

## 20 Микрористаллические алмазные порошки как перспективные объекты для генерации многочастотного вынужденного комбинационного рассеяния\*

© В.С. Горелик<sup>1,2,¶</sup>, А.В. Скрабатун<sup>1,2</sup>, Dongxue Bi<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005 Москва, Россия

¶ e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 18.11.2018 г.

В окончательной редакции 11.01.2019 г.

Принята к публикации 31.01.2019 г.

Исследованы закономерности комбинационного рассеяния света в микрористаллических алмазных порошках в зависимости от размеров алмазных микрорезонаторов в диапазоне 1–600  $\mu\text{m}$ . Наблюдаемый эффект аномально высокой интенсивности спонтанного комбинационного рассеяния в алмазных микрорезонаторах объясняется „пленением“ в них электромагнитного излучения, длина волны которого меньше размеров микрористаллов алмаза. Вследствие „пленения“ фотонов в алмазных микрорезонаторах повышается плотность электромагнитной энергии для возбуждающего и вторичного излучений. Высокая добротность фундаментальной оптической моды в колебательном спектре алмаза и аномальное возрастание интенсивности комбинационного рассеяния в алмазных микрорезонаторах открывают возможности для наблюдения низкопорогового вынужденного многочастотного комбинационного рассеяния в микрористаллических алмазных порошках. Использование в качестве возбуждающего излучения линий генераций импульсного твердотельного лазера YAG:Nd<sup>3+</sup> ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ) и его оптических гармоник ( $\lambda = 1064, 532, 355, 266 \text{ nm}$ ) открывает возможность для создания линейки эквидистантных (по сдвигу частоты) генераторов лазерного излучения от ультрафиолетовой области до терагерцового диапазона, перспективного для исследования биологических и медицинских объектов.

DOI: 10.21883/OS.2019.05.47661.10-19

### Введение

Кристаллы алмаза являются уникальными объектами для исследований методом комбинационного рассеяния (КР) света вследствие рекордно высоких показателей механических и оптических свойств. Природные алмазы стали изучаться методом КР практически сразу после открытия этого явления [1]. Регистрация спектров КР синтетических алмазов позволила оптимизировать технологию их синтеза и обеспечила возможность получения совершенных и достаточно крупных образцов [2,3].

Алмаз, являющийся основной высокобарической фазой углерода, кристаллизуется в кубической сингонии и имеет пространственную группу  $O_h^7$  симметрии с двумя атомами углерода в примитивной ячейке [3]. Согласно результатам теоретико-группового анализа [4,5], в спектре длинноволновых оптических фононов кристалла алмаза присутствует лишь одна трехкратно вырожденная мода ( $\nu = 1332 \text{ cm}^{-1}$ ) типа  $F_{2g}$ , активная в спектре КР,

\* The 22nd Annual Conference Saratov Fall Meeting 2018 (SFM'18): VI International Symposium „Optics and Biophotonics“ and XXII International School for Junior Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophotonics, September 24–29, 2018, Saratov, Russia.  
<https://www.sgu.ru/structure/fiz/saratov-fall-meeting/previous-conferences/sara>

но запрещенная для процессов однофотонного поглощения в ИК области. Методом КР сравнительно легко можно идентифицировать присутствие алмазов в ювелирных изделиях и в гетерогенных фазах. Теория [6,7] предсказывает, что уменьшение размеров кристаллов алмаза приводит к коротковолновому сдвигу частоты фундаментальной  $F_{2g}$ -моды и к деформации соответствующей спектральной формы сигнала спонтанного КР. В настоящее время весьма актуальной является задача установления закономерностей спектров КР в нано- и микрористаллических частицах алмазов [7–11], а также в алмазных пленках, получаемых методом химического осаждения из газовой фазы (chemical vapor deposition — CVD) [12,13]. При возбуждении КР в алмазных микро- и нанокристаллах различными источниками лазерного излучения наблюдаются дополнительные полосы, которые могут принадлежать примесям графита [14] и аморфного углерода [15]. Увеличение длины волны возбуждающего излучения приводит к появлению в спектре КР CVD-пленок микро- и нанокристаллов алмаза многочисленных „биений“ и высокоинтенсивного фона в области частот до фундаментальной моды  $1332 \text{ cm}^{-1}$  [13,16,17].

Кристаллы алмаза характеризуются сравнительно высоким коэффициентом комбинационного уси-

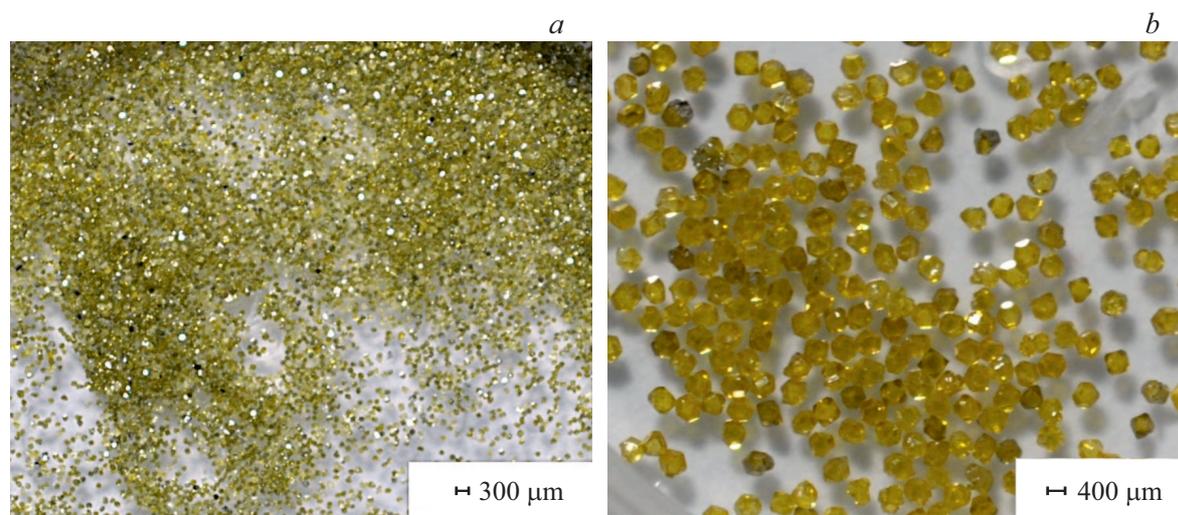


Рис. 1. Фотографии искусственных микрокристаллов алмаза; *a* — 150–180  $\mu\text{m}$ ; *b* — 425–600  $\mu\text{m}$ .

ления при вынужденном комбинационном рассеянии света (ВКР):  $\beta \sim 10 \text{ cm/GW}$  при накачке лазером  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ) [18]. Они характеризуются также рекордным коэффициентом теплопроводности ( $\sim 2000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) [19], большим частотным сдвигом фундаментальной моды в спектре ВКР ( $\nu = 1332 \text{ cm}^{-1}$ ). Все эти особенности, а также широкий диапазон прозрачности кристаллов алмаза (от дальнего ультрафиолета до радиодиапазона) [20] делают этот кристалл весьма перспективным для генерации многочастотного ВКР и наблюдения параметрического четырехволнового рассеяния света.

Исследования ВКР в искусственных алмазах активно проводятся в последние годы рядом научных коллективов [18–23]. При этом до последнего времени возбуждение ВКР осуществлялось на искусственных алмазных пленках и тонких пластинках искусственных алмазов. Разрабатываются лазеры на основе синтетических CVD-пленок [24,25], позволяющие достигать выходной мощности 24.5 W [21].

Целью настоящей работы является исследование закономерностей спектров КР света в поликристаллических алмазных порошках в зависимости от размеров микрочастиц алмазов. Решение такой задачи открывает возможность для генерации линейки частот лазерного излучения в широком спектральном диапазоне при ВКР в поликристаллических алмазных порошках.

## Экспериментальная часть

В используемых кристаллических алмазных порошках (рис. 1, *a, b*) присутствовали микрочастицы близких размеров в виде многогранников — микрорезаноторов. Размер микрочастиц изменялся в диапазоне  $d = 1\text{--}600 \mu\text{m}$ .

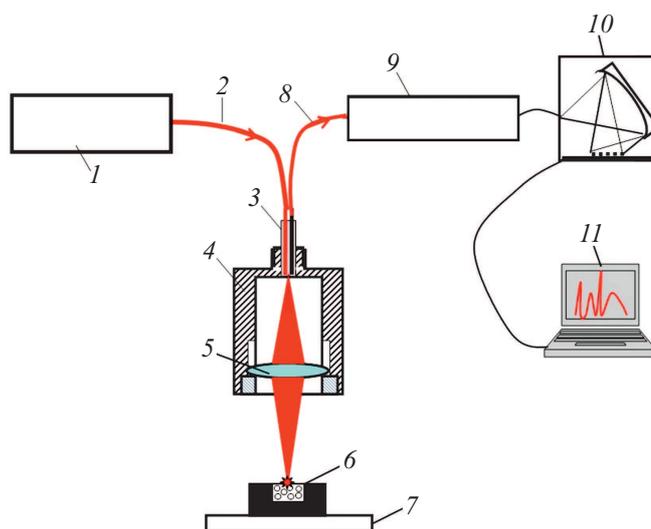
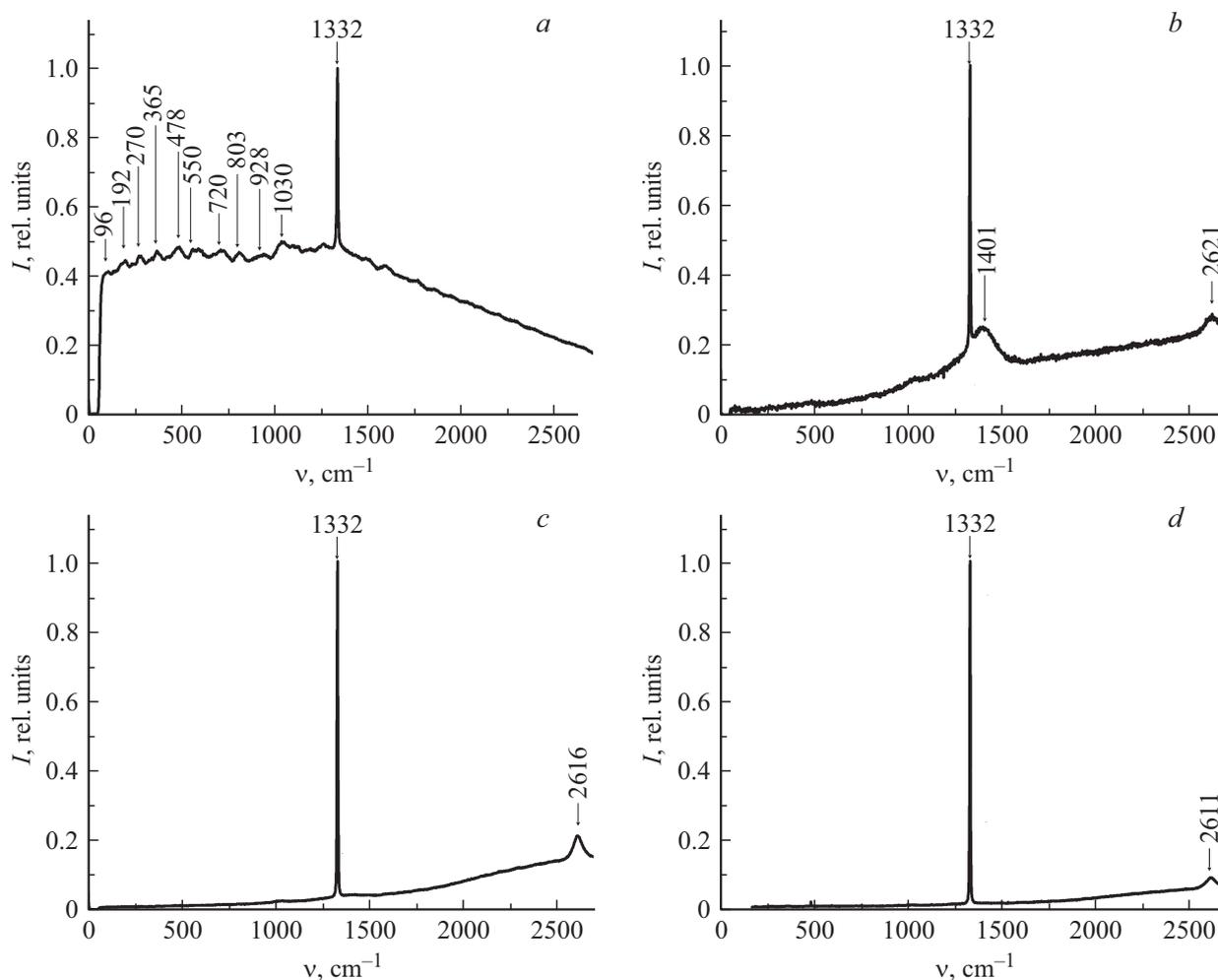


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для наблюдения спонтанного КР в алмазных порошках: 1 — зонд; 4 — корпус; 5 — линза; 6 — кювета; 7 — подложка; 9 — фокусатор; 10 — мини-спектрометр; 11 — компьютер.

В настоящей работе использовались кристаллические порошки с заданными размерами частиц: 1–2, 10–20, 150–180 и 425–600  $\mu\text{m}$ .

Для возбуждения и регистрации спектров спонтанного КР света была использована экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 2. В качестве источника возбуждающего излучения применялся лазер 1, работающий в непрерывном режиме с длиной волны  $\lambda_0 = 785 \text{ nm}$  и мощностью 100 mW. Лазерное излучение вводилось в первый световод 2 и зонд 3. С помощью линзы 5 это излучение фокусировалось на кювете 6, заполненной микрокристаллическим алмазным порошком.



**Рис. 3.** Нормированные спектры КР микрокристаллических алмазных порошков с различными размерами зерен; *a* — 1–2  $\mu\text{m}$ , *b* — 10–20  $\mu\text{m}$ , *c* — 150–180  $\mu\text{m}$ , *d* — 425–600  $\mu\text{m}$ .

Возникающий в образце сигнал КР попадал на второй световод 8, фильтровался в фокусаторе 9 с помощью „нотч-фильтра“ и поступал на вход мини-спектрометра типа BWS465-785H 10 с многоэлементным приемником. Компьютер 11 был предназначен для цифровой обработки и накопления спектров КР. Спектральное разрешение составляло  $1\text{ cm}^{-1}$ . Полный спектр КР микроалмазов в диапазоне  $50\text{--}2750\text{ cm}^{-1}$  регистрировался при экспозициях 10–100 с.

## Результаты экспериментальных исследований

Зарегистрированные спектры КР в микрокристаллических алмазных порошках с различными размерами зерен представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, вид спектров КР в микрокристаллах алмазов существенно отличается от известных спектров КР первого порядка в крупных алмазах, состоящих только из одной линии с частотой  $1332\text{ cm}^{-1}$ . Для образца с размером

зерен  $d \sim 1\text{ }\mu\text{m}$  в области низких частот наблюдаются многократные „биения“ и непрерывный фон по всей области спектра КР. В то же время в этом спектре (рис. 3, *a*) присутствует характерный пик с частотой  $1332\text{ cm}^{-1}$ , интенсивность которого сопоставима с интенсивностью непрерывного фона. При возрастании размера  $d$  алмазных микрорезонаторов до  $10\text{ }\mu\text{m}$  интенсивность непрерывного фона уменьшалась, а фундаментального пика увеличивалась (рис. 3, *b*). При этом биения интенсивности КР на частотах 96, 192, 270, 365, 478, 550, 720, 803, 928,  $1030\text{ cm}^{-1}$  не обнаруживались, но наблюдалось появление двух дополнительных широких полос с частотами максимумов  $1401\text{ cm}^{-1}$  (рис. 3, *b*) и в области  $2620\text{ cm}^{-1}$  (рис. 3, *b-d*). При дальнейшем увеличении размера микрорезонаторов ( $d = 150\text{--}600\text{ }\mu\text{m}$ ) непрерывный фон в спектре КР практически отсутствовал. При этом, кроме резкого интенсивного фундаментального пика  $1332\text{ cm}^{-1}$ , в оберточной области спектра наблюдался достаточно интенсивный пик в области с частотой  $2620\text{ cm}^{-1}$ .

Длины волн и частоты комбинационных спутников, рассчитанные при эквидистантном частотном сдвиге на  $1332\text{ см}^{-1}$  от линий генерации  $\lambda = 1.064, 0.532, 0.355, 0.266\ \mu\text{м}$ . В скобках указаны номера стоксовых (S) и антистоксовых (AS) компонент

$\lambda_{01} = 1.064\ \mu\text{м} (9398\text{ см}^{-1})$			$\lambda_{02} = 0.532\ \mu\text{м} (18797\text{ см}^{-1})$		
Длина волны $\lambda, \mu\text{м}$	Частота $\nu,$ $\text{см}^{-1}$	S и AS спутники	Длина волны $\lambda, \mu\text{м}$	Частота $\nu,$ $\text{см}^{-1}$	S и AS спутники
0.931	10738	AS(1)	0.497	20129	AS(1)
0.829	13394	AS(2)	0.466	21461	AS(2)
0.679	14726	AS(3)	0.439	22793	AS(3)
0.623	16058	AS(4)	0.414	24125	AS(4)
0.746	17390	AS(5)	0.393	25457	AS(5)
0.575	12062	AS(6)	0.373	26789	AS(6)
0.534	18722	AS(7)	0.355	28121	AS(7)
1.240	8066	S(1)	0.572	17465	S(1)
1.485	6734	S(2)	0.620	16133	S(2)
1.851	5402	S(3)	0.675	14801	S(3)
2.457	4070	S(4)	0.742	13469	S(4)
3.652	2738	S(5)	0.824	12137	S(5)
7.112	1406	S(6)	0.925	10805	S(6)
135.135	74	S(7)	1.055	9473	S(7)
$\lambda_{03} = 0.355\ \mu\text{м} (28194\text{ см}^{-1})$			$\lambda_{04} = 0.266\ \mu\text{м} (37594\text{ см}^{-1})$		
Длина волны $\lambda, \mu\text{м}$	Частота $\nu,$ $\text{см}^{-1}$	S и AS спутники	Длина волны $\lambda, \mu\text{м}$	Частота $\nu,$ $\text{см}^{-1}$	S и AS спутники
0.338	29526	AS(1)	0.257	38926	AS(1)
0.324	30858	AS(2)	0.248	40258	AS(2)
0.310	32190	AS(3)	0.240	41590	AS(3)
0.298	33522	AS(4)	0.233	42922	AS(4)
0.287	34854	AS(5)	0.226	44254	AS(5)
0.276	36186	AS(6)	0.219	45586	AS(6)
0.266	37518	AS(7)	0.213	46918	AS(7)
0.372	26862	S(1)	0.275	36262	S(1)
0.392	25530	S(2)	0.286	34930	S(2)
0.413	24198	S(3)	0.297	33598	S(3)
0.437	22866	S(4)	0.310	32266	S(4)
0.464	21534	S(5)	0.323	30934	S(5)
0.495	20202	S(6)	0.338	29602	S(6)
0.530	18870	S(7)	0.353	28270	S(7)

## Обсуждение полученных результатов

Согласно известной теории рассеяния Ми на сферических частицах [26], индикатриса рассеянного излучения света существенно видоизменяется в том случае, когда длина волны электромагнитного излучения, отнесенная к соответствующему показателю преломления, становится сравнимой или меньше размеров рассеивающих частиц. Алмазные микрочастицы характеризуются большим значением показателя преломления в видимом диапазоне длин волн ( $n = 2.4-2.5$ ) [27]. Таким образом, исследуемые микрокристаллы алмазов удовлетворяют условиям для наблюдения резонансов Ми, а сами микрочастицы можно рассматривать как оптические резонаторы, обеспечивающие „пленение“ излучения в них мод типа шепчущей галереи. Соответственно наблюдаемое резкое возрастание эффек-

тивности КР на фундаментальной моде  $1332\text{ см}^{-1}$  по сравнению с крупными образцами алмазов, исследуемых при 90-градусной геометрии рассеяния [3], можно объяснить „пленением“ электромагнитного излучения в алмазных микрочастицах и соответствующего резкого увеличения его плотности энергии. Наблюдаемый непрерывный фон и присутствие биений в низкочастотной области в спектре алмазов микронного размера (рис. 3, а) можно объяснить проявлением стоячих волн в микрорезонаторах, соответствующих акустическим и оптическим дисперсионным ветвям кристаллов алмаза. Пик с частотой  $1401\text{ см}^{-1}$ , наблюдаемый в спектре КР (рис. 3, б) для микрочастиц с размером  $d = 10-20\ \mu\text{м}$ , естественно отнести на счет двухфононного возбуждения, соответствующего критической точке акустической ветви на границе зоны Бриллюэна.

Особый интерес представляет пик в области  $2620\text{ cm}^{-1}$  (рис. 3, *b-d*), расположенный вблизи обертона моды с частотой  $1332\text{ cm}^{-1}$ . Известно [28,29], что в крупных монокристаллах алмаза наблюдался слабый резкий пик КР на частоте  $2668\text{ cm}^{-1}$ , интерпретируемый как связанное состояние двух фононов — бифона с очень малой энергией связи. Для подтверждения такой интерпретации проводилось сопоставление наблюдаемого спектра КР второго порядка в алмазе с плотностью двухфононных состояний [27–29]. Соответственно пик в области  $2620\text{ cm}^{-1}$  (рис. 3, *b-d*) естественно объяснить как проявление связанного состояния двух оптических фононов (бифона) с возросшей энергией связи ( $\Delta = 44\text{ cm}^{-1}$ ) в условиях конфайнмента в алмазном микрорезонаторе. При этом интенсивность КР на бифоне только в пять раз ниже интенсивности КР на основном тоне.

Кристаллы алмаза прозрачны в широком спектральном диапазоне: от дальнего ультрафиолетового до радиоволнового излучения. Такие окна прозрачности обуславливаемого материала, а также сравнительно низкий порог ВКР делают алмаз одним из удобных объектов для наблюдения многочастотного ВКР. Выполненные к настоящему времени работы по наблюдению многочастотного ВКР в алмазных CVD-пленках имеют ограниченные возможности из-за небольшой толщины пленок, в результате чего возникает необходимость использовать высокую плотность мощности возбуждающего лазерного излучения, приводящую к светоиндуцированным процессам разрушения дорогостоящих образцов. С этой точки зрения микрокристаллические алмазные порошки имеют существенные преимущества, обусловленные большой эффективностью спонтанного КР и соответственно низким порогом ВКР-генерации, а также возможностью использования большого количества образцов различных размеров. Как показали наши эксперименты, наиболее перспективными микрокристаллическими алмазными порошками для возбуждения ВКР являются образцы с размерами  $150\text{--}180\text{ }\mu\text{m}$ , характеризующиеся присутствием высокодобротной фундаментальной моды  $1332\text{ cm}^{-1}$  в спектре КР.

В таблице приведены рассчитанные значения длин волн и частот линий генерации многочастотного ВКР в алмазах, возбуждаемого линией генерации  $1.064\text{ }\mu\text{m}$  твердотельного лазера  $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$  и его оптических гармоник с длинами волн  $0.532$ ,  $0.355$  и  $0.266\text{ }\mu\text{m}$ . Как показывают результаты исследований многочастотного ВКР в конденсированных средах, наиболее эффективное возбуждение ВКР осуществляется при использовании ультракоротких лазерных импульсов с длительностью  $20\text{--}80\text{ ps}$ . Согласно данным таблицы, в спектре многочастотного ВКР ожидается присутствие семи стоковых (S) и антистоковых (AS) компонент, эквидистантно сдвинутых друг относительно друга на частоту фундаментальной моды  $\Delta\nu = 1332\text{ cm}^{-1}$ . Отметим, что при возбуждении ВКР в алмазах импульсным ИК излучением ( $\lambda = 1.064\text{ }\mu\text{m}$ ) ожидается

генерация в среднем и дальнем ИК диапазонах, вплоть до длины волны  $135\text{ }\mu\text{m}$  ( $\nu = 74\text{ cm}^{-1}$ ), соответствующей терагерцовой области спектра, перспективной для исследований биологических и медицинских объектов.

## Заключение

Таким образом, в настоящей работе зарегистрированы спектры КР микрокристаллических алмазных порошков с размерами частиц  $d = 1\text{--}600\text{ }\mu\text{m}$ . Микрокристаллы алмазов, присутствующие в порошке, имели вид микрорезонаторов, обеспечивающих пленение возбуждающего излучения и КР. В результате полный спектр спонтанного КР в кристаллическом алмазном порошке в диапазоне  $50\text{--}2750\text{ cm}^{-1}$  удавалось регистрировать при небольших экспозициях:  $10\text{--}100\text{ s}$ . При размерах алмазных зерен  $d \sim 1\text{ }\mu\text{m}$  в спектре КР присутствовал большой непрерывный фон, который является результатом проявления однофононных и двухфононных акустических процессов. При переходе к образцам с размером  $d = 10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$  в спектре КР, кроме фундаментальной моды с частотой  $1332\text{ cm}^{-1}$ , были обнаружены дополнительные полосы  $1401$  и  $2620\text{ cm}^{-1}$ , обусловленные двухфононными переходами и проявлением связанного состояния двух фононов с большой энергией связи. При этом интенсивность в спектре КР пика, соответствующего связанному состоянию ( $2620\text{ cm}^{-1}$ ), оказалась всего лишь в пять раз меньше интенсивности КР на фундаментальной моде. Для образцов микрокристаллов с размерами  $d = 150\text{--}600\text{ }\mu\text{m}$  в спектре непрерывный фон практически отсутствовал, и интенсивность КР на фундаментальной моде существенно превышала аналогичную величину для микрокристаллов меньших размеров.

На основании проведенных исследований спонтанного КР в микрокристаллических алмазных порошках сделан вывод о перспективности их использования для возбуждения линейки частот при возбуждении многочастотного ВКР интенсивными лазерными импульсами наносекундного или пикосекундного диапазонов с различными длинами волн:  $\lambda = 1.064$ ,  $0.532$ ,  $0.355$  и  $0.266\text{ }\mu\text{m}$ . При этом ожидается присутствие большого числа линий генерации в широкой области спектра (от дальней ИК области до ультрафиолетового диапазона), эквидистантно сдвинутых по частоте на  $1332\text{ cm}^{-1}$ .

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 16-08-00618, 16-02-00488, 18-02-00181, 18-32-00259) и China Scholarship Council.

## Список литературы

- [1] *Krishnan R.S.* // Proc. Indian Acad. Sci. Sec. A. 1947. V. 26. P. 399–418. doi 10.1007/BF03170898
- [2] *Bundy F.P., Hall H.T., Strong H.M., Wentorf R.H.* // Nature. 1955. V. 176. P. 51–55. doi 10.1038/176051a0
- [3] *Knight D.S., White W.B.* // J. Mater. Res. 1989. V. 4. N 2. P. 385–393. doi 10.1557/JMR.1989.0385
- [4] *Solin S.A., Ramdas A.K.* // Phys. Rev. B. 1970. V. 1. N 4. P. 1687–1698. doi 10.1103/PhysRevB.1.1687
- [5] *Orwa J.O., Nugent K.W., Jamieson D.N., Prawer S.* // Phys. Rev. B. 2000. V. 62. N 9. P. 5461–5472. doi 10.1103/PhysRevB.62.5461
- [6] *Yoshikawa M., Mori Y., Maegawa M., Katagiri G., Ishida H., Ishitani A.* // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. N 24. P. 3114–3116. doi 10.1063/1.109154
- [7] *Аргунов К.П., Горелик В.С., Резник Б.И., Ротнер Ю.М., Фаїзуллоев Т.Ф.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1991. № 9. С. 21–24; *Argunov K.P., Gorelik V.S., Reznik B.I., Rotner Yu.M., Faizullov T.F.* // Sov. Phys. Lebedev Inst. Rep. 1991. N 9. P. 18.
- [8] *Palnichenko A.V., Jonas A.M., Charlier J.-C., Aronin A.C., Issl J.-P.* // Nature. 1999. V. 402. P. 162–165. doi 10.1038/46000
- [9] *Nasdala L., Steger S., Reissner C.* // Lithos. 2016. V. 265. P. 317–327. doi 10.1016/j.lithos.2016.03.009
- [10] *Углов В.В., Шиманский В.И., Русальский Д.П., Самцов М.П.* // ЖПС. 2008. Т. 75. № 4. С. 524–528; *Uglov V.V., Shimanski V.I., Rusalsky D.P., Samtsov M.P.* // J. Appl. Spectrosc. 2008. V. 75. N 4. P. 546–549. doi 10.1007/s10812-008-9078-6
- [11] *Горелик В.С., Иго А.В., Миков С.Н.* // ЖЭТФ. 1996. № 109. С. 2141–2149; *Gorelik V.S., Igo A.V., Mikov S.N.* // JETP. 1996. V. 82. N 6. P. 1154–1158.
- [12] *Lee K.C., Sussman B.J., Sprague M.R., Michelberger P., Reim K.F., Nunn J., Langford N.K., Bustard P.J., Jaksch D., Walmsley I.A.* // Nature Photonics. 2011. V. 6. P. 11–14. doi 10.1038/NPHOTON.2011.296
- [13] *May P.W., Smith J.A., Rosser K.N.* // Diamond Relat. Mater. 2008. V. 17. P. 199–203. doi 10.1557/PROC-1039-P15-02
- [14] *Okada K., Kanda H., Komatsu S., Matsumoto S.* // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. N 8. P. 1674–1678. doi 10.1063/1.373870
- [15] *Ferrari A.C., Robertson J.* // Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 121405. doi 10.1103/PhysRevB.63.121405
- [16] *Gyollai I., Gucsik A., Veres M., Koós M., Nagy S., Bérczi S.* // Spectrosc. Lett. 2012. V. 45. N 2. P. 151–155. doi 10.1080/00387010.2011.627527
- [17] *May P.W., Ludlow W.J., Hannaway M., Heard P.J., Smith J.A., Rosser K.N.* // Diamond Relat. Mater. 2008. V. 17. P. 105–117. doi 10.1016/j.diamond.2007.11.005
- [18] *Williams R.J., Kitzler O., Bai Z., Sarang S., Jasbeer H., McKay A., Antipov S., Sabella A., Lux O., Spence D.J., Mildren R.P.* // J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2018. V. 24. N 5. P. 1602214. doi 10.1109/JSTQE.2018.2827658
- [19] *Olson J.R., Pohl R.O., Vandersande J.W., Zoltan A., Anthony T.R., Banholzer W.F.* // Phys. Rev. B. Condens. Matter. 1993. V. 47. N 22. P. 14850–14856. doi 10.1103/PhysRevB.47.14850
- [20] *Kaminskii A.A., Ralchenko V.G., Konov V.I.* // Letter JETP. 2004. V. 80. N 4. P. 298–301. doi 10.1134/1.1813684
- [21] *Lux O., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., Konov V.I., Sharonov G.V., Shirakawa A., Yoneda H., Rhee H., Eichler H.J., Mildren R.P., Kaminskii A.A.* // Laser Phys. Lett. 2014. V. 11. P. 086101. doi 10.1088/1612-2011/11/8/086101
- [22] *Granados E., Spence D.J., Mildren R.P.* // Optics Express. 2011. V. 19. N 11. P. 10857–10863. doi 10.1364/OE.19.010857
- [23] *Kaminskii A.A., Hemley R.J., Lai J., Yan C.S., Mao H.K., Ralchenko V.G., Eichler H.J., Rhee H.* // Laser Phys. Lett. 2007. V. 4. N 5. P. 350–353. doi 10.1002/lapl.200610127
- [24] *Mildren R.P., Butler J.E., Rabeau J.R.* // Optics Express. 2008. V. 16. N 23. P. 18950–18955. doi 10.1364/OE.16.018950
- [25] *Feve J.-P.M., Shortoff K.E., Bohn M.J., Brasseur J.K.* // Optics Express. 2011. V. 19. N 2. P. 913–922. doi 10.1364/OE.19.000913
- [26] *Bohren C.F., Huffman D.R.* Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley-Interscience, 1983. 533 p.; *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 623 с.
- [27] *Zaitsev A.M.* Optical Properties of Diamond. A Data Handbook. Berlin: Springer, 2001. 486 p.
- [28] *Klein C.A., Hartnett T.M., Robinson C.J.* // Phys. Rev. B. 1992. V. 45. N 22. P. 12854–12863. doi 10.1103/PhysRevB.45.12854
- [29] *Windl W., Pavone P., Karch K., Schutt O., Strauch D., Giannozzi P., Baroni S.* // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. N 5. P. 3156–3163. doi 10.1103/PhysRevB.48.3156