

УДК: 535.375.51; 535.375.54

Г.Д. Артыкова, мл. науч. сотр.;
А.И. Водчиц, канд. физ.-мат. наук, в.н.с.;
И.А. Ходасевич, канд. физ.-мат. наук, зам. зав. центром
(ИФ НАН Беларуси, г. Минск);
П.Н. Капанов, студ., (БГУ, г. Минск)

СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛОВ KGW: ВЫБОР СРЕДЫ ДЛЯ "СЛУЧАЙНЫХ" ЛАЗЕРОВ

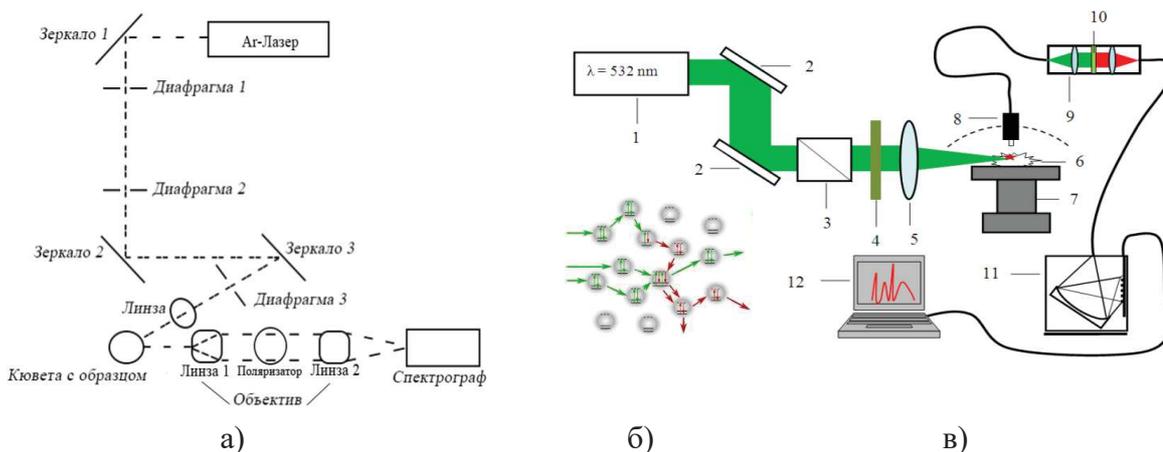
В последнее десятилетие активно развивается направление по разработке и исследованию лазеров на неупорядоченных средах, известных как «random» лазеры [1]. «Random» лазеры – это особый класс источников слабо когерентного излучения, в которых усиление осуществляется в неупорядоченной активной среде вместо традиционного оптического резонатора (Рис. 1б). Более простой способ получения микрокристаллов и увеличение длины взаимодействия для преодоления порога генерации в результате многократного отражения от граней микрокристаллов делает привлекательным использование порошков в качестве активной среды в «random» лазерах на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (РВКР-лазер) [2]. Так как излучение ВКР развивается из затравки на наиболее интенсивных колебаниях спонтанного КР (СКР), то при выборе комбинационно-активного кристалла для РВКР-лазера необходимо учитывать влияние размера частиц на интенсивность полос в его спектре СКР [3, 4], а также оптическое качество микрокристаллов. Особенно эти характеристики важны для порошков анизотропных двуосных микрокристаллов, например, кристалла калий-гадолиниевого вольфрамата ($\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, KGW) [5], широко используемого для ВКР-преобразования [6]. Сравнительно недавно появилось направление использования ВКР в микроскопии, позволяющее выявлять конформационные различия молекулярных кристаллов вещества в его микропорошке [7].

Целью работы являлось применение методов СКР и ВКР для изучения оптических характеристик микрокристаллов KGW и обоснования выбора их размеров в порошке для создания РВКР-лазера.

Порошки микрокристаллов KGW были приготовлены путем дробления объемного кристалла (Завод «Оптик», РБ) в ударно-центробежной и струйно-вихревой мельницах, а затем разделены на фракции. Микрокристаллы KGW с размерами 500, 400, 310, 300, 250, 200, 160, 71 и 30 мкм наносились на поверхности граней кюветы слоем, толщиной 1 – 1,5 мм, и исследовались методом СКР. Для возбуждения СКР использовалось сфокусированное цилиндрической линзой

($f = 200$ мм) излучение аргонового лазера мощностью 10,5 мВт с длиной волны $\lambda = 514,5$ нм и вертикальной поляризацией. Спектры СКР регистрировались в 45° - геометрии с разрешением ≤ 2 см $^{-1}$ с помощью спектрометра MS3504i (Солар ТИИ, РБ) (2400 шт/мм, щель: 50 мкм) с ПЗС-камерой Spec 10:256E/LN (Roper Scientific, США) (Рис. 1а). Каждый спектр СКР был получен с экспозицией 2 с при усреднении по 20 спектрам. Кроме того, для каждого образца спектры СКР были зарегистрированы в шести различных точках и затем усреднены.

Для исследования методом ВКР использовались микрокристаллы размером 10 мкм. ВКР возбуждалось горизонтально поляризованным импульсным излучением (60 пс, 15 Гц) с энергией до 20 мДж и длиной волны 532 нм. Лазерный пучок фокусировался на горку порошка, расположенную на столике, с использованием линз с фокусным расстоянием от 150 до 250 мм. Для регистрации спектров ВКР применялся спектрометр S100 с оптическим волокном, устанавливаемым под углом от 45° - 90° градусов относительно направления распространения накачивающего пучка (Рис. 2б).



Цифровые обозначения на рисунке (в): 1 – лазер; 2 – поворотные зеркала; 3 – призма Глана; 4 – светофильтр СЗС21; 5 – кварцевая линза; 6 – исследуемый образец; 7 – поворотный столик; 8 – фиксатор световода; 9 – рефокусатор; 10 – notch-фильтр; 11 – спектрометр; 12 – компьютер

Рисунок 1 – Схемы экспериментальных установок по изучению спонтанного (а) и вынужденного (в) комбинационного рассеяния, а также усиления возбуждаемого излучения (б) в микрокристаллических порошках

о всех зарегистрированных спектрах СКР проявляются 10 основных колебаний (Рис. 2а). Их сравнение с поляризованными спектрами КГВ с моноклинной пространственной группой кристаллической решетки I2/a (C2h6) [5] показало соответствие с колебаниями связи W–O при растяжении в ее плоскости (809, 747, 686, 436, 401 см $^{-1}$) и с трансляционно-изгибным колебанием (368 см $^{-1}$), с растяжением связи WOW (902 см $^{-1}$), а для связи WOOW – с растяжением в плоскости

(769 и 528 см-1) и с изгибом за ее пределы (345 см-1). Основные вклады в спектры СКР дает рассеяние, характерное для ориентаций возбуждения-наблюдения a(bb)a и b(aa)b, что согласуется с условиями эксперимента по изучению поляризованных спектров СКР. Влияние поляризации рассеянного излучения сказывается на интенсивности колебания (ν_4) 769 см-1. Интенсивность всех измеренных полос по поляризованным спектрам СКР увеличивалась с ростом размера частиц от 30 до 500 мкм, и достаточно хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией нарастания (Рис. 2б). По мере увеличения размеров частиц интенсивность излучения возрастает, за счет его многократного отражения от внутренних граней кристаллов, что способствует более эффективному усилению стокового излучения. Наиболее интенсивные линии в спектрах, на которых возможно развитие ВКР-преобразования, относятся к колебаниям (ν_2) 902 см-1 и (ν_4) 769 см-1. ВКР-излучение в зависимости от условий возбуждения может генерироваться одновременно на обоих колебаниях или на одной частоте, но в последнем случае они будут создавать конкуренцию для развития ВКР.

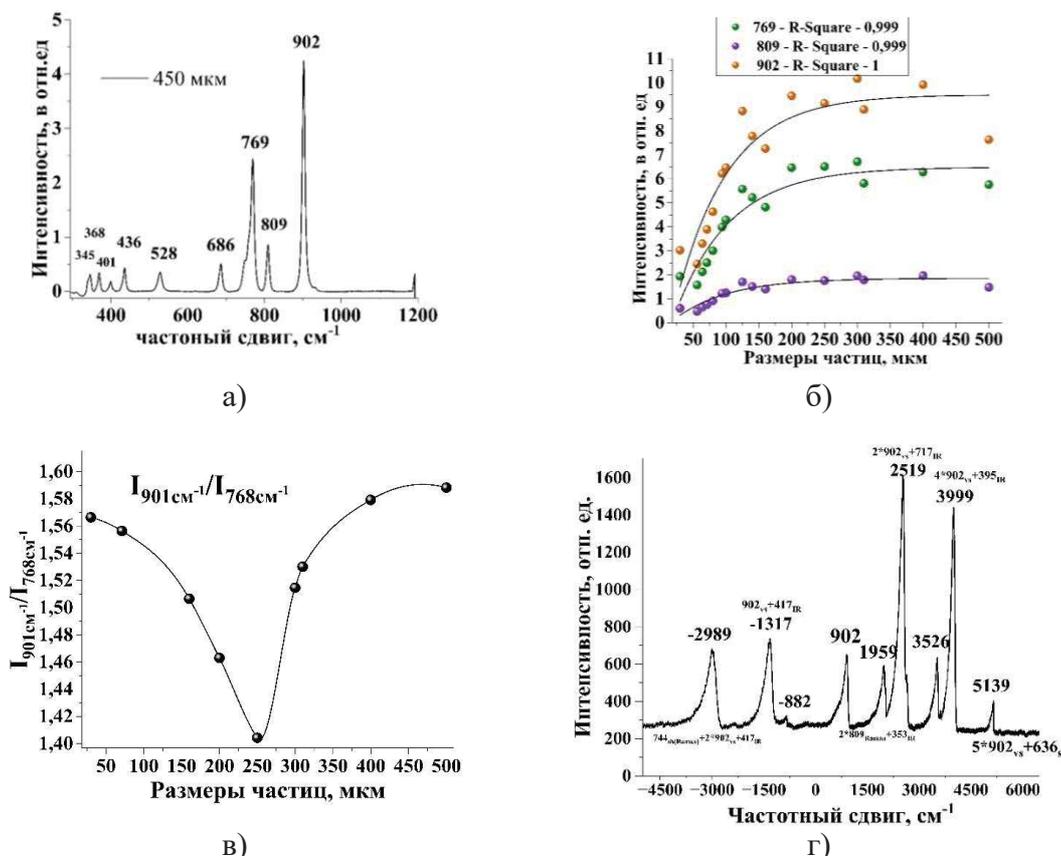


Рисунок 2 – Спектры СКР (а) и ВКР (г) порошка KGW, зависимости интенсивности полос (б) и отношения их интенсивностей для частот 902 и 769 см⁻¹ (в) от размера кристалликов

Анализ отношения интенсивностей полос этих колебаний показал, что зависимость характеризуется выраженным минимумом для микрокристаллов с размером около 250 мкм (Рис. 2в). То есть, в таком порошке конкуренция процессов ВКР будет максимальна, и его лучше использовать для генерации на двух частотах. При возбуждении одночастотного ВКР предпочтительнее использовать порошки с кристалликами 400 – 500 мкм или около 30 мкм. С одной стороны, интенсивность линий СКР больше для более крупных кристалликов, но с другой стороны, при определенных условиях возбуждения можно получить высокую интенсивность рассеяния и на мелких частицах, как показывает теория Кубелки-Мунка, предсказывающая для них диффузию фотонов в относительно локализованном пространстве [8].

В зависимости от энергии импульсов накачки, фокусного расстояния линзы и угла положения волокна в спектрах ВКР регистрировалось различное число компонент преобразованного излучения. Это обусловлено параметрическим механизмом ВКР, поскольку параметрическая связь между компонентами возрастает с уменьшением размера частиц, а угол синхронизма при таком преобразовании уменьшается с ростом энергии накачки. При возбуждении импульсами с энергией 20 мДж, при фокусировке линзой с $f = 250$ мм и угле сбора излучения около 60° , было зарегистрировано 2 антистоксовые и 6 стоксовых компонент (Рис. 2г). Неоднородное уширение полос и анализ их частотных сдвигов показал, что в спектрах ВКР также проявляются колебания, характерные для инфракрасных спектров. Этот факт указывает на деформацию кристаллической решетки, которая может быть связана с механическими напряжениями в кристалликах, полученными при их дроблении до фракции в 10 мкм.

Таким образом, установлено, что интенсивность всех измеренных полос СКР увеличивалась с ростом размера частиц от 30 мкм до 500 мкм. Для ВКР-преобразования предпочтительнее использовать порошки с размером кристалликов 400 – 500 мкм или 30 – 10 мкм. В 10 мкм кристаллическом порошке KGW было получено многочастотное излучение ВКР в стоксовой и антистоксовой областях спектра. Показана возможность использования ВКР в порошках одновременно как источника излучения в новой спектральной области и как инструмента для оценки оптического качества микрокристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Recent advances and applications of random lasers and random fiber lasers / A.S.L. Gomes [et al.] // Progress in Quant. Electron. – 2021. – V. 78. – P. 100343.

2. Picosecond random Raman lasing in the spectral range of 360–630 nm using powders of potassium, sodium and strontium nitrates / A.Yu. Pyatyshev et. al. // *Laser Phys. Lett.* – 2023. – V. 20. – P. 025401 (5).

3. Zeng-Ping Chen, Li-Mei Li, Jing-Wen Jin. Quantitative Analysis of Powder Mixtures by Raman Spectrometry: the influence of particle size and its correction // *Anal.Chem.* – 2012. – V. 84. – P. 4088–4094.

4. P. Kristova, L. J. Hopkinson, K. J. Rutt. The Effect of the Particle Size on the Fundamental Vibrations of the $[\text{CO}_3^{2-}]$ Anion in Calcite // *J. Phys. Chem.* – 2015. – V. 119. – P. 4891–4897.

5. L. Macalik, J. Hanuza, A. A. Kaminskii. Polarized infrared and Raman spectra of $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ and their interpretation based on normal coordinate analysis // *J. Raman Spectrosc.* – 2002. V. 33. – P. 92–103.

6. Research progress of crystalline Raman yellow lasers / Pengbo Jiang [et al.]// *Optics and Laser Technology.* – 2024. V. 169. – P. 110072.

7. P. K. Duy, Seulah Chun, Hoeil Chung. Characterization of Raman Scattering in Solid Samples with Different Particle Sizes and Elucidation on the Trends of Particle Size-Dependent Intensity Variations in Relation to Changes in the Sizes of Laser Illumination and Detection Area // *Analytical Chem.* – 2017.

8. Bright random laser emission from a laser-conditioned powder/ B.H. Hokr [et al.] // *Nature Commun.* – 2014. – A5356.

УДК 004.827

А.Э. Гусейнов, асп.
(АГУНП, г. Баку, Азербайджан)

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Аннотация. В данной работе рассматривается возможность применения аппарата нечеткой логики для формального представления и структурирования экспертных знаний, используемых в интеллектуальных и экспертных системах. В отличие от традиционных подходов, ориентированных преимущественно на построение алгоритмов логического вывода, основной акцент сделан на описании понятий предметной области и смысловых связей между ними. Для формализации экспертных оценок используются нечеткие множества и лингвистические переменные, позволяющие учитывать размытость границ понятий и субъективный характер знаний эксперта. В работе приводятся математические модели основных элементов нечеткого представления знаний, а также программный пример на Python, иллюстрирующий реализацию лингвистических понятий.