Письма в ЖЭТФ, том 104, вып. 5, с. 356 – 361

Моноизотопные ^{12}C- и ^{13}C-алмазы – новейшие ВКР-активные кристаллы, как новый этап в развитии алмазной фотоники (diamond photonics)

А. А. Каминский[+1)], *В. Г. Ральченко*[*], *Х. Ёнеда*[×], *А. П. Большаков*[*], *А. В. Инюшкин*[○]

[+]*Институт кристаллографии РАН, 119333 Москва, Россия*

[*]*Институт общей физики РАН, 119991 Москва, Россия*

[×]*Institute for Laser Science of the University of Electro-Communications, Chofu-Tokyo, 182-8585 Japan*

[○]*НИЦ "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 14 июля 2016 г.

После переработки 21 июля 2016 г.

Сообщаем о синтезе CVD-методом монокристаллов моноизотопных ^{12}C- и ^{13}C-алмазов и об их импульсивном вынужденном комбинационном рассеянии ("*impulsive stimulated Raman scattering*" – ISRS). Представлены данные измерений теплопроводности алмазов ^{12}C и с природным составом изотопов $^{\mathrm{nat}}$C. Возбуждение и исследование стоксова разнофононного $\chi^{(3)}$-нелинейного лазинга в алмазной "тройке" ^{12}C-, ^{13}C и $^{\mathrm{nat}}$C рассматриваем как новый этап в развитии алмазной фотоники (*diamond photonics*).

DOI: 10.7868/S0370274X16170124

1. Алмаз был в числе трех природных кристаллов (также кальцит, $CaCO_3$ и α-сера, α-S_8), в которых в 1963 г. было обнаружено явление вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [1]. В этой пионерской работе при возбуждении алмаза импульсами наносекундного лазерного излучения было зарегистрировано несколько компонентов его стоксовой и антистоксовой $\chi^{(3)}$-нелинейной генерации. Второй шаг в исследовании ВКР ("simulated Raman scattering" – SRS) в алмазе был сделан в 1970 г. авторами [2] при анализе углового распределения его антистоксовой генерации. В течение почти сорока последующих лет, интерес к ВКР в алмазе не проявлялся в научных публикациях. Этот исторический факт вызывает удивление, поскольку многие другие физические свойства монокристаллов природного алмаза, включая оптические и спектроскопические, все эти годы были объектами пристального внимания исследователей (см., например, [3–5]). К этому уместно добавить, что кристаллы алмазов, особенно природные, всегда были в обильной доступности для ВКР-исследований.

Чуть более 10 лет назад нас заинтересовала возможность изучения $\chi^{(3)}$-нелинейно оптических процессов в алмазах, синтезируемых методом осаждения из газовой фазы ("*chemical vapor deposition*", CVD), которые по сравнению с природными алмазами обладают более высокой чистотой и более широким исследовательским и прикладным потенциалом [6]. За обнаруженной нами в 2004 г. стационарной (*steady-state*) ВКР-генерации в поликристаллическим CVD-алмазе последующие наши эксперименты дали новые данные об этом эффекте как в поли-, так и в монокристаллической его модификациях [7–9] и послужили определенным стимулом для постановки в ряде научных центрах мира фундаментальных и прикладных ВКР-исследований алмазов (природных и синтетических) в области лазерной физики, нелинейной оптики и физики твердого тела (см., например, [10–17]). В этих публикациях были получены новые знания о когерентных оптических фононах, о $\chi^{(3)}$-коллинеарной генерации октавной протяженности стоксовых частот, природе двухфононного когерентного антистоксова рамановского рассеяния, первом алмазном ВКР-конвертере лазерных частот (*diamond Raman laser*) и др. Здесь важно отметить, что до сих пор во всех работах по изучению эффекта $\chi^{(3)}$-нелинейного лазинга в алмазах, как в природных, так и в синтезированных, CVD-методом или техникой высоких давлений ("*high-pressure/high-temperature*" – HPHT) использовались кристаллы с природным содержанием стабильных изотопов углерода ^{12}C (98.93 %) и ^{13}C (1.07 %), т.е. алмазы с "изотопным разупорядочением" (со случайным "природ-

1)e-mail: kaminalex@mail.ru

ным" распределением атомов изотопов углерода по C_1-позициям кубической решетке алмаза). Расчеты и эксперименты показали (см., например, [18–27]) показали, что устранение "изотопного разупорядочения" улучшает физические свойства кристаллов алмаза и расширяет их прикладные возможности. Так, при обогащении алмаза по изотопу углерода ^{12}C до 99.96 % и выше его теплопроводность существенно возрастает (до 50 %, [18–20]) за счет уменьшения рассеяния фононов на атомах примесного изотопа ^{13}C. Моноизотопные ^{12}C- и ^{13}C-алмазы характеризуются другой ценной фундаментальной особенностью, частоты их оптических F_{2g}-фононных мод различаются на значительную величину ~ 52.2 см$^{-1}$ [22, 28] в согласии с зависимостью частоты оптического фонона от массы атома M в решетке $\sim M^{-1/2}$. ^{nat}C-алмаз с содержанием изотопов ^{12}C и ^{13}C очень близок по вибронным свойствам к ^{12}C-алмазу, измеренная разница их F_{2g}-фононных мод составляет около 0.9 см$^{-1}$. В настоящем письме представлены сведения о синтезе монокристаллов CVD-алмазов ^{nat}C, ^{12}C и ^{13}C, их теплопроводности, и результаты первого этапа наших исследований $\chi^{(3)}$-нелинейного стоксового импульсивного вынужденного комбинационного рассеяния (ИВКР) в этой "алмазной тройке" (в краткой форме часть предварительных результатов приведена в работах [29, 30]).

2. Монокристаллы ^{nat}C-, ^{12}C- и ^{13}C-алмазов были синтезированы CVD-методом путем осаждения в СВЧ плазме (2.45 ГГц) в смесях метан-водород (CH_4/H_2) на установке ARDIS-100 [31]. Гомоэпитаксиальный рост всех трех разновидностей алмазов проводили на ориентированных монокристальных (100)-подложках HPHT-алмаза типа Ib (концентрация азота $\sim 10^{19}$ см$^{-3}$) с использованием "нормального" метана, либо обогащенного по изотопу ^{12}C до 99.96 % метана ($^{12}CH_4$) или метана $^{13}CH_4$ (также 99.96 %). CVD-процесс осуществляли при параметрах: расход CH_4–10 ст. $\cdot$ см^3 $\cdot$ мин$^{-1}$, расход H_2–490 ст. $\cdot$ см^3 $\cdot$ мин$^{-1}$, давление 130 Торр, СВЧ мощностью 3350 Вт, температура подложки ~ 950 °C. Синтезированный слой обогащенного ^{12}C-алмаза отделяли от подложки лазерной резкой, далее из него полировкой был получен образец в виде параллелепипеда размером $3.3 \times 2.8 \times 0.82$ мм^3, в котором большие плоскости имели ориентацию {100}, остальные грани – ориентацию {110}. Определенная по методике [31] концентрация азота в этом кристалле составила не более 10 ppb (1 ppb = 1.76×10^{14} см$^{-3}$). Образец ^{13}C-алмаза представлял собой ~ 95-мкм слой, выращенный на подложке из HPHT-алмаза ^{nat}C толщиной ~ 570 мкм. Этот алмазный "сандвич" для ВКР-эксперимента имел поперечные размеры 4.6×4.6 мм^2 с аналогичными кристаллографическими ориентациями, что и образец ^{12}C-алмаза. В табл. 1 для сравнения приведены некоторые физические свойства "тройки" CVD-алмазов ^{nat}C, ^{12}C и ^{13}C. Теплопроводность образцов монокристаллов алмаза измеряли методом продольного теплового потока по методике аналогично описанной в [27, 37]. В нашей работе для измерения градиента температуры в образце использовали дифференциальную термопару. На рис. 1 представлены температурные

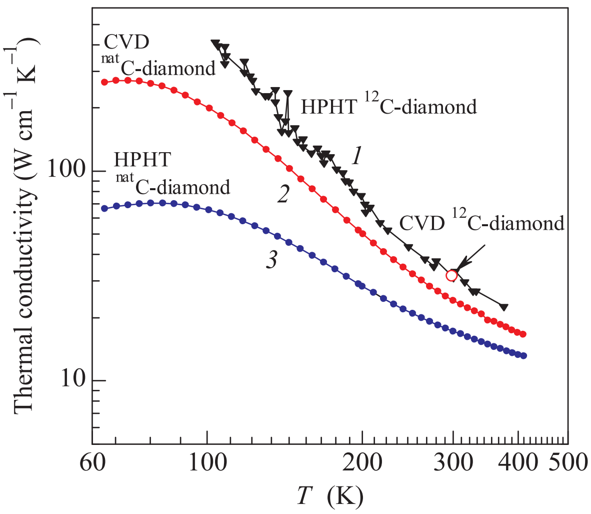

Рис. 1. (Цветной онлайн) Температурные зависимости теплопроводности монокристаллов алмаза в логарифмическом масштабе для изотопически обогащенного HPHT-алмаза ^{12}C (99.9 %) [20] (*1*), и для CVD-алмаза (*2*) и HPHT-алмаза типа Ib (*3*) с природным составом изотопов (^{nat}C), измеренные в настоящей работе. Величина теплопроводности $k = 31.7$ Вт $\cdot$ см$^{-1}$ $\cdot$ К$^{-1}$ при комнатной температуре для синтезированного нами CVD-алмаза ^{12}C (99.96 %) показана увеличенным красным кружком

зависимости $k(T)$ образцов CVD-алмаза ^{nat}C и подложки HPHT-алмаза ^{nat}C (образцы ^{nat}C измеряли в интервале температур ^{12}C = 60–410 К, а кристалл ^{12}C только при $T \sim 300$ К). При комнатной температуре теплопроводность CVD-алмаза достигает $^{nat}k \sim 23$ Вт $\cdot$ см$^{-1}$ $\cdot$ К$^{-1}$, а в максимуме $^{nat}k_{max}(70\,\text{K}) \sim 270$ Вт $\cdot$ см$^{-1}$ $\cdot$ К$^{-1}$, что примерно вдвое превышает рекордное значение $^{nat}k_{max} \sim 110$ Вт $\cdot$ см$^{-1}$ $\cdot$ К$^{-1}$ для природных или синтетических HPHT-алмазов, о которых когда либо сообщалось ранее (см., например, [38]). Повышенная теплопроводность для CVD-алмаза ^{nat}C обусловлена, в первую очередь, низким содержанием примесного азота. Кривая теплопроводности $k(T)$

Таблица 1. Некоторые физические свойства CVD-алмазов с природным ^{nat}C и изотопически обогащенным составом ^{12}C и ^{13}C при комнатной температуре

Свойство	CVD-алмаз		
	^{nat}C	^{12}C	^{13}C
Содержание изотопа ^{13}C, %	1.07	~ 0.04	~ 99.96
Пространственная группа	$O_p^7 - Fm\bar{3}d$ (№ 227)		
Параметр элементарной ячейки, Å	3.56712 [29]	3.56712(5) [21]	3.56658(7) [21]
Нелинейность	$\chi^{(3)}$		
Атомная плотность, 10^{23} см$^{-3}$	1.7625 [32]	1.7625	1.7632 [32]*
Теплопроводность k, Вт $\cdot$ см$^{-1} \cdot$ K^{-1}	22 [33]	31.7 [29]	22 [35]**
Время фононной релаксации T_2, пс***	≤ 4.6****	≤ 6.2	≤ 6.2
Частота ВКР-активной моды, см$^{-1}$ (ТГц)	~ 1332.3 [34] (~ 40.37)	~ 1333.2 [29] (~ 40.4)	~ 1281 [29] (~ 42.7)

*По утверждению авторов [32], это наибольшая атомная плотность среди известных твердых тел.
**В статье [35] приведены экспериментальные данные по теплопроводности HPHT-алмаза с содержанием ^{13}C 99.0 % при комнатной температуре величина ~ 22 Вт $\cdot$ см$^{-1}$ K^{-1}. Эта величина близка к величинам, характерным для алмазов ^{nat}C в силу практически равенства концентраций изотопной примеси в этих двух случаях. Не видно причин, по которым следует ожидать более слабого в сравнении с алмазом ^{12}C изотопного эффекта в теплопроводности при дальнейшем обогащении (> 99.9 %) алмаза изотопом ^{13}C, однако о работах в этом направлении сведения отсутствуют.
***Оценено по ширине линий спонтанного комбинационного рассеяния (КР), $T_2 \sim (\pi \Delta\nu_R)^{-1}$.
****По данным [36] $T_2 \sim 6.8$ пс ($\Delta\nu_R \sim 1.56$ см$^{-1}$) для HPHT-алмаза типа Ib.

для HPHT-алмаза ^{nat}C, в котором концентрация азота на четыре порядка выше, проходит существенно ниже, и при $T \sim 300$ K теплопроводность составляла $^{nat}k \sim 17.4$ Вт $\cdot$ см$^{-1} \cdot$ K^{-1}. Для CVD-алмаза ^{12}C (99.96 %) при комнатной температуре нами была получена величина $\mathbf{k} \sim 31.7$ Вт $\cdot$ см$^{-1} \cdot$ K^{-1}, что на 44 % превышает теплопроводность монокристалла CVD-алмаза ^{nat}C. Отметим, что этот результат для CVD-алмаза ^{nat}C находится в хорошем согласии с данными [20] для HPHT-алмаза, обогащенного до 99.0 % по изотопу ^{12}C. Ввиду слишком малой толщины слоя нашего ^{13}C алмаза, измерения теплопроводности для него не проводились.

3. Импульсное ВКР в CVD-алмазах (^{nat}C, ^{12}C и ^{13}C) изучалось с использованием лазерной установки (рис. 2), состоящей из Yb-пикосекундного лазера (Fianium FP1060, $\lambda_p \sim 1.0645$ мкм, $\tau_p \sim 3$ пс, $f \sim 80$ МГц, мощность генерации ~ 0.5 Вт), стретчера (“расширителя”) импульсов, Yb-волоконного усилителя с лазерным диодом DC-200/40-PZ-Si накачки (на схеме не показан), импульсного компрессора, и спектрометра на базе дифракционного монохроматора. Перед усилением затравочные импульсы (*seed pulses*) задающего генератора “расширяются” в стретчере до длительности $\tau_p \sim 50$ пс (с возможностью изменения их частотной составляющей фильтром F1). Для предотвращения нежелательного влияния поляризованного излучения усилителя на стретчер между ними установлен оптический изолятор (*Faraday rotator* – FR). “Ширина” усиленных импульсов до уровня 10 Вт контролируется дополнительным частотным фильтром F2 в компрессоре. Средняя мощность излучения фемтосекундных импульсов накачки, направляемого линзой $L_1 (f = 100$ мм) на образец алмазов составляла от 2 до 7 Вт, при этом ее максимальная плотность равнялась $\sim 10^{11}$ Вт $\cdot$ см$^{-2}$, что было ниже порога оптического разрушения кристаллов. Излучение $\chi^{(3)}$-нелинейного ИВКР-лазинга алмазов фокусировалось линзами $L_2 (f = 50$ мм) и $L_3 (f = 10$ мм) на щель спектрометра. Установленный между этими фильтрами узкополосный режекторный фильтр (*notch filter* – NF) значительно уменьшал влияние мощного излучения накачки ($\lambda_p \sim 1.0645$ мкм) на характер стоксовой $\chi^{(3)}$-генерации алмазов. ИВКР-спектры регистрировались ИК-детектором InGaAs (G10768-1024D). На рис. 2 рядом с компонентами установки показаны их основные функциональные спектрально-лазерные параметры. Короткие импульсы накачки $\tau_p \sim 600$ фс обеспечивали режим ИВКР, когда $\tau_p < T_2 \sim (4.6{-}6.2)$ пс, и позволяли надежно регистрировать разность частот ~ 51.3 см$^{-1}$ (~ 1.554 ТГц) стоксовых линий алмазного “сандвича” ^{13}C + ^{nat}C. Избранные спектры ИВКР-лазинга для тройки CVD-алмазов показаны на рис. 3. Спектральный состав ИВКР-спектров отражает “родственную” одинаковость кристаллических структур ^{12}C-, ^{13}C- и ^{nat}C-алмазов. Различие

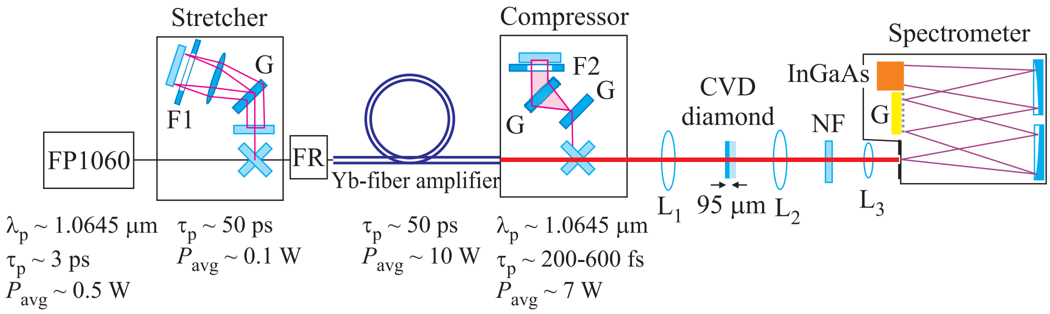

Рис. 2. (Цветной онлайн) Упрощенная схема экспериментальной фемтосекундной лазерной установки для изучения ИВКР спектров CVD-алмазов: FR – оптический изолятор (фарадеевский вращатель); F1 и F2 – частотные фильтры; L_1–L_3 – линзы; G – дифракционные решетки; InGaAs – ИК-детектор

масс ядер изотопов углерода ^{12}C и ^{13}C проявляется на размерах элементарных ячеек алмазов и на длине тетраэдрических связей их атомов [21], результатом является разность частот $\Delta\omega \sim 52.2\,\text{см}^{-1}$ их колебаний F_{2g}-симметрии. Алмаз кристаллизуется в O_h^5 – пространственной группе с восемью атомами углерода в элементарной ячейке в позициях C_1 (см., например, [32]). Их структуру можно представить как две взаимопроникающие кубические гранецентрованные решетки (см. вставку на рис. 3а, где они показаны разным цветом), смещенные относительно друг друга по главной диагонали куба в направлении [111] на одну четверть его длины. Примитивная (*Bravais*) ячейка алмазов с двумя атомами углерода ($Z^{\text{Br}} = 2$), обладающая шестью ($3\text{N}Z^{\text{Br}} = 6$) вибронными степенями свободы, характеризуется двумя типами колебательных мод $\Gamma_6 = F_{2g} + F_{1u}$ [34]. Из них трижды вырожденные колебания F_{2g}-симметрии представляют оптические моды, которые являются следствием строго направленной вибрацией атомов углерода друг против друга двух отмеченных выше решеток алмаза (см. вставку на рис. 3а). Эти колебания и являются промоутирующими $\chi^{(3)}$-нелинейный лазинг в ^{12}C-, ^{13}C- и $^{\text{nat}}$C-алмазах. Высокая частота ВКР-мод $\omega_{\text{SRS}}(^{12}\text{C}) \sim 1333.2\,\text{см}^{-1}$, $\omega_{\text{SRS}}(^{13}\text{C}) \sim 1281\,\text{см}^{-1}$ и $\omega_{\text{SRS}}(^{\text{nat}}\text{C}) \sim 1332.3\,\text{см}^{-1}$ изученных алмазов обусловлена сильной ковалентной связью С–С в их структурных тетраэдрах с sp^3-гибридизацией и относительно малой массой атомов углерода (см., например, [22]). Близость частот ($\Delta\omega \sim 0.9\,\text{см}^{-1}$) ВКР-активных мод ^{12}C- и $^{\text{nat}}$C-алмазов обусловлена малым (естественным) содержанием в $^{\text{nat}}$C-алмазе изотопа ^{13}C ($\sim 1\,\%$). Алмазы, как моноизотопные, так и с различным (контролируемым) содержанием изотопов ^{12}C и ^{13}C, выращенные CVD или HTHP методами, обладают рядом прикладных возможностей. В частности, они перспективны для разработки терагерцовых лазерных ВКР-источников на основе нелинейного смешения их стоксовых частот. Такая спектральная возможность подтверждается результатами изучения спонтанного КР "изотопически смешанных" алмазов [39, 40].

4. В результате проведенных экспериментов получена "тройка", т.е. полная изотопная серия ВКР-активных ^{12}C-, ^{13}C- и $^{\text{nat}}$C-алмазов, которые, обладая уникальными физическими свойствами, обещают новые возможности в фундаментальных и прикладных $\chi^{(3)}$-нелинейно лазерных исследованиях. Так, моноизотопные ^{12}C-алмазы с рекордно высокой теплопроводностью являются очевидными и незаменимыми кандидатами для создания на их основе нового поколения сверхмощных ВКР-лазеров и ВКР-лазерных конвертеров в широком диапазоне длин волн. Излучение разностных частот при нелинейном смешении частот $\chi^{(3)}$-стоксовой ИК-генерации алмазов ^{12}C и ^{13}C ($\Delta f \sim 1.58$ ТГц – $\Delta\omega \sim 52.2\,\text{см}^{-1}$) и $^{\text{nat}}$C и ^{13}C ($\Delta f \sim 1.554$ ТГц – $\Delta\omega \sim 51.3\,\text{см}^{-1}$) – это мост от лазеров когерентного "света" к новым типам источников когерентных терагерцовым микроволн. Эта перспектива охватывает все режимы $\chi^{(3)}$-нелинейной генерации "алмазной тройки" – фемтосекундный ИВКР, пико- и наносекундный ВКР, а также и ВКР-непрерывный их лазинг. Использование двухизотопных алмазов (с разной концентрацией изотопов ^{12}C и ^{13}C) даст возможность создавать терагерцовые источники с другими частотами генерации. Результаты осуществленных $\chi^{(3)}$-нелинейно лазерных исследований ^{12}C-, ^{13}C- и $^{\text{nat}}$C-алмазов являются фундаментальным вкладом в развитие алмазной фотоники.

Работа выполнена в рамках исследовательских планов институтов соавторов, а также мотивировалась: программой Президиума РАН "Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения" (для А.А.К.) и "Photon frontier network

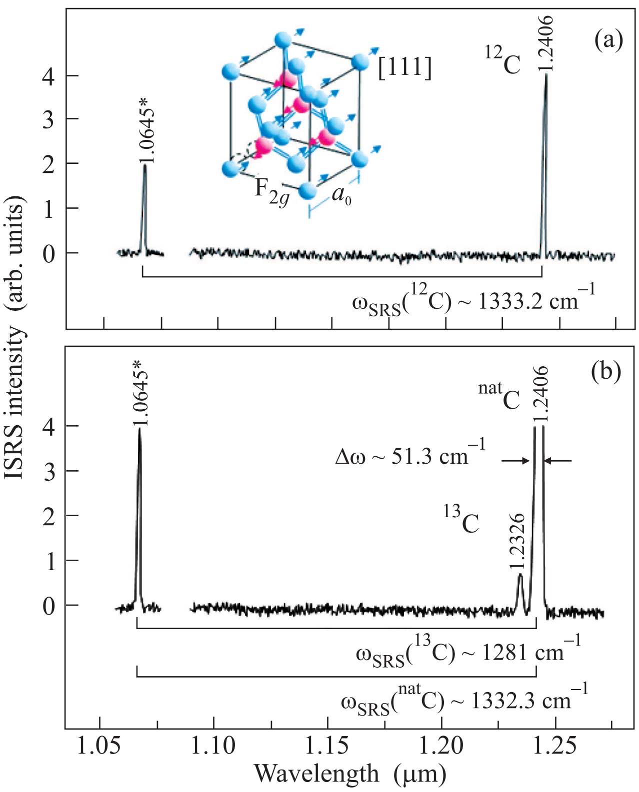

Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектры (“стоксовы” фрагменты) фемтосекундного ИВКР-лазинга CVD-алмазов: моноизотопного ^{12}C (a) и алмазного “сандвича” (b) из моноизотопного ^{13}C и с “изотопным разупорядочением” ^{nat}C, зарегистрированные ИК-фотосенсором InGaAs-CMOS при комнатной температуре с использованием безрезонаторной (*cavity-free*) схемы возбуждения с накачкой излучением ($\lambda_p \sim$ 10645 мкм) Yb-волоконного лазера. Длины волн линий даны в мкм (линии накачки отмечены звездочкой). Энергетические зазоры между линиями накачки и стоксовой генерации, связанные с ВКР-активными колебательными модами алмазов, обозначены квадратными скобками. Вставка на рис. (a) показывает тетраэдрические связи атомов углерода в структуре алмазов и поясняет их F$_{2g}$-колебания (см. текст)

program of the Ministry of education, culture, sport, science and technology, Japan” (для Х.Ё., H. Yoneda). Измерения теплопроводности выполнены (А.В.И.) при поддержке РФФИ (грант # 16-07-00979) на оборудовании Ресурсного центра электрофизических методов НИЦ “Курчатовский институт”. В.Г.Р. и А.П.Б. отмечают поддержку работы в части синтеза алмаза грантом РНФ # 14-12-01403.

1. G. Eckhard, D. P. Bortfeld, and M. Geller, Appl. Phys. Lett. **3**, 137 (1963).
2. A. K. McQuillan, W. R. L. Clements, and B. P. Stoicheff, Phys. Rev. A **1**, 628 (1970).
3. D. H. Douglas-Hamilton and E. D. Hoag, J. Opt. Soc. Am. **64**, 36 (1974).
4. R. W. Ditchburn, Opt. Lett. **29**, 355 (1982.
5. S. C. Rand and L. G. DeShazer, Opt. Lett. **10**, 481 (1985).
6. A. A. Kaminskii, V. G. Ralchenko, and V. I. Konov, JETP Lett. **80**, 267 (2004).
7. A. A. Kaminskii, V. G. Ralchenko, V. I. Konov, and H. J. Eichler, Phys. Stat. Sol. B **242**, R4 (2005).
8. A. A. Kaminskii, V. G. Ralchenko, and V. I. Konov, Laser Phys. Lett. **3**, 171 (2006).
9. A. A. Kaminskii, R. J. Hemley, J. Lai, C. S. Yam, H. K. Mao, V. G. Ralchenko, H. J. Eichler, and H. Rhee, Laser Phys. Lett. **4**, 350 (2007).
10. M. Zhi, X. Wang, and A. V. Sokolov, Opt. Express **16**, 12139 (2008).
11. R. P. Mildren, J. E. Butler, and J. R. Rabeau, Opt. Express **16**, 18950 (2008).
12. T. Kuroda, P. A. Zhokhov, K. Watanabe, K. Watanabe, A. M. Zheltikov, and K. Sakoda, Opt. Express **17**, 20794 (2009).
13. W. Lubeigt, G. M. Bonner, J. E. Hastie, M. D. Dawson, D. Burns, and A. J. Kemp, Opt. Express **18**, 16765 (2010).
14. J.-P. M. Feve, K. E. Shortoff, M. J. Bohn, and J. K. Brasseur, Opt. Express **19**, 913 (2011).
15. M. Jelínek, O. Kitzler, H. Jelínkova, J. Šulc, and M. Němec, Laser Phys. Lett. **9**, 35 (2012).
16. Q. Liu, Z. Ouyang, and S. Albia, Appl. Phys. B **113**, 457 (2013).
17. S. M. Pimenov, B. Neuenschwander, B. Jaggi, and V. Romano, Appl. Phys. A **114**, 1309 (2014).
18. T. R. Anthony, W. F. Banholzer, J. F. Fleischer, L. Wei, P. K. Kuo, R. L. Thomas, and R. W. Pryor, Phys. Rev. B **42**, 1104 (1990).
19. А. П. Жернов и А. В. Инюшкин, УФН **172**, 573 (2002).
20. L. Wei, P. R. Kuo, R. L. Thomas, T. R. Anthony, and W. F. Banholzer, Phys. Rev. Lett. **70**, 3764 (1993).
21. T. Yamanaka, S. Morimoto, and H. Kanda, Phys. Rev. B **49**, 9341 (1994).
22. R. Vogelgesang, A. K. Ramdas, S. Rodriguez, M. Grimsditch, and T. R. Anthony, Phys. Rev. B **54**, 3989 (1996).
23. R. Vogelgesang, A. D. Alvarenga, H. Kim, A. K. Ramdas, S. Rodriguez, M. Grimsditch, and T. R. Anthony, Phys. Rev. B **58**, 5408 (1998).
24. T. R. Anthony, J. F. Fleischer, J. R. Olson, and D. G. Cahil, J. Appl. Phys. **69**, 8122 (1991).
25. D. A. Broido, L. Lindsay, and A. Ward, Phys. Rev. B **86**, 115203 (2012).

26. K. Belay, Z. Etzel, D. G. Onn, and T. R. Anthony, J. Appl. Phys. **79**, 8336 (1996).
27. А. В. Инюшкин, В. Г. Ральченко, А. Н. Талденков, А. А. Артюхов, А. А. Артюхов, Я. М. Кравец, И. П. Гнидой, А. Л. Устинов, А. П. Большаков, А. Ф. Попович, А. В. Савельев, А. В. Хомич, В. А. Панченко, В. И. Конов, Краткие Сообщ. Физ. **11**, 36 (2007).
28. A. K. Ramdas and S. Rodriguez, Phys. Stat. Sol. B **215**, 71 (1999).
29. А. А. Каминский, В. Г. Ральченко, А. П. Большаков, А. В. Инюшкин, ДАН **464**, 676 (2015).
30. А. А. Каминский, В. Г. Ральченко, А. П. Большаков, А. А. Хомич, ДАН **465**, 665 (2015).
31. A. P. Bolshakov, V. G. Ralchenko, V. Y. Yurov, A. F. Popovich, I. A. Antonova, A. V. Khomich, I. I. Vlasov, E. E. Ashkinazi, S. G. Ryzhkov, A. V. Vlasov, and A. A. Khomich, Diamond Relat. Mater. **62**, 49 (2016).
32. H. Holloway, K. C. Hass, M. A. Tamor, T. R. Anthony, and W. F. Banholzer, Phys. Rev. B **44**, 7123 (1991).
33. R. S. Balmer, J. R. Brandon, C. L. Clewes, H. K. Dhillon, J. M. Dodson, I. Friel, P. N. Inglis, T. D. Madgwick, M. L. Markham, T. P. Mollart, N. Perkins, G. A. Scarsbrook, D. J. Twitchen, A. J. Whitehead, J. J. Wilman, and S. M. Woollard, J. Phys.: Cond. Matt. **21**, 364221 (2009).
34. O. Lux, V. G. Ralchenko, A. P. Bolshakov, V. I. Konov, V. I. Sharonov, A. Shirakawa, H. Yoneda, H. Rhee, H. J. Eichler, R. P. Mildren, and A. A. Kaminskii, Laser Phys. Lett. **11**, 086101 (2014).
35. T. R. Anthony and W. F. Banholzer, Diamond Relat. Mater. **1**, 717 (1992).
36. F. C. Waldermann, B. J. Sussman, J. Nunn, V. O. Lorenz, K. C. Lee, K. Surmacz, K. H. Lee, D. Jaksch, I. A. Walmsley, P. Spizziri, P. Olivero, and S. Prawer, Phys. Rev. B **78**, 155201 (2008).
37. А. В. Инюшкин, А. Н. Талденков, В. Г. Ральченко, В. И. Конов, А. В. Хомич, Р. А. Хмельницкий, ЖЭТФ **134**, 544 (2008).
38. R. Berman, P. R. W. Hudson, and M. Martinez, J. Phys. C: Solid State Phys. **8**, L430 (1975).
39. R. M. Chrenko, J. Appl. Phys. **63**, 5873 (1988).
40. K. C. Hass, M. A. Tamor, T. R. Anthony, and W. F. Banholzer, Phys. Rev. B **45**, 7171 (1992).