

УДК: 535.375.5; 621.375.826

А.С. Грабчиков, вед. науч. сотр.; Л.Е. Батай, ст. науч. сотр.;
А.И. Водчиц, вед. науч. сотр.; В.А. Орлович, зав. центром
(Институт физики НАН Беларуси, г. Минск);
Ж. Даваасамбуу, проф., акад. МАН (Лазерный исследовательский
центр Национального университета Монголии, г. Улан-Батор);
И.А. Ходасевич, зам. зав. центром
(Институт физики НАН Беларуси, г. Минск);
Е.Г. Саликов, студ. (БГУ, г. Минск)

ДВУХЧАСТОТНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ВКР В ВОДОРОДЕ: СТАТИСТИКА ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1,9 МКМ

Эффект вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) является одним из основополагающих эффектов нелинейной оптики и находит многочисленные применения для частотного, пространственного и временного преобразования лазерного излучения [1–4].

Недостатки метода ВКР-преобразования связаны с ограничениями, определяемыми как коэффициентом усиления среды, падающим с увеличением длины волны возбуждающего излучения, так и предельными значениями для углов распространения пучков излучения, осложняющими выполнение условий синхронизма для параметрически генерируемых компонент рассеяния.

Наиболее простой и распространенной схемой возбуждения ВКР является вариант непосредственной фокусировки пучка видимого лазерного излучения в комбинационно-активную среду. Введение дополнительного пучка излучения с варьируемыми длиной волны, в том числе ИК диапазона, и направлением распространения, который обеспечивает резонансное взаимодействие излучения со средой и открывает новые возможности для увеличения числа генерируемых компонент [5] и повышения когерентности выходных характеристик в системе излучение-среда [6].

Данный подход позволил получать субфемтосекундные импульсы генерации [7] и до минимальных скоростей замедлить световые импульсы [8]. Среди многообразия применений ВКР следует отметить актуальность преобразования в спектральную область 2 мкм, оптимизации которого до сих пор уделяется внимание [9].

В частности, при ВКР-преобразовании излучения Nd:YAG лазера с $\lambda = 1064$ нм в водороде (H_2), имеющем большой частотный сдвиг (4155 см^{-1}) при комбинационном рассеянии и используемым для ВКР в газообразном, жидком, и твердом состояниях.

В данном докладе приведены результаты реализации двухчастотного возбуждения ВКР в водороде лазерным излучением со значительно различающимися длинами волн (532 нм и 1064 нм), что обеспечивает расширение спектрального диапазона преобразованного излучения в инфракрасную (ИК) область, а также данные по статистике энергии импульсов преобразованного излучения, позволяющие выявить процессы, участвующие в энергопереносе при ВКР в рассматриваемых условиях.

Схема взаимодействия излучения со средой заключается в возбуждении ВКР генерации на колебании 4155 см^{-1} в пространственно-совмещенных перетяжках пучков излучения двух частот при их одновременном коллинеарном распространении.

Возбуждение ВКР осуществлялось излучением второй гармоники (532 нм) импульсного многомодового Nd:YAG лазера (длительность импульсов 12 нс, частота 10 Гц, энергия импульсов до 100 мДж), а изменение первой гармоники (1064 нм) параметрически преобразовывается в стоксову компоненту с длиной волны 1907 нм. Импульсы лазерного излучения обеих гармоник направлялись в кювету (длина 150 см) с водородом при давлении 27 атм. Лазерные пучки фокусировались в центр кюветы линзой с фокусным расстоянием 75 см.

Для выделения и идентификации стоксовой компоненты (1907 нм) использовались призмы, пространственно разделяющие излучение, экраны-ножи, фильтры, спектральное оборудование. Анализ энергетических характеристик проводился с помощью оборудования производства «Ophir».

На рис. 1 представлена зависимость средней энергии импульсов излучения первой стоксовой компоненты с длиной волны $\lambda = 1907\text{ нм}$ от энергии импульсов излучения накачки с $\lambda = 1064\text{ нм}$.

При одночастотном возбуждении излучением с длиной волны 1064 нм порог генерации ВКР не достигался при энергии импульсов до 100 мДж. В то же время при двухчастотном возбуждении, как видно из рис. 1, первая стоксовая компонента ВКР с $\lambda = 1907\text{ нм}$ регистрировалась, начиная с энергии импульсов накачки $\approx 61\text{ мДж}$.

Максимальная выходная энергия, полученная в наших экспериментах, составила $\sim 450\text{ мкДж}$, что соответствует эффективности преобразования $\approx 0,5\%$.

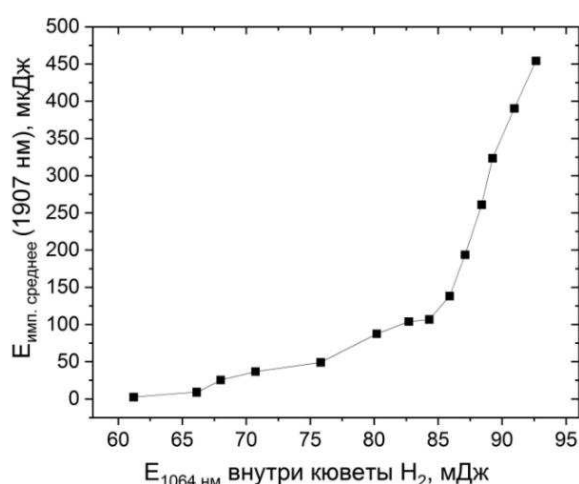


Рисунок 1 – Зависимость энергии импульсов первой стоксовой компоненты с $\lambda = 1907$ нм от энергии импульсов накачки с $\lambda = 1064$ нм

Отметим возрастающий характер зависимости и отсутствие ее насыщения, что позволяет рассчитывать на дальнейший рост выходной энергии за счет увеличения энергии импульсов накачки.

Важную информацию также несут распределения энергий импульсов, позволяющие оценивать не только энергетические параметры, но и флуктуации энергии в разных режимах преобразования.

Статистические данные (рис. 2) представлены зависимостью нормированного стандартного отклонения энергии импульсов стоксовой компоненты от энергии импульсов накачки и соответствующими распределениями энергии импульсов стоксового излучения.

Зависимость нормированного стандартного отклонения (рис. 2а) имеет характерный вид со значениями, максимальными у порога ВКР ($\approx 75\%$) и снижающимися до $\approx 10\%$ при максимальной накачке. Зависимость можно условно разделить на три части, которые соответствуют разным режимам преобразования.

Первая часть (от порога до энергий импульсов накачки ≈ 70 мДж) соответствует линейному режиму преобразования и характеризуется распределением экспоненциального типа, как это видно из представления распределения энергий импульсов в логарифмическом масштабе (рис. 2б).

Следующий диапазон, наблюдаемый при энергиях накачки от 72 до 80 мДж (рис. 2а), соответствует переходному режиму, представленному на рис. 2в. Для него характерна гауссова форма распределения (сосредоточена основная доля импульсов) с широким «хвостом» в сторону больших значений энергии.

Дальнейшее увеличение энергии импульсов от 80 до 95 мДж (рис.

2а) приводит к устойчивой ВКР-генерации, соответствующей нелинейному режиму преобразования с относительно узким стабилизированным гауссовым распределением энергии импульсов преобразованного излучения с $\lambda = 1907$ нм (рис. 2г).

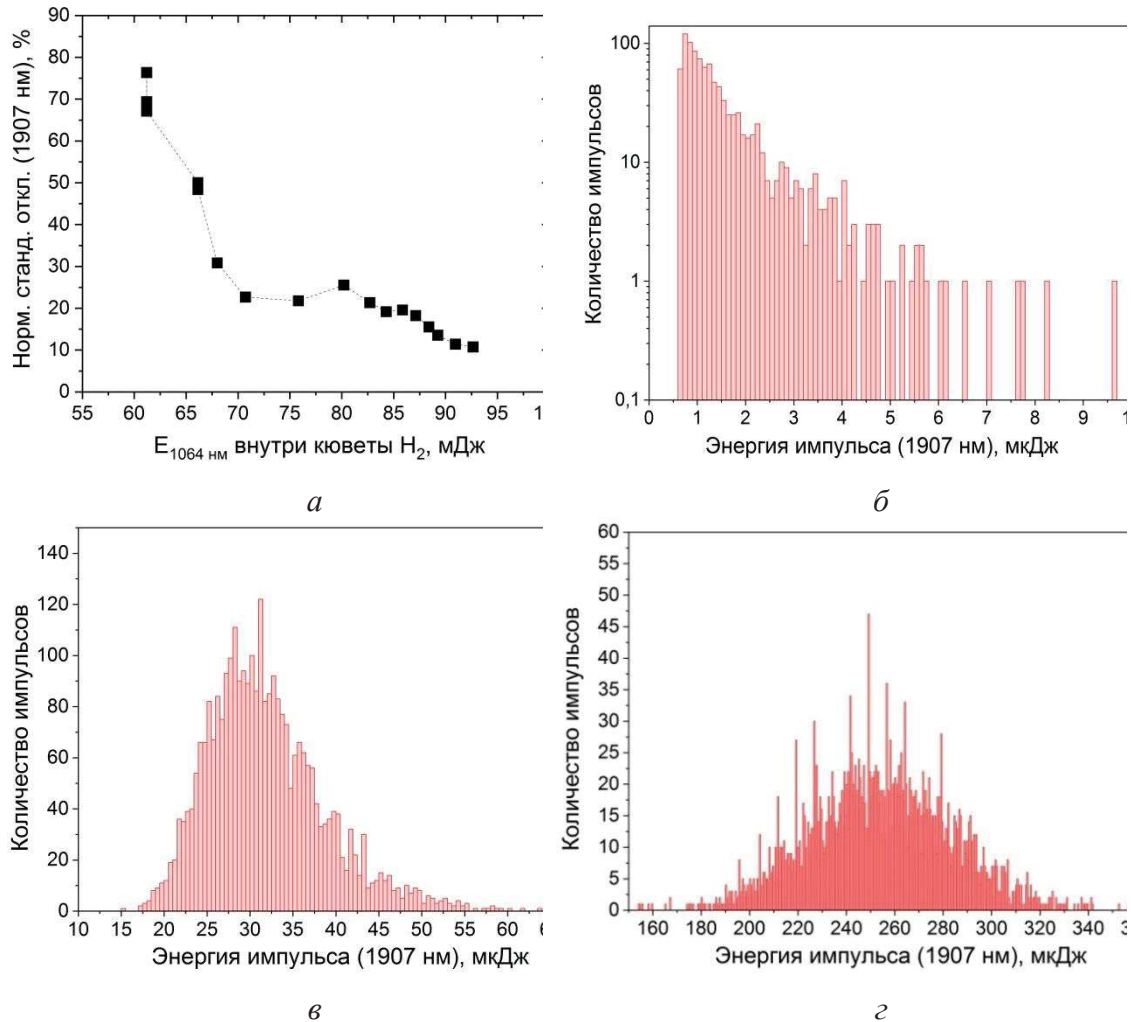


Рисунок 2 – Зависимость нормированного стандартного отклонения стокова излучения (а) и распределение энергии его импульсов для энергии импульсов накачки 61,2 мДж (б), 75,8 мДж (в) и 91 мДж (г).

Таким образом, получено преобразование излучения с $\lambda = 1064$ нм в водороде в спектральную область 2 мкм от при использовании двухчастотного подхода, обеспечившего снижение порога ВКР генерации излучения с $\lambda = 1907$ нм до 61 мДж.

Получены энергетические зависимости и статистические характеристики излучения. Энергия импульсов стоковой компоненты достигала 450 мкДж.

Распределение энергии стокова излучения (1907 нм) в линейном режиме обладает слабо выраженным неэкспоненциальным «хвостом» в сторону возрастания энергии, что говорит о негаусовости процесса.

Совместный анализ усредненных данных по энергии и результатам статистической обработки показал существование переходного режима ВКР-преобразования от линейного к нелинейному, по-видимому, связанному с перекачкой энергии между всеми взаимодействующими потоками излучения, однако требующему дальнейшего детального изучения.

*Работа выполнена в рамках совместного
белорусско-монгольского проекта №Ф23МН-008
при финансовой поддержке БРФФИ.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Penzkofer A., Laubereau A., and Kaiser W. High Intensity Raman Interactions / Prog. Quant. Elec. – 1979. – Vol. 6. – P. 55-140.
2. Reinjes J., Bashkansky M. Stimulated Raman and Brillouin scattering / Handbook of Optics. second edition volume IV Fiber Optics and Non-linear Optics. pp.18.1-18.61.
3. Reinjes J. (ed.), Laser Wavefront Control, SPIE 1000 (1988).
4. Murray J.R., Goldhair J., Eimerl D., Szoke A. Raman Pulse Compression of Excimer Lasers for Application to Laser Fusion / IEEE J. Quant. Electr. – 1979. – Vol. 15. – P. 342.
5. Maneesh Jain, Hui Xia, Yin G.Y., Merriam A.J., Harris S.E. Efficient Nonlinear Frequency Conversion with Maximal Atomic Coherence / Phys. Rev. Lett. – 1996. – Vol. 77. – P. 4326.
6. Harris S.E., Sokolov A.V. Broadband spectral generation with refractive index control / PRA. – 1997. – Vol. 55. – P. R4019(R).
7. Harris S.E. and Sokolov A.V. Subfemtosecond Pulse Generation by Molecular Modulation / Phys. Rev. Lett. – 1998. – Vol. 81. – P. 2894.
8. Liang J. Q., Katsuragawa M., Fam Le Kien, Hakuta K. Slow light produced by stimulated Raman scattering in solid hydrogen / Phys.Rev. A. – 2002. – Vol. 65. – P. 031801.
9. Efficient high-power 1.9 μm picosecond Raman laser in H₂-filled hollow-core fiber without generation of rotational lines / Junjie Jiang [et al] // Optics and laser technology. – 2025. – Vol. 181. – P. 111851.