

# Эффективный твердотельный лазер на основе композита нанопористое стекло – полимер, активированного красителями феналеминового ряда (область генерации 600 – 660 нм)

С.М.Долотов<sup>1</sup>, М.Ф.Колдунов<sup>2</sup>, Я.В.Кравченко<sup>3</sup>, В.Б.Луговой<sup>2</sup>, А.А.Маненков<sup>3</sup>,  
В.А.Петухов<sup>4</sup>, Е.П.Пономаренко<sup>1</sup>, Г.П.Роскова<sup>5</sup>, Т.С.Цехомская<sup>5</sup>

*Исследованы спектральные и генерационные характеристики твердотельных лазерных элементов (ЛЭ), изготовленных из композита нанопористое стекло – полимер, активированного красителями феналеминового ряда. Получены высокая эффективность преобразования излучения (35%–40%) в области длин волн 600–660 нм и большой ресурс работы ЛЭ при накачке импульсами наносекундной длительности второй гармоники YAG: Nd<sup>3+</sup>-лазера. Сопоставление характеристик твердотельных ЛЭ с жидкостными, активированными теми же красителями, показало, что по эффективности преобразования излучения твердотельный ЛЭ не уступает жидкостному.*

**Ключевые слова:** красители феналеминового ряда, композит нанопористое стекло – полимер, твердотельные лазерные элементы.

## 1. Введение

Создание эффективных твердотельных лазеров на основе органических красителей является одной из актуальных задач лазерной физики и техники. Для ее решения необходимо разработать твердотельную матрицу, пригодную для введения красителей и обладающую хорошими механическими, оптическими и другими характеристиками. Необходимо также поиск красителей, которые легко вводятся в выбранную матрицу и эффективно преобразуют излучение накачки в излучение требуемого диапазона длин волн.

В настоящее время в качестве твердотельных матриц для введения красителей используются оптические полимеры [1–3], золь-гельные стекла [4–6] и композит нанопористое стекло – полимер (НПСР) [7–9].

Применение композита НПСР является, по-видимому, оптимальным решением проблемы матрицы для лазерного элемента (ЛЭ) [7–9]. Это позволяет использовать преимущества хорошего сочетания высокой растворимости органических красителей в полимерном составе с жесткостью кварцевого каркаса композита, обеспечивающего отличные механические свойства. Композит легко обрабатывается традиционными методами полировки стекла до высокого оптического качества и обладает отличными термооптическими и климатическими характеристиками.

Результаты работы [9] показывают, что ЛЭ на основе композита НПСР, активированного красителями пирометенового ряда, обладают высокой эффективностью преобразования излучения накачки второй гармоники YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера в область длин волн 540–600 нм. Однако в области более 600 нм эффективность преобразования излучения и ресурс работы ЛЭ, активированных красителями этого ряда, падают. По этой причине поиск красителей, эффективно преобразующих излучение с  $\lambda = 532$  нм в область длин волн свыше 600 нм, представляет значительный интерес.

В связи с проблемой выбора эффективного красителя следует подчеркнуть, что, согласно литературным данным (см. напр., [2, 6]), эффективность генерации излучения красителями в жидком растворителе, как правило, выше, чем в твердотельной матрице. Эти результаты в достаточной мере неожиданны. Молекула красителя, внедренная в твердотельную матрицу, приобретает дополнительную «жесткость», следствием чего является подавление каналов безызлучательной релаксации, рост квантового выхода люминесценции и т.д. [10]. Такие изменения дают основания ожидать, что эффективность преобразования излучения также должна возрастать, тогда как на практике наблюдается обратное.

Цель настоящей работы – создание ЛЭ на основе композита НПСР, эффективно преобразующего излучение второй гармоники YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера в область длин волн 600–660 нм, а также сопоставление эффективности генерации излучения красителями в жидких растворителях и твердом композите.

## 2. Исследуемые красители

В настоящей работе исследовались относительно малоизученные красители феналеминового ряда Ф510, Ф512 и Ф640. Эти красители хорошо люминесцируют в этанольных растворах и генерируют излучение в области длин волн более 600 нм при накачке второй гармоникой

<sup>1</sup>НПФ «Альфа-Аконис», Россия, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Лихачевский проезд, 5

<sup>2</sup>НПО «Оптроника», Россия, 141700 Долгопрудный, Московская обл., а/я 3

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул.Вавилова, 38

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

<sup>5</sup>Институт химии силикатов РАН, Россия, 119155 С. Петербург, ул. Одоевского, 24, к. 2

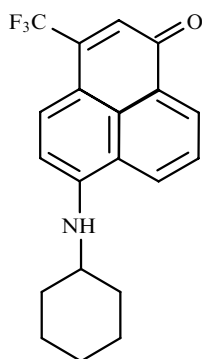


Рис.1. Структурная формула молекулы красителя феналемин 512

YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера [11]. Структурная формула молекулы одного из этих красителей (Ф512) представлена на рис.1. Несмотря на то они относятся к одному ряду, между ними есть существенное различие: красители Ф510 и Ф512 имеют нейтральную форму, тогда как Ф640 – ионную.

Одновременно с этими красителями для сравнения исследовался краситель пиррометена 650 (ПМ650), люминесцирующего и генерирующего излучение в области длин волн более 600 нм.

### 3. Спектроскопические исследования

#### 3.1. Применяемое оборудование и методы исследования

Концентрация красителей в растворах как этанола, так и мономерной смеси варьировалась от 10<sup>-5</sup> моль/л до предела растворимости, составляющего величину порядка 10<sup>-2</sup> моль/л. Спектры поглощения красителей измерялись в области 190–900 нм спектрофотометром Perkin-Elmer Lambda 5. Для измерения оптической плотности высококонцентрированных растворов красителей применялись кюветы Шотта малой толщины. ЛЭ из композита имели размеры 20 × 10 × 3.5 мм, их оптическая плотность изменялась от 4 до 45 (на длине волны, соответствующей максимуму длинноволновой полосы поглощения), так что не могла быть измерена непосредственно. Ее оценка выполнялась по слабому побочному максимуму в коротковолновой области спектра поглощения.

Спектры люминесценции измерялись с помощью флуориметра Perkin-Elmer 650-40. Для раствора малой концентрации (10<sup>-5</sup> моль/л) спектр люминесценции измерялся под прямым углом к возбуждающему пучку. При высоких концентрациях красителя в растворе, а также в композите применялась схема измерения с фронтальным возбуждением люминесценции [10]. Люминесценция красителя возбуждалась источником с длиной волны, соответствующей максимуму его основной полосы поглощения.

#### 3.2. Результаты спектральных исследований

Спектры поглощения каждого красителя остаются неизменными с ростом его концентрации в растворе вплоть до предела растворимости. Тщательные измерения оптической плотности для ряда длин волн показали, что во всей области концентраций выполняется закон Бугера – Ламберта – Бера:

$$D(\lambda) = \lg(I_0/I) = \varepsilon(\lambda)CL,$$

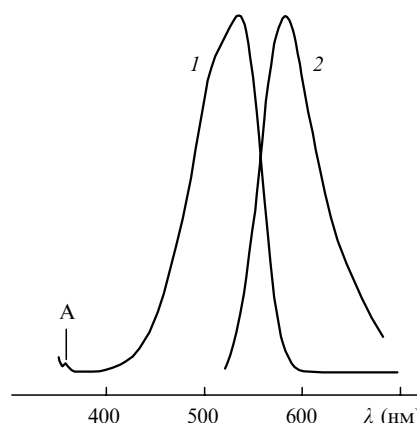


Рис.2. Спектры поглощения (1) и люминесценции (2) красителя феналемин 512 в жидкой мономерной смеси. Буквой А обозначен максимум, по которому оценивалась концентрация красителя в композите НПСР.

где  $D(\lambda)$  – оптическая плотность;  $\lambda$  – длина волны;  $\varepsilon(\lambda)$  – экстинкция;  $C$  – концентрация красителя;  $L$  – толщина образца;  $I_0, I$  – интенсивности падающего и прошедшего излучения. Это означает, что во всей области концентраций, вплоть до предела растворимости, ассоциаты красителя в этаноле и мономерной смеси не образуются. Положение максимумов длинноволновой полосы поглощения красителей и ряд других характеристик их спектров в мономерной смеси представлены в табл.1.

Спектр поглощения одного из них (Ф512) в мономерном составе представлен на рис.2, где буквой А обозначен максимум с длиной волны  $\lambda_A = 355$  нм, использованный для оценки концентрации красителя Ф512 в композите НПСР. Как и у других красителей, отношение для Ф512  $\varepsilon(\lambda_a)/\varepsilon(\lambda_A) = 42$  является неизменным во всем исследованном диапазоне концентраций красителей. Полагая, что это отношение сохраняется и для композита, по поглощению в коротковолновом максимуме А рассчитывали оптическую плотность композита в максимуме основной полосы поглощения на длине волны накачки ( $\lambda = 532$  нм) и коэффициент внедрения красителя в композит. Результаты расчетов представлены в табл.2.

В отличие от спектра поглощения, спектр люминесценции обнаруживает слабую зависимость от концентрации красителя в растворе. При высоких концентрациях (составляющих для Ф512 величину порядка 10<sup>-3</sup> моль/л) в длинноволновой области спектра люминесценции появляется «плечо», которое по мере дальнейшего увеличения концентрации красителя в растворе смещается в сторону больших длин волн. Такое поведение спектра лю-

Табл.1. Спектроскопические характеристики красителей в мономерной смеси.

Краситель	$\lambda_a$ (нм)	$\lambda_f$ (нм)	$\lambda_A$ (нм)	$10^{-3}\varepsilon(\lambda_a)$	$10^{-3}\varepsilon(\lambda_p)$	$\varepsilon(\lambda_a)/\varepsilon(\lambda_A)$
Ф510	524	593	356	22	21	18
Ф512	533	578	355	25	25	42
Ф640	590	616	364	30	8,5	19
ПМ650	590	606	430	45	14	7.4

Примечание:  $\lambda_a, \lambda_f, \lambda_A$  и  $\lambda_p$  – длины волн максимума длинноволновой полосы поглощения, люминесценции, максимума поглощения в коротковолновой области спектра и накачки соответственно;  $\varepsilon(\lambda)$  – экстинкция.

Табл.2. Характеристики лазерных элементов из композита НПСР

Краситель	$C_m$ (ммоль/л)	$D(\lambda_A)$ (измерение)	$D(\lambda_p)$ (оценка)	$C_c$ (ммоль/л)	$\xi = C_c/C_m$
Ф510	6.8	1.24	22	8.0	1.2
	3.4	1.29	23	8.5	2.5
	1.7	0.89	16	5.8	3.4
	0.85	0.57	10	3.5	4.1
Ф512	10	1.01	43	11.8	1.2
	5	0.41	17	4.8	0.95
	2.5	0.24	10	2.8	1.1
	1.25	0.14	5.8	1.5	1.2
Ф640	2.5	4.2*	22	18.5	7.4
	1.25	3.1*	16	13.8	11
	0.5	1.46	7.8	6.5	13
	0.25	0.82	4.3	3.5	14
ПМ650	10	3.0*	12	5.8	0.6
	5	2.99	6.7	3.5	0.7
	2.5	1.26	2.9	1.5	0.60
	1.25	0.70	1.6	0.83	0.66

Примечание:  $C_m$  и  $C_c$  – концентрация красителя в мономерной смеси и полимере, внедренном в поры стекла;  $D(\lambda_p)$  и  $D(\lambda_A)$  – оптическая плотность на длине волны накачки и в коротковолновом максимуме;  $\xi = C_c/C_m$  – коэффициент внедрения красителя; звездочкой обозначены величины, измеренные с низкой точностью.

минесценции свидетельствует, по-видимому, о формировании эксимеров [10] в области больших концентраций красителя в растворе.

Когда концентрация красителей в мономерной смеси начинает превышать  $10^{-3}$  моль/л (для Ф512 –  $3 \times 10^{-3}$  моль/л), наблюдается концентрационное тушение люминесценции (рис.3). Для этанольного раствора красителя картина аналогична.

При переходе от мономерного состава к композиту НПСР спектр люминесценции сдвигается в длинновол-

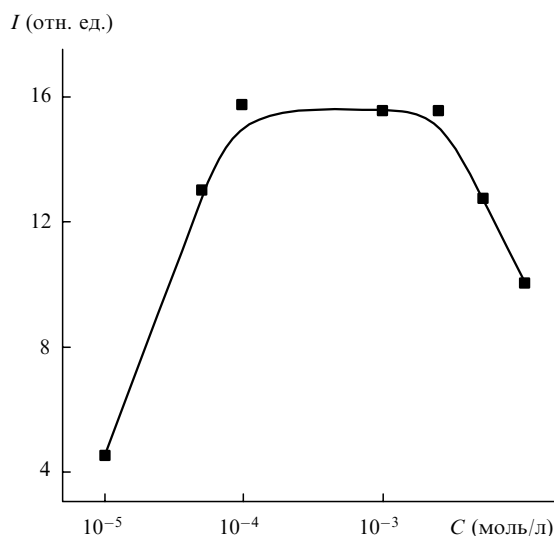


Рис.3. Зависимость интенсивности люминесценции  $I$  от концентрации  $C_m$  красителя феналемин 512 в мономерной смеси.

новую область на 3–5 нм без видимого изменения формы. В области больших концентраций красителя в композите в спектре люминесценции, так же как и в случае его раствора в мономерном составе, наблюдается «плечо» при больших длинах волн. Концентрация красителя, начиная с которой наблюдается тушение люминесценции, практически не изменяется, однако интенсивность люминесценции при переходе от мономерного состава к композиту возрастает.

## 4. Исследования лазерных характеристик

### 4.1. Экспериментальная установка

В качестве источника накачки ЛЭ применялся одномодовый YAG: Nd<sup>3+</sup>-лазер с электрооптическим модулятором добротности и удвоением частоты излучения. Использовалась схема с продольной накачкой: излучение направлялось на ЛЭ через плоское дихроичное зеркало, коэффициент пропускания которого был равен 98 % для  $\lambda_p = 532$  нм и 2 % – в диапазоне 550–660 нм. Выходное зеркало имело коэффициент пропускания 62 %. Диаметр пучка излучения в области ЛЭ составлял 1.3 мм, частота следования импульсов  $f$  была равна 3.67 и 33 Гц. При  $f = 3.67$  Гц длительность импульса накачки  $\tau_p$ , его энергия  $E_p$  и интенсивность  $I_p$  равнялись соответственно 5 нс, 2 мДж и 30 МВт/см<sup>2</sup>, при  $f = 33$  Гц – 7 нс, 0.7 мДж и 7.5 МВт/см<sup>2</sup>. Энергия импульса измерялась с погрешностью 10 %. Длина волны генерации  $\lambda_g$  измерялась с помощью монохроматора МСД-1 с погрешностью  $\pm 1$  нм.

### 4.2. Выполняемые исследования и методы обработки данных

У растворов красителей и композитных ЛЭ измерялись порог генерации  $J_g$  и эффективность преобразования излучения  $\eta$ . Для ЛЭ из композита исследовался также ресурс работы  $N_{0.7}$ . Эффективность преобразования излучения определялась выражением  $\eta = (E_g/E_p) \times 100\%$  ( $E_g$  – энергия импульса генерации). При ее измерении одна область ЛЭ облучалась малым числом импульсов ( $N \ll N_{0.7}$ ). За ресурс работы ЛЭ ( $N_{0.7}$ ) принималось число импульсов накачки, облучающих одну область ЛЭ, после воздействия которых величина  $\eta$  составляла 70 % начального уровня.

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

### 4.3. Исследуемые составы и лазерные элементы. Результаты испытаний

Исследуемая мономерная смесь состояла из метилметакрилата, низкомолекулярной добавки, обычно используемой для повышения стабильности красителей в объемном полимере и его лазерной стойкости [1], и одного из исследуемых красителей (Ф510, Ф512, Ф640 или ПМ650). ЛЭ из композита НПСР имели высокое оптическое качество с однородным пространственным распределением красителя.

Параметры  $\eta$  и  $J_g$  для растворов красителей в этаноле и мономерной смеси представлены в табл.3, а характеристики ЛЭ из композита – в табл.4.

Табл.3. Эффективность генерации излучения растворами красителей.

Краситель и растворитель	$C_m$ (ммоль/л)	$L = 3.3$ мм			$L = 1.0$ мм			$L = 0.51$ мм		
		$D(\lambda_p)$	$\eta$ (%)	$J_g$ (МВт/см <sup>2</sup> )	$D(\lambda_p)$	$\eta$ (%)	$J_g$ (МВт/см <sup>2</sup> )	$D(\lambda_p)$	$\eta$ (%)	$J_g$ (МВт/см <sup>2</sup> )
Ф512, мономер- ная смесь	10	83	–	–	25	2.1	29	13	2.1	16
	5.0	41	Т	–	13	15	4.2	6.3	23	3.7
	2.5	21	7	4.4	6.3	36	1.8	3.2	38*	1.8
	1.25	10	36	2.8	3.1	46	1.2	1.6	42*	1.3
ПМ650, мономер- ная смесь	10	46	–	–	14	–	–	7.1	–	–
	5.0	23	–	–	7	5.2	14	3.5	11*	8.0
	2.5	12	–	–	3.5	11	7.5	1.8	13*	7.8
	1.25	5.8	19	7.5	1.8	21*	5.6	0.9	19*	2.8
Ф512, этанол	10	86	–	–	26	–	–	13	–	–
	5.0	43	–	–	13	18	5.6	7	23	3.7
	2.5	21	19	6.7	7	35	2.2	3	40	2.0
ПМ650, этанол	1.25	11	35	2.2	3	44	1.3	1.6	36*	1.8
	2.6	16	–	–	5	3.8	19	2.5	7.9*	16
	1.3	8	–	–	2.5	7.1*	12	1.2	4.4*	21

Примечание:  $C_m$  – концентрация красителя в мономерной смеси;  $L$  – толщина кюветы;  $D(\lambda_p)$  – оптическая плотность на длине волны накачки; звездочкой обозначены образцы, в которых излучение накачки частично проходит сквозь образец, а буквой Т – возникновение паразитного излучения в поперечном направлении; прочерк означает отсутствие генерации.

Табл.4. Эффективность генерации излучения и ресурс работы лазерного элемента из композита в различных режимах работы.

Краситель	$C_m$ (ммоль/л)	$D(\lambda_p)$ ( $\lambda = 532$ нм)	$\lambda_g$ (нм)	$\eta$ (%)		$J_g$ (МВт/см <sup>2</sup> )	$10^{-3}N_{0.7}$ $f = 33$ Гц $E_p = 0.7$ мДж
				$f = 3.67$ Гц $E_p = 2$ мДж	$f = 33$ Гц $E_p = 0.7$ мДж		
Ф512	10	43	615	11	8.8	5.0	40
	5	17	604	34	29	1.7	34
	2.5	10	600	40	37	1.3	55
	1.25	5.8	595	42	38	1.1	30
Ф510	6.8	22	630	24	12	3.2	24
	3.4	23	628	23	11	2.8	4
	1.7	16	622	30	13	2.0	10
	0.85	10	614	31	14	2.0	4
Ф640	2.5	22	–	–	–	–	–
	1.25	16	658	16	6.8	7.5	115
	0.5	7.8	647	27	13	2.2	50
ПМ650	0.25	4.3	642	35	20	1.8	16
	10	12	630	10	6	10	6
	5	6.7	628	30	18	5.3	20
	2.5	2.9	625	27*	13*	3.8	13
	1.25	1.6	620	33*	16*	2.9	8

Примечание:  $C_m$  – концентрация красителя в мономерной смеси;  $D(\lambda_p)$  – оптическая плотность на длине волны накачки; звездочкой обозначены данные для случая, когда излучение накачки частично проходит сквозь образец; прочерк – отсутствие генерации.

## 5. Анализ результатов исследования

### 5.1. Внедрение красителя в композит

Как следует из данных, приведенных в табл.2, коэффициент внедрения красителей в композит  $\xi = C_c/C_m$  (где  $C_m$  и  $C_c$  – концентрация красителя в мономерной смеси и в полимере, внедренном в композит), меняется в широких пределах. В ряду красителей Ф512, Ф510 и Ф640 он возрастает и составляет 0.95–1.2, 1.2–4.1 и 7.4–14 соответственно.

Нанопористое стекло (НПС) обладает развитой поверхностью. Ее удельная величина (для использованного

нами НПС) находится в пределах 300–500 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>. Физико-химические свойства поверхности НПС во многом определяются большим количеством гидроксильных групп [12]. Эти группы играют важную роль в адсорбционных процессах, происходящих при проникновении молекул красителя в НПС. Кроме того, на силу адсорбционного взаимодействия между гидроксильными группами поверхности и красителем оказывает влияние и полярность самого красителя. Например, ионный краситель Ф640 имеет максимальный коэффициент внедрения, так же как и другие ионные красители (например, исследованный ранее родамин 11В [9]). Слабополярные красители, такие как ПМ650, Ф510 и Ф512, не склонны к адсорб-

ции, что и обуславливает более низкую степень их внедрения в композит.

При внедрении красителя в композит адсорбция играет роль, неоднозначную с точки зрения работы ЛЭ. Она препятствует процессу образования ассоциатов и, следовательно, тушению люминесценции. По-видимому, это имеет место в случае Ф640 и родамина 11В. Однако при формировании сильной связи может возникнуть комплекс поверхность – краситель, свойства которого резко отличаются от свойств исходного красителя.

## 5.2. Эффективность генерации излучения в растворах и композите

Сопоставление данных, представленных в табл.3 и 4, показывает, что эффективности генерации излучения ЛЭ из композита и раствора красителя совпадают в пределах точности измерений. Это видно из сопоставления как оптимальных значений  $\eta$ , так и эффективностей, полученных для жидкостных и композитных ЛЭ с одинаковой оптической плотностью.

В литературе неоднократно отмечалось, что эффективность преобразования излучения красителем в растворе выше, чем в полимерной [2], золь-гельной [6] или поликомной [6, 13] матрице. В [2] отмечено, что для родамина 6Ж в матрице из полиуританаакрилата  $\eta = 30\%$ , тогда как в этанольном растворе – 50%. В [13] эффективность преобразования излучения красителем ПМ567 в жидкостях составила 30–40%, в модифицированном полиметилметакрилате – менее 10%, а в поликомной матрице – менее 20%.

Причину уменьшения эффективности усматривают в формировании ассоциатов при полимеризации, в уменьшении стокосова сдвига и в неоднородном уширении спектра красителей в матрице [2]. Эти изменения являются следствием уменьшения полярности материала матрицы и ее усадки в процессе полимеризации.

Уменьшение полярности компонентов раствора облегчает формирование ассоциатов. Наиболее сильно этот процесс должен влиять на красители, имеющие ионную форму (например, Ф640). Вместе с тем ассоциаты будут формироваться только тогда, когда концентрация красителя в мономерной смеси близка к пределу растворимости. Проведенные для этого случая спектральные исследования растворов красителей показали, что во всей области растворимости ассоциаты не образуются, причем концентрационное тушение начинается раньше достижения предела растворимости. Поскольку концентрация красителя в мономерной смеси, предназначенной для изготовления композита, была меньше предела растворимости, то образование ассоциатов в композите, по-видимому, исключалось. Возможно, что формированию ассоциатов препятствовала также адсорбция красителя на поверхности НПС, как это было отмечено выше.

Снижение эффективности генерации излучения с возрастанием частоты следования импульсов (см. табл.4) обусловлено изменением энергии импульса. Для импульса с энергией 0.7 мДж при частоте следования 3.67 Гц эффективность генерации излучения в пределах точности измерений соответствует эффективности, приведенной в табл.4 для частоты следования импульсов 33 Гц. Таким образом, увеличение частоты следования импульсов от 3.67 до 33 Гц не приводит к изменению эффективности генерации излучения.

## 5.3. Порог генерации излучения в растворах и композите и ресурс работы ЛЭ

Как следует из табл.3 и 4, порог генерации всех красителей в композите ниже, чем в растворах мономерной смеси и в этаноле при той же оптической плотности ЛЭ. Это и понятно: при переходе от раствора к композиту интенсивность люминесценции усиливается, т. е. квантовый выход люминесценции  $\phi$  возрастает. Как хорошо известно [14],  $J_p \sim \phi^{-1}$  в полном соответствии с экспериментальными данными.

В табл.4 приведены результаты исследования ресурса работы ЛЭ при  $f = 33$  Гц. Согласно этим данным, на зависимости  $N_{0.7}(C_m)$  имеется максимум. Его возникновение обусловлено двумя различными режимами деградации красителя. Для ЛЭ с малой концентрацией красителя (менее 3–5 ммоль/л) область облучения обесцвечивалась, тогда как для ЛЭ с большой концентрацией (выше 3–5 ммоль/л) область облучения в процессе работы медленно темнела. Заметим, что при частоте следования импульсов 3.67 Гц в области облучения ЛЭ наблюдалось обесцвечивание красителя при любой его концентрации. Это позволяет предположить, что для ЛЭ с большой концентрацией красителя при частоте следования импульсов 33 Гц в области накачки происходит термическое разложение красителя и полимера вследствие значительного выделения тепла.

Ресурс работы ЛЭ, приведенный в табл.4, – техническая характеристика. Физической величиной, характеризующей стойкость красителя в матрице, является энергетический ресурс  $W_{0.7}$  – поглощенная молекулой красителя энергия, приводящая к снижению эффективности преобразования излучения до 70% начального уровня. Оценка  $W_{0.7}$  на основании данных, приведенных в табл.4, дает (при  $f = 33$  Гц,  $I_p = 7.5$  МВт/см<sup>2</sup>) для всех исследованных красителей значение одного порядка:  $W_{0.7} \approx 15 - 10$  ГДж/моль. (Параметр  $W_{0.7}$  рассчитывался для концентрации красителя, при которой значение  $N_{0.7}$  максимально.) Выборочное исследование ресурса ряда ЛЭ при частоте следования импульсов накачки  $f = 3.67$  Гц показало, что для этого режима облучения  $N_{0.7}$  и, следовательно,  $W_{0.7}$  в 3–5 раз больше, чем для режима накачки с  $f = 33$  Гц.

## 5.4. Различия в преобразовании излучения жидкостными и твердотельными ЛЭ

Как следует из табл.3 и 4, ЛЭ из композита генерирует излучение при очень большой оптической плотности (хотя, конечно, и с низкой эффективностью). Так, Ф512 имеет эффективность преобразования  $\eta = 11\%$  при энергии накачки  $E_p = 2$  мДж для ЛЭ с оптической плотностью  $D(\lambda_p) = 43$ , тогда как жидкостный ЛЭ на основе этанольного раствора Ф512 не генерирует излучение при  $D(\lambda_p) = 43$ , а в случае мономерного состава – при  $D(\lambda_p) = 41$ . В области столь высоких оптических плотностей у жидкостных ЛЭ наблюдается суперлюминесценция (или, возможно, генерация) в поперечном направлении к излучению накачки.

## 5.5. Сопоставление параметров генерации красителей феналеминового ряда и красителя ПМ650

Красители пиррометенового ряда считаются наиболее эффективными при накачке с длиной волны 532 нм. Это, однако, касается области спектра генерации 550–570 нм. В области больших длин волн эффективность пре-

образования падает. Так, ПМ650, генерирующий в окрестности 625 нм, имеет (при сопоставимых условиях) эффективность 30 %. Феналеминовые красители генерируют излучение в области длин волн более 590 нм: Ф512 – на  $\lambda = 595 - 615$  нм, Ф510 – на  $\lambda = 614 - 630$  нм, а Ф640 – на  $\lambda = 630 - 658$  нм. Эффективность генерации излучения ЛЭ, активированного красителем Ф512, составляет 40 %, а Ф640 – 35 %. Таким образом, эффективность красителей феналеминового ряда больше эффективности ПМ650, генерирующего в той же области длин волн.

## 6. Заключение

Приведенные результаты исследования показывают, что красители феналеминового ряда, внедренные в твердую композитную матрицу НПСР, эффективны для получения генерации в области длин волн 600–660 нм при лазерной накачке второй гармоникой YAG: Nd<sup>3+</sup>-лазера, работающего в наносекундной области длительностей. Сопоставление результатов исследования генерационных характеристик этих красителей в жидких растворах и в твердой композитной матрице НПСР показывает, что по эффективности генерации излучения ЛЭ из композита не уступает жидкостному. Однако композит НПСР обладает более хорошими термооптическими характеристиками, позволяющими работать при достаточно

большой частоте следования импульсов. Важной особенностью красителей феналеминового ряда является высокая растворимость без образования ассоциатов во всех исследуемых в данной работе средах. Это свойство позволяет изготовить эффективный ЛЭ малой толщины.

1. Дюмаев К.М., Маненков А.А., Маслоков А.А. и др. *Труды ИОФ РАН СССР*, **33**, 144 (1991).
2. Бондар М.В., Пржонская О.В., Тихонов Е.А., Федоткина Н.М. *ЖПС*, **52**, 554 (1990).
3. Cazeca M.J., Jiang X.L., Kumar J., et al. *Appl. Opt.*, **36**, 4965 (1997).
4. Faloss M., Cava M., et al. *Appl. Opt.*, **36**, 6760 (1997).
5. Ye C., Lam K.S., Lam A.K., Lo L. *Appl. Phys. B*, **65**, 109 (1977).
6. Rahn M.D., King T.A. *Appl. Opt.*, **34**, 8260 (1995).
7. Долотов С.М., Колдунов М.Ф., Маненков А.А. и др. *Квантовая электроника*, **19**, 1134 (1992).
8. Г.Р.Алдэг, Долотов С.М., Колдунов М.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 954 (2000).
9. Г.Р.Алдэг, Долотов С.М., Колдунов М.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 1055 (2000).
10. Левшин Л.В., Салецкий А.М. *Оптические методы исследования молекулярных систем* (М.: изд-во МГУ, 1994, с.320).
11. Ведерникова В.Н., Волков В.М., Галов А.П. и др. А.с. № 1276208 (1984).
12. Jonowski F., Heyer W. *Porose Glaser. Herstellung, Eigenschaften, Anwendung* (Leipzig, 1981, p. 276).
13. Rahn M.D., King T.A., Garman A.A., Hamblitt I. *Appl. Opt.*, **36**, 5868 (1997).
14. Шефер Ф.П. В кн. *Лазеры на красителях* (М.: Мир, 1976, с. 5).