

**В. С. Горелик<sup>1</sup>, А. И. Водчиц<sup>2</sup>, В. А. Орлович<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН  
Ленинский пр., 53, Москва, 119991, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Республики Беларусь  
пр. Независимости, 68, Минск, 220072, Беларусь*

*gorelik@sci.lebedev.ru*

## **ВЫНУЖДЕННЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОМБИНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ \***

Наблюдались множественные стоксовы и антистоксовы спутники в спектрах вынужденного параметрического комбинационного рассеяния света в жидкостях и кристаллах при возбуждении ультракороткими лазерными импульсами твердотельного лазера YAG:Nd<sup>3+</sup> с длинами волн генерации 1064 и 532 нм.

*Ключевые слова:* лазер, комбинационное рассеяние, генерация, стоксовы и антистоксовы компоненты, спектр, инфракрасное излучение, частота.

После появления интенсивных лазерных источников света было обнаружено явление вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света в различных диэлектрических средах. При этом в отличие от спонтанного комбинационного рассеяния (КР) в спектре рассеянного излучения наблюдается резкое возрастание интенсивности одной из наиболее сильных линий спонтанного стоксова КР. При дальнейшем увеличении спектральной интенсивности возбуждающего излучения в молекулярных диэлектрических средах и кристаллах возникают несколько стоксовых, а также антистоксовых компонент, интенсивность которых близка к интенсивности возбуждающего излучения. При этом осуществляются вынужденные параметрические комбинационные процессы, при которых происходит одновременное уничтожение двух квантов возбуждающего излучения и одновременное рождение пар

стоксовых и антистоксовых компонент, т. е. реализуется режим вынужденного параметрического комбинационного рассеяния (ВПКР). На первом этапе исследований в жидкостях и кристаллах для возбуждения ВКР использовались гигантские импульсы лазеров на рубине или алюмоиттриевом гранате с длительностью около 10 нс и достаточно большой энергией в каждом импульсе (0,1–1 Дж). При фокусировке такого излучения на диэлектрическую среду в образце происходили процессы деструкции, ограничивающие возможности наблюдения ВКР во многих средах. В данной работе приводятся результаты исследований ВПКР в различных конденсированных диэлектрических средах, возбуждаемые ультракороткими (60–80 пс) импульсами лазера YAG:Nd<sup>3+</sup> [1; 2]. Для возбуждения спектров ВКР весьма эффективной оказалась вторая оптическая гармоника лазера YAG:Nd<sup>3+</sup> с длиной

---

\* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 18-02-00181.

волны излучения  $\lambda = 532$  нм (рис. 1, 2), а также основная линия генерации этого лазера с  $\lambda = 1064$  нм. Используемый лазер обеспечивал генерацию в импульсно-периодическом режиме сверхкоротких импульсов с частотой повторения 10 Гц при средней мощности 10–100 мВт и энергией в каждом импульсе 1–20 мДж. Экспресс-регистрация спектров ВПКР проводилась малогабаритным волоконно-оптическим спектрометром

типа FSD-8 с многоэлементным приемником, обеспечивающим цифровую обработку спектров в диапазоне 200–1100 нм с разрешением  $\sim 1$  нм.

В качестве объектов были исследованы жидкости (легкая и тяжелая вода, этанол, глицерин) и монокристаллы (нитрат бария, кальцит, бромат натрия, KGW) и кристаллические порошки (LiOH, LiOD). Были обнаружены эквидистантные частотные гребенки

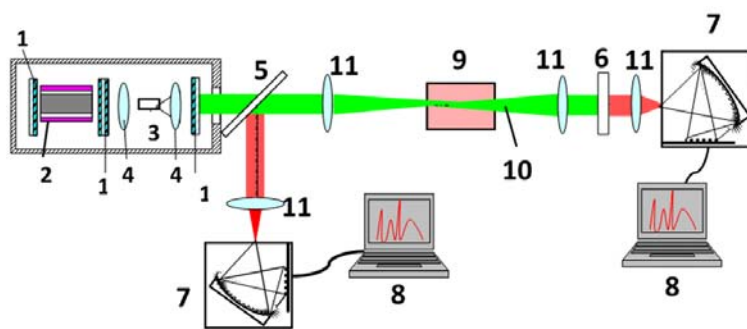


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для регистрации спектров ВПКР в конденсированных средах при возбуждении второй оптической гармоникой лазера  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  ( $\lambda = 532$  нм): 1 – зеркала лазера; 2 – активный элемент; 3 – нелинейно-оптический кристалл; 4, 11 – линзы; 5 – поворотное диэлектрическое зеркало; 6 – фотонный кристалл на основе анодного оксида алюминия; 7 – мини-спектрометр; 8 – компьютер; 9 – исследуемый монокристалл; 10 – излучение лазера и ВПКР

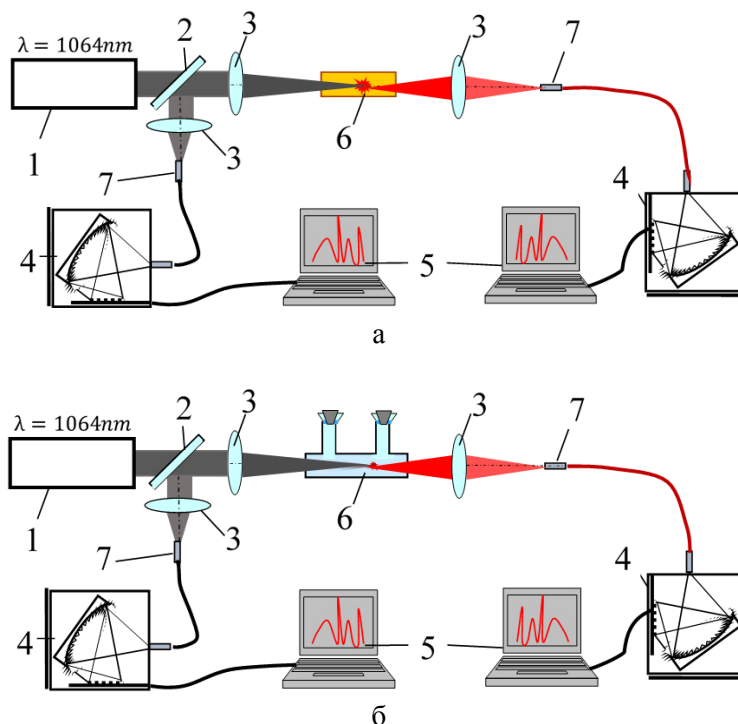


Рис. 2. Принципиальные схемы экспериментов для возбуждения ВПКР в кристаллах (а) и в жидкостях (б) при возбуждении инфракрасным излучением лазера  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  ( $\lambda = 1064$  нм): 1 – лазерный источник излучения; 2 – поворотное диэлектрическое зеркало; 3 – линзы; 4 – спектрометр; 5 – компьютер; 6 – образец; 7 – фиксатор световода

в виде большого числа (4–8) стоксовых и антистоксовых компонент, простирающихся от далекой инфракрасной области до ультрафиолетового диапазона (рис. 3, 4). В соответствии с условиями синхронизма для элементарных процессов четырехчастичного ВПКР должны выполняться законы сохранения энергии квазиимпульса. В простейшем случае распада двух квантов возбуждающего излучения на соответствующие стоксовы и антистоксовы компоненты такие законы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} 2\omega_L &= \omega_{1S} + \omega_{1A}; & 2\vec{k}_L &= \vec{k}_{1S} + \vec{k}_{1A}; \\ 2\omega_L &= \omega_{2S} + \omega_{2A}; & 2\vec{k}_L &= \vec{k}_{2S} + \vec{k}_{2A}; \\ 2\omega_L &= \omega_{3S} + \omega_{3A}; & 2\vec{k}_L &= \vec{k}_{3S} + \vec{k}_{3A}; \\ 2\omega_L &= \omega_{4S} + \omega_{4A}; & 2\vec{k}_L &= \vec{k}_{4S} + \vec{k}_{4A}. \end{aligned} \quad (1)$$

Возможны также другие процессы ВПКР, при которых на первом этапе два фотона стоксовых или антистоксовых спутников распадаются на соответствующие кванты рассеянного излучения. В частности, могут происходить процессы, для которых условия синхронизма принимают вид

$$\begin{aligned} 2\omega_{1S} &= \omega_{2S} + \omega_L; & 2\vec{k}_{1S} &= \vec{k}_{2S} + \vec{k}_L; \\ 2\omega_{2S} &= \omega_{3S} + \omega_{1S}; & 2\vec{k}_{2S} &= \vec{k}_{3S} + \vec{k}_{1S}; \\ 2\omega_{3S} &= \omega_{4S} + \omega_{2A}; & 2\vec{k}_{3S} &= \vec{k}_{4S} + \vec{k}_{2A}; \\ 2\omega_{1A} &= \omega_L + \omega_{2A}; & 2\vec{k}_{1A} &= \vec{k}_L + \vec{k}_{2A}; \\ 2\omega_{2A} &= \omega_{1A} + \omega_{3A}; & 2\vec{k}_{2A} &= \vec{k}_{1A} + \vec{k}_{3A}; \\ 2\omega_{3A} &= \omega_{2A} + \omega_{4A}; & 2\vec{k}_{3A} &= \vec{k}_{2A} + \vec{k}_{4A}. \end{aligned} \quad (2)$$

В соответствии с законами сохранения квазиимпульса (1), (2) рассеянное при ВПКР излучение должно распространяться лишь при определенных углах рассеяния, что приводит к кольцевой структуре на экране, установленном после исследуемого монокрystalла или кюветы с жидкостью. При этом убирались все оптические элементы справа от исследуемого монокрystalла или жидкости (см. рис. 1, 2), а излучение, возникающее в образце, направлялось на экран. Для разделения стоксовых (см. рис. 3, а) и антистоксовых (см. рис. 3, б) колец использовалась призма. При этом на экране (см. рис. 3) наблюдалось несколько стоксовых и антистоксовых компонент в виде кольцевой структуры, соответствующей различным углам рассеяния света при ВПКР. Кроме того,

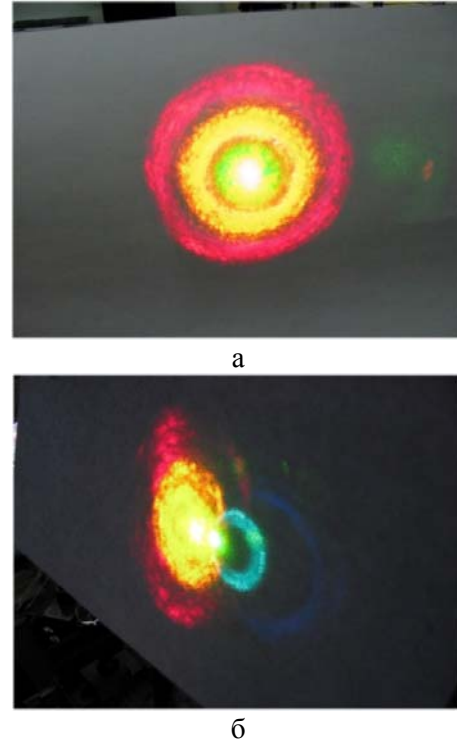


Рис. 3. Стоксовы (а) и антистоксовы (б) ВПКР кольца в монокрystalле нитрата бария при возбуждении второй оптической гармоникой лазера YAG:Nd<sup>3+</sup> с длиной волны излучения  $\lambda = 532$  нм

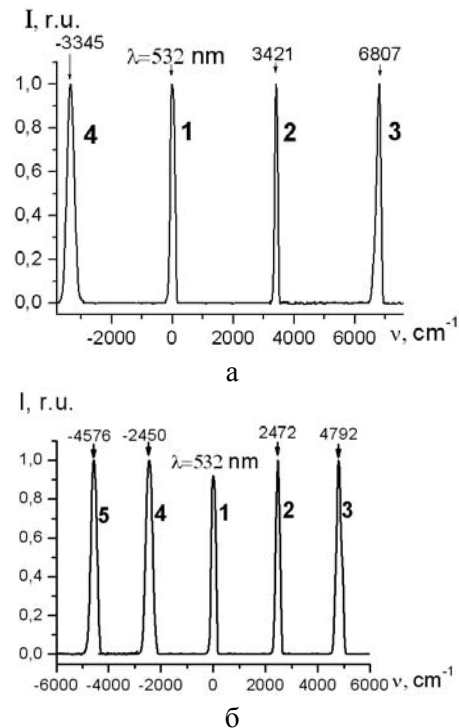


Рис. 4. Нормированные спектры ВПКР в легкой (а) и тяжелой (б) воде, возбуждаемого второй оптической гармоникой лазера YAG:Nd<sup>3+</sup> с длиной волны излучения  $\lambda = 532$  нм при плотности мощности лазерных импульсов 0,1 ТВт/см<sup>2</sup>: кривые соответствуют нормированному спектру возбуждающей линии (1), стоксовым компонентам (2, 3), антистоксовым спутникам (4, 5)

в коллинеарном с лазерным излучением направлении присутствовали стоксовы компоненты, соответствующие каскадным процессам вынужденного комбинационного рассеяния.

Возбуждение большого числа стоксовых и антистоксовых компонент (см. рис. 4) при накачке монокристаллов и жидкостей лазерным излучением видимого и ближнего инфракрасного диапазонов обеспечивает возможность получения линеек частот лазерной генерации в широкой области спектра: от дальнего инфракрасного до ультрафиолетового диапазонов.

### Список литературы

1. Gorelik V. S., Kudryavtseva A. D., Orlovich V. A., Sverbil P. P., Tcherniega N. V., Vodchits A. I., Voinov Yu. P. and Zlobina L. I.

Raman scattering in light and heavy waters // J. of Russian Laser Research. 2013. Vol. 34. No. 6. P. 523–530.

2. Водчиц А. И., Войнов Ю. П., Горелик В. С., Кудрявцева А. Д., Орлович В. А., Чернега Н. В. Вынужденное комбинационное рассеяние света при пикосекундном лазерном возбуждении // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2013. № 12. С. 3–13.

Материал поступил в редколлегию 28.06.2018

V. S. Gorelik<sup>1</sup>, A. I. Vodchits<sup>2</sup>, V. A. Orlovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> P. N. Lebedev Physical Institute RAS  
53 Leninskiy Ave., Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>2</sup> B. I. Stepanov Institute of Physics NAS of Belarus  
68-2 Nezavisimosti Ave., Minsk, BY-220072, Republic of Belarus

gorelik@sci.lebedev.ru

### STIMULATED PARAMETRIC RAMAN PROCESSES IN CONDENSED MATTERS

Multiple Stokes and anti-Stokes satellites in the Stimulated Parametric Raman Scattering spectra of liquids and crystals have been observed during excitation by ultrafast pulses of solid state laser YAG:Nd<sup>3+</sup> with wave lengths of generation 1064 и 532 nm.

*Keywords:* laser, Raman scattering, generation, Stokes and anti-Stokes satellites, infrared emission, frequency.

*For citation:*

Gorelik V. S., Vodchits A. I., Orlovich V. A. Stimulated Parametric Raman Processes in Condensed Matters. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 3, p. 69–72. (in Russ.)

DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-3-69-72