

Пикосекундный ВКР-лазер на этаноле с синхронной накачкой и выходным элементом резонатора на основе обращения волнового фронта

**С. М. Першин¹⁾, М. Я. Гришин¹⁾, Е. В. Шашков¹⁾, Г. А. Болдин¹⁾,
В. А. Орлович²⁾, А. И. Водчиц²⁾, И. А. Ходасевич²⁾, А. М. Вальшин³⁾**

¹⁾ *Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия*
e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

²⁾ *Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,*
e-mail: i.khodasevich@dragon.bas-net.by

³⁾ *Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

Впервые получена генерация ВКР-лазера на этаноле с синхронной накачкой пучком пикосекундных импульсов Nd³⁺:YAP лазера с обращением волнового фронта в этаноле вместо выходного зеркала резонатора. Установлено, что вариация длины пуга и энергии импульсов накачки обеспечивает управление числом импульсов стоксовой компоненты в пуге ВКР-лазера от одного и выше.

Ключевые слова: синхронная накачка; ВКР-лазер; обращение волнового фронта; пикосекундные импульсы.

Synchronously pumped picosecond Raman laser in ethanol with a cavity output element based on optical phase conjugation

**S. M. Pershin¹⁾, M. Ya. Grishin¹⁾, E. V. Shashkov¹⁾, G. A. Boldin¹⁾
V. A. Orlovich²⁾, A. I. Vodchits²⁾, I. A. Khodasevich²⁾, A. M. Valshin³⁾**

¹⁾ *Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia,*
e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

²⁾ *B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus*
e-mail: i.khodasevich@dragon.bas-net.by

³⁾ *Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia*

For the first time, stimulated Raman lasing has been obtained in ethanol under synchronous pumping by the train of picosecond pulses from a Nd³⁺:YAP laser with the wave front conjugation in an ethanol-filled cuvette instead of a cavity mirror. It was established that variation of the pump pulse energy allows controlling the number of the Stokes pulses in the Raman laser train of one or more pulses.

Keywords: synchronous pumping; SRS laser; optical phase conjugation; picosecond pulses.

Введение

Известно [1–4], что лазерная генерация с синхронной оптической накачкой активной среды являются одним из эффективных способов получения перестраиваемых по частоте ультракоротких световых импульсов (УКИ). Следует отметить важное отличие лазеров с синхронной накачкой от других генераторов УКИ: пикосекундные лазеры с синхронной накачкой являются, в большинстве случаев, единственными источниками перестраиваемых импульсов высокого спектрального

качества. Отдельный интерес представляет возможность генерации спектрально-ограниченных пикосекундных импульсов при сокращении длины цуга импульсов накачки, которые наиболее характерны для пикосекундных $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ лазеров [5]. Было экспериментально обосновано решение с размещением раствора красителя в тонкий дополнительный резонатор, который совмещён с одним из зеркал резонатора синхронно-накачиваемого лазера [5–7]. Оставалась неясной возможность запуска генерации ВКР-лазера с синхронной накачкой на воде и других органических жидкостях (этанол, ацетон), которые отличаются широкой полосой О-Н и С-Н валентных колебаний. Однако, высокий порог ВКР, сравнимый с порогом оптического пробоя зеркал тонкого резонатора, исключал его использование в предложенной ранее [5–7] схеме.

Предметом настоящей работы было изучение генерации ВКР-лазера с синхронной накачкой коротким цугом пикосекундных импульсов второй гармоники на основе алюмината иттрия с неодимом ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$) с обращением волнового фронта (ОВФ) в кювете вместо выходного зеркала резонатора.

1. Материалы и методы

Исследованы образцы дистиллированной воды и этанола, помещенные в кварцевую кювету со свободной верхней поверхностью и прозрачным дном из оптического кварцевого стекла (диаметр кюветы 20 мм, высота 80 мм), наполненную до верхнего края, чтобы исключить влияние кривизны поверхности мениска. Эксперименты проводили на лазерной установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка состояла из пикосекундного задающего генератора ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$, 1080 нм) с гибридной синхронизацией мод, каскада усилителей и системы управления длиной цуга импульсов (см. [8]).

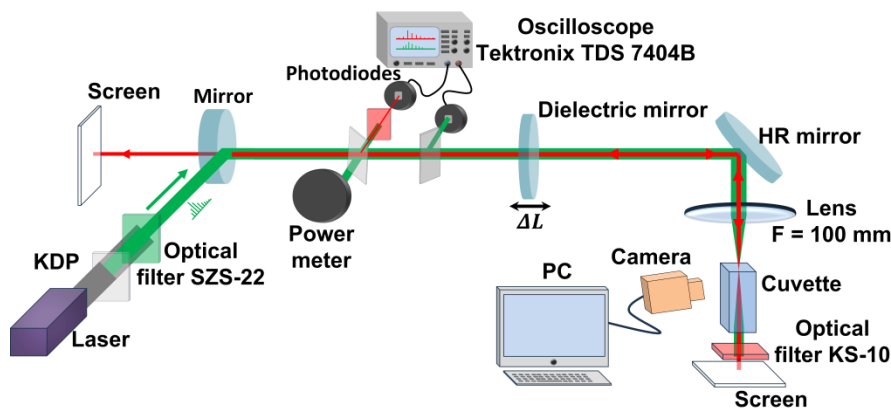


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по созданию ВКР-лазера с синхронной накачкой в жидкости

Пикосекундные лазерные импульсы второй гармоники (540 нм, ~52 пс, ~2 мДж/импульс, частота повторения вспышек лазера 0.3 Гц,) выделяли свето-фильтром SZS-22 и направляли горизонтально через входное зеркало резонатора ВКР-лазера (Dielectric mirror на рис. 1, $T_{540 \text{ нм}} = 77 \%$, $T_{660 \text{ нм}} = 5 \%$), которое было установлено на платформе с прецизионным смещением вдоль пучка для

юстировки длины резонатора. Затем пучок отклоняли вниз по нормали к открытой поверхности образцов в кювете. Кювету перемещали вдоль вертикальной оси с помощью микрометрического винта. Совмещение плоскости перетяжки каустики пучка и поверхности определяли по параллельности отражённого назад пучка после линзы. Прошедшее через кювету вперед (попутно накачке, ПВКР), а также рассеянное назад (навстречу накачке, обратное, ОВКР) излучение направляли с помощью кварцевого световода на входную щель спектрометра Avantes AvaSpec. Трек пучка и вспышки оптического пробоя в образцах регистрировали ПЗС камерой Hamamatsu C8484-05G02 сбоку кюветы.

После кюветы устанавливали стеклянный светофильтр KS-10 для пропускания излучения первой стоксовой (650 нм) и антистоксовой (443 нм) компоненты ВКР. Цуги импульсов накачки на входе резонатора ВКР-лазера, а также импульсы генерации ВКР-лазера навстречу накачке регистрировали с помощью лавинных фотодиодов и отображали на цифровом осциллографе Tektronix TDS-7404 (США, полоса пропускания 4 ГГц). Отметим одинаковую длину кабеля от фотодиода до входа в каждый канал осциллографа. Энергию импульсов излучения измеряли калориметрами Ophir Laser Star PE 9 (Израиль). Порог ВКР определяли визуально по появлению красного пятна на экране после кюветы с этанолом, а также по импульсам генерации ВКР-лазера.

Как видно из рис. 1 в резонаторе ВКР-лазера установлено только одно, входное зеркало. Мы предположили, что роль второго зеркала резонатора будет выполнять нелинейно-оптическое явление – обращение волнового фронта (ОВФ) компоненты ВКР в направлении навстречу накачке [9]. Явление ОВФ более известно при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна [10].

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Запуск ВКР-лазера на воде с синхронной накачкой был затруднён из-за конкуренции самофокусировки с оптическим пробоем в кювете при коллапсе пучка под поверхностью в нелинейном фокусе [11, 12]. Замена воды на этанол с двукратно более высоким коэффициентом нелинейной восприимчивости $5.0 \times 10^{-22} \text{ м}^2/\text{В}^2$ [9] обеспечила снижение порога и генерацию ВКР-лазера на валентных колебаниях С-Н со сдвигом $\sim 2900 \text{ см}^{-1}$. Порог ВКР в этаноле с большой расстройкой длин резонаторов был достигнут при энергии импульса накачки $\sim 0.3 \text{ мДж}$. При согласовании длин резонаторов порог ВКР генерации уменьшился до 0.05 мДж/импульс .

На рис. 2, а, b, c показаны импульсы накачки (зелёный цвет) и ОВКР (красный цвет) на двухлучевом осциллографе.

Из рисунков видно, что импульсы ОВКР приходят с запозданием на 11–12 нс от импульса накачки, который обеспечивал генерацию этого ОВКР импульса в кювете. Эта пауза обеспечена тем, что импульс ВКР задерживается на период (8 нс) из-за прохода из кюветы по резонатору и потом на отрезке ($\sim 100 \text{ см}$) от входного зеркала до приёмника и осциллографа. Отметим, что импульсы накачки допороговой интенсивности обеспечивают инжекцию энергии стоксовой компоненты для следующего импульса накачки, как видно на рис. 2, а. Важно, что вариация числа импульсов в цуге накачки управляет числом импульсов ВКР-лазера от одного и выше. Однако, при большой интенсивности импульса накачки (№ 4 на рис. 2, c)

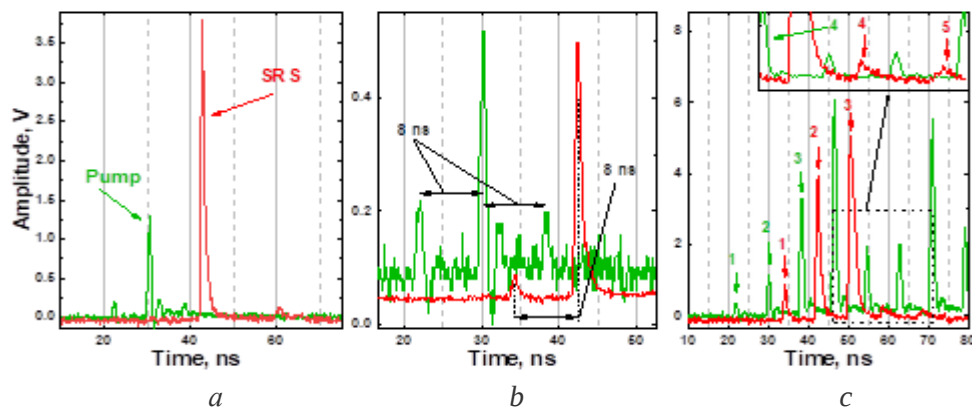


Рис. 2. Цуги импульсов накачки (зелёные) и ВКР-лазера с синхронной накачкой на этаноле (красные)

генерация ВКР блокируется пробоем (см. вставку на рис. 2, с), который регистрируется камерой сбоку на глубине 15–20 мм в области нелинейного фокуса. Эта глубина указывает на толщину слоя дополнительного тонкого резонатора как в ранних работах [5–7].

На рис. 3 представлены спектры ВКР-лазера на этаноле в направлении «вперёд» (тонкая линия) и «назад» (пунктир). Из рисунка видно, что спектры излучения ВКР-лазера в обоих направлениях идентичны по ширине ($\sim 10 \text{ см}^{-1}$) и по положению огибающей с экстремумом на отметке лидирующей компоненты 2930 см^{-1} в полосе СН, что указывает на отсутствие возмущающих факторов, таких как оптический пробой [12].

Следует отметить, что эффективная генерация ВКР в обратном направлении с ОВФ отличается малой расходимостью. Более того, нелинейное взаимодействие встречных волн накачки и компоненты ВКР по схеме четырёхволнового взаимодействия обеспечивает генерацию антистоксовой компоненты попутно с волной накачки (см. фото на рис. 4). П. А. Апанасевичем ранее [13] было показано, что ОВФ проявляется при четырехфотонных (четырёхволновых) взаимодействиях световых волн, две из которых направлены навстречу друг другу.

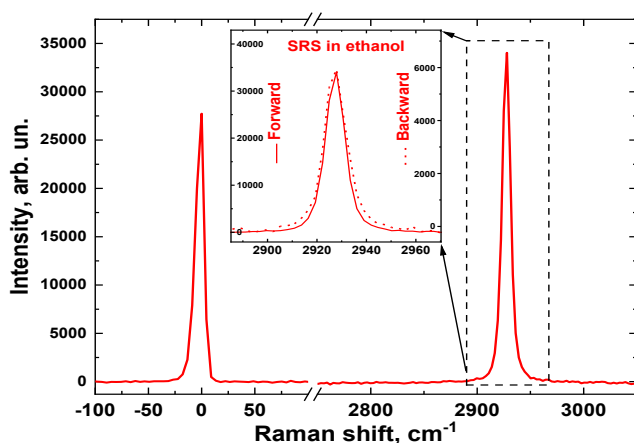


Рис. 3. Спектр излучения ВКР-лазера на этаноле с синхронной накачкой цугом пикосекундных импульсов «вперёд» (тонкая линия) и «назад» (пунктир)

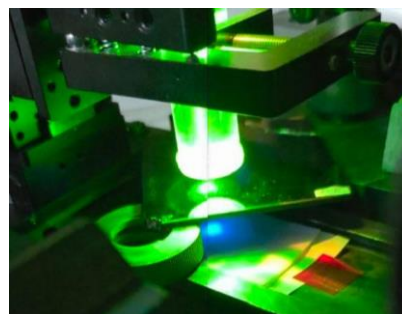


Рис. 4. Фото пятна после кюветы антистоксовой компоненты (синий цвет) ВКР пикосекундных импульсов в этаноле

Заключение

Таким образом, впервые, насколько нам известно, предложена и экспериментально обоснована генерация ВКР-лазера на этаноле при синхронной накачке цугом пикосекундных импульсов с обращением волнового фронта в кювете вместо зеркала. Выявлено кратное снижение порога генерации ВКР-лазера при согласовании длин резонаторов, а также возможность управления числом импульсов ВКР-лазера вариацией числа импульсов в цуге накачки. Впервые получена генерация от двух-импульсного цуга с нарастающей амплитудой импульсов, а также антистоксовая компонента ВКР-лазера попутно с импульсом накачки по схеме четырёхволнового взаимодействия П. А. Апанасевича со встречным импульсом обратного ВКР на отрезке до нелинейного фокуса. Остаётся неясным как влияет толщина слоя в кювете после нелинейного фокуса на развитие генерации ВКР-лазера. Широкая полоса излучения ВКР-лазера допускает компрессию импульса компоненты ВКР до длительности пропорциональной обратной ширине спектра при синхронной накачке с увеличением длины цуга, что будет являться предметом следующей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №23-42-10019 и БРФФИ Ф23РНФ-040.

Библиографические ссылки

1. Synchronously Pumped Anti-Stokes Parametric Raman Laser on a CaMoO_4 Crystal / S. N. Smetanin [et al.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2023. Vol. 50. P. S169.
2. Multiwavelength, picosecond, synchronously pumped, $\text{Pb}(\text{MoO}_4)_{0.2}(\text{WO}_4)_{0.8}$ Raman laser oscillating at 12 wavelengths in a range of 1128-1360 nm / M. Frank [et al.] // Optics Letters. 2021. V. 46. P. 5272–5275.
3. Mourou G. A., Sizer Li T. Up to 65 fs in SP_Dye laser II // Optics Comms. 1982. V. 41.
4. Synchronously Pumped Tunable Picosecond Lasers / V. A. Nekhaenko [et al.] // Sov. Quantum Electr. 1986. V. 13. P. 453–480.
5. The transient regime of synchronously pumped picosecond dye lasers / A. I. Kovrighin [et al.] // Opt. Quant. Electron. 1985. V. 17. P. 95.
6. Synchronously excited picosecond dye laser with an additional ultrathin resonator / K. D. Egorov [et al.] // Soviet Journal of Quantum Electronics. 1986. V.16. №. 6. P. 768.
7. Стабилизация параметров пикосекундных лазеров, синхронно-накачиваемых коротким цугом импульсов / С.М. Першин [и др.] // Ж. прикл. Спектр. 1988. Т. 49, №6. С.899–903
8. Temporal shaping of ultrashort laser pulses by volume Bragg gratings / N.S. Vorob'ev [et al.] // Quant.Electr. 2011. V 41. P. 501–503.
9. Amplitude object reconstruction by stimulated backward Raman scattering in the picosecond range with high efficiency conversion / S. Er-rhaimini [et al.] // Optics Comm. 1993. V. 104. P. 132–138.
10. Зельдович Б. Я. Обращение волнового фронта / Б. Я. Зельдович, Н. Ф. Пилипецкий, В. В. Шкунов, – Москва, Изд. «Наука», 1985.
11. Чекалин С. В., Кандидов В. П. От самофокусировки световых пучков – к филаментации лазерных импульсов // УФН. 2013. Т. 183. С. 133–152.
12. Подавление обратного ВКР пикосекундных импульсов в воде при перемещении каустики пучка накачки из объёма воды через поверхность / С. М. Першин [и др.] // Квантовая электр. 2022. Т. 52. С. 283–288.
13. Апанасевич П. А. Основы теории взаимодействия света с веществом. – Минск: Наука и техника. 1977.