

## Эффективное преобразование спектрального состава излучения (510 нм → 578 нм) лазеров на парах меди

А.Б.Дьячков, В.П.Лабозин

*Приведены результаты эксперимента по преобразованию спектрального состава (510 нм → 578 нм) мощного излучения лазера на парах меди (ЛПМ) в кювете с красителем. Использование эффективного лазерного красителя Pyromethene 597 (PM-597) позволило преобразовать излучение ЛПМ мощностью 120 Вт (72 Вт ( $\lambda = 510$  нм) + 48 Вт ( $\lambda = 578$  нм)) в излучение мощностью 102 Вт с длиной волны 578 нм, что эквивалентно эффективности преобразования 85%. Исследована фотостабильность данного красителя в различных растворителях. Для PM-597 в n-гептане фотостабильность (более 45 ГДж/моль) оказалась выше фотостабильности Rh6G в этаноле.*

**Ключевые слова:** лазерные красители, фотостабильность красителя, лазер на парах меди, преобразование частоты.

Излучение импульсных лазеров на красителе в спектральной области 600–670 нм представляет большой практический интерес для лазерного разделения изотопов [1] и для медицины (в частности, в лазерной динамической терапии [2]). Однако в случае, когда для накачки лазеров на красителе, генерирующих в красной области спектра, используются лазеры на парах меди (ЛРМ) [3], КПД лазерной установки заметно снижается. Дело в том, что полоса поглощения красителей, эффективно генерирующих в данном спектральном диапазоне, находится в интервале 570–620 нм (правило Стокса–Ломмеля). Кроме того, излучение ЛПМ состоит из зеленой ( $\lambda = 510$  нм) и желтой (578 нм) компонент, причем в оптимальном режиме работы газоразрядной трубки отношение выходных мощностей зеленой и желтой компонент составляет 1.5–2. Следовательно, большую часть излучения ЛПМ эффективно преобразовать нельзя. Исключением может стать использование красителя DCM, где спектральный сдвиг между полосами поглощения и флуоресценции аномально велик и в зависимости от растворителя составляет 100–150 нм [5]. Однако эффективность преобразования энергии накачки (510 нм) в данном красителе не превышает 20% [6] и значительно уступает КПД (50–60%), которые могут быть достигнуты в красителях Rhodamine 101, Cresyl Violet, Sulforhodamine 640 при накачке излучением с  $\lambda = 578$  нм.

Доля желтой составляющей может быть увеличена путем перегрева трубки ЛПМ, однако это связано не столько с ростом мощности излучения на длине волны 578 нм, сколько со снижением мощности генерации зеленой компоненты. К настоящему времени экспериментальные данные об успешном перераспределении спектрального состава излучения лазеров на парах меди в сторону увеличения желтой компоненты без заметного снижения выходной мощности нам неизвестны.

В работе [4] предложен простой способ преобразования спектра лазера на парах меди в сторону увеличения мощности желтой компоненты (578 нм). Для этого излучение ЛПМ фокусируется в кювету с красителем, инверсия населенности в котором создается зеленой линией излучения ЛПМ (накачка), а снимается индуцированно желтой линией ЛПМ (усиление). Наиболее эффективное перераспределение спектрального состава излучения ЛПМ в сторону желтой компоненты данным способом было продемонстрировано в работе [7]. Излучение ЛПМ со средней мощностью 6.2 Вт (при отношении мощностей зеленой и желтой компонент, равном двум) было преобразовано в излучение с  $\lambda = 578$  нм и средней мощностью 4.2 Вт, что соответствует эффективности конвертации спектрального состава ЛПМ 66%. Эффективность же преобразования 510 нм → 578 нм в используемом красителе Rh6G достигала 50%.

В настоящей работе показано, что использование для этой цели лазерного красителя Pyromethene 597 (PM-597) намного эффективнее.

Оптическая схема установки приведена на рис.1. Пучок излучения с диаметром 32 мм и расходимостью 0.5 мрад на выходе из линейки ЛПМ (задающий генератор и два усилителя) посредством сферической линзы 1 фокусировалось в кювету с красителем 2. За кюветой

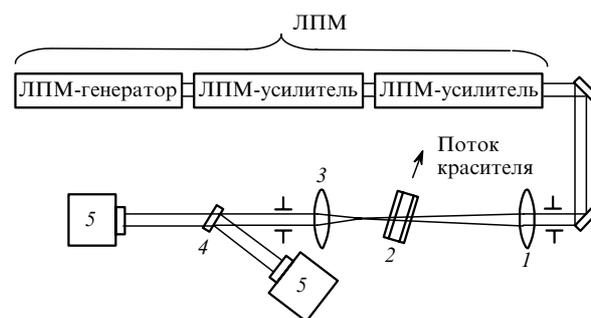


Рис.1. Оптическая схема эксперимента по преобразованию спектрального состава излучения ЛПМ в кювете лазера на красителе: 1 – линза; 2 – кювета с красителем; 3 – коллимирующая линза; 4 – дихроичное зеркало; 5 – измерители мощности.

находилась линза 3, коллимирующая выходной пучок. Для определения эффективности преобразования излучения лазера на парах меди желтая компонента выделялась с помощью дихроичного зеркала 4 (пропускание излучения с  $\lambda = 510$  нм составляло 90 %, отражение при  $\lambda = 578$  нм – 99.5 %). Мощность излучения определялась измерителями мощности 5 (Powermax 500D, фирма Molelectron, USA), временные характеристики импульсов излучения – фотоприемником ФК-26.

Частота повторения импульсов ЛПМ составляла 10 кГц, длительность импульсов по полувысоте – 25 нс. Из-за хроматизма линзы 1 точки фокусировки излучений с длинами волн 510 и 578 нм слегка различались. Кювета с красителем располагалась по лучу до геометрического положения фокуса. В этом случае в активной зоне излучение накачки (510 нм) находилось внутри опорного излучения (578 нм), что исключало пространственную потерю энергии накачки. Поперечный размер излучения на входном окне кюветы составлял 1.5–2 мм (пиковая плотность мощности излучения накачки в красителе была равна 10–15 МВт/см<sup>2</sup>). Внешние поверхности окон кюветы имели просветляющие диэлектрические покрытия, длина активной зоны (по лучу) составляла 3 мм.

Система прокачки (рабочий объем 14 л) обеспечивала расход раствора красителя через кювету 28 л/мин (скорость потока в активной зоне 22 м/с). Это соответствовало полной смене объема красителя в активной зоне за межимпульсный интервал времени. В качестве растворителя использовался *n*-гептан. Рабочая концентрация красителя РМ-597 составляла  $2.6 \times 10^{-4}$  моль/л.

В эксперименте на вход кюветы подавалось излучение лазера на парах меди со средней мощностью 120 Вт (72 Вт ( $\lambda = 510$  нм) + 48 Вт ( $\lambda = 578$  нм)). На выходе из кюветы средняя мощность излучения составила 104.5 Вт (мощность зеленой компоненты – 2.5 Вт, желтой – 102 Вт). Таким образом, энергетический КПД преобразования 510 нм → 578 нм в красителе достигал 75 %, полная эффективность преобразования спектрального состава излучения ЛПМ (510 нм + 578 нм → 578 нм) – 85 %. Остаточный сигнал накачки легко объяснить незначительным (2–3 нс) опережением импульса накачки (510 нм) по отношению к опорному (578 нм) излучению. Такое явление характерно для лазеров на парах меди.

Помимо эффективности, важным параметром, определяющим успешное использование красителя, является его фотостабильность, результаты исследования которой для различных пиррометиновых красителей приведены в работах [8–11]. Однако данные о фотостабильности РМ-597 нам не известны. Согласно работе [9] можно сделать вывод, что для пиррометиновых красителей нет единого растворителя, оптимального с точки зрения их фотостабильности.

Фотостабильность Руггометена 597 (фирма Exciton, USA) определялась в двух растворителях – этаноле (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) и *n*-гептане (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>), а красителя Rhodamine 6G (фирма Альфа-Аконикс, Долгопрудный, Россия) – в этаноле, который является своего рода эталоном лазерного красителя.

Оптическая схема эксперимента приведена на рис.2. Кювета закрытого типа с красителем 3 была расположена в плоском резонаторе и накачивалась второй гармоникой Nd–YAG-лазера (532 нм). Одно из зеркал резонатора (1) было дихроичным и служило для продольного ввода излучения накачки (пропускание с  $\lambda = 532$  нм

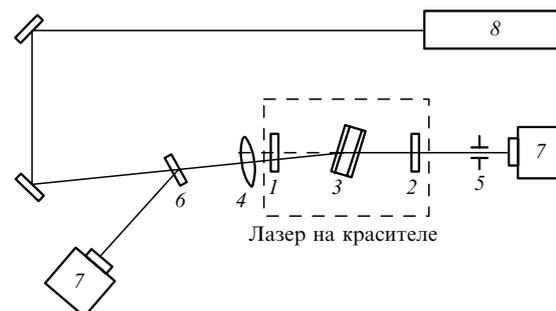


Рис.2. Оптическая схема эксперимента по определению фотостабильности красителя:

1 – дихроичное зеркало; 2 – выходное зеркало; 3 – кювета с красителем; 4 – длиннофокусная линза; 5 – диафрагма; 6 – делительная пластина; 7 – фотометр; 8 – лазер на Nd:YAG с удвоением частоты.

составляло 80 %, отражение превышало 98 % в области длин волн свыше 560 нм). Выходное зеркало 2 имело широкополосное диэлектрическое покрытие с коэффициентом пропускания 75 %. Длина кюветы с красителем составляла 10 мм. Для снижения френелевских потерь на отражение внешние поверхности окон кюветы (стекло К8) были просветлены. Длина резонатора составляла 40 мм, частота следования импульсов накачки – 1 Гц, длительность по полувысоте – 25 нс, энергия в импульсе была равна 10–15 мДж.

Излучение накачки фокусировалось в кювету длиннофокусной линзой 4 так, что поперечный размер пучка накачки на входном окне кюветы составлял 1–1.5 мм. Между осью резонатора и пучком накачки был небольшой угол (3°), позволявший с помощью диафрагмы 5 исключить попадание остаточного сигнала накачки в измеритель 7. Энергия в импульсе генерации и накачки измерялась лазерными наносекундными фотометрами 7.

В экспериментах концентрация *C* красителя РМ-597 в гептане составляла  $0.35 \times 10^{-4}$  моль/л, в этаноле –  $0.42 \times 10^{-4}$  моль/л, Rh6G в этаноле –  $0.21 \times 10^{-4}$  моль/л. При данных концентрациях эффективности генерации была близка к максимальному значению.

На рис.3 приведена зависимость эффективности генерации от поглощенной красителями энергии накачки. Под эффективностью генерации понималось отношение энергии в импульсе генерации к энергии в импульсе накачки. Поглощенная энергия накачки приводилась к мо-

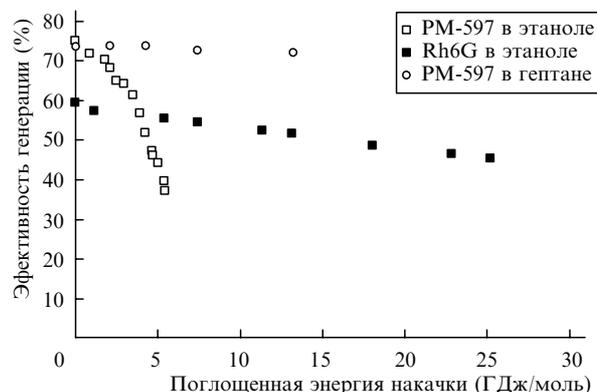


Рис.3. Зависимость эффективной генерации от поглощенной красителем энергии накачки.

лярному числу молекул красителя и имела размерность ГДж/моль. Согласно [12], за фотостабильность красителя принималась молярная доза поглощенной энергии накачки, при которой выходной сигнал генерации снижался в два раза.

В результате экспериментов было получено, что фотостабильность РМ-597 максимальна при использовании в качестве растворителя *n*-гептана. При энергии накачки 45 ГДж/моль эффективность генерации снижалась не более чем на 10 % своего максимального значения. Это в десятки раз превышает фотостабильность РМ-597 в этаноле (5 ГДж/моль) и больше фотостабильности Rh6G.

В работе [10] было обнаружено влияние концентрации красителя РМ-567 на его фотостабильность: с ростом концентрации фотостабильность уменьшалась. Чтобы избежать возможной ошибки в оценке времени работы усилительной ячейки без замены (или добавления) красителя, был проведен дополнительный эксперимент. Концентрация красителя РМ-597 в гептане устанавливалась близкой к рабочей концентрации красителя в усилительной ячейке, составившей  $2.1 \times 10^{-4}$  моль/л. В ходе эксперимента краситель объемом 0.25 см<sup>3</sup> облучался в течение 7 ч (частота следования импульсов 10 Гц, энергия в импульсе 9 мДж), что эквивалентно удельной поглощенной энергии 45 ГДж/моль. Эффективность генерации оставалась на уровне 75 %. Тем не менее о наличии фотодеградационных процессов красителя свидетельствовало появление слабого сигнала накачки на выходе из кюветы по окончании эксперимента (эффект обесцвечивания).

В заключение следует отметить, что повышение эффективности преобразования спектрального состава из-

лучения ЛПМ (510 нм + 578 нм → 578 нм) до 85 % позволяет увеличить КПД лазеров на красителях в красной области спектра при накачке излучением ЛПМ. При этом фотостабильность красителя РМ-597 в *n*-гептане, равная 45 ГДж/моль, означает, что время работы без заметного снижения эффективности преобразования излучения при мощности 120 Вт составит несколько сотен часов без добавления или смены красителя.

Авторы благодарят сотрудников Лаборатории лазерной технологии Института молекулярной физики РНЦ «Курчатовский институт» за предоставленную возможность работы с мощным излучением лазеров на парах меди.

1. Bass I.L., Bonanno R.E., Hackel R.P., Hammond P.R. *Appl. Opt.*, **31**, 6993 (1992).
2. Loschenov V.B., Konov V.I., Prokhorov A.M. *Laser Phys.*, **10**, 1188 (2000).
3. Morstyn G., Kaye A.H. *Phototherapy of cancer* (London: Harwood Academic Publishers, 1990, p. 55–65).
4. Кравченко В.И., Литвиненко А.Я., Смирнов А.А. *Квантовая электроника*, **5**, 675 (1979).
5. Meyer M., Mialocq M.J.C. *Opt. Commun.*, **64**, 264 (1987).
6. Hargrove R.S., Kan T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **16**, 1108 (1980).
7. Coutts D.W., Ainsworth M.D., Piper J.A. *Opt. Commun.*, **75**, 301 (1990).
8. Rahn M.P., King T.A., Gorman A.A., Hamblett I. *Appl. Opt.*, **36**, 5862 (1997).
9. Pavlopoulos T.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3613**, 112 (1999).
10. Mackey M.S., Sisk W.N. *Dyes and Pigments*, **51**, 79 (2001).
11. Pavloupoulos T.G., Boyer J.H., Sathyamoorthi G. *Appl. Opt.*, **37**, 7797 (1998).
12. Rahn M.P., King T.A. *Appl. Opt.*, **34**, 8260 (1995).