

К. Д. Егоров, В. А. Нехаенко, С. М. Першин, С. А. Плешанов, А. А. Подшивалов, В. В. Шувалов

СИНХРОННО ВОЗБУЖДАЕМЫЙ ПИКОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЕ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СВЕРХТОНКИМ РЕЗОНАТОРОМ

Исследована пикосекундная генерация синхронно накачиваемого лазера на красителе, состоящего из двух связанных резонаторов — согласованного с резонатором лазера накачки и сверхтонкого, заполненного активной средой. Установлено, что при изменении оптической толщины сверхтонкого резонатора длительность импульса генерации варьируется в широких пределах. Экспериментально показано, что даже при использовании коротких (10 импульсов) цугов накачки достигается генерация цугов практически одинаковых по длительности, стабильных, перестраиваемых в широких пределах спектрально ограниченных импульсов длительностью до 5 пс и мощностью в несколько десятков киловатт.

1. В последние годы наблюдается значительный прогресс в разработке синхронно накачиваемых лазеров на красителях (СЛК), возбуждаемых лазерами с активной синхронизацией мод [1]. Такие системы позволяют генерировать излучение предельно короткой длительности, однако они достаточно сложны в управлении и маломощны. Между тем в ряде задач требуется получение с помощью лазеров на красителях пикосекундных световых импульсов, генерируемых несколькими или даже одним мощным импульсом накачки.

В работе проводится теоретический анализ и экспериментальное исследование нового метода генерации мощных перестраиваемых по частоте импульсов длительностью до 5 пс при накачке СЛК цугом излучения второй гармоники твердотельного генератора с пассивной синхронизацией мод. Метод заключается в использовании схемы СЛК, состоящей из двух связанных резонаторов — внешнего, согласованного с резонатором лазера накачки, и сверхтонкого (СТР), заполненного активной средой.

Исследования генерации собственно СТР с растворами красителей [2] показали, что длительность импульсов излучения составляет единицы пикосекунд при возбуждении моноимпульсным излучением. Однако в лазерах с СТР труднопроизводимой. Испытание же СТР в системе СЛК с дисперсионным резонатором позволяет добиться генерации спектрально ограниченных перестраиваемых по частоте пикосекундных импульсов с гораздо большей эффективностью преобразования. Излучение, генерируемое системой связанных резонаторов, обладает малой пространственной расходимостью и высокой стабильностью, поскольку генерация происходит в режиме глубокого насыщения усиления активной среды.

Математический анализ генерации СЛК с СТР проводился с использованием теоретического подхода, развитого в [3] для описания нестационарного режима генерации в синхронно накачиваемых лазерах на красителях, когда учитываются многоуровневость активной среды и нестационарность поляризации рабочего перехода.

2. Рассмотрим динамику генерации в лазерной системе со связанными резонаторами, схематически изображенной на рис. 1. Система состоит из кюветы с раствором красителя K , дисперсионного элемента Φ и внешнего глухого зеркала M_3 . Кювета образована полупрозрачным выходным зеркалом M_1 , находящимся в непосредственном контакте с раствором красителя, и зеркалом (либо стеклянной под-

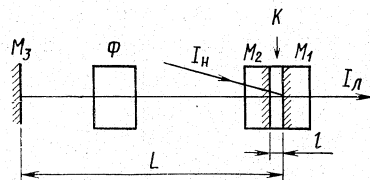


Рис. 1. Схема СЛК со связанными резонаторами

ложкой) M_2 . Зеркала $M_{1,2}$ образуют тонкий низкодобротный резонатор толщиной l . Внешний высокодобротный резонатор длиной L сформирован зеркалами $M_{1,3}$. Период повторения импульсов накачки T связан с L соотношением $T \approx 2L/c$.

Предположим, что в такой СЛК поступает короткий цуг (10—15 импульсов) накачки с гауссовой временной огибающей. Под действием первых импульсов происходит слабое возбуждение молекул красителя, в результате которого высвечиваются длинные импульсы спонтанной люминесценции. При некоторой энергии импульса накачки в тонкой кювете может возникнуть генерация пикосекундного импульса излучения, который фактически и окажется импульсом затравки, определяющим быстрое формирование цуга генерации СЛК. Физический механизм генерации пикосекундных импульсов тонкой низкодобротной кюветой K был подробно исследован в [4] и фактически представляет собой режим свободной генерации, в котором реализуется самомодуляция импульса вследствие насыщения коэффициента усиления активной среды.

В оптимальных условиях (при небольших превышениях порога генерации) длительность пикосекундных моноимпульсных пачков излучения кюветы $\tau_n \sim 2l/c$ определяется двумя факторами: временем жизни фотонов в низкодобротном резонаторе ($\sim 2l/c$) и большим коэффициентом усиления за проход по тонкому резонатору на линейном этапе развития генерации. Соотношение $\tau_n \sim 2l/c$ имеет достаточно общий характер и отмечается в работах по исследованию нестационарной генерации АИГ:Nd-лазера с быстрым включением добротности [6], генерации лазеров на парах меди [7], исследованию ВКР-генераторов [8].

3. Теоретическое рассмотрение процесса формирования пикосекундных импульсов в СЛК с СТР проводилось на основе допущений, принятых для описания нестационарного режима генерации синхронно накачиваемого лазера [3, 9, 10]. Применительно к случаю связанных резонаторов учитывалось, что длительность импульсов накачки $t_n \gg l/c$; это позволило усреднить уравнения генерируемого поля по длине среды l .

Система уравнений для амплитуды генерируемого поля $E_n^{(n)}$ и коэффициента усиления $G^{(n)}$ на произвольном n -м проходе через резонатор длиной L имеет вид:

$$\gamma T_2^2 \frac{d^2}{dt^2} E_n^{(n)} + (1 - R_2 + \gamma) T_2 \frac{d}{dt} E_n^{(n)} = \frac{\alpha_n}{\alpha_n} E_n^{(n)} \left(G^{(n)} - \frac{\alpha_n}{\alpha_n} (1 - R_2) \right) + E_n^{(n)}(t) + (1 - R_2) \left(T_2 \frac{d}{dt} F_n^{(n)} + F_n^{(n)} \right); \quad (1)$$

$$\left(T_1 \frac{d}{dt} + 1 \right) G^{(n)} = I_n^{(n)}(0, t) (\alpha_n l - G^{(n)}) - \frac{\alpha_n}{\alpha_n} \left((1 - R_2^2) I_n^{(n)} - F_n^{(n)} * F_n^{(n)} \right) + \gamma T_2 \frac{d}{dt} I_n^{(n)}, \quad (2)$$

где $\alpha_n = 4\pi\omega_n N d_{32}^2 \chi T_2 / cn_n$ — коэффициент усиления активной среды; d_{32} — матричный элемент дипольного перехода с частотой ω_n ; χ — квантовый выход люминесценции; N — число активных молекул в единице объема; $\alpha_n = 4\pi\omega_n N d_{14}^2 T_2 / cn_n$ — коэффициент поглощения накачки; T_1 , T_2 — времена жизни и дефазировки рабочего уровня; $\gamma = 2l/cT_2$; $E_n^{(n)}$ — амплитуда спонтанных шумов; $I_n^{(n)}(0, t)$ — форма n -го импульса на входе в активную среду.

Дополненная начальными и граничными условиями на гранях кюветы

$$G^{(n)}(t=0) = 0; F_n^{(n)}(t) = (1 - R_2) R_1 E_n^{(n-1)}(t \pm 2\Delta L/c), \quad (3)$$

система уравнений (1), (2) дает все данные для вычисления амплитуды поля

$E_n^{(n)} (1-R_2) (1-R_1)$ на выходе из синхронно накачиваемого резонатора на n -м проходе.

Система (1)–(3) при параметрах, соответствующих реальному эксперименту, просчитывалась на ЭВМ. Расчет эволюции параметров импульса генерации в зависимости от числа n проходов по резонатору СЛК показал, что амплитуда импульса генерации пороговым образом возрастает через 3–4 прохода, причем длительность первых импульсов в цуге генерации уже составляет несколько пикосекунд. На последующих проходах через резонатор контраст пикосекундного импульса генерации значительно возрастает.

Была рассчитана зависимость длительности τ_n генерируемого импульса СЛК со связанными резонаторами от толщины l СТР при различных уровнях накачки (рис. 2). Цуг накачки с гауссовой огибающей состоял из $M=15$ импульсов длительностью 10 пс. При расчетах произведение $\alpha_n l$ бралось постоянным. Видно, что, как и в случае генерации СТР, τ_n линейно связана с толщиной l тонкого резонатора и определяется, следовательно, пикочковым характером генерации СТР.

На рис. 3 приведена расчетная зависимость длительности τ_n импульса генерации СЛК с СТР от энергии импульса накачки ϵ_n (при постоянном отношении $\epsilon_n/\alpha_n l$), показывающая, что τ_n слабо зависит от ϵ_n при больших превышениях над пороговым уровнем генерации СТР $\epsilon_n^{\text{пор}}$.

Перспективность такого метода генерации пикосекундного излучения, когда длительность импульса задается только уровнем накачки и толщиной СТР, иллюстрируют рассчитанные зависимости τ_n от числа M импульсов в цуге накачки (рис. 4, а) и от длительности t_n одного импульса (рис. 4, б). Видно, что длительность генерируемого импульса практически не меняется при удлинении импульса накачки с 10 до 100 пс и при укорочении цуга импульсов накачки с 30 до 5 импульсов, что позволяет добиваться генерации пикосекундного излучения при использовании коротких цугов импульсов накачки от твердотельных генераторов с активной и пассивной синхронизациями мод.

4. Экспериментальное исследование СЛК со связанными резонаторами проводилось на установке, схема которой показана на рис. 5. В качестве задающего использовался либо лазер на АИГ:Nd 1 ($M\epsilon_n=5$ мДж, $M=8$, $t_n=40$ пс), либо лазер на КНФС 2 с пассивной синхронизацией мод ($M\epsilon_n=6$ мДж, $M=20-25$, $t_n=10$ пс). Излучение задающего лазера удваивалось по частоте в нелинейном кристалле 3 и фокусировалось линзой 4 ($f=30$ см) в раствор красителя С160, прокачиваемый между зеркалами СТР 5, толщина которого могла варьироваться в пределах 0,1–4 мм. Для селекции частоты использовался блок из трех 60°-ных призм 6 с диафрагмой диаметром 1,5 мм 7. Настройка генератора на синхронный режим осуществлялась перемещением плоского 100 %-ного зеркала 8. Длительность импульсов

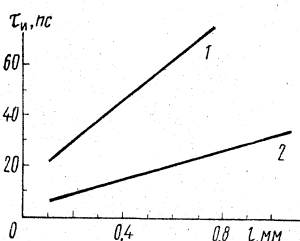


Рис. 2. Расчетная зависимость длительности τ_n импульса генерации СЛК с СТР от толщины l СТР при энергии импульса накачки $\epsilon_n = 1,2\epsilon_n^{\text{пор}}$ (1) и $2\epsilon_n^{\text{пор}}$ (2)

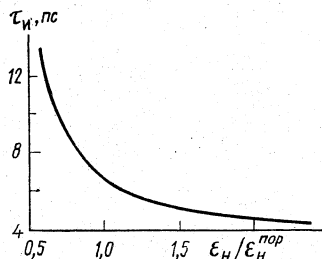


Рис. 3. Расчетная зависимость τ_n от энергии импульса накачки ($t_n=10$ пс, $M=15$, $l=0,2$ мм)

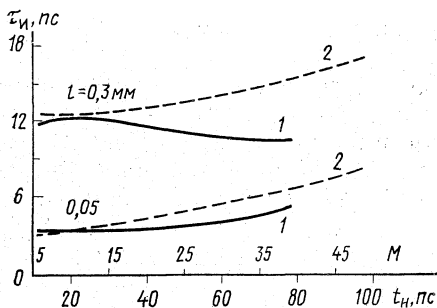
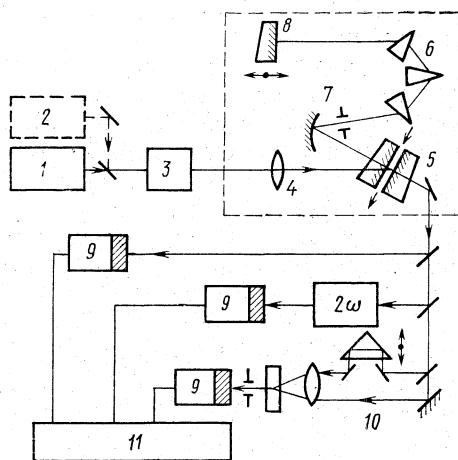


Рис. 4. Расчетные зависимости $\tau_{и}$ от числа ($t_n=10$ пс, $\epsilon_n=1,5\epsilon_n^{пор}$; 1) и длительности ($M=15$, $\epsilon_n=1,5\epsilon_n^{пор}$; 2) импульсов в цуге накачки

Рис. 5. Схема экспериментальной установки



измерялась по стандартной методике измерения автокорреляционной функции при неколлинеарной ГВГ в кристалле KDP 10 толщиной 0,8 мм. Автоматизированная система регистрации 11 накапливала и обрабатывала данные с фотоприемников 9 и осуществляла управление автокоррелятором.

Была исследована зависимость длительности $\tau_{и}$ импульса генерации СЛК с СТР при накачке лазера на красителе цугами пикосекундных импульсов второй гармоники излучения АИГ:Nd-лазера и лазера на КНФС с пассивной синхронизацией мод от толщины l СТР (рис. 6). При изменении l концентрация красителя каждый раз подбиралась такой, что в кювете поглощалось 90—95 % излучения накачки. Экспериментальные точки показывают линейную зависимость $\tau_{и}(l)$ в обоих случаях.

Минимальная длительность импульса генерации составила 5 пс при накачке лазером на КНФС и 5,3 пс при накачке АИГ:Nd-лазером.

Было исследовано распределение длительности импульса генерации СЛК с СТР по цугу генерации. Для этого аналогично [10] одновременно измерялись энергии генерации и второй гармоники каждого импульса из цу-

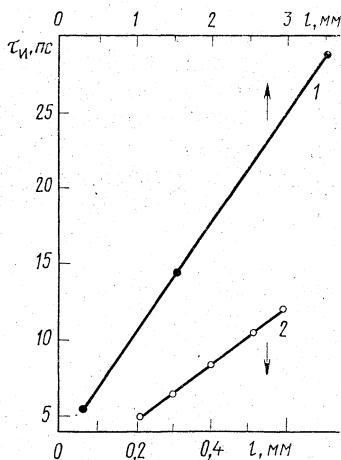


Рис. 6. Экспериментальная зависимость длительности импульса генерации СЛК с СТР от толщины l СТР при накачке АИГ:Nd-лазером (1) и лазером на КНФС (2)

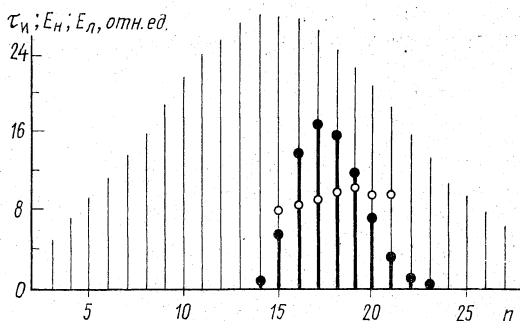


Рис. 7. Экспериментальное распределение параметров импульсов генерации СЛК с СТР по цугу:

тонкие линии — цуг импульсов накачки; жирные — цуг импульсов генерации СЛК с СТР; точки — длительность импульса генерации (накачка лазером на КНФС с пассивной синхронизацией мод)

Источник накачки	Толщина СТР, мм	Длительность импульса, пс	Спектральная ширина, см ⁻¹	Мощность в импульсе, кВт	КПД, %	Область перестройки, нм	$\Delta E/E$
АИГ:Nd	1,5	13	2	50	15	565—610 (Rh6G) 595—655 (C-160)	0,1
КНФС	0,2	5,0	3	20	2	590—640 (C-160)	0,15

га, что позволило по эффективности преобразования во вторую гармонику оценить относительное изменение длительности импульса генерации. Результаты измерений представлены на рис. 7 и показывают, что при синхронной накачке лазера с СТР генерируется цуг почти одинаковых по длительности импульсов.

Цуг генерации СЛК имеет характерную асимметричную форму с крутым фронтом и совпадает по времени со второй половиной цуга накачки (рис. 7), что подтверждает пороговый характер формирования генерации.

Типичные параметры СЛК с СТР при обоих условиях накачки приведены в таблице.

Относительно дальнейшей возможности укорочения длительности импульсов генерации в описываемой схеме лазера можно отметить следующее. Расчеты показывают, что импульс генерации с СТР укорачивается пропорционально толщине резонатора вплоть до $l=50$ мкм. Экспериментально весьма трудно реализовать толщину СТР менее 100 мкм в силу того, что при этом необходима высокая концентрация молекул красителя (более 1 ммоль/л), при которой уже сказываются эффекты концентрационного тушения люминесценции.

Синхронно накачиваемый лазер на красителе с дополнительным СТР, генерирующий спектрально ограниченные пикосекундные импульсы, использовался в экспериментах по нестационарной спектроскопии полупроводников [12] и измерению релаксационных констант молекул красителей [11].

Таким образом, теоретическое и экспериментальное исследования СЛК с активной средой, помещенной в тонкий низкодобротный резонатор, показывают, что а) существует прямая зависимость между длительностью импульса генерации и толщиной слоя активной среды; б) данное соотношение при полутора-двукратном превышении накачки над пороговым уровнем выполняется для широкого диапазона изменения длительности импульса и числа импульсов в цуге накачки; в) при использовании СТР в схеме СЛК генерируется цуг пикосекундных импульсов с практически одинаковой длительностью.

Метод позволяет реализовать устойчивую генерацию перестраиваемого излучения с управляемой длительностью (до 5 пс) при синхронной накачке лазеров на красителях коротким цугом пикосекундных импульсов от твердотельных лазеров с синхронизацией мод.

1. P. G. May, W. Sibbett, J. R. Taylor. *Appl. Phys.*, **B-16**, 179 (1981).
2. A. J. Cox, G. W. Scott. *Appl. Optics*, **18**, 522 (1979).
3. В. А. Нехаенко. *Квантовая электроника*, **8**, 737 (1981).
4. К. Д. Егоров, В. М. Петникова, С. А. Плешанов, В. В. Шувалов. *Квантовая электроника*, **12**, 41 (1985).
5. Z. Vog. *IEEE J. QE-16*, 517 (1980).
6. В. Г. Дмитриев, Е. А. Шалаев, Е. М. Швом. *Квантовая электроника*, **2**, 1834 (1975).
7. Ю. А. Ананьев, С. Г. Аникичев. *ЖТФ*, **53**, 1959 (1983).
8. Н. Н. Жуков, О. П. Заскалько, В. С. Старунов, И. Л. Фабелинский. *ЖЭТФ*, **85**, 50 (1983).
9. А. И. Ковригин, В. А. Нехаенко, С. М. Першин, А. А. Подшивалов. *Квантовая электроника*, **11**, 2007 (1984).

10. A. I. Kovrighin, V. A. Nekhaenko, S. M. Pershin, A. A. Podshivalov. *Opt. and Quant. Electron.*, **17**, 95 (1985).
11. С. А. Плешанов, В. В. Шувалов. *Вестник Моск. ун-та. Сер. III. Физика, астрономия*, **26**, 63 (1985).
12. В. М. Петникова, С. А. Плешанов, В. В. Шувалов. *Оптика и спектроскопия*, **57**, 665 (1984).

Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию
5 мая 1985 г.

K. D. Egorov, V. A. Nekhaenko, S. M. Pershin, S. A. Ple-
shanov, A. A. Podshivalov, V. V. Shuvalov. **A Synchronously Pumped
Picosecond Dye Laser With an Additional Superthin Resonator.**

Picosecond stimulated emission has been studied from a synchronously pumped dye laser which consists of two coupled resonators, one of which is matched with the pump laser resonator and the other is a superthin one, filled with the active medium. It has been found that the lasing pulse duration varies over a wide range with changes in the optical thickness of the superthin resonator. It is shown experimentally that, even when short (10 pulses) pump trains are used, trains are emitted of stable bandwidth-limited pulses which are of practically identical duration and tunable over a wide range. Duration of these pulses amounts to 5 ps and their power is as high as a few dozen kilowatts.