

К.М. Дегтяренко, Т.Н. Копылова, Р.Т. Кузнецова, Г.В. Майер, Е.Н. Тельминов

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КРАСИТЕЛЯ И КОНСТРУКЦИИ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА РЕСУРС РАБОТЫ

Экспериментально исследован ресурс работы лазерной системы с задающим генератором и двумя усилителями, генерирующей излучение в узкой линии ($\Delta\lambda \leq 0,01$ нм) при накачке эксимерным ХеСl-лазером этанольного раствора кумарина 2.

Показано, что ресурс такой системы превосходит ресурс обычного лазера с неселективным резонатором и зависит от длины кюветы и концентрации красителя в усилителе. Обнаружена фотостабилизация красителя генерацией, выделены каналы образования разных фотопродуктов. Показана необходимость выбора конструкции в соответствии с задачей и оптимизации эффективности лазера по концентрации.

В настоящее время проблема повышения ресурса работы активной среды (т.е. стабильности генерационных характеристик) является одной из важнейших для лазеров на красителях. Известно, что под действием мощного излучения накачки растворы красителей испытывают необратимые фотопревращения, т.е. в процессе генерации характеристики меняются, что затрудняет эксплуатацию лазеров. Существует достаточно много работ, посвященных улучшению ресурса, однако в основном эти работы выполнены для лазеров с неселективным резонатором [1, 2]. Кроме того, есть работы, в которых проведена теоретическая оценка влияния условий облучения на фотораспад лазерных красителей [3, 4]. В нашей работе мы экспериментально исследовали ресурс на установке, позволяющей сочетать высокую эффективность преобразования излучения эксимерного лазера с энергией до 0,5 Дж в импульсе (кпд до 20%), с высоким качеством преобразованного излучения (узкая линия 0,01 нм с расходимостью не более 1,5 мрад).

Генерационные характеристики лазерной системы <МЖЛ-03>

| Активная среда в У2, режим облучения | $\eta_0, \%$ | η/η_0 | $K_{\lambda_{\text{нак}}}^0, (\text{см}^{-1})$ | $\frac{\Delta K_{\lambda_{\text{нак}}}}{K_{\lambda_{\text{нак}}}, (\%)}$ | $1 - \frac{c}{c_0}$ | P_{80} | | P_{50} | | $\Delta D_{\lambda_{\text{ген}}}$ |
|---|--------------|---------------|--|--|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| | | | | | | $\frac{\text{Дж}}{\text{см}^3}$ | $\frac{\text{фот}}{\text{мол}}$ | $\frac{\text{Дж}}{\text{см}^3}$ | $\frac{\text{фот}}{\text{мол}}$ | |
| К2 0,6 ммоль/л в этаноле, селективная генерация | 8,1 | 0,43 | 1,4 | 13,6 | 0,056 | 3 | 13 | 10 | 43 | 0,158 |
| К2 1 ммоль/л в этаноле, спонтанный | 11,8 | 0,26 | 2,45 | 10,4 | 0,094 | 5 | 13 | 15 | 39 | 0,385 |
| К2 1 ммоль/л в этаноле, селективная генерация | 11,8 | 0,35 | 2,45 | 10,5 | 0,036 | 8 | 21 | 32 | 83 | 0,316 |
| К2 1,3 ммоль/л в этаноле, селективная генерация | 12,1 | 0,46 | 2,9 | 5,2 | 0,064 | 8 | 16 | 45 | 90 | 0,281 |
| К2 1,3 ммоль/л в этаноле, спонтанный | 12,1 | 0,5 | 2,9 | 10,7 | 0,13 | 5 | 10 | 22 | 44 | 0,267 |
| К2 1,3 ммоль/л в этаноле, неселективная генерация | 12,5 | 0,53 | 2,9 | 2,2 | 0,055 | 5 | 10 | 35 | 70 | 0,253 |
| К2 2 ммоль/л в этаноле, селективная генерация | 13,8 | 0,49 | 4,9 | 8,6 | 0,032 | 18 | 23 | 75 | 98 | 0,3 |
| К2 2 ммоль/л в этаноле, спонтанный | 13,8 | 0,51 | 4,9 | 9 | 0,12 | 8 | 10 | 46 | 60 | 0,295 |
| К2 4,2 ммоль/л в этаноле, селективная генерация | 15,1 | 0,52 | 10,2 | 4 | 0,019 | 20 | 12 | 95 | 59 | 0,348 |
| К2 4 ммоль/л в этаноле, спонтанный | 15,1 | 0,51 | 9,8 | 2,2 | 0,08 | 10 | 6 | 40 | 26 | 0,416 |

Излучение накачки эксимерного лазера распределяется следующим образом: $0,15 E_{\text{нак}}$ идет на задающий генератор (ЗГ), $0,3 E_{\text{нак}}$ – на первый усилитель (У1) и $0,55 E_{\text{нак}}$ – на второй усилитель (У2). В ЗГ в качестве селективного элемента используются 2 дифракционные решетки, одна из которых работает в режиме скользящего падения, что позволяет получить линию не шире $0,01 \text{ нм}$. Кюветы усилителей выполнены в виде призм полного внутреннего отражения, в которых излучение накачки полностью поглощается раствором красителя кумарина 2, циркулирующего во внутреннем канале $\varnothing 0,4 \text{ см}$, длиной $l = 5 \text{ см}$. Ресурс работы мы определяли как суммарную энергию накачки, вкачанную в единицу объема У2, при которой кпд генерации системы уменьшается на 20 или 50%. Поскольку ЗГ и У1 работают в прокачанном варианте с объемом раствора $V = 500 \text{ см}^3$, а У2 без прокачки с объемом $V = 1 \text{ см}^3$, мы считаем, что фотопревращения в ЗГ и У2 за время эксперимента можно пренебречь. Генерационные характеристики приведены в таблице.

Одновременно с ресурсом работы мы контролируем спектральные изменения в длинноволновой полосе поглощения, т.е. измеряем квантовый выход фотопревращений $\phi_{\text{фот}}$ – число распавшихся молекул в расчете на поглощенный фотон. Кроме того, мы контролируем изменение поглощения на $\lambda_{\text{ген}}$ и $\lambda_{\text{нак}}$ спектрально на приборе <Specord M 40> и измеряем ослабление инжектирующего сигнала I с У1 в процессе генерации с помощью ИМО 2Н, которое в пересчете на оптическую плотность $= \Delta D_{\lambda_{\text{ген}}} = \lg I_0^{Y1} / I^{Y1}$ совпадает со спектральными изменениями. Замена облученного раствора в У2, кпд которого упал в 2 раза, на свежий ведет к восстановлению инжектирующего сигнала до его значения в предыдущем эксперименте, что подтверждает фотохимическую причину его изменения.

Поскольку $\lambda_{\text{ген}}$ и $\Delta \lambda_{\text{ген}}$ задаются инжектирующим сигналом с ЗГ, который не подвергается заметным фотопревращениям в течение эксперимента, то изменения этих характеристик в процессе генерации мы не обнаружили, в то время как в неселективном резонаторе для кумаринов наблюдается небольшой длинноволновый сдвиг спектра генерации в результате фотопревращений $\approx 1\text{--}2 \text{ нм}$. Расходимость, которую мы измеряли с помощью диафрагмы в фокальной плоскости линзы, также в пределах ошибок оставалась постоянной.

Из анализа таблицы видно, что выход системы на оптимальные по эффективности преобразования параметры (кпд) наблюдается при концентрации красителя в У2 = $2\text{--}4 \text{ ммоль/л}$. Падение кпд \approx на 50% от первоначального за счет фотопревращений дает процент распавшихся молекул на порядок меньше – это свидетельствует о том, что уменьшение энергии генерации происходит не за счет уменьшения концентрации генерирующих молекул, а в результате образования фотопродуктов, поглощающих в области генерации и накачки красителя. На рис. 1 приведены зависимости уменьшения кпд η/η_0 от поглощения на $\lambda_{\text{ген}}$.

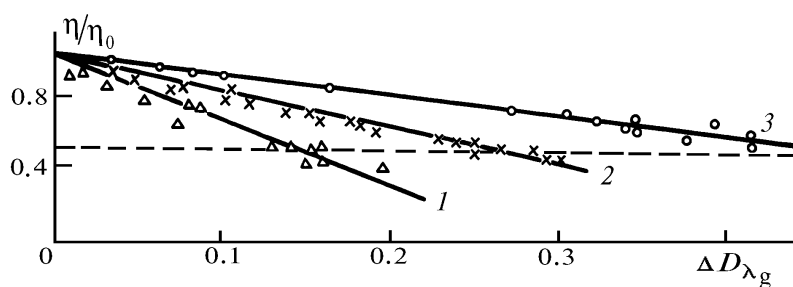


Рис. 1. Уменьшение кпд генерации в зависимости от роста оптической плотности на $\lambda_{\text{ген}}$ в процессе генерации для концентрации красителя в У2: кривая 1 – 0,6; 2 – 2; 3 – 4,2 ммоль/л

Поскольку к какому-то моменту образуется фотопродукт в концентрации c , поглощающий с коэффициентом ϵ на $\lambda_{\text{ген}}$, то из соотношения $D = c\epsilon l$ следует, что уменьшение кпд происходит пропорционально l – длине активной среды в усилителе. Причем это зависит еще и от концентрации красителя: при большей концентрации красителя энергия генерации падает медленнее при одном и том же поглощении на $\lambda_{\text{ген}}$ (рис. 1).

Результатом этого является увеличение ресурса работы с увеличением концентрации красителя в усилителе, как видно из рис. 2, б, более чем на порядок при увеличении концентрации от 0,6 до 4 ммоль/л при практически одинаковом выходе фотопревращений. Кривые, приведенные на рис. 2, показывают, что в случае режима облучения без генерации, т.е. спонтанного или близкого к спонтанному (без инжектирующего сигнала), ресурс работы уменьшается за счет увеличения выхода фотопревращений практически на порядок. В этом случае происходит фотостабилизация генерацией за счет уменьшения времени жизни фотодegradирующего состояния [5]. Рост поглощения в области генерации в расчете на поглощенный одной молекулой фотон имеет более резкую зависимость от концентрации в спонтанном режиме, чем в генерационном, в то время как характер зависимости на $\lambda_{\text{нак}}$ практически не меняется. Это свидетельствует о том, что в генерационном режиме в большей степени ингибируется канал фотопревращений, связанный с фотопродуктом, поглощающим на $\lambda_{\text{ген}}$, чем на $\lambda_{\text{нак}}$. Отсюда можно сделать вывод, что фотопродукт, поглощающий на $\lambda_{\text{ген}}$, связан с фотодegradацией красителя с лазерного уровня, а <коротковолновый> фотопродукт образуется в другом канале. Рост ресурса с увеличением концентрации от 0,6 до 4 ммоль/л в условиях генерации, по-видимому, объясняется выходом на оптимальный по эффективности преобразования режим, связанный с уменьшением доли спонтанного излучения. Ход кривой ресурса в условиях спонтанного облучения можно объяснить уменьшением энергетической нагрузки на молекулу в течение импульса накачки: по 1,3 фотона при 0,6 ммоль/л и 0,3 фотона при 2 ммоль/л.

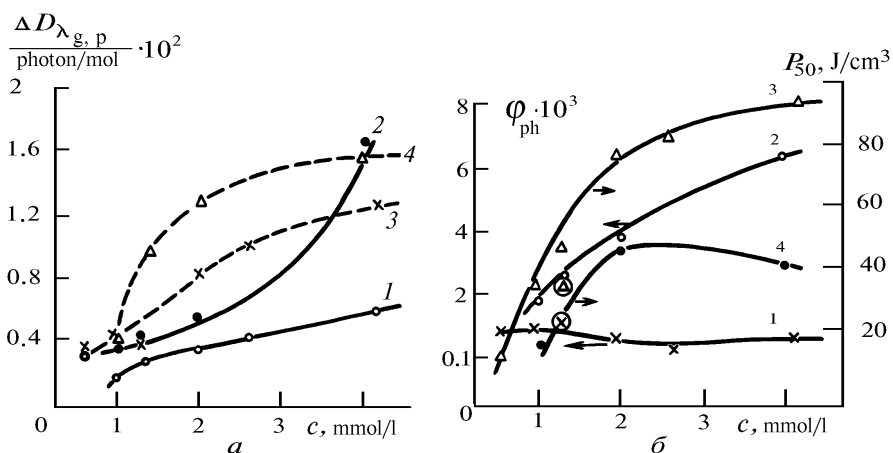


Рис. 2. Зависимость поглощения на $\lambda_{\text{ген}}$ – 1, 2 и $\lambda_{\text{нак}}$ – 3, 4 в расчете на поглощенный фотон (а) и квантового выхода фотопревращений Φ_{ph} – 1, 2 и ресурса работы P_{50} – 3, 4 (б) от концентрации красителя в У2 при разных режимах облучения: 1, 3 – режим генерации, 2, 4 – режим спонтанного облучения. Символы в кружках (б) соответствуют режиму генерации с неселективным резонатором

Особый интерес вызывает сравнение режима узкополосной генерации с $\Delta\lambda \leq 0,01$ нм и режима с неселективным резонатором в ЗГ, когда вместо 2-й решетки использовалось глухое зеркало, на которое выводится нулевой порядок дифракционной картины от 1-й решетки. В этом случае ресурс работы был меньше по сравнению с аналогичным раствором, генерирующим в узкой линии, хотя выход фотопревращений практически не отличается (рис. 2, б).

Это связано, по-видимому, с существенным увеличением суперизлучения, т.к. усиливается широкий спектральный диапазон ($\Delta\lambda_{\text{ген}}=12-13$ нм), т.е. повышается доля спонтанных процессов, и как результат – повышение поглощения на $\lambda_{\text{ген}}$. Если сравнить этот результат с ресурсом работы К2, полученным в обычном неселективном генераторе без усилителей с поперечной накачкой ХеС1-лазером примерно той же мощности, то с учетом длины кюветы ресурс в данной системе с неселективным резонатором гораздо выше, по-видимому, за счет увеличения однородности возбуждения и уменьшения времени развития генерации, т.е. уменьшения доли спонтанных процессов.

Замечено, что в данной установке меньше доля фотопродуктов, поглощающих на $\lambda_{\text{нак}}$: в генераторе с неселективным резонатором без усилителей она достигает 20% при падении КПД на 50%. Возможно, это дополнительный канал уменьшения ресурса работы в этом случае.

Таким образом, ресурс работы лазерной системы с каскадом усилителей превышает ресурс работы лазера с неселективным резонатором за счет уменьшения доли спонтанных процессов. Однако ресурс уменьшается с увеличением длины кюветы, т.е. этот параметр надо оптимизировать не только по КПД, но и по ресурсу. Кроме того, ресурс существенно зависит от концентрации красителя, которая также должна быть оптимизирована по эффективности преобразования.

1. Fletcher A.N., Pietrak M.E. // Appl. Phys. 1985. V. B37. P. 151–157.
2. Кузнецова Р.Т., Фофонова Р.М., Копылова Т.Н. и др. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. N 5. С. 993–996.
3. Горяева Е.М., Шабля А.В. // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64. N 3. С. 532–538.
4. Иваненко О.И., Чередниченко О.Б. // ЖПС. 1991. Т. 54. N 6. С. 955–959.
5. Бондар М.В., Пржонская О.В., Тихонов Е.А. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. N 11. С. 2201–2206.

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
при Томском госуниверситете

Поступила в редакцию
21 декабря 1992 г.

K. M. Degtyarenko, T.N. Kopylova, R. T. Kuznetsova, G. V. Mayer,
E. N. Tel'minov. **Influence of the Dye Concentration and the Laser System Construction on its Lifetime.**

Lifetime of a laser system composed of a master oscillator and two light amplifiers emitting within a narrow spectral interval ($\Delta\lambda=0,01$ nm) has been investigated experimentally. In this system the ethanol solution of the coumarine-2 dye is pumped by radiation of a Xe-Cl-laser.

It is shown that lifetime of such a system exceeds the lifetime of a laser system with nonselective resonator and depends on the cell length and dye concentration in the amplifier. It was revealed in this study that there exists a stabilization of dyes by the laser emission. It is shown that it is necessary to select the laser construction in accordance with the application and to optimize the laser efficiency by varying the dye concentration.