

11-30-2020

## PHOTOLUMINESCENCE AND RAMAN SPECTRA OF DIAMOND MICROPOWDERS PLACED IN PHOTON TRAPS

I A. Rakhmatullaev

*Center for Advanced Technologies under the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan*

V S. Gorelik

*Physical Institute. P.N. Lebedev of the Russian Academy of Sciences*

R A. Muminov

*Physical and Technical Institute NPO "Physics - Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan*

O M. Tursunkulov

*Center for Advanced Technologies under the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan*

O F. Tukfatullin

*Physical and Technical Institute NPO "Physics - Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>

---

### Recommended Citation

Rakhmatullaev, I A.; Gorelik, V S.; Muminov, R A.; Tursunkulov, O M.; Tukfatullin, O F.; Rakhmatullaev, M R.; and Kurbonov, A K. (2020) "PHOTOLUMINESCENCE AND RAMAN SPECTRA OF DIAMOND MICROPOWDERS PLACED IN PHOTON TRAPS," *Scientific-technical journal*: Vol. 3 : Iss. 5 , Article 20. Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol3/iss5/20>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact [sh.erkinov@edu.uz](mailto:sh.erkinov@edu.uz).

---

## PHOTOLUMINESCENCE AND RAMAN SPECTRA OF DIAMOND MICROPOWDERS PLACED IN PHOTON TRAPS

### Authors

I A. Rakhmatullaev, V S. Gorelik, R A. Muminov, O M. Tursunkulov, O F. Tukfatullin, M R. Rakhmatullaev, and  
A K. Kurbonov

УДК 535.361

**PHOTOLUMINESCENCE AND RAMAN SPECTRA OF DIAMOND MICROPOWDERS PLACED IN PHOTON TRAPS****<sup>1</sup>Rakhmatullaev I.A., <sup>2</sup>Gorelik V.S., <sup>3</sup>Muminov R.A., <sup>1</sup>Tursunkulov O.M., <sup>3</sup>Tukfatullin O.F.,  
<sup>1</sup>Rakhmatullaev M.R., <sup>1</sup>Kurbonov A.K.**<sup>1</sup>Center for Advanced Technologies under the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan,<sup>2</sup>Physical Institute. P.N. Lebedev of the Russian Academy of Sciences,<sup>3</sup>Physical and Technical Institute NPO "Physics - Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, e-mail: [ilyoss@rambler.ru](mailto:ilyoss@rambler.ru).**СПЕКТРЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ СВЕТА МИКРОПОРОШКОВ АЛМАЗА, ПОМЕЩЕННЫХ В ФОТОННЫЕ ЛОВУШКИ****<sup>1</sup>Рахматуллаев И.А., <sup>2</sup>Горелик В.С., <sup>3</sup>Муминов Р.А., <sup>1</sup>Турсункулов О.М.,  
<sup>3</sup>Тукфатуллин О.Ф., <sup>1</sup>Рахматуллаев М.Р., <sup>1</sup>Курбонов А.К.**<sup>1</sup>Центр передовых технологий при Министерстве инновационного развития Республики Узбекистан,<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук,<sup>3</sup>Физико-технический институт НПО «Физика – Солнце» Академии наук Республики Узбекистан  
e-mail: [ilyoss@rambler.ru](mailto:ilyoss@rambler.ru).**ФОТОНЛИ ТУЗОҚЛАРГА ЖОЙЛАШТИРИЛГАН ОЛМОС МИКРОКУКУНЛАРИДА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВА ЁРУҒЛИКНИНГ КОМБИНАЦИОН СОЧИЛИШ СПЕКТРЛАРИ****<sup>1</sup>Рахматуллаев И.А., <sup>2</sup>Горелик В.С., <sup>3</sup>Муминов Р.А., <sup>1</sup>Турсункулов О.М.,  
<sup>3</sup>Тукфатуллин О.Ф., <sup>1</sup>Рахматуллаев М.Р., <sup>1</sup>Курбонов А.К.**<sup>1</sup>Ўзбекистон Республикаси Инновацион ривожланиш вазирлиги хузуридаги илғор технологиялар маркази,<sup>2</sup>Физика институти. П.Н. Россия Фанлар академиясининг Лебедев<sup>3</sup>Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг "Физика - Куёш" НПО физика-техника институти, e-mail: [ilyoss@rambler.ru](mailto:ilyoss@rambler.ru).

**Abstract.** *The photoluminescence and Raman spectra of diamond micropowders placed in photon traps under repetitively pulsed excitation by a copper vapor laser are studied. The recorded spectra of the photoluminescence and Raman spectra of micro-diamond powders were characterized by anomalously high intensity, which was associated with the trapping of exciting radiation in microparticles, the size of which significantly exceeded the lasing wavelength.*

**Keywords:** diamond, micropowder, photon trap, photoluminescence, Raman scattering, copper vapor laser.

**Аннотация.** *Исследованы спектры фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света микропорошков алмаза, помещенных в фотонные ловушки при импульсно-периодическом возбуждении лазером на парах меди. Регистрируемые спектры фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света порошков микроалмазов характеризовались аномально большой интенсивностью, что связывалось с пленением возбуждающего излучения в микрочастицах, размер которых существенно превышал длину волны лазерной генерации.*

**Ключевые слова:** алмаз, микропорошок, фотонная ловушка, фотолюминесценция, комбинационное рассеяние света, лазер на парах меди.

**Materials of the V International Conference "Optical and photoelectrical phenomena in semiconductive micro- and nanostructures". Ferghana, November 13-14, 2020.**

**Аннотация.** Фотон тузоқларига жойлаштирилган олмос микрокукунларининг мис буғларидаги лазернинг импульсли-даврийли уйғотилган фотолюминесценция ва ёруғликнинг комбинацион спектрлари ўрганилган.

Олмос микрокукунларининг қайд қилинган фотолюминесценция ва ёруғликнинг комбинацион сочилиши спектрлари гайритабий катта интенсивликка эга бўлиб, улар микроррачаларда уйғотувчи нурланишининг “қамалиб қолиши” туфайли содир бўлиши кузатилди: микроррачаларнинг ўлчамлари лазер нурининг тўлқин узунлигидан анча каттадир.

**Таянч сўзлар:** олмос, микрокукун, фотонли тузок, фотолюминесценция, ёруғликнинг комбинацион сочилиши, мис буғларидаги лазер.

**Введение.** Оптические спектры поглощения, люминесценции, комбинационного рассеяния света природных и искусственных кристаллов алмаза к настоящему времени достаточно хорошо изучены. В тоже время в меньшей степени исследованы оптические свойства микро- и нанопорошков алмаза, а также плёнок алмаза, которые приобрели в последнее время особый интерес благодаря разработке новых методов их синтеза [1-3]. Характерной особенностью оптических свойств алмаза по сравнению с большинством других кристаллов является наличие люминесценции в сине-голубой и УФ области спектра, что используется, например, для определения качества алмазов. В частности, в работе [4] изучены различные типы люминесценции (фотолюминесценция (ФЛ), катодолюминесценция, рентгенолюминесценция) в диапазоне от 360 до 900 нм синтезированных микрочастиц алмаза различных размеров. Влияние примесей азота на ФЛ природных порошков алмаза изучали в [5]. В работе [6] исследованы природные алмазы, содержащие макро- и микровключения. Радиационная стойкость синтетических алмазных микропорошков в зависимости от их предельной механической прочности исследована методами рентгеновской дифракции в работе [7]. Самым распространенным дефектом алмаза является примесь азота, она содержится в 98% большинство природных алмазов, а её концентрация определяет интенсивность окраски камня [8]. Примеси азота в алмазной решётке образуют в запрещенной зоне локальные уровни, которые существенно влияют на люминесцентные, оптические, электрические, механические и тепловые свойства алмаза [9-10].

В спектрах комбинационного рассеяния света (КРС) микро- и нанопорошков алмаза имеются три характерных максимума в областях  $1332$ ,  $1380$  и  $1580\text{ см}^{-1}$  [11] или  $1332$ ,  $1500$  и  $1580\text{ см}^{-1}$  [12]. Максимум КРС в области  $1332\text{ см}^{-1}$ , характерен для крупных алмазов, который имеет уширение в диапазоне от  $2$  до  $94\text{ см}^{-1}$ . Пики в диапазоне от  $1380$  до  $1500\text{ см}^{-1}$  характерны колебаниям углеродных групп на поверхности частицы алмаза в  $sp^2$ -гибридном состоянии. Пик при  $1580\text{ см}^{-1}$  относится к колебанию симметрии  $E_{2g}$  фазы.

Цель настоящей работы — установление закономерностей в спектрах ФЛ и КРС монодисперсных алмазных порошков в фотонных ловушках в зависимости от размеров частиц в диапазоне  $0,5\text{--}50\text{ мкм}$ .

**Методика эксперимента.** Заготовки для получения микроалмазов изготовлены из графита методом статического сжатия при высокой температуре ( $1000\text{--}3000\text{ °C}$ ) и сверхвысоком давлении ( $5\text{--}10\text{ ГПа}$ ). Для возбуждения и регистрации спектров ФЛ и КРС использовалась волоконно-оптическая методика. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника возбуждения использовался лазер на парах меди (1), генерирующий излучение в видимой области спектра с длинами волн  $510,6$  и  $578,2\text{ нм}$ . Генерация осуществлялась в монохроматическом режиме ( $\lambda=510,6\text{ нм}$ ), при этом желтая линия ( $\lambda=578,2\text{ нм}$ ) была подавлена фильтром. Возбуждающее излучение лазера (1) с помощью световода (6) направлялось внутрь кюветы с образцом (7). Вторичное излучение входило в другой световод (6) диаметром  $100\text{ мкм}$  и направлялось к входной щели

*Materials of the V International Conference "Optical and photoelectrical phenomena in semiconductive micro- and nanostructures". Ferghana, November 13-14, 2020.*

волоконно-оптического миниспектрометра (8). С миниспектрометра цифровая информация о спектре вторичного излучения посредством USB-кабеля (9) передавалась на компьютер (10).

Средняя мощность излучения лазера 10 Вт. Излучение генерируется в импульсно-периодическом режиме с большой частотой следования ( $10^4$  Гц) коротких (20 нс) импульсов генерации с пиковой мощностью  $10^5$  Вт.

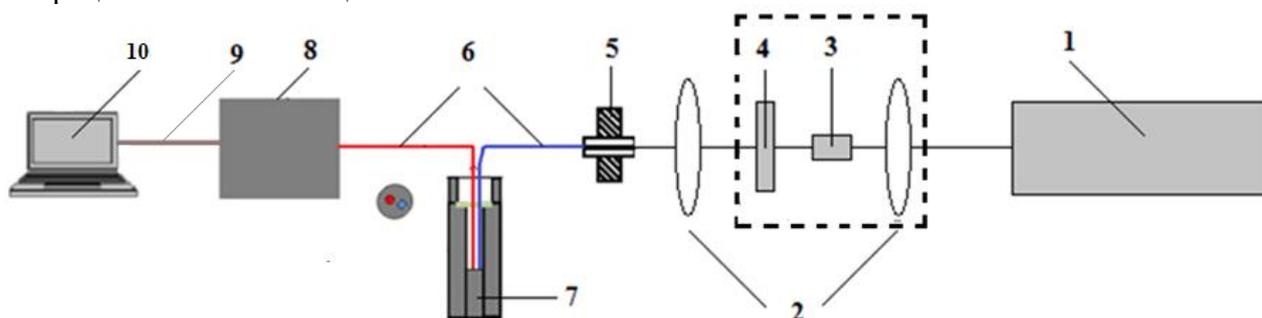


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – лазер на парах меди; 2 – собирающая линза; 3 –  $BaV_2O_4$  (ВВО); 4 – светофильтр; 5 – держатель световода; 6 – световод; 7 – резонаторная кювета (фотонная ловушка) с образцом; 8 – миниспектрометр FSD-8; 9 – USB-кабель; 10 – компьютер.



Рис. 2. Минирезонаторные кюветы с образцами.

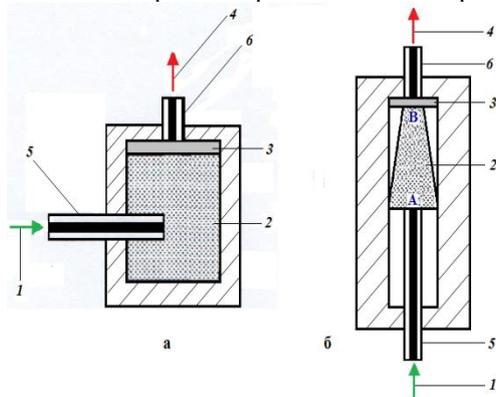


Рис. 3. Устройство минирезонаторной кюветы (фотонной ловушки) с цилиндрическим (а) и конусным (б) резонаторами: 1 – возбуждающее излучение; 2 – исследуемое вещество (порошок); 3 – абсорбционный светофильтр; 4 – вторичное излучение; 5 – входной световод; 6 – выходной световод.

ловушки, т.е. кюветы, в которых излучение претерпевает многократное отражение и рассеяние. Эти кюветы имели диаметр капилляра 1,5–3 мм и длину 20–50 мм (рис. 2). Края отверстий кюветы можно изготовить из металлов для которых реализуется эффект

Наиболее эффективной для изучения спектров ФЛ оказалась вторая оптическая гармоника зелёной линии (510,6 нм) генерации лазера, соответствующая длине волны излучения  $\lambda=255,3$  нм. Высокая пиковая мощность лазерного излучения позволяет осуществить эффективное удвоение и сложение частот линий генерации лазера путем использования нелинейно-оптических кристаллов ( $BaV_2O_4$ ). Излучение от активного элемента лазера на парах меди, работающего в режиме неустойчивого резонатора, фокусировалось длиннофокусной линзой в нелинейно-оптическом кристалле  $BaV_2O_4$ . Кристалл был вырезан таким образом, что условие синхронизма выполнялось для удвоения частот исходного лазерного излучения. Таким образом, на выходе кристалла возникало УФ излучение с длинами волн 255,3, 271,2 или 289,1 нм. Излучение лазера видимого диапазона устранялось с помощью абсорбционного фильтра, помещаемого сразу после  $BaV_2O_4$ .

Для усиления сигнала вторичного излучения (ВИ) в порошках нами были изготовлены специальные конструкции других типов металлических кювет: минирезонаторные кюветы различных видов — фотонные

гигантского усиления вероятности возбуждения процессов ВИ. Кюветы использовались для работы по схеме «на отражение» и «на просвет». Кювета выполнена в форме замкнутой полости с двумя отверстиями для ввода возбуждающего (первичного) и вывода ВИ. Идея использования фотонных ловушек (рис. 3) состоит в том, что значительная часть доли первичного (лазерного) света, попадая в ловушку, переходит во ВИ. В корпусе фотонной ловушки была вырезана полость, являющаяся рабочим объемом и заполняемая исследуемым порошком. Было установлено, что конусообразная полость оказалась самым оптимальным вариантом для усиления сигналов ВИ (рис. 3, б).

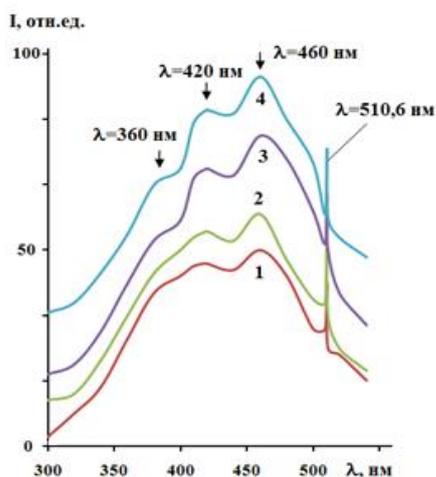


Рис. 4. Спектры ФЛ микропорошков алмаза различных размеров при их возбуждении второй оптической гармоникой ( $\lambda_{\text{возб}}=255,3$  нм) лазера на парах меди: (1) –  $d_{\text{ср}}=0,5$  мкм; (2) –  $d_{\text{ср}}=1$  мкм; (3) –  $d_{\text{ср}}=10$  мкм; (4) –  $d_{\text{ср}}=50$  мкм ( $I_{\text{возб}} \sim 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>).

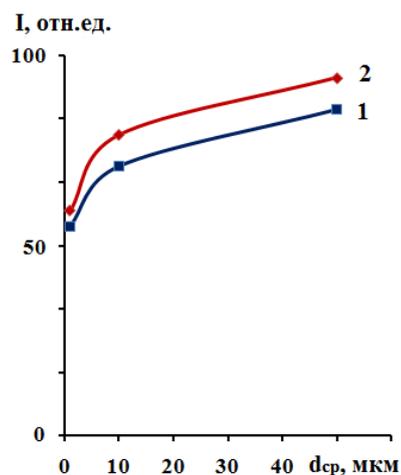


Рис. 5. Зависимость интенсивности ФЛ полосы при 420 нм (1) и 460 нм (2) от размера частиц микропорошков алмаза.

Использование светофильтров позволило уменьшить интенсивность возбуждающей линии лазера в спектре ВИ почти в 100 раз при полном пропускании сигнала ВИ. Светофильтры использовались в основном при использовании метода «на отражение». Для метода «на просвет» оказалось возможным регистрировать ВИ без использования каких-либо фильтров, так как при этом лазерное излучение сильно ослаблялось на выходе из кюветы из-за процессов многократного рассеяния в порошке.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 4 представлены спектры ФЛ алмазных микропорошков различных размеров при их возбуждении второй оптической гармоникой ( $\lambda_{\text{возб}}=255,3$  нм) лазера на парах меди. Спектры зарегистрированы при одинаковых условиях возбуждения и регистрации. Этот факт исключает возникновение различий, вызванных методикой

Как видно из рисунка, спектр ФЛ микропорошков алмаза (кривые 1–4) находится в диапазоне 300–530 нм и представляет широкую полосу с двумя максимумами в области 420 и 460 нм. Кроме того, в спектре наблюдается слабая полоса в коротковолновой области спектра ( $\lambda=360$  нм). В образце алмаза со средним размером 50 мкм данный пик полосы проявляется явным образом (кривая 4). Для алмаза вторая гармоника от зеленой линии лазера на парах меди  $\lambda_{\text{возб}}=255,3$  нм (4,8 эВ) не превышает  $E_g$ , т.е.  $E_{\text{возб}} < E_g$  (ширина запрещенной зоны алмаза при комнатной температуре  $E_g=5,4-5,5$  эВ). Результаты показали, что в наших исследованиях в алмазе ФЛ осуществляется при участии дефектов в порошке [13-15]. Известно из работы [16], что полосы в области 410–460 нм в спектре ФЛ микропорошков обусловлены электронными переходами между дважды вырожденным

**Materials of the V International Conference "Optical and photoelectrical phenomena in semiconductive micro- and nanostructures". Ferghana, November 13-14, 2020.**

возбужденным состоянием ( $E_1$ ) и основным невырожденным состоянием ( $A_1$ ) дефекта N3 в спектре ФЛ природных алмазов. Наблюдаемый пик (422 нм) в спектре ФЛ также относится к этому типу дефекта. Слабый максимум при  $\lambda=380$  нм в спектрах ФЛ микропорошков можно связать с дефектом "N2". Дефекты "N2" (N2-центры) образуются замещением двух смежных атомов углерода, расположенных на телесной диагонали, атомами азота [16]. Такой дефект обладает симметрией  $D_{3d}$  и имеет два дипольных перехода с длинами волн бесфононных переходов 317 и 330 нм.

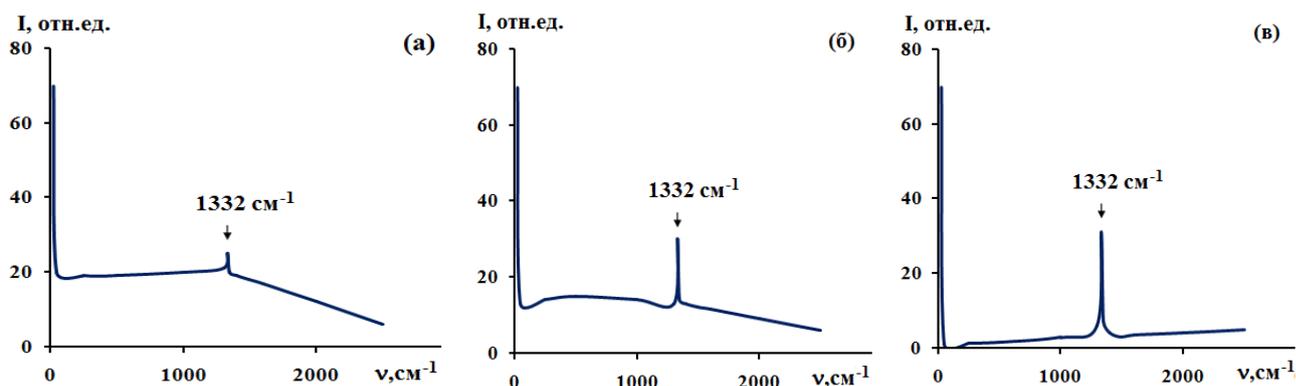


Рис. 6. Спектры КРС микропорошков алмаза различных размеров при их возбуждении зеленой линией лазера на парах меди ( $\lambda_{\text{возб}}=510,6$  нм): (а) —  $d_{\text{cp}}=0,5$  мкм; (б) —  $d_{\text{cp}}=1$  мкм; (в) —  $d_{\text{cp}}=50$  мкм ( $I_{\text{возб}} \sim 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>).

На рис. 5 приведена зависимость интенсивности ФЛ полосы при 420 нм (кривая 1) и 460 нм (кривая 2) от размера частиц микропорошков алмаза. Как видно из рисунка, интенсивность ФЛ в обоих максимумах с увеличением размера частиц (от 1 мкм до 10 мкм) резко возрастает, далее возрастает плавно, что связано с увеличением количества азотных дефектов вследствие увеличения размеров частиц алмаза. Это в свою очередь приведет к эффективному поглощению образцами возбуждающего излучения. Аналогичная зависимость ФЛ от диаметра зерен фракции для оксидных порошков изучена в работе [17].

Спектры КРС микропорошков алмаза различных размеров при их возбуждении зеленой линией лазера на парах меди ( $\lambda_{\text{возб}}=510,6$  нм) представлены на рис. 6. Практически у всех образцов наблюдается особенность на  $\nu=1332$  см<sup>-1</sup>, соответствующая фундаментальному колебанию решётки алмаза. Регистрация узкой линии на данной частоте подтверждает наличие кристаллической фазы алмаза в исследуемых образцах. Однако, во всех спектрах присутствует люминесцентный фон по всей области спектра, связанный с двухфотонно-возбуждаемой люминесценцией (ДВЛ). При увеличении размеров микропорошков до 50 мкм сплошной фон резко падает и интенсивность КРС на фундаментальной моде 1332 см<sup>-1</sup> относительно фона увеличивается (рис. 6, в). Интенсивность 1332 см<sup>-1</sup> возрастает по мере увеличения средних размеров микропорошков и достигает максимума при 50 мкм.

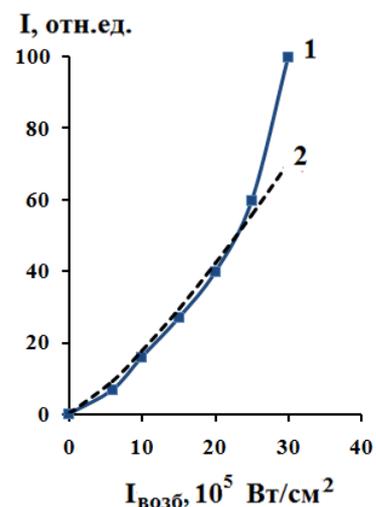


Рис. 7. Зависимость интенсивности КРС микропорошков алмаза ( $d_{\text{cp}}=10$  мкм) ( $I$ ) от плотности мощности возбуждающего излучения ( $I_{\text{возб}}$ ) в резонаторной кювете. Экспериментальная кривая (1) и (2) теоретическая зависимости ( $I \approx I_{\text{возб}}^{1.25}$ ) соответствуют  $\nu=1332$  см<sup>-1</sup>.

Рис. 7 иллюстрирует зависимости интенсивности КРС ( $\nu=1332 \text{ см}^{-1}$ ) от интенсивности возбуждающего излучения ( $\lambda_{\text{возб}}=510,6 \text{ нм}$ ). При сравнительно небольших плотностях (до  $20 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ ) зависимость  $I(I_{\text{возб}})$  соответствует степенной зависимости с  $\alpha \approx 1,25$  (кривые 1 и 2). При повышении плотности мощности возбуждающего излучения обнаруживается слабая нелинейность (зависимость характеризуется явным отклонением от  $I \approx I_{\text{возб}}^{1.25}$ ).

Таким образом, в фотонных ловушках интенсивность КРС микропорошков алмаза на выходе из кюветы существенно возрастает (см. рис. 6, кривая 3 и рис. 7): наблюдается существенное возрастание относительной интенсивности КРС в сравнении с интенсивностью возбуждающей линии (режим комбинационной опалесценции). Это объясняется значительным увеличением полного пути, который фотон возбуждающего излучения проходит в исследуемом веществе, за счет многократного отражения от стенок ловушки и рассеяния на неоднородностях среды. Как известно, отношение интенсивности КРС  $I_{\text{КРС}}$  в спектре вторичного излучения к интенсивности возбуждающего излучения  $I_{\text{возб}}$  в однородной среде записывается в виде [18]:

$$\frac{I_{\text{КРС}}}{I_{\text{возб}}} = \sigma \cdot N \cdot L \cdot \delta\Omega \quad (1)$$

где  $\sigma$  — эффективное сечение КРС ( $\sigma \sim 10^{-28} \text{ см}^2$ ),  $N$  — концентрация частиц,  $L$  — путь, пройденный фотоном возбуждающего излучения в веществе,  $\delta\Omega$  — телесный угол, в котором анализируется исследуемое излучение (угол сбора).

Таким образом, при исследовании веществ в обычных кюветах длиной  $\sim 1 \text{ см}$  отношение интенсивности КРС  $I_{\text{КРС}}$  в спектре вторичного излучения к интенсивности возбуждающего излучения  $I_{\text{возб}}$  при концентрации частиц  $N \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$  и угле сбора рассеянного излучения  $\delta\Omega \approx 1 \text{ ср}$  составляет

$$\frac{I_{\text{КРС}}}{I_{\text{возб}}} = 10^{-6} \quad (2)$$

Таким образом, на выходе из кюветы с однородной средой интенсивность КРС в миллион раз слабее интенсивности возбуждающего излучения.

Для определения пути, который проходит фотон возбуждающего излучения в ультрадисперсной среде, было использовано приближение броуновского движения. Модель броуновского движения обычно применяется для описания хаотического теплового движения мельчайших частиц в жидкости. В данной работе в качестве броуновской частицы рассматриваются фотоны, траектории которых в ультрадисперсной среде формируются в результате многократного рассеяния на неоднородностях среды [18]. В качестве длины свободного пробега  $\Delta x_i = \Delta x$  фотона используется характерный размер оптических неоднородностей в ультрадисперсной среде. Полагая, что за некоторый промежуток времени  $\Delta t_i = \Delta t$  фотон проходит расстояние  $\Delta x$  в произвольном направлении, можно записать значение квадрата окончательного удаления ( $l^2$ ) фотона от исходного положения за  $n$  промежутков времени  $\Delta t$ :

$$l^2 = \sum_{i=1}^n (\Delta x_i^2) + \sum_{i=2}^n (2\Delta x_i l_{i-1} \cos \alpha_i), \quad (3)$$

где  $l_i$  — полное перемещение фотона за  $i$  промежутков времени  $\Delta t$ ,  $\alpha_i$  — угол между  $\Delta x_i$  и продолжением  $l_{i-1}$ . Учитывая, что фотон проходит за определенный промежуток времени  $\Delta t$  приблизительно одинаковое расстояние  $\Delta x$  (длина свободного пробега) в произвольном направлении и что  $\cos \alpha_i$  равновероятно может иметь как положительный, так и отрицательный знак, поскольку значения углов  $\alpha_i$  равновероятны, получим для среднего значения квадрата окончательного удаления ( $\langle l^2 \rangle$ ):

$$\langle l^2 \rangle = n(\Delta x)^2, \quad (4)$$

Обозначим через  $t$  время, в течение которого произошло  $n$  перемещений  $\Delta x$ , измеренных через промежутки времени  $\Delta t$ , тогда

$$n = \frac{t}{\Delta t}, \quad \langle l^2 \rangle = \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} t. \quad (5)$$

Отсюда получаем для перемещения  $l_0 = \sqrt{\langle l^2 \rangle}$  фотона за время  $t$

$$l_0 = \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{\Delta t}} \sqrt{t}. \quad (6)$$

При этом перемещение  $l_0$  с одинаковой вероятностью может иметь любое направление в пространстве.

Таким образом, при рассмотрении данной модели можно полагать, что фотон, находившийся в начальный момент времени в определённой точке, через  $t$  секунд окажется вблизи поверхности шара радиусом  $R = l_0$ :

$$R = \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{\Delta t}} \sqrt{t}. \quad (7)$$

Отсюда путь, пройденный фотоном в веществе, равен

$$L = tc = \frac{R^2 \Delta t}{(\Delta x)^2} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{R^2}{\Delta x}, \quad (8)$$

где  $c$  — скорость света в веществе.

Для фотонной ловушки, используемой в эксперименте, расстояние между входным и выходным торцами световодов, т.е. перемещение фотона в фотонной ловушке, равнялось  $R = 1$  см. Длина свободного пробега фотона в ультрадисперсной среде может считаться сравнимой с размерами частиц, т.е.  $\Delta x \approx 10^{-4}$  см. Тогда полный путь, пройденный фотоном возбуждающего излучения в фотонной ловушке, равен  $L \approx 10^4$  см. В то же время при использовании фотонной ловушки телесный угол рассеянного излучения  $\delta\Omega \approx 4\pi$ . Такой выбор  $\delta\Omega$  обусловлен тем, что возбуждающее излучение, попадая в фотонную ловушку, многократно отражается от ее стенок и от поверхностей частиц ультрадисперсной среды.

Подставив полученные значения в (1), получим:

$$\frac{I_{КР}}{I_{возб}} = 10^{-1}. \quad (9)$$

Таким образом, в результате использования разработанной фотонной ловушки контрастность КРС на выходе из кюветы для веществ, находящихся в ультрадисперсной форме, по сравнению с обычными типовыми кюветами возрастает на пять порядков. При

*Materials of the V International Conference "Optical and photoelectrical phenomena in semiconductive micro- and nanostructures". Ferghana, November 13-14, 2020.*

---

этом наблюдается комбинационная опалесценция, т.е. сигнал КРС в спектре вторичного излучения оказывается сравнимым по интенсивности с возбуждающим излучением.

**Заключение.** Таким образом, при использовании разработанных фотонных ловушек и волоконно-оптической техники в ультрадисперсных средах может быть реализован режим комбинационной опалесценции, состоящий в аномальном возрастании интенсивности КРС в спектре вторичного излучения. Высокая эффективность преобразования возбуждающего излучения в сигнал КРС объясняется большим значением полного пути, который фотон возбуждающего излучения проходит в ультрадисперсной среде, находящейся в фотонной ловушке. Разработанный метод регистрации спектров ФЛ и КРС открывает возможность для создания малогабаритных лазерных анализаторов химических соединений, необходимых для решения многих практических задач.

#### References:

- [1]. Sobolev V.V. Dinamicheskiy sintez almaza i rost monokristallov v tverдой srede // Trudi nauchno-texnicheskoy konferentsii s mejdunarodnim uchastiem "Ultradispersniewporoshki, nanostrukturi, materiali: poluchenie, svoystva, primeneniye" (VI Staverovskie chteniya), 9–12 sentyabr 2012 goda – Biysk. – Russia. – S.53-57. (In Russ.)
- [2]. Vereshagin A.L. Svoystva detonatsionnix nanoalmazov. Iz-vo Alt. gos. texn. un-ta, 2005. – 134 s. (In Russ.)
- [3]. Iizuka K., Furukawa Y., Oshima R. Analysis of binding state of heat treated diamond powder // Am. J. Chem. Mater. Sci. – 2014. – Vol.1, No.1. – P.7-10.
- [4]. Lisenko O.G., Grushko V.I., Miskevich V.I., Initskaya D.I., Boyarentsev A.Yu., Onufruev Yu.D., Popov V.F., Levchuk L.G., Kazyuchis N.M., Rusetskiy M.S., Lisakovskiy V.V., Ivaxnenko S..A. Lyumenesentnie i radiatsionnie xarakteristiki monokristallicheskiy almaznix poroshkov // Sverxtverdie materiali. – 2019. – № 1. – S.23-32. (In Russ.)
- [5]. Lu H.C., Lin M.Y., Pen Y.C., Cheng B.M. Analysis of nitrogen defects in diamond with VUV photoluminescence // Anal. Chem. – 2011. – Vol.83. – P.6539-6544.
- [6]. Mironov V.P., Rakevich A.L., Stepanov F.A., Emelyanova A.S., Zedgenezov D.A., Shatskiy V.S., Kagi X., Martinovich E.F. Luminesentsiya almazov rossipi Sao-Luis (Braziliya) // Geologiya i geofizika. – 2015. – T.56, №5. – S.932-940. (In Russ.)
- [7]. Shishonok E.M., Luhn V.G., Koltunowicz T.N. XRD analysis of synthetic diamond powders irradiated with electrons // Acta Physica Polonica A. – 2015. – Vol.128, No.5. – P.912-914.
- [8]. Khomich A.A. Osobnosti proyavleniya razmernix effektiv i radiatsionnogo razuporyadochivaniya v opticheskix svoystvax almaza. Diss. k-tafiz.-mat. nauk. — Moskva: IOFRAN, 2015. – 184 s. (In Russ.)
- [9]. Kaiser W., Bond W. Nitrogen, a major impurity in common type I diamond // Phys. Rev. – 1959. – Vol. 115, No. 4. – P.857-863.
- [10]. Bokiy G.B., Kirova N.F. Osobnosti kristallizatsii nekotorie svoystva almazov, sintezirovannix s azotoderzhashimi dobavkami // Kristallografiya. – 1975. – T.20, № 3. – S.631-637. (In Russ.)
- [11]. Obraztsov A.N., Timofeyev M.A., Guseva M.B., Babaev V.G., Valliulova Z.Kh., Babina V.M. Comparative study of microcrystalline diamond // Diamond and related materials. – 1995. – Vol. 4, No. 4. – P. 968-971.
- [12]. Kompan M.E., Terukov E.I., Gordeev S.K., Jukov S.G., Nikolayev Yu.A. Spektri fotolyuminesnensii ultradispersnix almazov // Fizika tverdogo tela. – 1997. – T. 39, № 12. – S.3033-3038. (In Russ.)
- [13]. Rakhmatullaev I.A., Gorelik V.S., Kurbonov A.K. Spektri fotolyuminesnensii nanoporoshkov almaza I oksida sinka pri lazernom возбужdenii // "Sovremennye problemi fiziki i tekhnologii": Sb.tezisev V Mejd. Molodej.nauch. shkoli-konf. 18-23 aprel 2016. – Moskva, 2016. – S. 331-333. (In Russ.)
- [14]. Rakhmatullaev I.A., Gorelik V.S., Kurbonov A.K. Laser Raman and photoluminescence spectroscopy of condensed dielectrics // "New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Prospectives": Book of Abstracts of International Symposium, November 10-11, 2016. – Tashkent, 2016. – P.111-113.
- [15]. Rakhmatullaev I.A., Semenov D.I., Kurbonov A.K., Sabirov L.M. Diagnostics of nanopowders with ultraviolet laser radiation // Materiali 7-oy Mejd. konf. po Fizicheskoy Electronice IPEC-7. 18-19 may 2018. – Tashkent. – S.105.
- [16]. Mikov S.N., Igo N.V., Gorelik V.S. Spektri dvxfotonno-vozbujaemoy lyuminesnensii vnanokristallax almaza // Fizika tverdogo tela. – 1999. – T. 41, № 6. – S.1110-1112. (In Russ.)
- [17]. Mxaylov M.M., Vladimirov V.M., Vlasov V.A. O razmernom effekte v radiatsionnom materialovedenii // Izvestiya TPU. – 2000. – T.303, № 2. – S.191-225. (In Russ.)
- [18]. Goncharov A.P., Gorelik V.S., Kravsov A.V. Kombinatsionnoe rasseyaniye sveta v kondensirovannix sredax, pomesheyonnix v fotonnie lovushki // Jurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2007. – T.77, №11. – S.78-82. (In Russ.)