Моноизотопные ¹²С- и ¹³С-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

 $^{ imes}$ 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 ¹²C- и ¹³C-алмазов и об их импульсивном вынужденном комбинационном рассеянии ("*impulsive stimulated Raman scattering*" – ISRS). Представлены данные измерений теплопроводности алмазов ¹²C и с природным составом изотопов ^{nat}C. Возбуждение и исследование стоксова разнофононного $\chi^{(3)}$ -нелинейного лазинга в алмазной "тройке" ¹²C-, ¹³C и ^{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, CaCO₃ и α -сера, α -S₈), 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 ВКРисследований.

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/hightemperature" – HPHT) использовались кристаллы с природным содержанием стабильных изотопов углерода ¹²С (98.93%) и ¹³С (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 ¹²С до 99.96 % и выше его теплопроводность существенно возрастает (до 50 %, [18-20]) за счет уменьшения рассеяния фононов на атомах примесного изотопа 13 С. Моноизотопные ¹²С- и ¹³С-алмазы характеризуются другой ценной фундаментальной особенностью, частоты их оптических F2a-фононных мод различаются на значительную величину $\sim 52.2 \,\mathrm{cm}^{-1}$ [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 ¹²С и ¹³С очень близок по вибронным свойствам к ¹²С-алмазу, измеренная разница их F_{2g} -фононных мод составляет около $0.9 \,\mathrm{cm}^{-1}$. В настоящем письме представлены сведения о синтезе монокристаллов CVD-алмазов ^{nat}C, ¹²C и ¹³C, 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-, ¹²C- и ¹³С-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 НРНТ-алмаза типа Ib (концентрация азота $\sim 10^{19} \, \mathrm{cm}^{-3}$) с использованием "нормального" метана, либо обогащенного по изотопу 12 С до 99.96 % метана (12 CH₄) или метана 13 CH₄ (также 99.96%). CVD-процесс осуществляли при параметрах: расход CH_4 -10 ст. · см³ · мин⁻¹, расход $H_2 - 490 \,\mathrm{ct. \cdot cm^3 \cdot мин^{-1}}$, давление 130 Торр, CBЧ мощностью 3350 Вт, температура подложки ~ 950 °C. Синтезированный слой обогащенного ¹²С-алмаза отделяли от подложки лазерной резкой, далее из него полировкой был получен образец в виде параллелепипеда размером $3.3 \times 2.8 \times 0.82 \, \mathrm{mm}^3,$ 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 = $1.76 \times 10^{14} \,\mathrm{cm}^{-3}$). Образец ¹³С-алмаза представлял собой ~95-мкм слой, выращенный на подложке из НРНТ-алмаза $^{\rm nat}{\rm C}$ толщиной $\sim\!570\,{\rm мкм}.$ Этот алмазный "сандвич" для ВКР-эксперимента имел поперечные размеры $4.6 \times 4.6 \text{ мм}^2$ с аналогичными кристаллографическими ориентациями, что и образец ¹²С-алмаза. В табл. 1 для сравнения приведены некоторые физические свойства "тройки" СVD-алмазов ^{nat}C, ¹²С и ¹³С. 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 ¹²С (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 $k = 31.7 \,\mathrm{Br} \cdot \mathrm{cm}^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-1}$ при комнатной температуре для синтезированного нами CVD-алмаза ¹²С (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 ¹²C = 60–410 K, а кристалл ¹²C только при $T \sim 300 \text{ K}$). При комнатной температуре теплопроводность CVDалмаза достигает ^{nat} $k \sim 23 \text{ BT} \cdot \text{сm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, а в максимуме ^{nat} $k_{\text{max}}(70 \text{ K}) \sim 270 \text{ BT} \cdot \text{сm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, что примерно вдвое превышает рекордное значение ^{nat} $k_{\text{max}} \sim 110 \text{ BT} \cdot \text{сm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 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)

Свойство	CVD-алмаз		
	^{nat} C	$^{12}\mathrm{C}$	$^{13}\mathrm{C}$
Содержание изотопа 13 С, $\%$	1.07	~ 0.04	~ 99.96
Пространственная группа	$O_p^7 - Fm\bar{3}d ~(N^{\circ}227)$		
Параметр элементарной	3.56712 [29]	3.56712(5) [21]	3.56658(7) [21]
ячейки, Å			
Нелинейность	$\chi^{(3)}$		
Атомная плотность, 10^{23} см ⁻³	1.7625 [32]	1.7625	1.7632 [32]*
Теплопроводность k , $BT \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	22 [33]	31.7 [29]	22 [35]**
Время фононной релаксации	$\leq 4.6^{****}$	≤ 6.2	≤ 6.2
$T_2, \pi c^{***}$			
Частота ВКР-активной	~ 1332.3 [34]	~ 1333.2 [29]	~ 1281 [29]
моды, см ⁻¹ (ТГц)	(~ 40.37)	(~ 40.4)	(~ 42.7)

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

*По утверждению авторов [32], это наибольшая атомная плотность среди известных твердых тел.

**В статье [35] приведены экспериментальные данные по теплопроводности НРНТ-алмаза с содержанием ¹³С 99.0% при комнатной температуре величина $\sim 22 \,\mathrm{Bt} \cdot \mathrm{cm}^{-1} \,\mathrm{K}^{-1}$. 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 ¹²С изотопного эффекта в теплопроводности при дальнейшем обогащении (>99.9%) алмаза изотопом ¹³С, однако о работах в этом направлении сведения отсутствуют.

***Оценено по ширине линий спонтанного комбинационного рассеяния (КР), $T_2 \sim (\pi \Delta \nu_{\rm R})^{-1}$.

****По данным [36] Т₂ $\sim 6.8 \,\mathrm{nc} \; (\Delta \nu_{\mathrm{R}} \sim 1.56 \,\mathrm{cm}^{-1})$ для НРНТ-алмаза типа Ib.

для НРНТ-алмаза ^{nat}С, в котором концентрация азота на четыре порядка выше, проходит существенно ниже, и при $T \sim 300 \,\mathrm{K}$ теплопроводность составляла ^{nat} $k \sim 17.4 \,\mathrm{Br} \cdot \mathrm{cm}^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-1}$. Для CVD-алмаза ¹²С (99.96%) при комнатной температуре нами была получена величина $\mathbf{k} \sim 31.7 \,\mathrm{Br} \cdot \mathrm{cm}^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-1}$, 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 НРНТ-алмаза, обогащенного до 99.0% по изотопу ¹²С. Ввиду слишком малой толщины слоя нашего ¹³С алмаза, измерения теплопроводности для него не проводились.

3. Импульсное ВКР в CVD-алмазах (^{nat}C, ¹²C) и ¹³С) изучалось с использованием лазерной установки (рис. 2), состоящей из Yb-пикосекундного лазера (Fianium FP1060, $\lambda_{\rm p} \sim 1.0645$ мкм, $\tau_{\rm p} \sim 3$ пс, $f \sim 80 \,\mathrm{M}$ Гц, мощность генерации $\sim 0.5 \,\mathrm{Br}$), 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 "pacширяются" в стретчере до длительности $\tau_{\rm p}\sim 50\,{\rm nc}$ (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 $L_1(f = 100 \text{ мм})$ на образец алмазов составляла от 2 до 7 Вт, при этом ее максимальная плотность равнялась $\sim 10^{11}\,\mathrm{Bt}\,\cdot\,\mathrm{cm}^{-2},$ что было ниже порога оптического разрушения кристаллов. Излучение $\chi^{(3)}$ -нелинейного ИВКР-лазинга алмазов фокусировалось линзами $L_2(f = 50 \text{ мм})$ и $L_3(f = 10 \text{ мм})$ на щель спектрометра. Установленный между этими фильтрами узкополосный режекторный фильтр (notch filter – NF) значительно уменьшал влияние мощного излучения накачки ($\lambda_{\rm p} \sim 1.0645\,{\rm мкм}$) на характер стоксовой $\chi^{(3)}$ -генерации алмазов. ИВКРспектры регистрировались ИК-детектором InGaAs (G10768-1024D). На рис. 2 рядом с компонентами установки показаны их основные функциональные спектрально-лазерные параметры. Короткие импульсы накачки $\tau_{\rm p} \sim 600\,{\rm dc}$ обеспечивали режим ИВКР, когда $\tau_{\rm p} < T_2 \sim (4.6-6.2)\,{\rm nc},$ и позволяли надежно регистрировать разность частот $\sim 51.3 \,\mathrm{cm^{-1}}$ ($\sim 1.554 \,\mathrm{T\Gamma \mu}$) стоксовых линий алмазного "сандвича" ¹³C + ^{nat}C. Избранные спектры ИВКР-лазинга для тройки CVD-алмазов показаны на рис. 3. Спектральный состав ИВКР-спектров отражает "родственную" одинаковость кристаллических структур ¹²С-, ¹³С- и ^{nat}С-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; L₁-L₃ – линзы; G – дифракционные решетки; InGaAs – ИК-детектор

масс ядер изотопов углерода ¹²С и ¹³С проявляется на размерах элементарных ячеек алмазов и на длине тетраэдрических связей их атомов [21], результатом является разность частот $\Delta \omega \sim 52.2 \,\mathrm{cm}^{-1}$ их колебаний F_{2q}-симметрии. Алмаз кристаллизуется в O_b⁵ – 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. За, 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 ($Z^{\rm Br}=2$), обладающая шестью $(3\mathrm{N}Z^{\mathrm{Br}}=6)$ вибронными степенями свободы, характеризуется двумя типами колебательных мод $\Gamma_6 = F_{2g} + F_{1u}$ [34]. Из них трижды вырожденные колебания F_{2a}-симметрии представляют оптические моды, которые являются следствием строго направленной вибрацией атомов углерода друг против друга двух отмеченных выше решеток алмаза (см. вставку на рис. За). Эти колебания и являются промоутирующими $\chi^{(3)}$ -нелинейный лазинг в 12 С-, ¹³С- и ^{nat}С-алмазах. Высокая частота ВКР-мод $\omega_{\rm SRS}(^{12}{\rm C}) \sim 1333.2 \,{\rm cm}^{-1}, \ \omega_{\rm SRS}(^{13}{\rm C}) \sim 1281 \,{\rm cm}^{-1}$ и $\omega_{\rm SRS}(^{\rm nat}{\rm C}) \sim 1332.3\,{\rm cm}^{-1}$ 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 ($\Delta \omega \sim 0.9 \, {\rm cm}^{-1}$) ВКР-активных мод ¹²С- и ^{nat}С-алмазов обусловлена малым (естественным) содержанием в ^{nat}C-алмазе изотопа $^{13}{\rm C}~(\sim 1\,\%).$ Алмазы, как моноизотопные, так и с различным (контролируемым) содержанием изотопов ¹²С и ¹³С, выращенные СVD или НТНР 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 ВКРактивных ¹²С-, ¹³С- и ^{nat}С-алмазов, которые, обладая уникальными физическими свойствами, обещают новые возможности в фундаментальных и прикладных $\chi^{(3)}$ -нелинейно лазерных исследованиях. Так, моноизотопные ¹²С-алмазы с рекордно высокой теплопроводностью являются очевидными и незаменимыми кандидатами для создания на их основе нового поколения сверхмощных ВКР-лазеров и ВКРлазерных конвертеров в широком диапазоне длин волн. Излучение разностных частот при нелинейном смешении частот $\chi^{(3)}$ -стоксовой ИК-генерации алмазов ¹²С и ¹³С ($\Delta f \sim 1.58 \, {
m T} \Gamma {
m I} - \Delta \omega \sim 52.2 \, {
m cm}^{-1}$) и ^{nat}C и ¹³C ($\Delta f \sim 1.554 \, \mathrm{T}$ Гц – $\Delta \omega \sim 51.3 \, \mathrm{cm}^{-1}$) – 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 ¹²С и ¹³С) даст возможность создавать терагерцовые источники с другими частотами генерации. Результаты осуществленных $\chi^{(3)}$ -нелинейно лазерных исследований ¹²С-, ¹³С- и ^{nat}С-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 A.A.K.) и "Photon frontier network



Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектры ("стоксовы" фрагменты) фемтосекундного ИВКР-лазинга СVDалмазов: моноизотопного ¹²С (а) и алмазного "сандвича" (b) из моноизотопного ¹³С и с "изотопным разупорядочением" ^{nat}C, зарегистрированные ИК-фотосенсором InGaAs-CMOS при комнатной температуре с использованием безрезонаторной (cavity-free) схемы возбуждения с накачкой излучением ($\lambda_{\rm p} \sim 10645 \,{\rm мкм}$) 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. (а) показывает тетраэдрические связи атомов углерода в структуре алмазов и поясняет их F_{2a}-колебания (см. текст)

ргодгат of the Ministry of education, culture, sport, science and technology, Japan" (для Х.Ё., Н. 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).

- A. K. McQuillan, W. R. L. Clements, and B. P. Stoicheff, Phys. Rev. A 1, 628 (1970).
- D. H. Douglas-Hamilton and E. D. Hoag, J. Opt. Soc. Am. 64, 36 (1974).
- 4. R. W. Ditchburn, Opt. Lett. 29, 355 (1982.
- S.C. Rand and L.G. DeShazer, Opt. Lett. 10, 481 (1985).
- A.A. Kaminskii, V.G. Ralchenko, and V.I. Konov, JETP Lett. 80, 267 (2004).
- A. A. Kaminskii, V.G. Ralchenko, V.I. Konov, and H. J. Eichler, Phys. Stat. Sol. B 242, R4 (2005).
- A. A. Kaminskii, V.G. Ralchenko, and V.I. Konov, Laser Phys. Lett. 3, 171 (2006).
- 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).
- M. Zhi, X. Wang, and A. V. Sokolov, Opt. Express 16, 12139 (2008).
- R. P. Mildren, J. E. Butler, and J. R. Rabeau, Opt. Express 16, 18950 (2008).
- T. Kuroda, P. A. Zhokhov, K. Watanabe, K. Watanabe, A. M. Zheltikov, and K. Sakoda, Opt. Express 17, 20794 (2009).
- W. Lubeigt, G. M. Bonner, J. E. Hastie, M. D. Dawson, D. Burns, and A. J. Kemp, Opt. Express 18, 16765 (2010).
- J.-P. M. Feve, K. E. Shortoff, M. J. Bohn, and J. K. Brasseur, Opt. Express 19, 913 (2011).
- M. Jelínek, O. Kitzler, H. Jelínkova, J. Šulc, and M. Němec, Laser Phys. Lett. 9, 35 (2012).
- Q. Liu, Z. Ouyang, and S. Albia, Appl. Phys. B 113, 457 (2013).
- S. M. Pimenov, B. Neuenschwander, B. Jaggi, and V. Romano, Appl. Phys. A **114**, 1309 (2014).
- 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).
- А.П. Жернов и А.В. Инюшкин, УФН 172, 573 (2002).
- L. Wei, P.R. Kuo, R. L. Thomas, T. R. Anthony, and W. F. Banholzer, Phys. Rev. Lett. **70**, 3764 (1993).
- T. Yamanaka, S. Morimoto, and H. Kanda, Phys. Rev. B 49, 9341 (1994).
- R. Vogelgesang, A.K. Ramdas, S. Rodriguez, M. Grimsditch, and T.R. Anthony, Phys. Rev. B 54, 3989 (1996).
- 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).
- D. A. Broido, L. Lindsay, and A. Ward, Phys. Rev. B 86, 115203 (2012).

- K. Belay, Z. Etzel, D.G. Onn, and T.R. Anthony, J. Appl. Phys. 79, 8336 (1996).
- 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).
- A. K. Ramdas and S. Rodriguez, Phys. Stat. Sol. B 215, 71 (1999).
- А. А. Каминский, В. Г. Ральченко, А. П. Большаков, А. В. Инюшкин, ДАН 464, 676 (2015).
- А. А. Каминский, В. Г. Ральченко, А. П. Большаков, А. А. Хомич, ДАН 465, 665 (2015).
- 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).
- 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).
- T. R. Anthony and W. F. Banholzer, Diamond Relat. Mater. 1, 717 (1992).
- 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).
- 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).
- K. C. Hass, M. A. Tamor, T. R. Anthony, and W. F. Banholzer, Phys. Rev. B 45, 7171 (1992).