

# Композит микропористое стекло – полимер: новый материал для твердотельных лазеров на красителях.

## II. Лазерные характеристики

Г.Р.Алдэг\*, С.М.Долотов\*\*, М.Ф.Колдунов\*\*\*, Я.В.Кравченко\*\*\*\*, А.А.Маненков\*\*\*\*,  
Д.П.Пачико\*, Е.П.Пономаренко\*\*, А.В.Резниченко\*\*, Г.П.Роскова\*\*\*\*\*, Т.С.Цехомская\*\*\*\*\*

*Исследованы эффективность преобразования и ресурс работы лазерных элементов на основе композита микропористое стекло – полимер (МПС – П), активированного органическими красителями. Показано, что как эффективность преобразования, так и ресурс работы лазерных элементов достигают значений, полученных для тех же красителей в объемных полимерных элементах. Хорошие лазерные характеристики исследованных элементов выгодно сочетаются с высокой механической и лазерной прочностью и отличными термооптическими свойствами композита МПС – П.*

**Ключевые слова:** активные среды, лазерные среды, микропористое стекло.

### Введение

Попытки применить микропористое стекло (МПС) для создания лазерных элементов (ЛЭ) предпринимались неоднократно [1–3]. В наиболее ранних работах краситель адсорбировался на поверхность микропор [1]. Полученные таким образом ЛЭ обладали малым ресурсом работы и практического применения не нашли.

Позднее были предложены твердотельно-жидкостные ЛЭ на основе МПС, пропитанного раствором красителя [2, 3]. Они, по существу, оставались жидкостными, с характерными для таких элементов недостатками, но обладали лучшими термооптическими характеристиками [2, 3]. Однако ресурс их работы также был невелик и, кроме того, они не допускали прокачки раствора красителя методами, развитыми для жидкостных элементов. Попытки организовать «прокачку» другими способами [3] успеха не имели. По этой причине твердотельно-жидкостные ЛЭ также не нашли практического применения.

Эффективные твердотельные ЛЭ были разработаны на основе полимерной матрицы, активированной красителями [4–9]. Сочетание свойств МПС с полимерами в композите МПС – П позволяет существенно улучшить ряд характеристик ЛЭ (лазерную прочность, механическую твердость и др. [10]). Остается, однако, неясным, будут ли эффективность преобразования красителей и ресурс их работы в композите МПС – П столь же высокими, как и в полимерах. Специфические условия формирования полимеров в узких каналах МПС не гарантируют

идентичности свойств объемных полимеров и полимеров, внедренных в МПС, а также аналогичного стабилизирующего влияния низкомолекулярных добавок на красители.

Цель настоящей работы – изучение эффективности преобразования и ресурса ЛЭ, созданных на основе МПС – П, и сравнение полученных результатов с теми же характеристиками для ЛЭ на основе объемных полимеров.

### 1. \*Исследования лазерных характеристик

#### 1.1. Экспериментальные установки

Генерация лазерного излучения исследовалась в схеме с продольной накачкой. В качестве источника возбуждения применялся YAG : Nd<sup>3+</sup>-лазер с модулированной добротностью и удвоением частоты. Исследуемый ЛЭ помещался в резонатор с дихроичным зеркалом (прозрачным для  $\lambda_p = 532$  нм и глухим для длины волны генерации  $\lambda_g$ ). Параметры установок, использованных при измерениях, и режимы их работы приведены ниже.

Тип модулятора	Многомодовый режим	
	Пассивный	Одномодовый режим Электрооптический
Длительность импульса (нс)	5	5
Диаметр пучка ( $1/e^2$ ) (мм)	1.4	1.3
Длина резонатора (см)	7	10
Радиус кривизны глухого зеркала (м)	0.5	$\infty$
Коэффициент отражения плоского выходного зеркала $R_m$ (%)	20, 50	62
Интенсивность накачки $I_p$ (МВт/см <sup>2</sup> )	25, 50	9, 22
Частота повторения импульсов $F$ (Гц)	5	11/3, 33

Длина волны излучения генерации  $\lambda_g$  измерялась с помощью волномера Coherent WaveMate и монохроматора Optrometrics MC1-03 с погрешностью  $\pm 1$  нм.

\*Physical Sciences Inc., 20 New England Business Center, Andover, MA, 01810 USA

\*\*НПФ «Альфа-Аконис», Россия, 141700 Долгопрудный Моск. обл., Лихачевский проезд, 5

\*\*\*НПО «Оптроника», Россия, 141700 Долгопрудный, Моск. обл., а/я 3

\*\*\*\*Институт общей физики РАН, Россия, 117769 Москва, ул. Вавилова, 38

\*\*\*\*\*Институт химии силикатов РАН, Россия, 199155 С.-Петербург, ул. Одоевского, 24, корп. 2

## 1.2. Исследования и методы обработки данных

Измерялись эффективность преобразования излучения накачки ЛЭ  $\eta$ , их ресурс работы (по уровню 0.7)  $N_{0.7}$ , зависимость  $\eta$  от интенсивности накачки  $I_p$  в широкой области интенсивностей, а также влияние частоты повторения импульсов накачки на  $\eta$  и  $N_{0.7}$ . Эффективность преобразования определялась из соотношения

$$\eta = (E_g/E_p)100\%$$

( $E_p$  и  $E_g$  – энергия импульса накачки и генерации соответственно). Величина  $N_{0.7}$  определялась из соотношения  $\eta(N_{0.7}) = 0.7\eta_0$ , где  $\eta_0$  – эффективность преобразования при воздействии первого импульса накачки.

При исследовании  $\eta$  одна область ЛЭ облучалась малым числом импульсов, удовлетворяющих условию  $N \ll N_{0.7}$ , а при изучении ресурса ЛЭ – серией импульсов равной интенсивности до момента выполнения соотношения  $\eta(N_{0.7}) = 0.7\eta_0$ . При всех исследованиях различные облучаемые области находились на расстоянии не менее двух диаметров лазерного пучка друг от друга, так что их взаимное влияние исключалось.

При расчете  $\eta$  мы пренебрегали потерями энергии излучения, связанными с френелевским отражением от поверхности ЛЭ. В случае ЛЭ малой оптической плотности часть энергии импульса проходила сквозь них, и тогда расчет  $\eta$  основывался на поглощенной, а не на падающей энергии импульса накачки.

## 1.3. Изучаемые ЛЭ и результаты исследования

Исследования преобразования излучения в лазерах на основе композита МПС–П проводились на ЛЭ, активированных красителями пиррометенового ряда (PM 580, PM 597, PM 650) и красителем ксантенового ряда Rh 11B. В мономерную композицию, использованную для изготовления ЛЭ, входили метилметакрилат (ММА) и низкомолекулярные добавки, обычно применяемые для повышения стабильности красителя в объеме полимера [4]. ЛЭ имели размеры  $20 \times 10 \times 4$  мм и были оптически прозрачными в видимой области спектра с однородным

Табл.1. Эффективность преобразования ЛЭ

Краситель	$C$ (ммоль/л)	$R_m$ (%)	$P_0$ (мкДж)	$\eta$ (%)	$\eta_{max}$ (%)
PM 580	2.4	20	–	–	46
		50	–	–	53
PM 597	1.5	20	150	65	64
		50	130	69	67
		20	230	73	69
PM 650	3.0	50	160	65	63
		20	700	31	28
PM650	2.15	50	610	20	18
		20	670	26	23
Rh 11B	4.3	50	290	17	16
		20	310	56	55
Rh 11B	0.2	50	60	52	53
		20	340	58	54
Rh 11B	0.5	50	160	51	50
		20	450	46	41
Rh 11B	1.0	50	100	31	31

Примечание:  $\eta_{max}$  – максимальная эффективность преобразования во всем исследованном диапазоне  $I_p$ ;  $C$  – приведенная концентрация красителя, равная концентрации красителя в мономерной композиции;  $P_0$  – порог генерации.

пространственным распределением красителей. При накачке излучением с  $\lambda_p = 532$  нм выбранные красители обладают высокой эффективностью преобразования и большим ресурсом работы в полимерной матрице [6–9].

Величины  $\eta$  и  $N_{0.7}$ , полученные в режиме многомодовой накачки, представлены в табл.1 и 2.

Табл.2. Ресурс работы ЛЭ.

Краситель	$C$ (ммоль/л)	$R_m$ (%)	$I_p$ (МВт/см <sup>2</sup> )	$F$ (Гц)	$N_{0.7}$ (имп.)
PM 580	2.4	20	25	1	3300
		20	25	5	2500
PM 597	3.0	20	25	5	60000
		50	50	5	45000
PM 650	4.3	20	25	5	90000
		20	50	5	46000
Rh 11B	1.0	20	25	5	110000

## 2. Результаты исследования

### 2.1. ЛЭ с красителем PM 580

#### 2.1.1. Многомодовый режим накачки

Для красителя PM 580 излучение с  $\lambda_p = 532$  нм соответствует краю полосы поглощения. По этой причине активированный им ЛЭ имел малую оптическую плотность на длине волны накачки. Для ЛЭ с концентрацией красителя  $C$  (PM 580) = 2.4 ммоль/л пропускание составляло 12 % при  $I_p = 10$  МВт/см<sup>2</sup> и возрастало до 27 % при  $I_p = 50$  МВт/см<sup>2</sup>. Приведенные в табл.1  $\eta$  и  $\eta_{max}$  рассчитаны с учетом поглощенной, а не падающей энергии, как было указано выше.

Зависимость  $\eta(I_p)$  при  $R_m = 20$  % показана на рис.1, из которого видно, что эффективность преобразования сильно варьируется при облучении различных областей ЛЭ и практически не увеличивается с увеличением  $I_p$ . Лишь в случае  $R_m = 50$  % наблюдается незначительный рост  $\eta$  с увеличением  $I_p$ . Такое поведение  $\eta(I_p)$ , как и локальные вариации  $\eta$ , имело место только для ЛЭ с красителем PM 580 при накачке многомодовым излучением. Локальные вариации  $\eta$  не могут быть связаны с распределением красителя по объему ЛЭ, т. к. краситель равномерно распределен по объему композита МПС–П [10]. Эти вариации, возможно, связаны с генерацией паразитных мод в ЛЭ.

Относительно низкий ресурс ЛЭ с PM 580 в условиях многомодовой накачки также, по-видимому, связан с генерацией в нем паразитных мод.

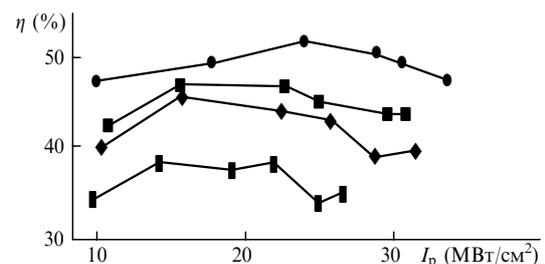


Рис.1. Зависимости эффективности преобразования лазерного излучения  $\eta$  в ЛЭ на основе МПС–П с красителем PM 580 от интенсивности накачки  $I_p$  для различных областей при  $C = 2.4$  ммоль/л и  $R_m = 20\%$ .

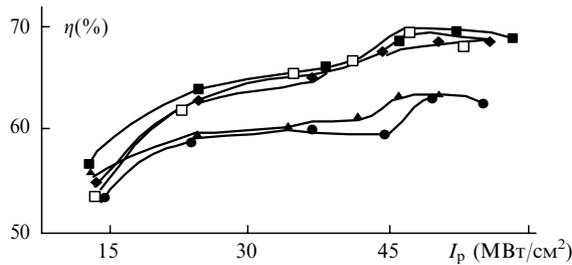


Рис.2. Зависимости эффективности преобразования излучения  $\eta$  от интенсивности накачки  $I_p$  для различных областей ЛЭ на основе композита МПС-П с красителем РМ 597 при  $C = 3$  ммоль/л и  $R_m = 20\%$  (■, ◆) и  $50\%$  (▲, ●); □ - контрольный элемент из МПММА с  $R_m = 20\%$ .

### 2.1.2. Одномодовый режим накачки

В условиях одномодовой накачке устойчивой генерации на ЛЭ с  $C$  (РМ 580) = 2.4 ммоль/л получить не удалось, что, по-видимому, обусловлено малой оптической плотностью образца и малым  $I_p$ . Увеличение  $C$  (РМ 580) до 6 ммоль/л дало существенный рост оптической плотности ЛЭ на длине волны накачки. Для этого ЛЭ порог генерации в одномодовом режиме накачки составлял 7 мДж/см<sup>2</sup>,  $\eta_{\max} = 46\%$  (при  $I_p = 9$  МВт/см<sup>2</sup>) и  $N_{0,7} = 50000$  имп.

## 2.2. ЛЭ с красителем РМ 597

### 2.2.1. Многомодовый режим накачки

Краситель РМ 597 известен как высокоэффективный и стабильный [11]. Результаты, приведенные в табл.2 и на рис.2, показывают, что  $\eta$  (в изученных пределах изменения  $C$  (РМ 597) и условий испытаний) слабо зависит как от концентрации  $C$  (РМ 597) в ЛЭ, так и от  $R_m$ . Заметим, что эффективность  $\eta_{\max} = 69\%$  для ЛЭ с  $C$  (РМ 597) = 3 ммоль/л при  $R_m = 20\%$  совпадает с  $\eta$ , полученной при тех же условиях, для ЛЭ на основе модифицированного полиметилметакрилата (МПММА) с  $C$  (РМ 597) = 0.1 ммоль/л.

Различие концентраций красителя в сравниваемых полимерном и композитном ЛЭ обусловлено следующими обстоятельствами: объем пор в МПС, использованном для композитного ЛЭ, составляет 32 % его общего объема; коэффициент заполнения красителем пор МПС равен 0.2–0.3 [10]. Поскольку  $C$  (РМ 597) = 3 ммоль/л является концентрацией красителя в исходной мономерной композиции, то с учетом факторов заполнения реальная концентрация  $C_{\text{эф}}(\text{РМ 597}) = 0.1$  ммоль/л.

Эффективность преобразования  $\eta(I_p)$  для ЛЭ с красителем РМ 597 линейно растет с увеличением  $I_p$ . Точно так же ведет себя и зависимость  $\eta(I_p)$  для ЛЭ из МПММА (см. рис.2). Ресурс работы ЛЭ с  $C$  (РМ 597) = 3 ммоль/л составляет 60000 и 45000 имп. при  $I_p = 25$  и 50 МВт/см<sup>2</sup> соответственно. Кинетика изменения  $\eta$  в процессе работы ЛЭ показана на рис.3. При этом наблюдается медленное изменение длины волны генерации от 571 до 568 нм.

### 2.2.2. Одномодовый режим накачки

При одномодовом режиме накачки ЛЭ с  $C$  (РМ 597) = 2 ммоль/л имел эффективность преобразования  $\eta = 52\%$  при  $I_p = 9$  МВт/см<sup>2</sup>, а ресурс его работы  $N_{0,7} \approx 50000$  имп. Увеличение  $I_p$  до 22 МВт/см<sup>2</sup>, как и следовало ожидать, привело к росту  $\eta$  до 65 %. Порог генерации в этом случае равнялся 5 мДж/см<sup>2</sup>.

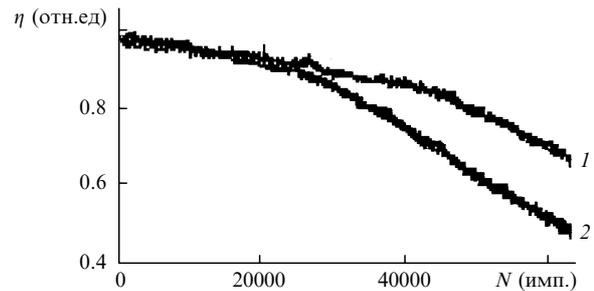


Рис.3. Зависимости эффективности преобразования  $\eta$  от числа импульсов  $N$  облучения одной области лазерного элемента с красителем РМ 597 при  $C = 3$  ммоль/л,  $F = 5$  Гц,  $R_m = 20\%$  для  $I_p = 25$  (1) и 50 МВт/см<sup>2</sup> (2).

## 2.3. ЛЭ с красителем РМ 650

### 2.3.1. Многомодовый режим накачки

Краситель РМ 650 является наиболее длинноволновым среди исследованных нами: его длина волны генерации составляет 625 нм. Особенность красителя – относительно низкий по сравнению с другими красителями пиррометенового ряда квантовый выход ( $\phi = 0.54$  в этаноле): для РМ 580  $\phi = 0.90$ , для РМ 597  $\phi = 0.77$ . Следствием этого является более низкая эффективность генерации и сильный нагрев ЛЭ во время работы, который приводит к термическому распаду красителя и, таким образом, к уменьшению ресурса работы ЛЭ.

Более высокая теплопроводность композита МПС-П по сравнению с МПММА позволяет надеяться на больший ресурс работы этого ЛЭ. Эффективность преобразования красителя РМ 650 (табл.1) достигает 31 % при  $C = 2.15$  ммоль/л,  $R_m = 20\%$  и  $I_p = 20$  МВт/см<sup>2</sup>. Заметим, что для этого ЛЭ наблюдалось незначительное (примерно 3–4 %) пропускание излучения накачки, учтенное при расчете  $\eta$ .

Эффективность преобразования  $\eta(I_p)$ , как и для красителя РМ 597, медленно увеличивается с ростом  $I_p$  и для ЛЭ с  $C$  (РМ 650) = 4.3 ммоль/л (т.е.  $C_{\text{эф}}(\text{РМ 650}) = 0.2$  ммоль/л) при  $R_m = 20\%$ ,  $I_p = 20$  и 50 МВт/см<sup>2</sup> составляет 17 и 26 % соответственно. Полученная эффективность преобразования несколько уступает  $\eta$  для ЛЭ с  $C$  (РМ 650) = 0.2 ммоль/л из МПММА, равной 32 % при  $I_p = 35$  МВт/см<sup>2</sup> и  $R_m = 20\%$ .

Ресурс работы ЛЭ, как и ожидалось, довольно значителен:  $N_{0,7} = 90000$  имп. при  $I_p = 25$  МВт/см<sup>2</sup>, что превышает ресурс для ЛЭ, активированного красителем РМ 597 при тех же условиях. Работа ЛЭ, как и в других случаях, сопровождалась уменьшением длины волны генерируемого излучения с 625 до 620 нм.

### 2.3.2. Одномодовый режим накачки

При одномодовой накачке эффективность преобразования была невелика и при  $I_p = 22$  МВт/см<sup>2</sup> для образца с  $C$  (РМ 650) = 4.3 ммоль/л достигала 17 %. Порог генерации составлял 35 мДж/см<sup>2</sup>.

## 2.4. ЛЭ с красителем Rh 11B

### 2.4.1. Многомодовый режим накачки

Краситель Rh 11B легко входит в композит, что позволяет варьировать плотность ЛЭ в широких пределах и оптимизировать как  $\eta$ , так и  $N_{0,7}$ .

Для многомодового режима накачки оптимальным является ЛЭ с  $C$  (Rh 11B) = 0.2 ммоль/л, для которого  $\eta = 55\%$  при  $I_p = 25$  МВт/см<sup>2</sup> и  $R_m = 20\%$ . Как умень-

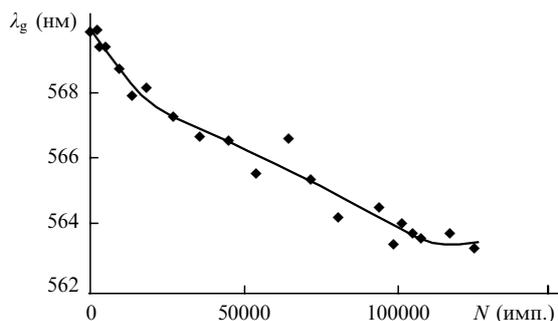


Рис. 4. Зависимость длины волны генерации  $\lambda_g$  от числа импульсов накачки  $N$  для ЛЭ из МПС–П с красителем Rh 11B при  $C = 1$  ммоль/л,  $I_p = 25$  МВт/см<sup>2</sup>,  $F = 5$  Гц и  $R_m = 20\%$ .

шение, так и увеличение  $C$  (Rh 11B) в ЛЭ приводит к уменьшению  $\eta$ . Увеличение  $C$  (Rh 11B) до 1 ммоль/л вызывает снижение  $\eta$  до 40 %, что, по-видимому, обусловлено концентрационным тушением люминесценции красителя.

Исследование зависимости  $\eta(I_p)$  выявило медленный рост эффективности преобразования излучения с увеличением  $I_p$ ; вариации  $\eta$  при облучении различных областей ЛЭ отсутствовали. Ресурс работы ЛЭ с  $C$  (Rh 11B) = 1 ммоль/л при  $I_p = 20$  МВт/см<sup>2</sup> и  $R_m = 20\%$  составил 110000 имп. Существенно, что  $N_{0.7}$  сильно уменьшается с ростом  $I_p$  и при  $I_p = 50$  МВт/см<sup>2</sup> составляет 22000 имп. Такое поведение  $N_{0.7}(I_p)$  указывает на существенную роль нелинейных процессов в деструкции красителя Rh 11B.

В процессе работы у рассматриваемых ЛЭ, как и у ЛЭ с пиррометеновыми красителями, уменьшалась длина волны излучения генерации. Кинетика ее уменьшения при воздействии импульсов накачки  $I_p = 25$  МВт/см<sup>2</sup> с частотой 5 Гц при  $R_m = 20\%$  показана на рис. 4. Общий сдвиг длины волны генерации после 100000 имп. составил 7 нм, а длина волны излучения достигла 563 нм.

#### 2.4.2. Одномодовый режим накачки

В случае одномодовой накачки для красителя Rh 11B была получена эффективность  $\eta = 45\%$  при  $I_p = 9$  МВт/см<sup>2</sup>,  $C = 0.1$  ммоль/л, а ресурс  $N_{0.7} = 25000$  имп.

Для оценки влияния низкомолекулярной добавки на краситель в композите МПС–П был изготовлен контрольный ЛЭ без ее применения. Концентрация красителя в нем составляла 0.1 ммоль/л. Генерационные испытания этого ЛЭ дали тот же результат:  $\eta = 45\%$  при  $I_p = 9$  МВт/см<sup>2</sup>. Однако ресурс работы  $N_{0.7}$  ЛЭ понизился в 10 раз и составил всего 2500 импульсов. Таким образом, механизм фотообесцвечивания красителя и методы его стабилизации, по-видимому, одинаковы для полимера и композита и определяются процессами в полимерной компоненте композита.

### 3. Обсуждение

Результаты работы показывают, что при накачке ЛЭ импульсами излучения второй гармоники YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера для всех исследованных красителей эффективности преобразования излучения и ресурс работы ЛЭ из композита МПС–П сравнимы с соответствующими параметрами, достигнутыми для ЛЭ из МПММА. Наиболее ясно это видно из результатов, полученных для красителей Rh 11B и PM 597, на которых были выпол-

нены самые подробные исследования и созданы ЛЭ, обладающие достаточной оптической плотностью для эффективной работы. Эти данные позволяют сделать вывод об отсутствии сколько-нибудь существенных особенностей внедрения красителей в полимер, связанных с МПС. Это означает, что принципы стабилизации красителей, разработанные для полимерной матрицы, применимы и для их стабилизации в композите МПС–П, а эффективность преобразования излучения и ресурс работы будут соответствовать параметрам, достигнутым у полимерных ЛЭ.

В то же время ЛЭ из композита МПС–П обладают важными достоинствами: они имеют хорошие механические и термооптические характеристики и их лазерная прочность выше, чем у объемных полимерных элементов. Следствием этого является стабильность характеристик ЛЭ при больших частотах следования лазерных импульсов, а также в равной мере высокая эффективность преобразования излучения как для одномодовой, так и для многомодовой накачки. Отметим, что характеристики ЛЭ были неизменными во всем исследованном диапазоне частот следования лазерных импульсов (вплоть до 33 Гц), а ресурс работы элементов был ограничен фотообесцвечиванием красителя (ни в одном из экспериментов матрица композита МПС–П при используемой интенсивности накачки не разрушалась).

При ресурсных испытаниях ЛЭ в процессе работы наблюдался сдвиг длины волны генерации в коротковолновую область. Такое поведение объясняется хорошо известной концентрационной зависимостью длины волны генерации [12]. В процессе работы часть красителя разрушается, а его концентрация уменьшается, что и обуславливает сдвиг длины волны генерации. Эта точка зрения находит подтверждение в различии длин волн генерации ЛЭ, имеющих разные концентрации красителя: для ЛЭ с  $C$  (PM 597) = 1.5 и 3 ммоль/л длины волн генерации равны 568 и 571 нм соответственно.

Важнейшей характеристикой ЛЭ является ресурс его работы. В подавляющем большинстве публикаций, посвященных исследованию твердотельных ЛЭ, он определяется из условия  $\eta(N_s) = s\eta_0$ , где  $\eta_0$  – эффективность генерации при воздействии первого импульса накачки;  $s$  – число, которое мы полагали равным 0.7. Найденный таким образом ресурс является технической характеристикой ЛЭ. Его главным недостатком с точки зрения физики деструкции ЛЭ является зависимость от большого числа параметров, что не позволяет корректно сопоставлять результаты исследований ресурса ЛЭ, полученные различными авторами. По этой причине на основании данных о техническом ресурсе сложно оценить как стабильность красителя в матрице, так и совместимость матрицы с красителем.

Для понимания механизма фотодеструкции красителя, сравнения фотостойкости красителей в различных матрицах и в условиях эксперимента необходим специальный анализ, учитывающий различные факторы. В частности, в качестве характеристик устойчивости красителя можно ввести энергетический ресурс  $W_s$  – поглощенная молекулой красителя энергия, приводящая к снижению эффективности преобразования излучения от  $\eta_0$  до  $s\eta_0$ . Оценка  $W_{0.7}$  на основе данных, приведенных в табл. 2, дает  $W_{0.7}(\text{Rh 11B}) \approx 70$  ТДж/моль при  $I_p = 25$  МВт/см<sup>2</sup> и 15 ТДж/моль при  $I_p = 50$  МВт/см<sup>2</sup>, тогда как  $W_{0.7}(\text{PM 597}) \approx 30$  ТДж/моль при  $I_p = 50$  МВт/см<sup>2</sup>. Последнее значе-

ние  $W_{0.7}$  полезно сопоставить с результатами ресурсных исследований этого красителя в золь-гельной матрице [13]. Согласно данным, представленным в [13], в золь-гельной матрице  $W_{0.7}(\text{PM 597}) = 0.15 - 1.5$  ТДж/моль, что значительно меньше  $W_{0.7}$ , характерного для этого же красителя в композите МПС – П.

Таким образом, краситель PM 597 значительно стабильнее в матрице композита МПС – П, нежели в золь-гельной. Большой технический ресурс  $N_s$  для золь-гельной матрицы, полученный в [13], связан, по-видимому, с тем, что в работе [13] толщина ЛЭ (10 мм и более) превышает толщины исследованных нами ЛЭ, а также с условием  $s = 0.5$ , принятым при определении ресурса  $N_s$  в [13].

## Выводы

Таким образом, ЛЭ, созданные на основе композита МПС – П, обладают хорошими физическими характеристиками: высокой механической и лазерной прочностью, хорошими термооптическими характеристиками, стабильностью работы в частотном режиме, легко активируются красителями и т.д. Исследования эффективности преобразования излучения и ресурса работы лазерных элементов из композита МПС – П показывают, что опыт по стабилизации красителя в матрице, накопленный при изучении полимерных элементов, применим в полной мере и к композиту МПС – П. Полученные эффективность преобразования излучения и ресурс работы ЛЭ сравнимы с аналогичными характеристиками ЛЭ на основе МПММА. По этой причине композит МПС – П является одним из наиболее перспективных материалов для создания твердотельных ЛЭ, активированных красителями.

1. Дульнев Г.Н., Земский В.И., Крынецкий Б.Б и др. *Письма в ЖТФ*, **4**, 1041 (1978).
2. Альтшулер Г.Б., Дульнева Е.Г., Крылов К.И. *Квантовая электроника*, **10**, 1222 (1983).
3. Альтшулер Г.Б., Дульнева Е.Г., Ерофеев А.В., Мокиенко И.А. *Письма в ЖТФ*, **14**, 2290 (1988).
4. Дюмаев К.М., Маненков А.А. Маслоуков А.А и др. *Труды ИОФАН*, **33**, 144 (1991).
5. Дюмаев К.М., Маненков А.А., Маслоуков А.П. и др. *Квантовая электроника*, **10**, 810 (1983).
6. Kravchenko Ya.V., Manenkov A.A., Matushin G.A., et al. *Proc. SPIE*, **2986**, 124 (1997).
7. Garnov S.V., Klimentov S.M., Manenkov A.A. et al. *Proc.SPIE*, **3265**, 306 (1998).
8. Gromov S.V., Dyumaev A.A., Manenkov A.A., et al. *J.Opt.Soc. Amer. B*, **2**, 1028 (1985).
9. Anderson R.S., Hermes R.E., Matyushin G.A., et al. *Proc.SPIE*, **3265**, 13 (1998).
10. Алдэг Г.Р., Долотов С.М., Колдунов М.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 954 (2000).
11. Rahn M.D., King T.A. *Proc.SPIE*, **3613**, 94 (1999).
12. Шефер Ф.П. В кн. *Лазеры на красителях* (М., Мир, 1976, с. 5).
13. Faloss M., Cava M. et al. *Appl.Optics*, **36**, 6760, (1997).

**H.R.Aldag, S.M.Dolotov, M.F.Koldunov, Ya.V.Kravchenko, A.A.Manenkov, D.P.Pacheco, E.P.Ponomarenko, A.V.Reznichenko, G.P.Roskova, T.S.Tsekhomskaya. A microporous glass-polymer composite as a new material for solid-state dye lasers. II. Lasing parameters.**

The conversion efficiency and operating life of the laser elements based on a microporous glass – polymer (MPG – P) composite doped with organic dyes are studied. It is shown that both the conversion efficiency and the operating life of the laser elements achieve the values obtained for the same dyes in bulk polymer elements. Good lasing parameters of the elements studied are advantageously combined with high mechanical and laser strength and excellent thermal optical properties of the MPG – P composite.