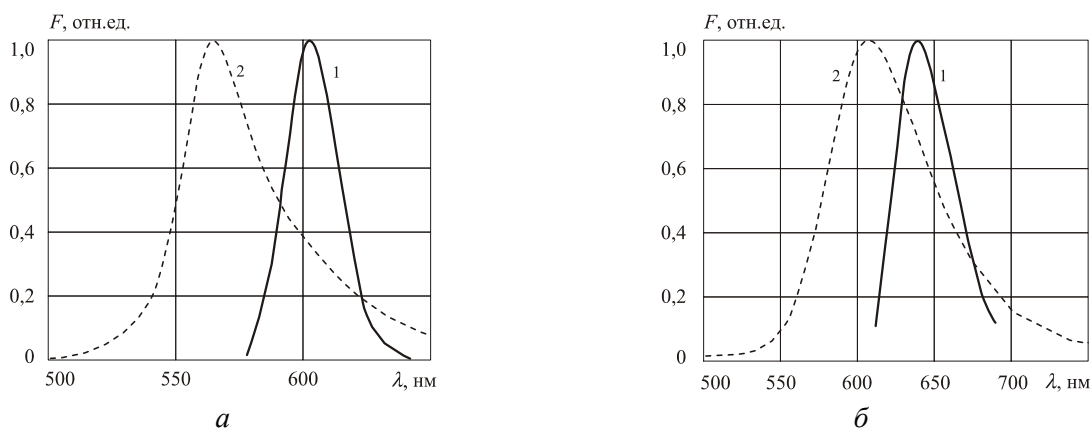


Рис. 4

Измерения далекопольных картин выявили большую расходимость излучения, что присуще однопроходной суперлюминесценции. Это же подтвердили измерения энергии суперлюминесцентного излучения с одного из торцов стержня при наличии и отсутствии “глухого” зеркала. Порога генерации удалось достичь лишь на одном из стержней, который имел наивысшее оптическое качество (стержень № 2, упомянутый выше). Генерация возникла при помещении стержня в резонатор, зеркала которого имели коэффициенты отражения 100 и 50 %. При энергии накачки 600 Дж энергия генерации составила ~ 4 мДж.

Таким образом, эти измерения показали, что степень инверсии энергетических состояний активных молекул, а следовательно, и эффективность усиления вторичного излучения в полиуретановых средах, которая достигается при облучении импульсными лампами, является недостаточной для обеспечения режима генерации. Это связано с особенностями спектральных характеристик и оптического качества этих сред, обусловленных как собственной структурой, так и влиянием излучения накачки.

Излучение полиуретановых сред при мощном лазерном облучении

Изучение характеристик излучения полиуретановых сред при лазерном облучении проводилось на установке, которая описана в [11]. В ней применялся вариант поперечной накачки матриц с красителем. Рабочими веществами лазеров накачки служили этанольные

растворы красителей Родамин незамещенный ($\lambda_p = 560$ нм), Родамин 6G ($\lambda_p = 590$ нм) и Оксазин 17 ($\lambda_p = 665$ нм). Родамин незамещенный использовался для накачки матриц со всеми исследованными красителями, Родамин 6G – для возбуждения Сульфородамина 101 и Оксазина 1, а Оксазин 17 – для накачки активных элементов на Оксазине 1. Образцы сред имели вид цилиндрических матриц длиной 10 мм и диаметром 10 мм.

В ходе экспериментов прежде всего исследовались пороговые характеристики генерации новых сред. Учитывая, что конкретные значения пороговой энергии зависят от многих факторов, было сделано сравнение пороговых энергий накачки полиуретановых матриц и кювет таких же размеров со спиртными растворами тех же красителей в одинаковых условиях. Такое сравнение позволило сделать общий вывод, что при любых условиях порог генерации матриц с Родамином 6G, Сульфородамином 101 и Оксазином 17 был выше, чем в спиртовых растворах. В частности, соотношение энергий возбуждения твердых матриц и спиртовых растворов Оксазина 17 составляло $\sim 1,6$ и не изменялось при увеличении концентрации красителя. Основной причиной роста порога генерации, как мы считаем, является худшее оптическое качество полиуретановых сред по сравнению с жидкими растворами. Для матриц, активированных Оксазином 1, напротив, наблюдался более низкий порог генерации, чем в этанольном растворе. Это обусловлено особенностями молекул Оксазина 1, которые в вязких и твердых растворах имеют больший квантовый выход люминесценции, чем в этаноле, а потому генерируют значительно эффективнее. В целом исследования пороговых условий генерации полиуретановых матриц позволяют сделать вывод, что при лазерном облучении эти активные среды имеют пороги генерации, сопоставимые с порогами жидких растворов красителей, что позволяет осуществлять накачку со значительным превышением порога, а следовательно, – получать высокую энергию лазерного излучения. Энергетические характеристики лазерного излучения, полученные на наиболее качественных образцах матриц, представлены в таблице. В ней приведены название и концентрация (C) красителя, длина активной зоны (l), а также значение длины волны (λ), энергии (E) и КПД (η) генерации, которые были получены на данной матрице.

Краситель	l (мм)	C (моль/л)	λ (нм)	E (мДж)	η (%)
Родамин 6G	10	$2,5 \cdot 10^{-4}$	585	32	13
	20	$1,25 \cdot 10^{-4}$		48	12
Сульфородамин 101	10	$5 \cdot 10^{-4}$	615+650	23,5	20
	20	$2,5 \cdot 10^{-4}$		76	26
Оксазин 17	10	$2,5 \cdot 10^{-4}$	625	28	16
	20	$2,5 \cdot 10^{-4}$		52	18
Оксазин 1	10	$5 \cdot 10^{-4}$	700+745	46	15
	20	$2,5 \cdot 10^{-4}$		127	21

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что, несмотря на оптическое несовершенство полиуретановых сред, они могут быть успешно использованы для создания достаточно эффективных лазерных матриц, которые способны генерировать мощное излучение микросекундной длительности.

Поляризационные характеристики излучения полиуретановых сред при лазерном возбуждении

Состояние поляризации излучения инвертированной среды полностью определяется характером взаимодействия вещества с действующим полем. Возникновение наименьшей поляризационной анизотропии в генерирующей среде должно существенно повлиять на состояние поляризации излучения. Поэтому, исследуя поляризацию, можно судить об особенностях взаимодействия активного вещества с действующими на него полями.

Исследования поляризации излучения полиуретановых сред заключались в измерении энергии отдельных поляризационных компонент в изотропных широкополосных резонаторах при разных энергиях возбуждения и разной поляризации излучения накачки. Поляризационные компоненты выделялись с помощью дихроичного поляризационного фильтра. По данным измерений вычислялось значение степени поляризации $P = (E_{max} - E_{min}) / (E_{max} + E_{min})$, где E_{max} и E_{min} – энергии излучения сильной и слабой компонент соответственно.

Результаты экспериментов показали, что при возбуждении неполяризованным светом все исследованные образцы матриц излучали линейно поляризованное излучение с разной степенью поляризации P . При этом вектор преимущественной поляризации лежит в плоскости, ортогональной наведенной оптической оси среды. Степень поляризации излучения полиуретановых матриц оказалась зависящей от энергии возбуждения, концентрации красителя, оптического качества среды и добротности резонатора. Зависимости степени поляризации P от энергии накачки E_p для матриц с разной концентрацией C красителя Сульфородамин 101 показаны на рис. 5. Кривые на рисунке соответствуют концентрациям красителя: 1 – $C = 1,0 \cdot 10^{-4}$ Моль/л; 2 – $C = 2,0 \cdot 10^{-4}$ Моль/л; 3 – $C = 3,0 \cdot 10^{-4}$ Моль/л; 4 – $C = 5,0 \cdot 10^{-4}$ Моль/л. Видно, что при увеличении энергии возбуждения степень поляризации уменьшается. Графики также показывают, что изменение концентрации красителя тоже влияет на степень поляризации. Постепенное увеличение концентрации сначала приводит к уменьшению степени поляризации, а затем к ее росту.

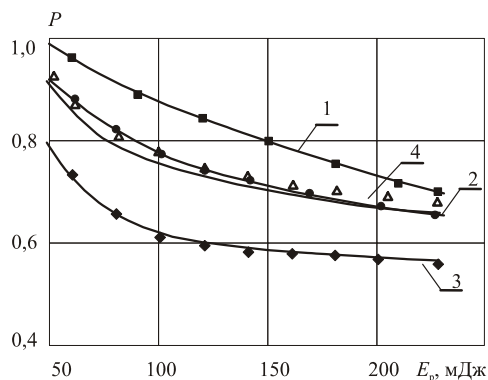


Рис.5

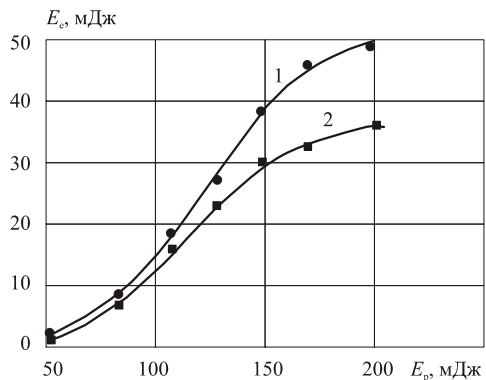


Рис.6

Причиной обнаруженного эффекта можно считать возникновение градиента показателя преломления среды в результате неравномерного локального нагрева вещества за счет нерадиационной составляющей распада возбужденных состояний красителя. Известно, что в твердых аморфных средах возникновение разницы показателей преломления в некотором направлении сопровождается появлением внутренних напряжений, которые, в свою очередь, приводят к анизотропии распределения показателя преломления. В таком случае в среде должно возникать двулучепреломление [15]. Этот эффект наблюдается, например, в стеклянных стержнях твердотельных лазеров. Поэтому можно было предположить, что и в полиуретановых средах возможно возникновение наведенного двулучепреломления. При этом в условиях несимметричной накачки локальные оптические оси анизотропной среды будут лежать в плоскости возбуждения, то есть ортогонально оси резонатора. Активный элемент будет напоминать одноосный кристалл, через который ортогонально к его оптической оси проходят лучи неполяризованного излучения. Это излучение будет раскладываться на обыкновенный и необыкновенный лучи с взаимно ортогональной поляризацией и разными показателями преломления. Один из этих лучей, для которого показатель преломления больше, будет сильнее отклоняться от оси резонатора, а следовательно, излучение соответствующей поляризации будет иметь большие потери. То есть лазер должен генерировать частично поляризованное излучение. При этом вблизи порога генерации излучение будет почти полностью поляризовано. При росте энергии накачки появляются более благоприятные условия для генерации слабой компоненты, которая приводит к уменьшению степени поляризации.

Важным следствием наведенного двулучепреломления является зависимость энергии генерации полиуретановых матриц от состояния поляризации возбуждающего излучения. Это показали измерения энергии генерации матриц на основе полиуретана Crystal Clear 204, активированного Сульфородаминоном 101 с концентрацией $2,0 \cdot 10^{-4}$ Моль/л, при возбуждении неполяризованным и линейно поляризованным излучением лазера на красителе с ламповой накачкой. При этом вектор поляризации возбуждающего излучения был ориентирован ортогонально к оси резонатора ТЛК и совпадал с ориентацией вектора поляризации излучения матрицы. Степень поляризации излучения накачки составляла 0,98. Результаты измерений представлены на рис. 6, где приведены зависимости энергии генерации E_e Сульфородамина 101 в полиуретане при возбуждении линейно поляризованным (1) и неполяризованным (2) излучением. Очевидно, что энергия генерации ТЛК при накачке линейно поляризованным излучением, поляризация которого совпадает с поляризацией излучения генерации, выше, чем при возбуждении неполяризованным светом. Такая закономерность характерна для лазеров с поляризационно-анизотропным резонатором и объясняется существованием поляризационной анизотропии коэффициента усиления их активной среды.

Выводы

Основные результаты выполненной работы заключаются в следующем:

1. Изучены оптические свойства новых лазерно-активных сред и определено влияние методики изготовления образцов на характер возможных искажений оптической однородности сред. Проведена количественная оценка коэффициента потерь за проход в этих средах.

2. Исследованы характеристики излучения полиуретановых стержней при импульсном некогерентном облучении. Показано, что в этих условиях излучение представляет собой преимущественно суперлюминесценцию, что обусловлено не достаточной для генерации инверсией населенности энергетических уровней активных молекул при возбуждении полиуретановых сред импульсными лампами.

3. Исследована генерационная способность полиуретановых матриц при лазерном возбуждении импульсами микросекундной длительности. Проведено сравнение пороговых энергий генерации красителей в твердых матрицах и в этанольных растворах. Установлено, что, несмотря на оптическое несовершенство полиуретановых сред, порог генерации красителей в полиуретане достаточно низкий, чтобы осуществлять накачку с многократным превышением порога генерации и получать мощное лазерное излучение.

4. Исследованы поляризационные характеристики излучения полиуретановых активных сред. Установлено, что в условиях несимметричного возбуждения полиуретановые матрицы в широкополосном изотропном резонаторе генерируют поляризованное излучение даже при возбуждении неполяризованным светом. Причиной этого может быть эффект наведенного двулучепреломления, связанный с наведенной анизотропией показателя преломления полиуретановых сред.

Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины.

Список литературы: 1. Бонч-Бруевич А.М., Разумова Т.К. Нелинейные эффекты в растворах красителей // Журнал прикладной спектроскопии. – 1981. – Т.34. №5. – С. 825 – 834. 2. Тихонов Е.А., Шнак М.Т. Нелинейные оптические явления в органических соединениях. – Киев : Наук. думка, 1979. – 384 с. 3. Kranzeilbinder G., Leising G. Organic solid-state dye lasers // Rep.Prog.Phys. – 2000. – Vol. 63. – P. 729 – 762. 4. Sunita S., Kanetkar V. R., Sridhara G. et al. Solid-state polymeric dye lasers // Journal of Luminescence. – 2003. – Vol. 101. – P. 285-291. 5. Duarte F.J. Tunable Laser Applications. – New York : CRC Press, 2009. – 444 p. 6. Безродный В.И., Ищенко А.А. Активные лазерные среды на основе окрашенного полиуретана // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. № 12. – С.1043 – 1048. 7. Bezrodnyi V.I., Ishchenko A.A. High efficiency lasing of a dye-doped polymer laser with 1.06 μm

pumping // Applied Physics B (Lasers and Optics). – 2001. – Vol. B73, № 3. – P. 283 – 285. 8. *Безродный В.И., Дервянко Н.А., Ищенко А.А.* и др. Лазер на красителях на основе полиуретановой матрицы // Журн. техн. физики. – 2001. – Т. 71, вып.7. – С. 72 – 78. 9. *Ковалев А.А., Макишанцев Б.И., Пилипецкий Н.Ф.* и др. Эффекты накопления и временная зависимость порога оптического пробоя твердых прозрачных диэлектриков при воздействии когерентного излучения // Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7, №6. – С. 1287 – 1303. 10. *Николаев С.В., Пожар В.В., Дзюбенко М.И.* Лазерная генерация микросекундных импульсов на полиуретановых матрицах, активированных красителями // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, № 8. – С. 758 – 762. 11. *Николаев С.В., Пожар В.В., Дзюбенко М.И.* Генерационные характеристики оксазиновых красителей в твердых полиуретановых матрицах // Радиофизика и электроника. – 2009. – Т.14, №3. – С. 358-365. 12. *Николаев С.В., Пожар В.В., Дзюбенко М.И.* Лазерные свойства активной среды на основе Сульфородамина 101, внедренного в промышленный полиуретановый компаунд // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40, № 12. – С. 1112 – 1115. 13. *Сперанская Т.А. Тарутина Л.И.* Оптические свойства полимеров. – Л. : Химия, 1976. – 136 с. 14. *Finlayson A.J., Peters N.* Flashlamp pumped polymer dye laser containing Rhodamine 6G // Applied Physics Letters. – 1998. – Vol. 72, № 17. – P. 2153 – 2155. 15. *Быков В.П., Силичев О.О.* Лазерные резонаторы. – М. : Физматлит, 2004. – 320 с.

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

Поступила в редколлегию 24.11.2013