

Связь спектральных и генерационных характеристик красителей различных классов

М.Ф.Колдунов, Я.В.Кравченко, А.А.Маненков, И.Л.Покотило

Выполнено экспериментальное исследование эффективности генерации и ресурса работы красителей пиррометинового и феналеминового рядов, внедренных в композит нанопористое стекло – полимер, при монохроматической (лазерной) накачке. Изучены спектры поглощения и люминесценции этих красителей. На основе анализа генерационных и спектральных характеристик установлены ключевые спектральные параметры, определяющие эффективность генерации, и проведено ранжирование красителей по этой характеристике. Установлена также корреляция между эффективностью генерации и ресурсом работы лазерных элементов.

Ключевые слова: лазерный краситель, пиррометен, феналемин, эффективность генерации, ресурс работы, поглощение, экстинкция, люминесценция, стоков сдвиг.

1. Введение

К настоящему времени изучено большое количество лазерных красителей различных классов, позволяющих получить генерацию в широкой (от ИК до УФ) области спектра [1]. Подробно исследованы как спектральные, так и важнейшие лазерные характеристики – эффективность генерации и деградация красителей под действием оптического излучения. Последняя характеристика наиболее важна для твердотельных лазерных элементов (ЛЭ). Для жидкостных элементов проблема деградации красителей решается путем прокачки растворов через область накачки и генерации.

Предпринимались неоднократные попытки сформулировать требования к красителям, выполнение которых обеспечивало бы высокую эффективность генерации излучения и их фотостабильность в активной среде (см. [2–4]). В результате этих попыток появилось множество разнородных эмпирических «правил» отбора эффективных красителей. Например, полагают, что молекула хорошего лазерного красителя должна обладать жесткой плоской конфигурацией [2] или что эффективность генерации красителя растет с увеличением стокова сдвига линии люминесценции [3] и т. п. Эти правила носят качественный характер, недостаточно обоснованны, область их применимости обычно плохо определена, имеются многочисленные исключения. Так, нетрудно привести пример красителя (например, терфенил), молекула которого не является жесткой и не имеет плоской конфигурации, но эффективно генерирует излучение.

Выполненные к настоящему времени многочисленные теоретические расчеты генерации излучения органическими соединениями также не позволяют сформулировать правила отбора эффективных красителей.

Таким образом, вплоть до настоящего времени не выявлены характеристики красителей, которые позволили бы сопоставить их лазерную эффективность и объяснить наблюдаемые закономерности. Выявление характеристик красителей, позволяющих количественно сравнивать эффективность их генерации, и является целью данной работы.

2. Постановка задачи

Сложность сопоставления эффективности различных красителей обусловлена влиянием на генерацию излучения многочисленных факторов, затрудняющих отбор наиболее существенных из них. Сюда относятся, прежде всего, технические факторы (условия накачки, вид и параметры резонатора и др.), факторы, обусловленные влиянием среды, в которую введен краситель (растворимость, формирование агрегатов, процессы, приводящие к тушению люминесценции, и т.д.), а также факторы, обусловленные структурой и свойствами молекул красителя. Вариация любого из упомянутых факторов ведет к изменению эффективности генерации излучения и фотостабильности активной среды.

С целью корректного сопоставления эффективности красителей проведем анализ их генерационных свойств в идентичных условиях. Для определенности будем полагать, что генерация осуществляется в режиме накачки красителя лазерными импульсами наносекундной длительности в продольной геометрии. Кроме того, полагаем, что в растворе или твердой матрице краситель не образует агрегатов и тушения люминесценции не происходит. В таких условиях существенными остаются только характеристики красителей.

Эффективность генерации красителей, даже в такой упрощенной постановке, все еще зависит от большого количества параметров. С целью выявления наиболее существенных из них ограничимся прежде всего анализом закономерностей генерации красителей одного класса. Молекулы одного класса красителей имеют близкую структуру, в силу чего свойства и характеристики их представителей (при надлежащем упорядочении) должны незна-

М.Ф.Колдунов, Я.В.Кравченко, А.А.Маненков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

И.Л.Покотило. НПО «Оptronика», Россия, 141700 Долгопрудный, Московская обл., а/я 3

чительно и монотонно изменяться при переходе от одного представителя к другому. Следствием малых изменений структуры красителей будет постепенное изменение их характеристик. В частности, постепенно будут меняться эффективность генерации излучения и фотостабильность активной среды, так что выделение определяющих параметров станет относительно простой задачей. Ее решение создаст основу для сопоставления эффективностей генерации красителей различных классов.

3. Экспериментальные исследования

Исследовались красители пиррометенового (ПМ 567, ПМ 580, ПМ 597, ПМ 650) и феналеминового (Ф 510, Ф 512, Ф 640) классов, внедренные в композитную матрицу нанопористое стекло – полимер (НПСР), а также растворенные в мономерной смеси, применяемой для ее изготовления. Изучались спектральные и генерационные характеристики этих красителей.

Лазерные элементы из композита изготавливались по технологии, описанной в [5, 6]. Они имели размеры $20 \times 15 \times 3$ мм и обладали высоким оптическим качеством.

Спектроскопические исследования проводились по методике из работы [7]. Концентрация красителей в мономерной смеси изменялась от 10^{-5} моль/л до предела растворимости, составляющего порядка 10^{-2} моль/л (данные о растворимости красителей приведены в табл.1). Пример спектров поглощения и люминесценции одного из исследованных красителей показан на рис.1.

Во всей области концентраций форма полос поглощения красителей оставалась неизменной, причем для оптической плотности $D(\lambda)$ выполнялось следующее соотношение: $D(\lambda) = \varepsilon(\lambda)CL$, где $\varepsilon(\lambda)$ – экстинкция; λ – длина волны; C – концентрация красителя; L – толщина слоя. Это означает, что вплоть до предела растворимости ассоциаты красителя в мономерной смеси не образуются.

Спектр люминесценции, в отличие от спектра поглощения, зависит от концентрации красителя в растворе. При высоких концентрациях, превышающих C_{ex} (табл.1), в длинноволновой области спектра люминесценции появляется «плечо», которое смещается в сторону более длинных волн по мере увеличения концентрации красителя в растворе. Такое поведение спектра люминесценции, по-видимому, свидетельствует о формировании эксимеров в области больших концентраций красителя в растворе [8]. При концентрациях красителя в мономерном составе более 10^{-3} моль/л (табл.1) наблюдается концентрационное тушение люминесценции.

При переходе от мономерного состава к композиту спектры поглощения и люминесценции не изменяли сво-

Табл.1.

Краситель	C_s (моль/л)	C_q (моль/л)	C_{ex} (моль/л)
ПМ 567	2×10^{-2}	10^{-2}	10^{-3}
ПМ 580	2.2×10^{-2}	10^{-2}	10^{-3}
ПМ 597	2×10^{-2}	10^{-2}	10^{-3}
ПМ 650	10^{-2}	0.5×10^{-2}	10^{-5}
Ф 512	10^{-2}	2.5×10^{-3}	10^{-3}
Ф 510	0.5×10^{-2}	10^{-3}	10^{-3}

Примечание: C_s , C_q и C_{ex} – предел растворимости красителя, концентрация тушения люминесценции и концентрация возникновения «плеча» на линии люминесценции соответственно.

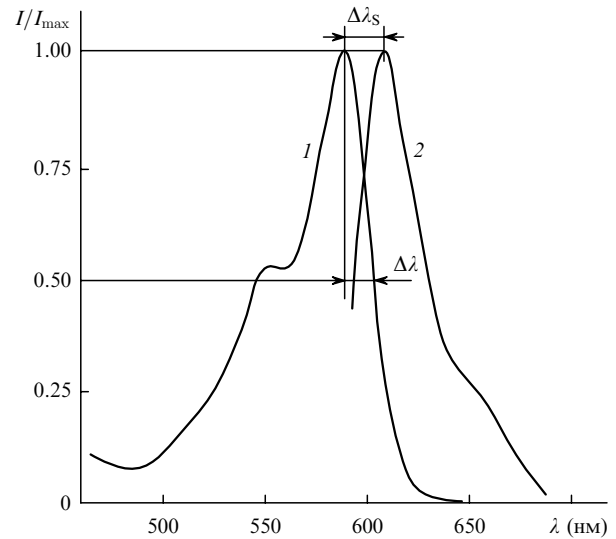


Рис.1. Спектры поглощения (1) и люминесценции (2) раствора красителя ПМ 650 в мономерной композиции ($\Delta\lambda_s$ – стоксов сдвиг, $\Delta\lambda$ – полуширина линии поглощения со стороны ее длинноволновой части).

ей формы в пределах точности измерений. Однако спектр люминесценции сдвигался в длинноволновую область на 3–5 нм, а интенсивность люминесценции увеличивалась.

Спектральные характеристики, представляющие интерес для целей настоящего исследования, приведены в табл.2.

В исследованиях генерационных характеристик всех ЛЭ источником накачки служила 2-я гармоника излучения одномодового YAG : Nd³⁺-лазера с электрооптическим модулятором добротности. Использовалась схема продольной накачки. Излучение направлялось на ЛЭ, который был помещен в резонатор, образованный плоским дихроичным зеркалом с коэффициентом пропускания 98 % на длине волны 532 нм и коэффициентом отражения 98 % в диапазоне 550–660 нм и выходным зеркалом с коэффициентом отражения 62 %. Диаметр пучка излучения накачки в области ЛЭ составлял 1.3 мм. Длительность, энергия и интенсивность импульса (τ_p , E_p и I_p) равнялись соответственно 5 нс, 2 мДж и 30 МВт/см². Энергии импульсов накачки и генерации измерялись с точностью 10 %.

Были проведены исследования эффективности генерации η и ресурса работы $N_{0.7}$. Эффективность генерации η измерялась при частоте следования импульсов $3\frac{2}{3}$ Гц и определялась как отношение E_g/E_a , где E_g – энергия импульса генерации, E_a – поглощенная энергия импульса

Табл.2.

Краситель	λ_a (нм)	λ_f (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	$\varepsilon(\lambda_a) \times 10^{-3}$	$\varepsilon(\lambda_p) \times 10^{-3}$	$\varepsilon(\lambda_f) \times 10^{-3}$
ПМ 567	518	536	10	96	28	14
ПМ 580	520	537	10	89	32	16
ПМ 597	524	561	16	80	64	3
ПМ 650	590	607	14	45	14	14
Ф 510	524	593	46	22	21	1.5
Ф 512	533	578	24	25	25	2
Ф 640	590	616	16	30	8.5	5.5

Примечание: λ_a , λ_f и λ_p – длины волн максимума основной полосы поглощения, люминесценции и накачки соответственно; $\varepsilon(\lambda)$ – экстинкция красителя (в л·моль⁻¹·см⁻¹).

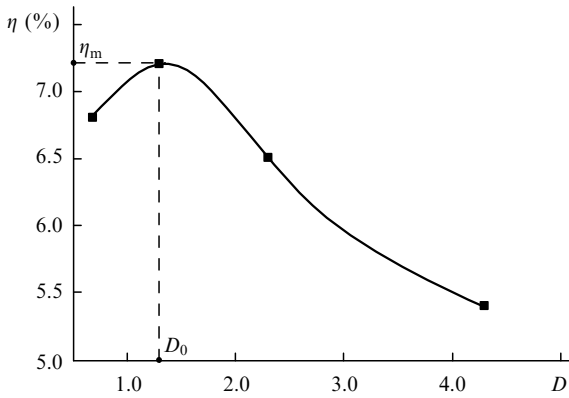


Рис.2. Зависимость эффективности преобразования η ЛЭ на основе композита НПСЦ, активированного красителем ПМ 597, от оптической плотности D при накачке 2-й гармоникой одномодового YAG: Nd³⁺-лазера с плотностью мощности импульса $I_p = 30$ МВт/см²; D_0 – оптимальная оптическая плотность, η_m – максимальная эффективность преобразования.

накачки. Параметр $N_{0.7}$, определяемый как число импульсов накачки, при котором эффективность генерации уменьшается до уровня 0.7 от первоначального значения, измерялся при частоте следования импульсов накачки 33 Гц. При расчете η не учитывались потери энергии излучения, связанные с френелевским отражением от поверхности ЛЭ.

На рис.2 представлена зависимость $\eta(D)$ для ЛЭ, активированного красителем ПМ 597. Видно, что эффективность генерации η немонотонно зависит от оптической плотности ЛЭ на длине волны накачки и что существует оптимальное значение оптической плотности (D_0), при котором η максимально: $\eta_m = \eta(D_0)$.

Для последующего рассмотрения наибольший интерес представляют значения η_m и $N_{0.7}$, соответствующие плотности D_0 . Эти данные для ЛЭ, активированных исследованными красителями, представлены в табл.3.

Табл.3.

Краситель	λ_g (нм)	D_0	η_m (%)	$N_{0.7} \times 10^{-3}$
ПМ567	562	8.8	55	40
ПМ 580	561	12	55	51
ПМ 597	570	13	72	340
ПМ 650	625	1.6	33	8
Ф 512	595	5.8	42	30
Ф 510	614	10	30	14
Ф 640	642	4.3	35	16

Примечание: λ_g – длина волны генерации.

Приведенные в табл.3 значения $N_{0.7}$ получены при частоте следования импульсов 33 Гц. Ее снижение до 3² Гц увеличивало ресурс работы ЛЭ в 2–3 раза, что обусловлено тепловыми эффектами.

4. Эффективность генерации: ключевые параметры

Существование оптимальной плотности на зависимости $\eta(D)$ (см. рис.2) обусловлено неоднородностью возбуждения ЛЭ. В условиях продольной накачки инверсия лазерных уровней энергии уменьшается от входного торца ЛЭ к выходному. Если $D > D_0$, то область ЛЭ у выходного торца остается «не прокачанной» и в ней до-

минируют процессы реабсорбции излучения генерации, приводящие к падению η . Если же $D < D_0$, то излучение накачки насыщает рабочий лазерный переход $S_0 \rightarrow S_1$ (здесь S_0 и S_1 – основное и первое возбужденное синглетные состояния соответственно) во всей области ЛЭ, взаимодействующей с излучением, что вызывает его просветление. В таких условиях излучение накачки либо поглощается в результате переходов $S_1 \rightarrow S_n$ (S_n – возбужденное электронное состояние, находящееся выше состояния S_1), либо проходит сквозь ЛЭ без значительного ослабления. Каждый из этих процессов приводит к падению эффективности генерации η . Для $\eta_m = \eta(D_0)$ поглощение излучения накачки и реабсорбция генерируемого излучения сбалансированы.

Поскольку величина η_m определяется балансом поглощения излучения накачки и реабсорбции генерируемого излучения, то естественно предположить, что существует параметр $\bar{\xi}$, определяющий эффективность генерации красителя, выраженный через характеристики поглощения излучения красителем и эквивалентный η_m ; с увеличением $\bar{\xi}$ возрастает эффективность генерации:

$$\bar{\xi} = [\varepsilon(\lambda_p)/\varepsilon(\lambda_f)]k(\lambda_p, \lambda_f, I), \quad (1)$$

где $\varepsilon(\lambda_p)$ и $\varepsilon(\lambda_f)$ – экстинкция красителя на длине волны накачки и максимуме линии люминесценции; $k(\lambda_p, \lambda_f, I)$ – безразмерный коэффициент, учитывающий вклад наведенного поглощения. Справедливость этого предположения будет подтверждена на основе анализа экспериментальных данных. Для дальнейшего рассмотрения нет необходимости конкретизировать структуру $k(\lambda_p, \lambda_f, I)$. Отметим, однако, что поскольку наведенное поглощение всегда приводит к потерям энергии, то $k(\lambda_p, \lambda_f, I) \leq 1$, причем $k(\lambda_p, \lambda_f, I) \rightarrow 1$ с уменьшением интенсивности излучения.

Расчет $\bar{\xi}$ требует знания величин $\varepsilon(\lambda_p)$, $\varepsilon(\lambda_f)$ и $k(\lambda_p, \lambda_f, I)$, которые, как правило, неизвестны. Однако эти величины можно связать с более легко измеримыми спектральными характеристиками молекулы. Полагая, что форма линии гауссова, запишем: $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_a \exp[-\ln 2(\lambda - \lambda_a)^2/(\Delta\lambda)^2]$, где ε_a – экстинкция в максимуме основной полосы поглощения; $\Delta\lambda = \lambda_{1/2} - \lambda_a$ – полуширина линии поглощения (см. рис.1); $\lambda_{1/2} > \lambda_a$; $\varepsilon(\lambda_{1/2}) = (1/2)\varepsilon(\lambda_a)$. Тогда, введя параметр $\xi = \ln \bar{\xi}$, получим

$$\xi = (A_S^2 - A_P^2) \ln 2 + \xi_{nl}, \quad (2)$$

где $A_S = (\lambda_f - \lambda_a)/\Delta\lambda$ и $A_P = (\lambda_p - \lambda_a)/\Delta\lambda$ – относительный стоксов сдвиг и отстройка длины волны накачки; $\xi_{nl} = \ln k(\lambda_p, \lambda_f, I)$ – составляющая, учитывающая наведенное нелинейное поглощение. Величина $\xi_{nl} \leq 0$, так как $k(\lambda_p, \lambda_f, I) \leq 1$, а ее вид определяется формой линии наведенного поглощения.

Параметр ξ эквивалентен $\bar{\xi}$ (т. е. рост обоих параметров соответствует росту эффективности преобразования в исследованных классах красителей) при условии, что $\bar{\xi}$ рассчитывается на основе точного значения $\varepsilon(\lambda)$. Рассмотренные условия предполагают, что длина волны излучения накачки попадает в область основной линии поглощения красителя, так что параметр ξ , рассчитанный согласно (2), эквивалентен (1) только в данном случае. Это требование выполняется для всех исследованных нами красителей.

5. Ранжирование красителей по эффективности генерации

При оценке эффективности генерации красителей по эквивалентным параметрам ξ и $\bar{\xi}$ наибольшую сложность представляет учет процессов наведенного поглощения. Однако, как отмечалось выше, свойства красителей одного и того же класса при переходе от одного его представителя к другому меняются незначительно. По этой причине параметры $\bar{\xi}_1 = \varepsilon(\lambda_p)/\varepsilon(\lambda_f)$ и $\xi_1 = (A_S^2 - A_p^2) \ln 2$ изменяются монотонно (табл.4), и, следовательно, $k(\lambda_p, \lambda_f, I)$ и ξ_{nl} также должны изменяться монотонно в пределах одного класса красителей. Это означает, что для одного класса красителей $\bar{\xi}$, ξ , $\bar{\xi}_1$ и ξ_1 эквивалентны.

Табл.4.

Краситель	$\bar{\xi}_1$	ξ_1	A_S	η_m (%)
ПМ 567	2.0	0.89	1.8	55
ПМ 580	2.0	1.0	1.7	55
ПМ 597	21	3.5	2.3	72
ПМ 650	1.0	-1.0	1.2	33
Ф 512	13	1.36	1.9	42
Ф 510	14	2.4	1.5	30
Ф 640	1.5	-0.9	1.6	35

В табл.4 демонстрируется также, что относительный стоксов сдвиг A_S эквивалентен $\bar{\xi}$ для множества красителей одного класса. Выбирая $\bar{\xi}$ в качестве параметра ранжирования красителей, получим представленный на рис.3 результат.

Данные табл.4 показывают, что для одного класса красителей параметры $\bar{\xi}$, ξ , $\bar{\xi}_1$ и A_S эквивалентны η_m , а множество всех красителей является частично упорядоченным. Согласно теореме Цермело [9] любое частично упорядоченное множество может быть вполне упорядочено, так что на основе спектроскопических данных принципиально возможно ранжировать эффективность красителей различных классов. Из доказательства теоремы Цермело следует, что в зависимости от решаемой задачи упорядочение можно провести различным образом. Например, параметр A_S ранжирует красители по эффективности генерации при оптимальной длине волны накачки ($A_p = 0$) и умеренной интенсивности, когда процессами наведенного поглощения можно пренебречь.

Данные, представленные на рис.3, показывают, что различие эффективностей генерации различных классов

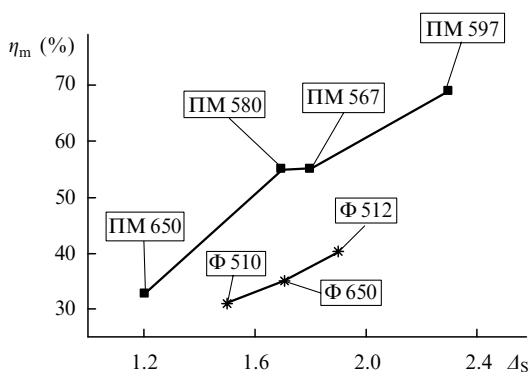


Рис.3. Эффективность генерации η_m красителей пиррометенового и феналеминового классов, внедренных в композит НПСР, как функция относительного стоксова сдвига A_S .

красителей должно быть обусловлено влиянием наведенного поглощения. Для учета роли наведенного поглощения достаточно сопоставить эффективности генерации двух представителей красителей различных классов. Действительно, полагая, что η_m пропорциональна $\bar{\xi}$, для разности параметров $\delta \xi_{nl}$ наведенного поглощения красителей классов 1 и 2 при условии $A_p = 0$ и с учетом соотношений (1) и (2) получим

$$\delta \xi_{nl} \approx \ln(\eta_{m1}/\eta_{m2}) + (A_{S1}^2 - A_{S2}^2) \ln 2. \quad (3)$$

Используя данные для ПМ 650 и Ф 640, представленные в табл.4, получим $\delta \xi_{nl} \approx 0.8$. Результат ранжирования красителей по параметру $\xi^* = (A_S) \ln 2 + \delta \xi_{nl}$ с учетом приведенной оценки $\delta \xi_{nl}$ представлен в табл.5.

Табл.5.

Краситель	ξ^*	η_m (%)
ПМ 597	4.2	72
ПМ 567	2.6	55
ПМ 580	2.3	55
Ф 512	2.0	42
Ф 640	1.3	35
ПМ 650	1.2	33
Ф 510	1.0	30

6. Обсуждение

Специфика органических красителей как активной среды лазеров заключается в значительном перекрытии полос поглощения (возбуждения) и линии люминесценции. По этой причине потери на длине волны генерации, вносимые реабсорбцией излучения генерации, являются определяющими. Это обстоятельство учитывалось выше как основное при определении эффективности генерации лазерной среды, активированной красителями. Заметим, что в случае твердотельных лазерных сред, активированных ионами переходных элементов (кристаллы, стекла), определяющий процесс поглощения излучения генерации будет иным, чем для красителей. По этой причине закономерности генерации и связь между спектральными и генерационными характеристиками должны иметь другой характер.

Проведенное выше ранжирование красителей по эффективности генерации излучения основано на анализе экспериментальных данных, полученных при продольной накачке активной среды импульсами наносекундной длительности. Вместе с тем результаты работы могут быть использованы и в других условиях эксперимента. Это обусловлено определяющим влиянием на эффективность генерации процессов поглощения и реабсорбции излучения. Естественно, что изменение условий генерации потребует корректировки ключевых параметров. Так, при накачке активной среды широкополосным излучением параметр $\bar{\xi}$ следует усреднить по спектру возбуждения. В пренебрежении процессами наведенного поглощения усредненный параметр ранжирования $\bar{\xi} = \langle \varepsilon(\lambda) \rangle / \varepsilon(\lambda_g)$ (угловые скобки означают усреднение по спектру излучения источника накачки). Усреднение учитывает специфику источника накачки, так что параметр $\bar{\xi}$ будет, вообще говоря, ранжировать красители иначе, чем

$\bar{\xi}$. Изменение ранжирования не является особенностью широкополосной накачки. В случае монохроматического источника длина волны накачки также влияет на эффективность генерации, что явно отражает в соотношении (2) член A_p , учитывающий отстройку длины волны накачки от максимума линии поглощения.

Существенно, что спектральные параметры, рассчитанные в пренебрежении наведенным поглощением, ранжируют красители одного класса. Это позволяет дать прогноз относительно эффективности красителей одного класса на основе спектральных данных. Так, используя эти данные, приведенные в [1], для кумариновых красителей получим (в порядке убывания эффективности генерации) следующую последовательность: К 152, К 522, К 152А, К 153, К 151, К 30, К 307, К 102, К 120, К 47, К 2, К 4, К 314, К 334, К 7, К 6.

Развитые представления истолковывают эффективность генерации в терминах спектральных характеристик и, таким образом, позволяют учитывать влияние среды. При отсутствии формирования агрегатов и тушения люминесценции роль среды сводится к сдвигу полос поглощения и люминесценции, а также к изменению ширины спектров (и, возможно, их формы). Принято считать, что увеличение стока сдвига ведет к росту эффективности генерации, а неоднородное уширение спектра – к ее падению (см. напр., [4]). Из соотношения (2) видно, что адекватной характеристикой, отражающей влияние среды, является относительный стока сдвига, учитывающий изменение как собственно стока сдвига, так и ширины спектральной линии. В случае отсутствия модификации спектров при изменении среды эффективность генерации должна оставаться неизменной. В частности, эффективность генерации красителей в твердой матрице должна быть не хуже, чем в жидком растворе. Это подтверждается на примере красителей феналеминового ряда [7].

Для твердотельного ЛЭ важной характеристикой, кроме эффективности генерации, является также ресурс работы. Большое число экспериментальных данных указывает на корреляцию этих характеристик. Например, для ЛЭ из композита НПСР эта корреляция продемонстрирована в табл.6.

Табл.6.

Краситель	η_m (%)	$N_{0.7}$
ПМ 597	72	3.4×10^5
ПМ 567	57	4×10^4
ПМ 580	55	5.1×10^4
Ф 512	42	3×10^4
Ф 650	35	1.6×10^4
ПМ 650	33	8×10^3
Ф 510	30	1.4×10^4

Из табл.6 не следует, однако, что спектральные параметры, введенные выше, ранжируют красители и по ресурсу работы. Эти параметры не связаны с механизмом деструкции молекул красителя. Объективные характеристики ресурса работы красителей можно ввести только на основе анализа механизмов деструкции.

Вместе с тем корреляцию эффективности генерации и ресурса работы ЛЭ, очевидную из табл.6, можно качественно объяснить на основе простых энергетических представлений. Действительно, чем выше эффективность генерации, т. е. чем больше энергии накачки преобразуется в излучение, тем меньше вероятность фотохимической деструкции красителя.

Существование этой корреляции позволяет создать ЛЭ, обладающие большим ресурсом и высокой эффективностью. Очевидно, что концентрация красителя с большими значениями относительной экстинкции и относительного стока сдвига может быть повышена без существенного роста поглощения излучения генерации. Среди исследованных нами красителей такими параметрами обладает ПМ 597 ($A_S = 2.3$, $\bar{\xi}_1 = 21$). Изготовленный из композита НПСР, активированный этим красителем, ЛЭ толщиной 3.5 мм имел оптическую плотность 23 и эффективность генерации 65 % при интенсивности накачки 30 МВт/см², а его ресурс работы превышал 10⁶ имп. при облучении одной фиксированной области с частотой следования импульсов $3\frac{2}{3}$ Гц. Уменьшение оптической плотности ЛЭ до 13 приводило к увеличению эффективности генерации до 72 % и к незначительному снижению ресурса работы.

7. Выводы

Проведенный в работе анализ позволяет сделать следующие выводы:

- Эффективность генерации излучения красителями определяется их спектральными характеристиками. Ключевым параметром качества красителя является относительная экстинкция $\bar{\xi}$ (или эквивалентный спектральный параметр ξ), ранжирующая красители по эффективности генерации: увеличению $\bar{\xi}$ соответствует увеличение η .

- Различие эффективностей генерации классов красителей обусловлено процессами наведенного поглощения.

- Ресурс работы твердотельных ЛЭ коррелирует с их эффективностью генерации.

Полученные результаты создают основу для прогнозирования эффективности генерации красителей и понимания закономерностей генерации излучения красителями различных классов в разных средах (как жидких, так и твердых).

1. Brackmann U. *Lambdachrome Laser Dyes* (Göttingen: Lambda Physik GmbH, 1997, p. 284).
2. Дрэхсхейвж К. В сб. *Лазеры на красителях*. Под ред. Ф.П.Шефера (М.: Мир, 1976, с. 172).
3. Бондар М.В., Пржонская О.В., Тихонов Е.А., Федоткина Н.М. *ЖПС*, **52**, 554 (1990).
4. Pavlopoulos T.G. *Opt. Commun.*, **38**, 397 (1981).
5. Алдэг Г.Р., Долотов С.М., Колдунов М.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 954 (2000).
6. Алдэг Г.Р., Долотов С.М., Колдунов М.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 1055 (2000).
7. Долотов С.М., Колдунов М.Ф., Кравченко Я.В. и др. *Квантовая электроника*, **32**, 669 (2002).
8. Левшин Л.В., Салецкий А.М. *Оптические методы исследования молекулярных систем* (М.: изд. МГУ, 1994, с. 320).
9. Данфорд Н., Шварц Дж. Т. *Линейные операторы. Общая теория* (М.: ИЛ, 1962, с. 895).