

ВАКУУМНАЯ И ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.373.826.038.825

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКСАЗИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ В ТВЕРДЫХ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ МАТРИЦАХ

С. В. Николаев, В. В. Пожар, М. И. Дзюбенко

Институт радиопроизводства и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: svn@ire.kharkov.ua

Исследованы энергетические и спектральные характеристики излучения цилиндрических полиуретановых матриц, активированных красителями Оксазин 17 и Оксазин 1. Изучено влияние на энергию и спектр излучения наведенных термооптических искажений, возникающих в условиях применения поперечной схемы возбуждения. Наивысшие значения энергии и КПД, полученные на 2-см матрицах, составили соответственно: для Оксазина 17 – 52 мДж и 18 %, а для Оксазина 1 – 120 мДж и 23 %. Сделан вывод о том, что полиуретановые среды, активированные этими красителями, являются перспективным материалом для создания твердотельных лазерных активных элементов, способных работать в условиях мощной микросекундной накачки. Ил. 9. Табл. 1. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: твердотельный лазер на красителях, полиуретановая матрица, оксазиновые красители.

В последнее время значительно возрос интерес к исследованиям, направленным на создание эффективных твердотельных лазеров на красителях (ТЛК). Это обусловлено тем, что ТЛК рассматриваются как удачная альтернатива традиционным жидкостным лазерам на красителях (ЖЛК) с точки зрения компактности конструкций и, самое главное, экологической и пожарной безопасности [1–3].

Энергетические и спектральные характеристики ТЛК зависят прежде всего от свойств активной среды, из которой изготовлен его активный элемент. В свою очередь, свойства активной среды определяются характеристиками двух основных составляющих: материала матрицы и внедряемых в нее красителей.

В качестве материалов для изготовления твердых активных элементов ТЛК, как правило, используются вещества, отверждение которых происходит при невысоких температурах [4–6]. Это связано с тем, что большинство органических красителей, которые должны внедряться в материал матрицы, разлагаются при температуре свыше 60 °С. Кроме того, активная среда должна обладать хорошей оптической однородностью и высокой лучевой стойкостью. Этим требованиям в той или иной мере отвечают оптически прозрачные полимеры различной химической природы. Поэтому именно полимеры чаще всего используются для создания твердых активных сред на красителях. При этом активные элементы ТЛК могут представлять собой как целиком полимерные матрицы, так и матрицы, изготовленные из нанопористых материалов с внедренным в них полимером [7–10].

Одним из видов полимеров, который может быть использован в лазерной технике, явля-

ется полиуретан и его производные [11–13]. Полиуретан относится к классу эластомеров, поэтому обладает значительной пластичностью и термоупругостью. Эти свойства определяют его стойкость к интенсивному облучению импульсами значительной длительности, в частности, микросекундной. К достоинствам полиуретана можно отнести также мягкие условия полимеризации, что позволяет не только успешно внедрять в него красители различных классов, но и обеспечить их фотостойкость в процессе облучения.

По сравнению с другими видами полимерных сред полиуретановые среды исследованы гораздо меньше. В частности, это относится к проблеме поиска наиболее эффективно генерирующих в данной среде красителей. На сегодняшний день перечень красителей, использовавшихся для активации полиуретановых активных элементов, невелик. Так, при наносекундном возбуждении исследованы генерационные характеристики красителей Родамин 6G, Астрафлорсин и Пирометен 597 [11, 13], Тиоперилотрикарбонцианин [12], а при микросекундной накачке нами испытаны Родамин 6G, Оксазин 17 [14] и Оксазин 1 [15]. В этих работах продемонстрирована принципиальная возможность получения мощного лазерного излучения микросекундной длительности на цилиндрических полиуретановых матрицах, активированных красителями. Для более полного выявления лазерных свойств таких активных элементов необходимы дальнейшие исследования. При этом главное внимание должно быть уделено трем основным задачам:

- систематический поиск красителей, способных эффективно генерировать в полиуретане;
- совершенствование технологии изготовления протяженных цилиндрических матриц;

– оптимизация элементов ТЛК с учетом особенностей поперечного способа возбуждения активного элемента.

Решению этих задач и посвящена данная статья.

1. Характеристики полиуретановых матриц и методика эксперимента. В качестве активных веществ, внедряемых в полиуретановые матрицы, был выбран ряд красителей оксазинового класса. Первоначально в этот перечень мы включили Оксазин 17, Крезилвиолет, Нильский синий и Оксазин 1. Необходимым условием пригодности красителя является его химическая совместимость с полимером как при внедрении, так и на этапе полимеризации. Оказалось, что этому условию не отвечают Крезилвиолет и Нильский синий. Крезилвиолет обесцвечивался сразу же при растворении в полиуретане, а Нильский синий разлагался в процессе полимеризации среды. Поэтому дальнейшие эксперименты проводились лишь с двумя красителями – Оксазином 17 и Оксазином 1, которые хорошо внедрялись в полиуретан, не обесцвечиваясь в процессе полимеризации. Спектральные характеристики полученных активных сред показаны на рис. 1, где приведены нормированные спектры поглощения D_{17} , D_1 , и флуоресценции F_{17} , F_1 для Оксазина 17 и Оксазина 1 соответственно.

F_1, F_{17}, D_1, D_{17} , отн. ед.

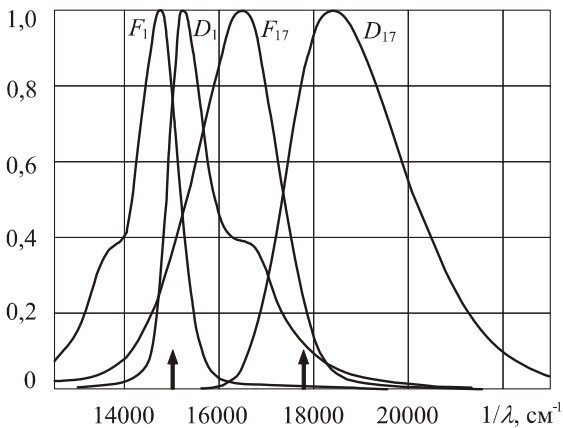


Рис. 1. Спектры поглощения D_{17} , D_1 , и флуоресценции F_{17} , F_1 для Оксазина 17 и Оксазина 1 в полиуретане соответственно

Для изготовления полиуретановых матриц использовалась методика, аналогичная описанной в работе [26]. Матрицы представляли собой кварцевые цилиндры длиной 1 и 2 см и радиусом 1 см с плоскопараллельными торцами, заполненные полиуретаном с внедренным красителем. Отметим, что соотношение продольных и поперечных размеров кварцевой кюветы в значительной степени определяет оптическое качество получаемых полиуретановых матриц. Это связано

со свойствами полиуретана, который при полимеризации в закрытом объеме не только дает «усадку», но и проявляет тенденцию к возникновению внутренних напряжений. Опытным путем мы установили, что возникающие напряжения наименьшим образом сказываются на оптическом качестве активной среды, если матрицы имеют цилиндрическую форму и указанные выше размеры. Помимо оптического качества существенное влияние на эффективность генерации оказывает концентрация красителя в активном элементе. Поэтому для определения оптимальной концентрации был изготовлен набор матриц с различным содержанием красителей: от 10^{-4} до 10^{-3} моль/л.

Исследование генерационных характеристик полиуретановых матриц проводилось на установке, схема которой показана на рис. 2.

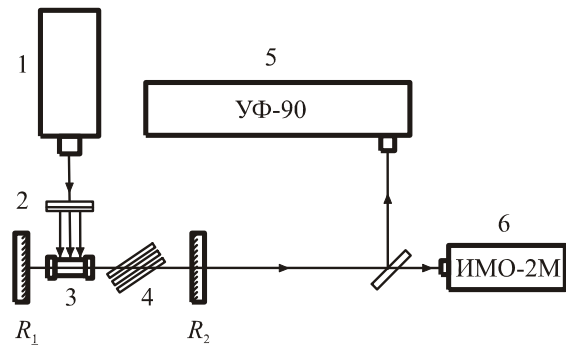


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – лазер накачки; 2 – цилиндрическая линза; 3 – полиуретановая матрица; 4 – интерференционно-поляризационный фильтр; R_1 и R_2 – зеркала резонатора; 5 – камера УФ-90; 6 – измеритель энергии

В ней применялся вариант поперечной накачки матрицы с красителем. Излучение лазера накачки 1 фокусировалось при помощи цилиндрической линзы 2 на матрицу с красителем 3. Резонатор лазера на красителе был образован глухим зеркалом R_1 с коэффициентом отражения $\sim 0,99$ и выходным зеркалом R_2 , коэффициент отражения которого варьировался. Кроме того, в резонатор мог помещаться дисперсионный элемент – интерференционно-поляризационный фильтр 4, который применялся для сужения и перестройки спектра излучения ТЛК. Энергия генерации измерялась калориметрическим измерителем ИМО-2М, а спектр излучения регистрировался на фотопластинах при помощи спектрографа УФ-90. В качестве источника возбуждения служил ЖЛК на этанольных растворах красителей Родамин незамещенный и Оксазин 17. Родамин незамещенный использовался для накачки матриц с Оксазином 17, а Оксазин 17 – для возбуждения твердых активных элементов на Оксазине 1.

Характеристики ЖЛК на каждом из красителей приведены в таблице, в которой даны длина волны излучения λ_p , максимальная энергия генерации E_p и длительность импульса τ_p .

Положение длин волн излучения накачки относительно спектров поглощения исследуемых сред показаны на рис. 1 вертикальными стрелками.

Краситель	λ_p , нм	E_p , мДж	τ_p , мкс
Родамин незамещенный	560	300	4,5
Оксазин 17	665	750	7

В ходе эксперимента проводились измерения энергетических и спектральных характеристик излучения матриц с различной концентрацией красителей при изменении интенсивности накачки и варьировании коэффициента отражения выходного зеркала резонатора ТЛК. Для сохранения неизменной формы импульса накачки возбуждающий ЖЛК работал при постоянном напряжении на емкостном накопителе, а энергия возбуждения регулировалась отражающей пластиной. Кроме того, с целью определения степени влияния термических искажений полиуретановой среды в условиях несимметричной накачки были проведены измерения энергетических параметров ТЛК с разъюстированными резонаторами.

2. Результаты исследования активной среды на Оксазине 17 и их обсуждение. Поиск оптимальных условий генерации матриц длиной 1 см, активированных Оксазином 17, осуществлялся при варьировании энергии возбуждения E_p от 10 до 200 мДж. Результаты измерений при $R2 = 0,4$ приведены на рис. 3 в виде зависимостей энергии E_e и КПД η генерации от энергии накачки E_p для матриц с различной концентрацией красителя. Сплошные кривые соответствуют энергии, а штриховые – КПД. Данные зависимости показывают, что при увеличении концентрации красителя прирост энергии генерации с увеличением энергии накачки имеет тенденцию к насыщению. Это приводит к наличию явно выраженного максимума в зависимостях КПД генерации от энергии накачки, причем с увеличением концентрации максимум смещается в сторону меньших интенсивностей возбуждения.

Такой характер зависимостей свидетельствует о том, что в резонаторе лазера существуют нерезонансные потери, величина которых возрастает при увеличении мощности накачки и концентрации красителя. Можно утверждать, что эти потери обусловлены термооптическими искажениями (ТОИ) активной среды, вызванными поглощенным излучением накачки.

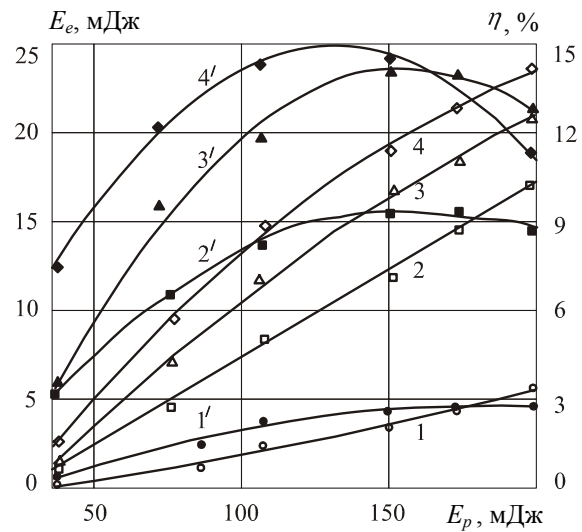


Рис. 3. Зависимости энергии и КПД генерации матриц длиной 1 см от энергии накачки при различных концентрациях Оксазина 17: 1, 1' – $C = 10^{-4}$ моль/л; 2, 2' – $C = 2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 3, 3' – $C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 4, 4' – $C = 7,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л

Чтобы продемонстрировать это, мы провели измерения зависимостей энергии генерации матриц с различной концентрацией красителя при вариации энергии возбуждения от угла разъюстировки глухого зеркала резонатора. Причем мы исходили из того, что в условиях несимметричной поперечной накачки наведенные ТОИ носят характер оптического клина. Частично такие искажения можно компенсировать соответствующей разъюстировкой зеркал резонатора (статическая компенсация). Изменение величины угла разъюстировки, при которой энергия генерации будет максимальна, позволит судить о степени влияния наведенных искажений. На рис. 4 представлены нормированные зависимости энергии генерации E_e от угла разъюстировки зеркала θ для матриц с тремя различными концентрациями при двух величинах энергии возбуждения. Из графиков видно, что при малой концентрации увеличение угла разъюстировки вызывает монотонное снижение энергии генерации при обеих интенсивностях накачки (кривые 1, 1'). С увеличением концентрации разъюстировка резонатора до некоторых определенных значений угла θ приводит к росту энергии генерации, а затем снова наблюдается ее уменьшение. При этом степень влияния разъюстировки на величину выходной энергии уменьшается с увеличением концентрации. Это, по-видимому, связано с ростом величины превышения накачкой порогового значения при увеличении концентрации красителя. В этом случае изменение потерь должно сказываться меньше, чем при малых концентрациях, когда превышение порога генерации невелико.

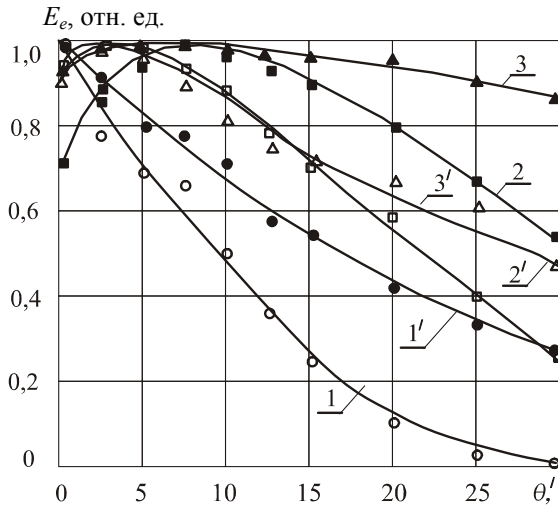


Рис. 4. Зависимости энергии генерации от угла разъюстировки резонатора для матриц с различной концентрацией Оксазина 17 при разных энергиях накачки E_p : 1, 1' - $C = 10^{-4}$ моль/л; 2, 2' - $C = 2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 3, 3' - $C = 7,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 1-3 - $E_p = 200$ мДж; 1'-3' - $E_p = 50$ мДж

Принципиально важно, что величина угла оптимальной разъюстировки, при которой достигается максимально возможная статическая компенсация ТОИ, увеличивается с ростом концентрации красителя и возрастании интенсивности накачки. Отметим, что если в отъюстированном резонаторе с $R2 = 0,4$ при $E_p = 200$ мДж наибольшая энергия достигалась на матрице с концентрацией $7,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л (~24 мДж), то при оптимальных углах разъюстировки наибольшую энергию генерации в тех же условиях давала матрица с концентрацией $2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л (~28 мДж).

Концентрационные зависимости энергии генерации $E_e(C)$ для различных интенсивностей накачки, снятые при оптимальных углах разъюстировки, представлены на рис. 5. Они демонстрируют наличие концентрационного максимума для энергии генерации, наиболее отчетливо выраженного при интенсивной накачке. Характерно, что с увеличением энергии возбуждения максимум смещается в сторону меньших концентраций. Такие особенности концентрационных зависимостей можно объяснить эффектом сокращения генерирующего объема при увеличении концентрации активных молекул. Поскольку эксперименты проводились на цилиндрических матрицах большого радиуса, то поперечный размер инвертированной области определялся глубиной проникновения излучения накачки. С увеличением концентрации глубина проникновения уменьшается, что и приводит к сокращению генерирующего объема. Если форма генерирующей области близка к цилиндрической, то ее объем сокращается быстрее, чем возрастает концентрация

молекул в единице объема и величина генерируемой энергии падает.

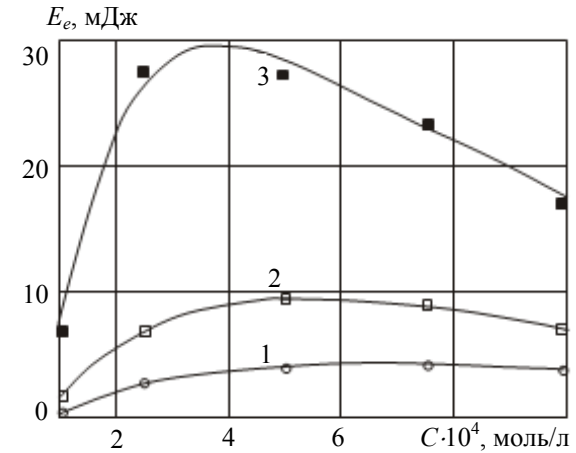


Рис. 5. Зависимости энергии генерации от концентрации Оксазина 17 при разных энергиях накачки E_p : 1 - $E_p = 50$ мДж; 2 - $E_p = 100$ мДж; 3 - $E_p = 200$ мДж

В ходе работы для тех же матриц регистрировались и интегральные спектры генерации. При этом для Оксазина 17 наблюдалось обычное для лазеров на красителях с «гладкими» спектрами люминесценции длинноволновое смещение длины волны генерации λ_e при увеличении концентрации красителя в активной среде. Это иллюстрирует рис. 6, где приведена соответствующая зависимость, полученная при $R2 = 0,4$.

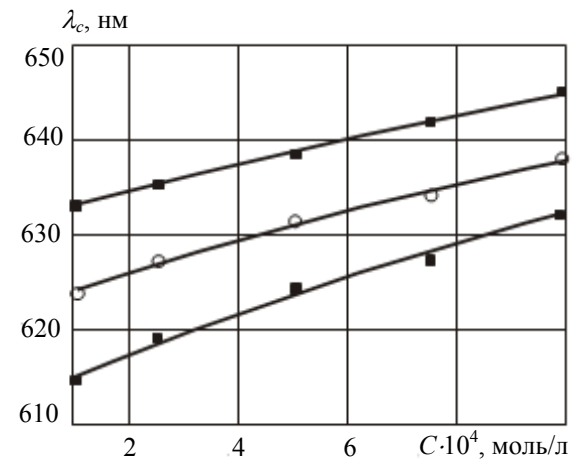


Рис. 6. Зависимость спектра генерации от концентрации Оксазина 17 в матрицах длиной 1 см при $E_p = 200$ мДж и $R2 = 0,4$

Сплошная кривая показывает положение максимума спектра, а штриховые кривые – его коротковолновую и длинноволновую границы. Следует обратить внимание на большую ширину спектров, причиной которой может быть смещение спектрального контура усиления среды в течение импульса генерации. Нестационарность контура усиления при микросекундных длительностях возбуждения вызывается теми же наве-

денными потерями в резонаторе лазера, имеющими нестационарный характер.

Были также проведены эксперименты по сужению и перестройке спектров генерации полиуретановых матриц, активированных Оксазином 17. Учитывая наличие в полиуретановой среде значительных термических искажений, в качестве дисперсионного элемента использовался интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ), который представлял собой три кварцевые пластины толщиной 1 мм. Такой ИПФ обладает фоновым пропусканием $\sim 0,57$ и обеспечивает полуширину линии пропускания резонатора $\sim 1,87$ нм при области свободной дисперсии $\sim 40,6$ нм. Фильтр размещался под углом Брюстера относительно оси резонатора. При этом длина резонатора составляла 36 см, а выходное зеркало имело коэффициент отражения 0,55. В таких условиях удалось осуществить перестройку длины волны генерации в диапазоне от 617 до 643 нм при ширине $\sim 1,2$ нм.

Чтобы продемонстрировать возможность создания цилиндрических полиуретановых активных элементов большого объема, были исследованы генерационные характеристики матриц длиной 2 см. Как и следовало ожидать, зависимости выходной энергии от интенсивности накачки, концентрации красителя и угла разъюстировки резонатора для этих матриц принципиально не отличались от тех же характеристик более коротких матриц, описанных выше. Главное отличие заключается в том, что на более длинных матрицах удалось достигнуть значительно больших энергий излучения. Так, на матрице с концентрацией $2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л в резонаторе с разъюстированным на $2,5'$ глухим зеркалом и $R_2 = 0,3$ при энергии возбуждения 300 мДж получена энергия генерации ~ 52 мДж. Максимальный КПД наблюдался при накачке ~ 180 мДж и составлял $\sim 18\%$.

3. Результаты экспериментов с матрицами на Оксазине 1 и их обсуждение. Исследования энергетических характеристик полиуретановых матриц, активированных Оксазином 1, проводилось по той же методике, что и для Оксазина 17. При этом измерения удалось провести в более широком диапазоне изменения энергии накачки благодаря тому, что возбуждающий ЖЛК на Оксазине 17 позволял получать энергию генерации до 750 мДж. Эти измерения показали, что на характер зависимостей энергии генерации от энергии накачки и концентрации, как и в случае матриц с Оксазином 17, решающим образом влияют эффекты, связанные с особенностями поперечного способа возбуждения. Эти эффекты обсуждались выше, и потому мы остановимся на изложении наиболее значимых результатов, полученных с учетом их влияния.

Главный результат заключается в том, что энергетическая эффективность полиуретановых матриц с Оксазином 1 оказалась выше, чем с Оксазином 17. Как для матриц длиной 1 см, так и длиной 2 см при сравнимых энергиях возбуждения энергия и КПД генерации Оксазина 1 превышали показатели Оксазина 17. Наглядное представление о возможностях исследуемой среды дает набор энергетических характеристик матриц длиной 2 см с различной концентрацией красителя, представленных на рис. 7 в виде зависимостей энергии (сплошные кривые 1–4) КПД генерации (штриховые кривые 1'–4') от энергии накачки.

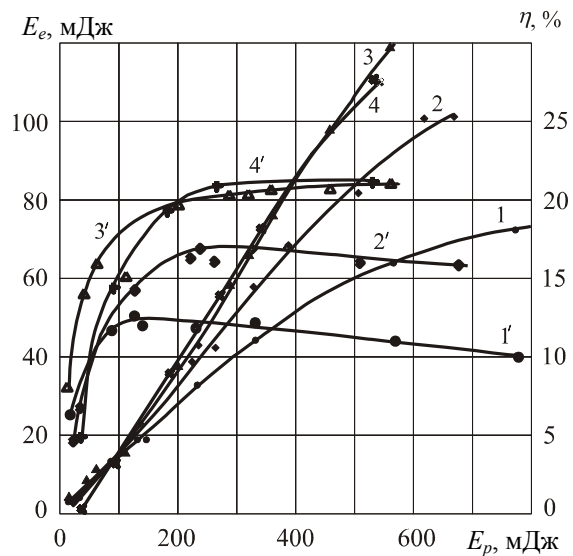


Рис. 7. Зависимости энергии (1–4) и КПД генерации (1'–4') от энергии возбуждения при различных концентрациях C Оксазина 1: 1, 1' – $C = 10^{-3}$ моль/л; 2, 2' – $C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 3, 3' – $C = 2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 4, 4' – $C = 1,25 \cdot 10^{-4}$ моль/л

Зависимости 1, 1' и 2, 2' получены в резонаторе с $R = 0,04$ на матрицах с концентрациями $C = 10^{-3}$ моль/л и $C = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л соответственно. Эти матрицы наиболее эффективно генерировали при использовании стеклянной подложки в качестве выходного зеркала резонатора почти во всем диапазоне изменения энергии накачки, кроме самых малых величин. Кривые 3, 3' характеризуют матрицу с концентрацией $C = 2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л при $R = 0,22$. В таком резонаторе на данной матрице при энергии накачки 560 мДж была получена наибольшая энергия генерации, равная 127 мДж. Кривые 4, 4' относятся к матрице с концентрацией $C = 1,25 \cdot 10^{-4}$ моль/л при $R = 0,3$. На этой матрице была достигнута наивысшая эффективность преобразования, которая составила $\sim 23\%$. Следует отметить, что все исследованные полиуретановые матрицы выдерживали высокие плотности энергии возбуждения без видимых следов деструкции.

При регистрации спектров генерации обнаружено, что на одной и той же матрице, в зависимости от условий эксперимента, возникала генерация либо в одной, либо в двух спектральных полосах. Это демонстрирует рис. 8, на котором схематически показаны полосы интегральных спектров излучения матрицы с концентрацией $C = 2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л при разных энергиях накачки и изменении коэффициента отражения выходного зеркала резонатора.

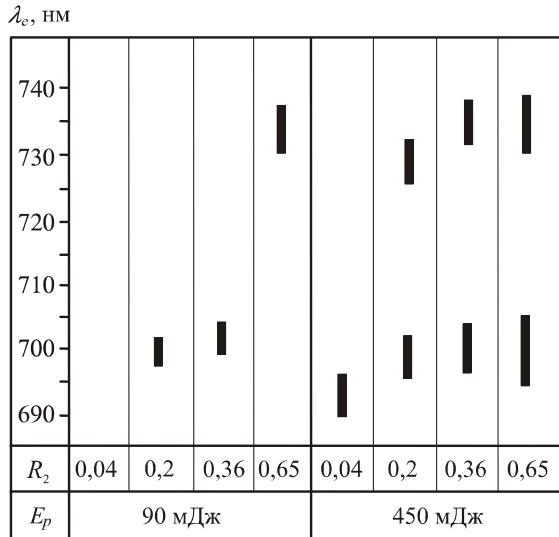


Рис. 8. Интегральные спектры генерации матрицы на Оксазине 1

При малой интенсивности накачки наблюдалась только одна полоса. В низкодобротном резонаторе – коротковолновая (в области ~700 нм), а в высокодобротном – длинноволновая (~735 нм). При повышении энергии накачки возникала двухполосная генерация при всех коэффициентах отражения выходного зеркала резонатора, кроме самого малого. По нашему мнению, это можно объяснить влиянием на спектральный контур усиления активной среды наведенных термооптических потерь резонатора, характерных для несимметричной накачки микросекундной длительности. Оксазин 1 обладает выраженной колебательной структурой на длинноволновом крыле спектра флуоресценции и имеет значительное перекрытие полос поглощения и флуоресценции. Это должно приводить к наличию двух максимумов в спектральном контуре коэффициента усиления лазера, относительная величина которых будет изменяться при изменении общих потерь резонатора. Покажем это, рассчитав спектральное распределение относительной величины коэффициента усиления $K(\nu)$ активной среды, реализующегося в режиме установившейся генерации, т. е. при выполнении условия $K(\nu) = \rho$, где ρ – коэффициент общих потерь

резонатора, ν – частота излучения, связанная с длиной волны как $\nu = c / \lambda$. Под общими потерями будем подразумевать сумму полезных потерь на выходном зеркале и вредных, обусловленных термическими искажениями активного элемента. Термооптические потери носят нестационарный характер, а их величина возрастает при увеличении интенсивности возбуждающего излучения.

Для упрощения примем, что молекула красителя описывается системой двух уширенных синглетных электронных уровней: основного и первого возбужденного. Если населенности этих уровней обозначить N_0 для основного и N_1 для возбужденного, а процессы поглощения и излучения в системе этих уровней характеризовать при помощи эффективных сечений поглощения $\sigma_{ab}(\nu)$ и излучения $\sigma_{em}(\nu)$, то $K(\nu)$ можно представить в виде

$$K(\nu) = N_1 \sigma_{em}(\nu) - N_0 \sigma_{ab}(\nu). \quad (1)$$

Чтобы иметь представление о спектральном распределении коэффициента усиления, достаточно рассчитать относительную величину $K(\nu) / K(\nu^*)$, где ν^* – какая-либо заданная частота. В нашем случае в качестве ν^* удобно выбрать частоту, соответствующую длине волны λ^* второго (длинноволнового) максимума в спектре флуоресценции Оксазина 1. Допустим также, что эффективные сечения поглощения $\sigma_{ab}(\nu)$ и излучения $\sigma_{em}(\nu)$ связаны вытекающим из принципа детального равновесия соотношением

$$\sigma_{ab}(\nu) = \sigma_{em}(\nu) \exp\left[\frac{h}{kT}(\nu - \nu_{el})\right],$$

где ν_{el} – частота чисто электронного перехода.

Обозначив $f(\nu) \equiv \exp\left[\frac{h}{kT}(\nu - \nu_{el})\right]$ и введя в качестве параметра пороговую степень инверсии $\delta = N_1 / N_0$, для отношения $K(\nu) / K(\nu^*)$ получаем простое выражение

$$K(\nu) / K(\nu^*) = \frac{\sigma_{em}(\nu)}{\sigma_{em}(\nu^*)} \left[\frac{\delta - f(\nu)}{\delta - f(\nu^*)} \right]. \quad (2)$$

Входящее в формулу (2) отношение эффективных сечений излучения $\sigma_{em}(\nu) / \sigma_{em}(\nu^*)$ можно определить из экспериментально измеренной кривой интенсивности флуоресценции $F(\lambda)$, полагая, что между сечением излучения и интенсивностью флуоресценции существует прямая зависимость.

Результаты расчетов спектральных контуров коэффициента усиления $K_g(\lambda) = K(\lambda) / K(\lambda^*)$ при различной степени пороговой инверсии δ , выполненных при помощи формулы (2), представлены на рис. 9. Значения частот ν^* и

ν_{el} задавались соответствующими $\lambda^* = 730$ нм и $\lambda_{el} = 625$ нм. Для наглядности приведена экспериментальная кривая спектра флуоресценции, нормированная на величину интенсивности при $\lambda^* = 730$ нм (кривая 6). Хорошо видно, что спектральные зависимости коэффициента усиления имеют два максимума различной величины. Если потери в резонаторе невелики, то генерация происходит при малой степени инверсии и максимум коэффициента усиления находится в длинноволновой полосе (кривая 1).

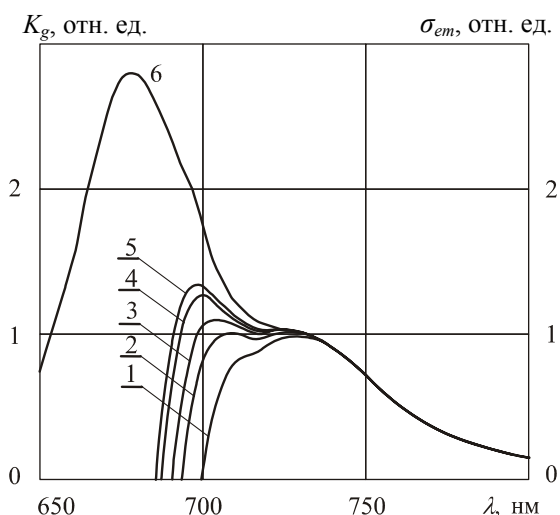


Рис. 9. Спектральные зависимости коэффициента усиления при различной степени инверсии δ : 1 – $\delta = 0,005$; 2 – $\delta = 0,009$; 3 – $\delta = 0,012$; 4 – $\delta = 0,017$; 5 – $\delta = 0,020$; 6 – спектр флуоресценции

Увеличение потерь, в том числе и термооптических, ведет к росту пороговой степени инверсии. В этом случае происходит возрастание величины коротковолнового максимума и спад длинноволнового (кривые 2–5). Заметим, что при некоторых величинах δ в спектре коэффициента усиления могут существовать два максимума с равной интенсивностью. При таких условиях, в зависимости от коэффициента отражения зеркал резонатора и интенсивности накачки, генерация может происходить либо на длине волны одного из максимумов коэффициента усиления, либо поочередно на каждой из них.

Выводы. Таким образом, исследованы генерационные характеристики полиуретановых активных элементов ТЛК, активированных оксазиновыми красителями. Изучено влияние на энергию и спектр излучения наведенных термооптических искажений, возникающих в условиях применения поперечной схемы возбуждения импульсами микросекундной длительности.

Получена эффективная генерация на красителях Оксазин 17 и Оксазин 1. Наивысшие зна-

чения энергии и КПД, полученные на 2-см матрицах с Оксазином 17, составили соответственно 52 мДж и 18 %. Матрицы такой же длины, активированные Оксазином 1, позволили получить энергию свыше 120 мДж и максимальный КПД ~23 %. Продемонстрирована высокая лучевая стойкость полиуретановых матриц.

Обнаружено, что в зависимости от интенсивности накачки и плотности зеркал резонатора в интегральном спектре генерации матриц с Оксазином 1 может наблюдаться как одна, так и две полосы.

Результаты работы позволяют сделать вывод о том, что активные среды на основе полиуретана, активированного красителями Оксазин 17 и Оксазин 1, являются перспективным материалом для создания активных элементов твердотельных лазеров на красителях, работающих в условиях мощной микросекундной накачки.

1. Kranzeilbinder G., Leising G. Organic solid-state dye lasers // Rep. Prog. Phys. – 2000. – 63. – P. 729–762.
2. Costela A., Garcia-Moreno R., Sastre R. et al. Polymeric solid-state dye lasers: recent developments // Phys. Chem. – 2003. – 5. – P. 4745–4763.
3. Sunita Singh, Kanetkar V. R., Sridhara G. et al. Solid-state polymeric dye lasers // Journ. of Luminescence. – 2003. – 101. – P. 285–291.
4. Costela A., Garcia-Moreno I., del Agua D. et al. Solid state dye lasers: new materials based on silicon // Optics Journ. – 2007. – 1. – P. 1–6.
5. Kopylova T. N., Mayer G. V., Reznichenko A. V. et al. Solid-state active media of tunable organic-compound lasers pumped with a laser. I. An XeCl laser // Applied Physics B (Lasers and Optics). – 2001. – B73, No. 1. – P. 25–29.
6. Kopylova T. N., Sukhanov V. B., Mayer G. V. et al. Solid-state active media of tunable organic-compound lasers pumped with a laser. II. A copper vapor laser // Applied Physics B (Lasers and Optics). – 2002. – B74, No. 6. – P. 545–547.
7. Costel A., Garcia-Moreno I., del Agua D. et al. Highly photostable solid-state dye lasers based on silicon-modified organic matrices // Journ. of Applied Physics. – 2007. – 101, No. 7. – P. 731–742.
8. Russell J. A., Pacheco D. P., Russell W. H. et al. Laser threshold and efficiency measurements of solid-state dye lasers operation in the near-infrared under microsecond pumping // Proc. SPIE Solid State Lasers XI. – 2002. – 4630. – P. 24–33.
9. Беличенко А. С., Матюшин Г. А., Матюшин, В. С. и др. Медицинский полимерный лазер на красителях с высокой энергией излучения и меняющейся длиной волны // Лазерная медицина. – 2000. – 4, № 1. – С. 25–29.
10. Алдэг Г. Р., Долотов С. В., Колдунов Н. Ф. и др. Композит микропористое стекло-полимер: новый материал для твердотельных лазеров на красителях. II Лазерные характеристики // Квантовая электроника. – 2000. – 30, № 12. – С. 1055–1059.
11. Безродный В. И., Ищенко А. А. Активные лазерные среды на основе окрашенного полиуретана // Квантовая электроника. – 2000. – 30, № 12. – С. 1043–1048.
12. Bezrodnyi V. I., Ishchenko A. A. High efficiency lasing of a dyedoped polymer laser with 1.06 μm pumping // Applied Physics B (Lasers and Optics). – 2001. – B73, No. 3. – P. 283–285.
13. Безродный В. И., Деревянко Н. А., Ищенко А. А. и др. Лазер на красителях на основе полиуретановой матрицы // Журн. техн. физики. – 2001. – 71, вып. 7. – С. 72–78.
14. Николаев С. В., Пожар В. В., Дзюбенко М. И. Лазерная генерация микросекундных импульсов на полиуретановых матрицах, активированных красителями // Квантовая электроника. – 2006. – 36, № 8. – С. 758–762.

15. Николаев С. В., Пожар В. В., Дзюбенко М. И. Эффективная генерация красителя Оксазин 1 в твердой полимерной матрице // Радиотехника. – 2006. – Вып. 147. – С. 376–380.

EMISSION CHARACTERISTICS
OF OXAZINE DYES INCORPORATED
IN SOLID POLYURETHANE MATRICES

S. V. Nikolaev, V. V. Pozhar, M. I. Dzyubenko

Energy and spectral emission characteristics of cylindrical polyurethane matrices, doped by Oxazine 17 and Oxazine 1 dyes were investigated. The influence of induced thermo-optical distortions arising in the conditions of application of transverse mode pumping on energy and emission spectrum was studied. The highest values of energy and efficiency, obtained of the two-centimeter matrices made up: for Oxazine 17, correspondingly, 52 mJ and 18 %, and for Oxazine 1 an 120 mJ and 23 %. The conclusion is made that the polyurethane media doped by these dyes, are a perspective material for creating solid-state laser active elements capable to work in the conditions of powerful microsecond pumping.

Key words: solid-state dye laser, polyurethane matrix, oxazine dyes.

ГЕНЕРАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ОКСАЗИНОВИХ БАРВНИКІВ У ТВЕРДИХ
ПОЛІУРЕТАНОВИХ МАТРИЦЯХ

С. В. Ніколаєв, В. В. Пожар, М. І. Дзюбенко

Досліджено енергетичні та спектральні характеристики випромінювання циліндричних поліуретанових матриць, активованих барвниками Оксазин 17 та Оксазин 1. Вивчено вплив на енергію та спектр випромінювання наведених термооптичних спотворень, що виникають за умов використання поперечної схеми збудження. Найвищі значення енергії та ККД, що отримані на 2-см матрицях, склали відповідно: для Оксазина 17 – 52 мДж і 18 %, а для Оксазина 1 – 120 мДж і 23 %. Зроблено висновок про те, що поліуретанові середовища, активовані цими барвниками, є перспективним матеріалом для створення твердотільних лазерних елементів, які здатні працювати в умовах потужного мікросекундного накачування.

Ключові слова: твердотільний лазер на барвниках, поліуретанова матриця, оксазинові барвники.

Рукопись поступила 26 мая 2009 г.