

Влияние видности интерференционного поля накачки на пикосекундный режим генерации РОС-лазера на красителях при субнаносекундном возбуждении

В. М. Катаркевич, Т. Ш. Эфендиев

*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: katarkevich@dragon.bas-net.by*

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния видности интерференционного поля накачки V на пикосекундный режим генерации лазера на красителях со светоиндуцированной распределенной обратной связью (РОС) при субнаносекундном возбуждении. Продемонстрирована возможность заметного (до $\sim 1,9$ раз) повышения энергии одиночных пикосекундных импульсов РОС-лазера при уменьшении значения V с ~ 1 до $\sim 0,14$.

Ключевые слова: лазеры на красителях, распределенная обратная связь, одиночные пикосекундные импульсы.

The influence of the visibility of the pump interference field on picosecond pulse generation by a DFB dye laser under subnanosecond excitation

V. M. Katarkevich, T. Sh. Efendiev

*B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: katarkevich@dragon.bas-net.by*

The results of a theoretical and experimental study of the influence of the visibility of the pump interference field V on picosecond pulse generation by a dye laser with light-induced distributed feedback (DFB) under subnanosecond excitation are presented. The possibility of a noticeable (up to $\sim 1,9$ times) increase in the energy of single picosecond pulses of a DFB laser by decreasing the value of V from ~ 1 to ~ 0.14 has been demonstrated.

Keywords: dye lasers, distributed feedback, single picosecond pulses.

Введение

Лазеры на красителях со светоиндуцированной распределенной обратной связью (РОС) являются простыми и удобными источниками перестраиваемого по спектру узкополосного когерентного излучения как наносекундной, так и пикосекундной длительности. При этом генерация одиночных пикосекундных импульсов в таких РОС-лазерах может быть получена как при их накачке одиночными сверхкороткими импульсами (СКИ) твердотельных импульсных лазеров с синхронизацией мод [1], так и при нано-/субнаносекундном возбуждении [2]. Последний из указанных выше способов, основанный на использовании режима релаксационных колебаний выходной интенсивности излучения при незначительном превышении порога, является особенно привлекательным, так как позволяет существенно упростить и удешевить пикосекундную лазерную систему. Фактически на сегодняшний день это наиболее простой способ получения одиночных СКИ с длительностью в несколько десятков пс с возможностью широкодиапазонной оперативной перестройки длина

волны генерации. Вместе с тем следует отметить, что в пикосекундном режиме генерации эффективность генерации РОС-лазера составляет единицы процентов, а поэтому энергии и пиковой мощности получаемых таким способом одиночных СКИ зачастую оказывается недостаточно для практических применений. Таким образом, поиск простых и удобных способов повышения энергетики одиночных СКИ РОС-лазера является актуальной задачей.

Наши недавние исследования показали, что одним из возможных путей решения указанной выше проблемы является переход от первого ($m = 1$) ко второму ($m = 2$) порядку брэгговского отражения [4–7]. При таких условиях ($m = 2$), из-за существенного падения добротности РОС-резонатора и возрастания активных потерь, режим релаксационных колебаний выходной интенсивности излучения носит более ярко выраженный характер, приводя к заметному (более чем в 2 раза) возрастанию энергии и пиковой мощности одиночных СКИ. Вместе с тем понижение добротности резонатора РОС-лазера может быть достигнуто и при $m = 1$ путем простого уменьшения видности интерференционного поля возбуждения V , формирующего пространственную решетку. Именно исследованию влияния видности интерференционного поля накачки V на основные характеристики одиночных СКИ РОС-лазера на красителях при субнаносекундном возбуждении и посвящена настоящая работа.

1. Численное моделирование РОС-генерации

Для численного моделирования кинетики генерации РОС-лазера при субнаносекундном возбуждении нами использовался метод скоростных уравнений, описывающих изменение населенности верхнего лазерного уровня $n(t)$ и плотности потока фотонов генерируемого излучения в резонаторе $q(t)$ [2]. Ключевым параметром данной динамической модели РОС-лазера, определяющим добротность резонатора, является время жизни фотона в резонаторе $\tau_c(t)$, которое в случае чисто амплитудной решетки (решетки усиления) имеет вид:

$$\tau_c(t) = \frac{\eta L^3}{8c\pi^2} [n(t)\sigma_e V]^2, \quad (1)$$

где η – показатель преломления раствора красителя; L – длина РОС-структуры; c – скорость света в вакууме; σ_e – сечение вынужденного излучения молекул красителя на длине волны генерации λ_L ; V – видность интерференционного поля накачки.

При расчетах нами использовались следующие параметры: $\eta = 1,36$ (этанол); $L = 0,7$ см; длина волны накачки $\lambda_p = 532$ нм; длина волны генерации $\lambda_L = 565$ нм; сечение поглощения молекул красителя (родамина 6Ж) на длине волны накачки $\sigma_p = 3,8 \times 10^{-16}$ см²; $\sigma_e = 3,78 \times 10^{-16}$ см²; длительность импульсов накачки гауссова профиля $\tau_p = 0,5$ нс; концентрация молекул красителя $N = 1,5 \times 10^{17}$ см⁻³ ($C_d = 0,25$ ммоль/л). В процессе численного моделирования варьировались уровень накачки $\gamma = E_p/E_{thr}$ (где E_p – энергия накачки, а E_{thr} – пороговая энергия возбуждения), а также параметр видности V .

Прежде всего, результаты численного моделирования показали, что уменьшение видности интерференционного поля возбуждения V сопровождается возрастанием порога и падением эффективности генерации РОС-лазера. В то же время было

установлено, что при различных значениях V влияние уровня накачки на временной ход излучения генерации РОС-лазера носит качественно подобный характер. При значительной мощности возбуждения в РОС-лазере генерируется цуг СКИ, в то время как при незначительном превышении порога – одиночные СКИ пикосекундной длительности. Наиболее короткие и мощные одиночные СКИ генерируются при уровне накачки $\gamma = E_{2Thr}/E_{Thr}$, где E_{2Thr} – порог появления второго СКИ. Выраженное в процентах указанное выше максимально допустимое превышения порога известно как динамический диапазон пикосекундного РОС-лазера на красителях $\gamma_{1-2} = 100\% (E_{2Thr} - E_{Thr})/E_{Thr}$. Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что с уменьшением V энергия и пиковая мощность одиночных СКИ возрастают, а динамический диапазон γ_{1-2} и длительность, наоборот, уменьшаются.

На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости энергии генерации РОС-лазера от энергии накачки для трех различных значений параметра видности V .

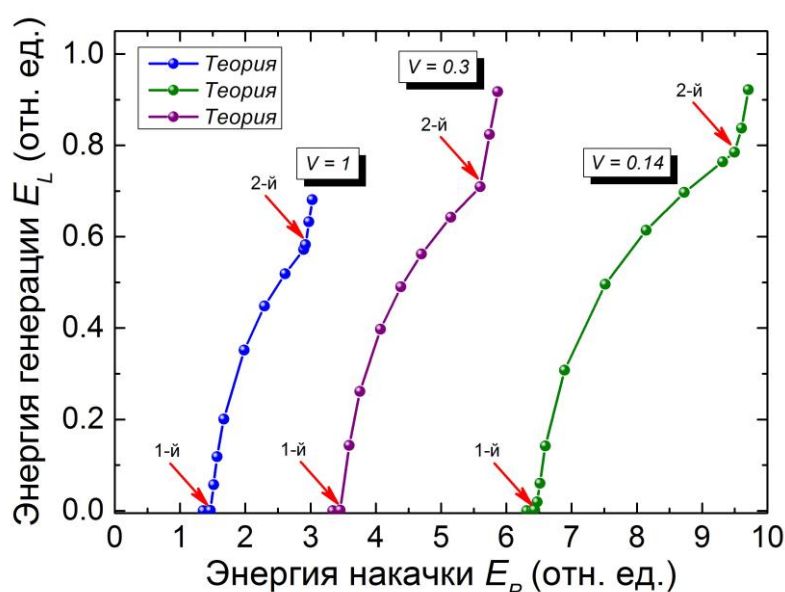


Рис. 1. Зависимость энергии генерации РОС-лазера E_L от энергии возбуждения E_p при различных значениях видности интерференционного поля накачки V (расчет)

Из рис. 1 видно, что уменьшение V с 1 до 0,14 приводит к возрастанию порога в $\sim 4,4$ раза и увеличению энергии одиночного СКИ в $\sim 1,4$ раза. При этом, как показали вычисления, длительность одиночного СКИ сокращается с $\tau_{0.5} = 15,9$ пс до $\tau_{0.5} = 12,4$ пс (т. е. в $\sim 1,3$ раза), а его пиковая мощность P_L возрастает в $\sim 1,8$ раз. Что касается динамического диапазона γ_{1-2} , то при указанном выше уменьшении V имеет место его сужение с $\gamma_{1-2} = 98\%$ до $\gamma_{1-2} = 48\%$ (т. е., в ~ 2 раза). Следствием указанного уменьшения γ_{1-2} является то, что при $\gamma = \text{const}$ меньшим значениям V соответствует большее количество СКИ в цуге. Так, например, если при $\gamma = 3$ и $V = 1$ в РОС-лазере наблюдается генерация двух СКИ, то при переходе к $V = 0,3$ и $V = 0,14$ их количество возрастает до трех и четырех, соответственно.

2. Экспериментальные результаты

Экспериментальное исследование генерационных характеристик РОС-лазера осуществлялось на экспериментальной установке, аналогичной [3]. В качестве активной среды использовались этанольные растворы родамина 6Ж с концентрацией $C_d \approx 0.23$ ммоль/л. Возбуждение генерации осуществлялась излучением второй гармоники ($\lambda_P = 532$ нм, $\Delta\lambda_{0.5} < 0.003$ нм) твердотельного Nd:LSB микролазера с диодной накачкой STA01SH-500 (Standa Ltd., Литва) с длительностью импульсов $\tau_{0.5} \approx 0,5$ нс и энергией $E_P \leq 80$ мкДж. РОС-лазер был настроен на работу на длине волны $\lambda_L = 570$ нм. Длина зоны возбуждения раствора красителя в кювете составляла $L_{DFB} \approx 0,7$ см при высоте $h = 0.01 \div 0,02$ см. Управление видностью интерференционного поля накачки $V = 2(I_1 \times I_2)^{0.5}/(I_1 + I_2)$, где I_1, I_2 – интенсивности первого и второго возбуждающих пучков, соответственно, достигалось путем ослабления интенсивности одного из них с помощью нейтральных светофильтров. Для измерения энергетических характеристик излучения накачки и генерации использовались фотодиоды ФД-24К с двухканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) ADC20M/10-2. Временные характеристики исследовались с помощью высокоскоростной электронно-оптической камеры (ЭОК) с линейной разверткой «Агат СФ-3» (разрешение до ~ 2 пс). Спектр излучения контролировался дифракционным спектрографом ДФС-8 (дисперсия $\sim 0,3$ нм/мм) и интерферометром Фабри-Перо.

Выполненные исследования кинетики генерации РОС-лазера показали, что при различных значениях видности интерференционного поля возбуждения временной ход интенсивности генерации носит качественно подобный характер. При значительном уровне накачки γ в РОС-лазере генерируется цуг СКИ, в то время как при не слишком больших превышениях порога ($1 < \gamma < 1,7$) – одиночные СКИ. При этом следует отметить, что если при $V = 1$ и $0,3$ всегда генерировались гладкие одиночные СКИ, длительность которых при $\gamma = \gamma_{1-2}$ составляла $\tau_{0.5} \sim 52$ пс и $\tau_{0.5} \sim 50$ пс, соответственно, то при $V = 0,14$ они могли иметь как гладкий (с $\tau_{0.5} \sim 70 \div 80$ пс), так и невоспроизводимый от импульса к импульсу структурный характер (с $\tau_{0.5} \sim 120 \div 180$ пс).

На рис. 2 приведены измеренные зависимости энергии генерации РОС-лазера от энергии накачки для трех различных значений V . Из рис. 2 видно, что уменьшение V с 1 до 0,14 приводит к возрастанию порога с $E_{Thr} \sim 1,11$ мкДж до $E_{Thr} \sim 2,65$ мкДж (т. е., в $\sim 2,4$ раза) и увеличению энергии одиночных СКИ с $E_L \sim 0,12$ мкДж до $E_L \sim 0,23$ мкДж (т. е., в $\sim 1,9$ раз). Применительно к гладким импульсам это соответствует увеличению их пиковой мощности с $P_L \sim 2,3$ кВт до $\sim 3,3$ кВт (т. е., в $\sim 1,4$ раза). Вместе с тем наши исследования показали, что вследствие возрастания порога при указанном выше уменьшении V диапазон перестройки длины волны генерации РОС-лазера сокращается с 544 – 605 нм до 548 – 576 нм. При этом в последнем случае в выходной энергии излучения РОС-лазера заметно возрастает удельный вес фона усиленного спонтанного излучения, которое, как известно [2], может оказывать заметное влияние на кинетику генерации РОС-лазера на красителях. Полученные нами при $V = 0,14$ экспериментальные результаты являются дополнительным свидетельством значительности указанного влияния.

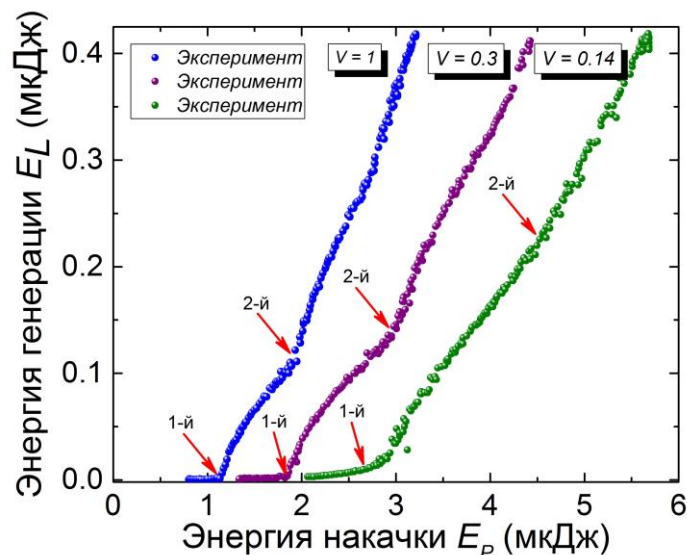


Рис. 2. Зависимость энергии генерации РОС-лазера E_L от энергии возбуждения E_P при различных значениях видности интерференционного поля накачки V (эксперимент)

Сравнение приведенных на рис. 1 и рис. 2 рассчитанных и экспериментально измеренных энергетических кривых свидетельствует об их хорошем качественном соответствии. Тот факт, что даже при невысоких значениях V в РОС-лазере может быть получен устойчивый режим генерации одиночных СКИ, причем с повышенной энергетикой, представляет не только чисто научный, но и практической интерес. Полученные в работе результаты могут найти применение при совершенствовании известных и разработке новых перестраиваемых источников пикосекундных импульсов излучения на основе РОС-лазеров на красителях.

Библиографические ссылки

1. Запорожченко В. А. Генерация сверхкоротких импульсов в лазере на красителях с распределенной обратной связью / В. А. Запорожченко, А. Н Рубинов, Т. Ш. Эфендиев // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3, № 3. С. 114–116.
2. Bor Zs. Tunable Picosecond Pulse Generation by an N2 Laser Pumped Self Q-Switched Distributed Feedback Dye Laser // IEEE J. Quant. Electron. 1980. V. QE-16, No. 5. P. 517–524.
3. Ultrashort pulse generation by distributed feedback dye lasers. I: Temporal characteristics / Zs. Bor [et al.] // Appl. Phys. B. 1982. V. 27, No. 1. P. 9–14.
4. Highly efficient solid-state distributed feedback dye laser based on polymer-filled nanoporous glass composite excited by a diode-pumped solid-state Nd:LSB microlaser / V. M. Katarkevich [et al.] // Appl. Opt. 2015. V. 54, No. 26. P. 7962–7972.
5. Влияние порядка брэгговской дифракции на пикосекундный режим генерации РОС-лазера на красителях при субнаносекундной накачке / V. M. Katarkevich [et al.] // Материалы XI Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (КЭ'2017) (13-17 ноября 2017 г., Минск). С. 5–7.
6. Picosecond laser pulse generation by second-order distributed feedback dye laser / D. Q. Hoa [et al.] // Communications in Physics. 2019. V. 29, No. 3SI. P. 299–304.
7. Katarkevich V. M., Novitsky D. V. Bragg Order Effect on Ultrashort Pulse Generation by Distributed Feedback Dye Lasers under Subnanosecond Excitation: Numerical Study // Optics & Laser Technology. 2022. V. 153. P. 108214.