УДК 535.374
DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-3-69-72

**В. С. Горелик** [1], **А. И. Водчиц** [2], **В. А. Орлович** [2]

[1] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН*
*Ленинский пр., 53, Москва, 119991, Россия*

[2] *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:$Nd^{3+}$ 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:$Nd^{3+}$ [1; 2]. Для возбуждения спектров ВКР весьма эффективной оказалась вторая оптическая гармоника лазера YAG:$Nd^{3+}$ с длиной

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

*Горелик В. С.*, *Водчиц А. И.*, *Орлович В. А.* Вынужденные параметрические комбинационные процессы в конденсированных средах // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 3. С. 69–72.


© В. С. Горелик, А. И. Водчиц, В. А. Орлович, 2018

волны излучения λ = 532 нм (рис. 1, 2), а также основная линия генерации этого лазера с λ = 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 ~ 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

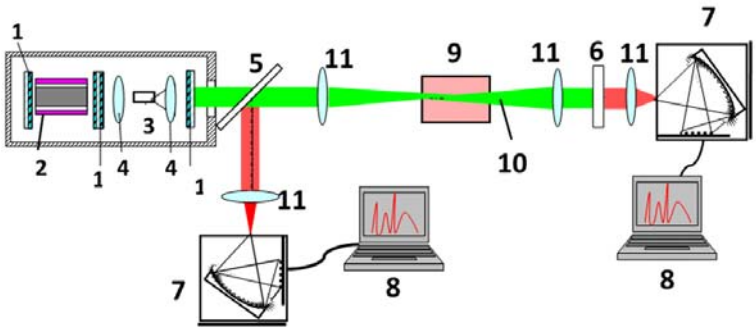


*Рис. 1.* Принципиальная схема экспериментальной установки для регистрации спектров ВПКР в конденсированных средах при возбуждении второй оптической гармоникой лазера YAG:$Nd^{3+}$ (λ = 532 нм); *1* – зеркала лазера; *2* – активный элемент; *3* – нелинейно-оптический кристалл; *4*, *11* – линзы; *5*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

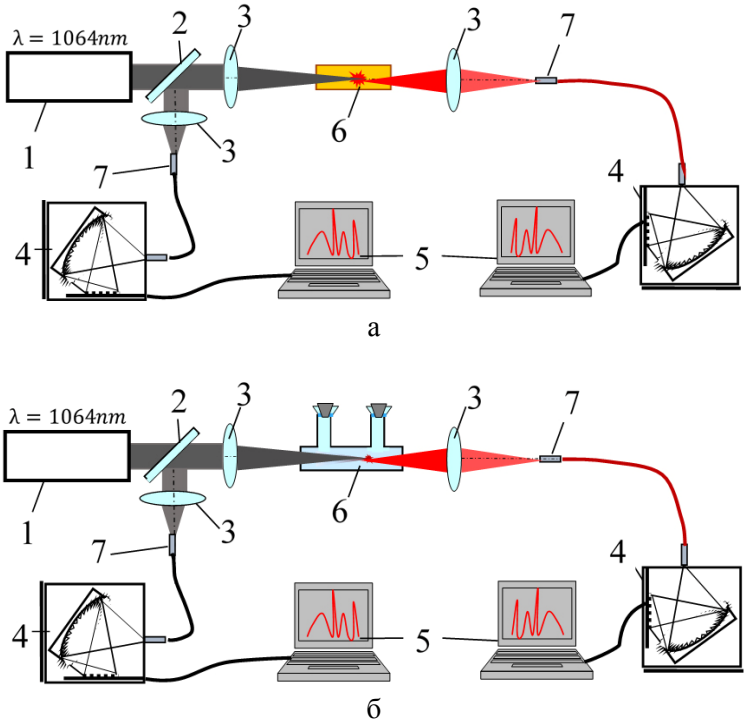


*Рис. 2.* Принципиальные схемы экспериментов для возбуждения ВПКР в кристаллах (*а*) и в жидкостях (*б*) при возбуждении инфракрасным излучением лазера YAG:$Nd^{3+}$ (λ = 532 нм): *1* – лазерный источник излучения; *2* – поворотное диэлектрическое зеркало; *3* – линзы; *4* – спектрометр; *5* – компьютер; *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:

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

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

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

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 монокристалла или кюветы с жидкостью. При этом убирались все оптические элементы справа от исследуемого монокристалла 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. Коме того,

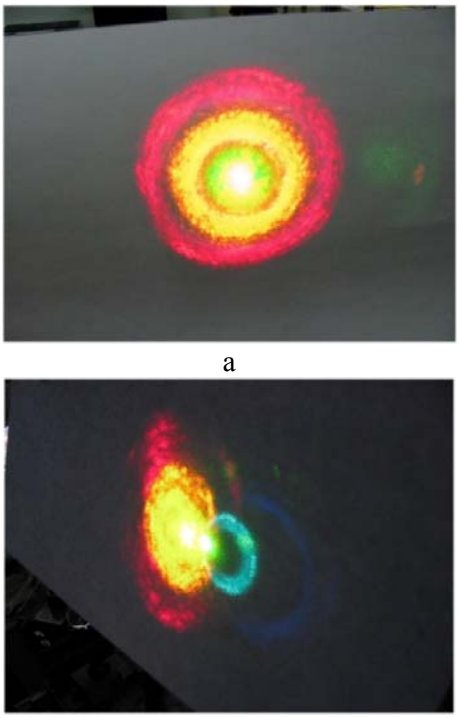

*Рис. 3.* Стоксовы (*а*) и антистоксовы (*б*) ВПКР кольца в монокристалле нитрата бария при возбуждении второй оптической гармоникой лазера YAG:$Nd^{3+}$ с длиной волны излучения $\lambda$ = 532 нм

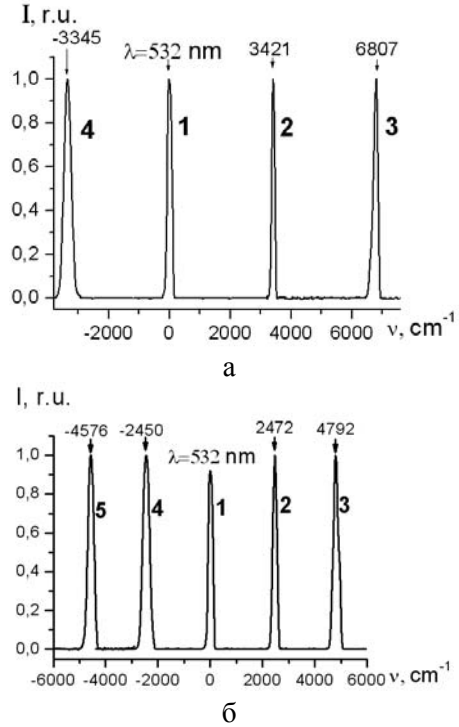


*Рис. 4.* Нормированные спектры ВПКР в легкой (*а*) и тяжелой (*б*) воде, возбуждаемого второй оптической гармоникой лазера YAG:$Nd^{3+}$ с длиной волны излучения $\lambda$ = 532 нм при плотности мощности лазерных импульсов 0,1 ТВт/см$^2$: кривые соответствуют нормированному спектру возбуждающей линии (*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** [1], **A. I. Vodchits** [2], **V. A. Orlovich** [2]

[1] *P. N. Lebedev Physical Institute RAS*
*53 Leninskiy Ave.*, *Moscow*, *119991*, *Russian Federation*

[2] *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:$Nd^{3+}$ 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