

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ С ПРИМЕСЬЮ БОРА

А. Н. Утюж, Ю. А. Тимофеев, А. В. Рахманина*

*Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина Российской академии наук
142190, Троицк, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 17 октября 2006 г.

Проведено исследование алмаза с примесью бора 0.04–0.1 ат. % методом комбинационного рассеяния света при давлении до 3 ГПа в камере с сапфировыми наковальнями. Для всех образцов рамановская частота при увеличении давления растет линейно с барическими коэффициентами $2.947 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа}$ для чистого алмаза и $3.01 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа}$ для образцов, легированных бором. Ширины рамановских линий чистого алмаза и алмаза с концентрацией бора около 0.04 ат. % остаются постоянными, а образцов с концентрацией бора примерно 0.1 ат. % линейно уменьшаются с ростом давления. Спектры комбинационного рассеяния, имеющие форму линии, соответствующую резонансу Фано, качественно не изменяются до давления 3 ГПа. В образцах алмаза с примесью бора более 0.1 ат. %, концентрация бора в поверхностном слое может быть существенно большей, чем в центре образца.

PACS: 63.20.Kr, 78.30.-j, 62.50.+p

1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее полное и подробное исследование фоновых дисперсионных кривых алмаза выполнено методом неупругого рассеяния нейтронов. Этот метод обладает невысоким разрешением и не позволяет определять ширины фоновых линий. Однако в центре зоны Бриллюэна лазерная спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) позволяет получить данные высокой точности для частоты и ширины линий фононов. Поэтому КРС-спектроскопия — наиболее подходящий метод изучения относительно слабых внешних возмущений, например температуры, легирования, влияния гидростатического давления, одноосных напряжений и изменения изотопного состава. Ранее мы исследовали [1] зависимость КРС-спектров алмаза от концентрации примеси бора в чистых и достаточно совершенных кристаллах синтетических алмазов, в которых бор является доминирующей примесью, при легировании до 0.1 ат. % [1]. Недавнее обнаружение в алмазе, легированном бором, сверхпроводимости [2–4] привлекло дополнитель-

ное внимание к исследованиям таких образцов. В настоящей работе мы изучаем влияние давления на КРС-спектры синтетических алмазов, легированных бором.

2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Использовались алмазные монокристаллы с разной концентрацией бора, аналогичные исследованым ранее методом КРС-спектроскопии при нормальном давлении [1]. Монокристаллы синтезировались из углеводородов при высоком давлении в области термодинамической стабильности алмаза.

Были отобраны чистый алмаз (концентрация бора $c_B < 0.001$ ат. %, образец №1) и алмаз серо-голубого цвета с концентрацией бора $c_B \approx 0.1$ ат. %, форма КРС-линии которого имела особенность, соответствующую резонансу Фано (образец №3). Образцы алмаза имели размер около 30 мкм. Спектры КРС свидетельствуют о высокой степени совершенства кристаллической структуры чистых алмазов, синтезированных из углеводородов, и о сохранении хорошего качества кристаллов

*E-mail: anatu@ns.hppi.troitsk.ru

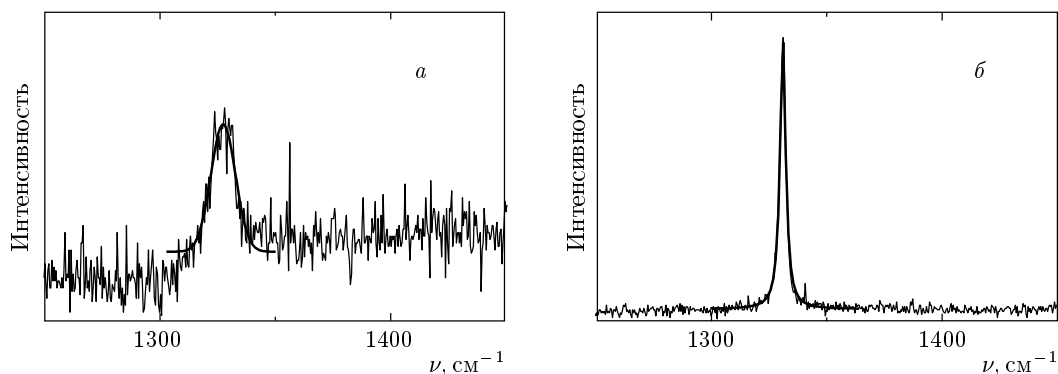


Рис. 1. Спектры КРС образца № 4 с концентрацией бора более 0.1 % (а) и образца № 2, полученного после раскалывания образца № 4 (б)

при уровне легирования ниже 0.1 ат. % бора [1]. Кроме того, из образцов с максимальным содержанием бора ($c_B > 0.1$ ат. %), имеющих серо-черную окраску, был выбран образец № 4, КРС-линия которого имела выраженную особенность, соответствующую резонансу Фано. Образец имел октаэдрический габитус и размер примерно 100 мкм. Для получения мелких образцов, пригодных для исследования в камере высокого давления с сапфировыми наковальнями, этот образец раскололи между наковальнями из твердого сплава. Обычно при ударе алмаз, завернутый в тонкую (около 30 мкм) медную фольгу, сразу раскалывается на множество кусочков. От образца № 4 при каждом ударе откалывались с поверхности мелкие крошки, и, наконец, осталась центральная часть размером примерно 40 мкм (далее называемая образцом № 2), которая и была помещена в камеру высокого давления. Цвет этого образца остался серо-черным за счет его достаточно большой толщины. Однако измерения КРС показали, что спектр образца № 2 соответствует концентрации бора $c_B \approx 0.04$ ат. %. Спектры КРС образца № 4 до и после раскалывания представлены на рис. 1.

Можно заключить, что в крупных (около 100 мкм) образцах алмаза с примесью бора более 0.1 ат. % концентрация бора в поверхностном слое может быть существенно большей, чем в центре образца. Параметры образцов алмаза при нормальных условиях приведены в табл. 1. Давление создавали в камере с сапфировыми наковальнями, рабочая площадка которых имела диаметр 1 мм. В камере с наковальнями из сапфира, в отличие от камер с алмазными наковальнями, нет фоновых линий КРС, обусловленных материалом наковальни

в интересующей нас области спектра.

При опрессовке медной прокладки между наковальнями использовали методику измерения толщины прокладки в области отпечатка, позволяющую получить нужную толщину за один цикл [5]. Прокладка имела отверстие диаметром 200 мкм, где были одновременно размещены образцы алмазов №№ 1, 2, 3 и два кристалла рубина для определения давления по смещению линий люминесценции рубина [6]. Камера была заправлена полиэтилсилоксановой жидкостью ПЭС5 в качестве среды, передающей давление.

Для возбуждения КРС-спектров использовали аргоновый лазер с $\lambda_{exc} = 487.986$ нм. Мощность излучения на образце не превышала 10 мВт. Спектры регистрировались спектрометром ДФС-24, оснащенным двумя голографическими фильтрами (notch filters) для подавления рассеянного света на частоте лазерной линии и CCD-детектором, охлаждаемым жидким азотом. Спектр калибровался по неоновой лампе. Измерения проводились при комнатной температуре в геометрии обратного рассеяния. Погрешность измерений составляла 0.1 см^{-1} . Давление определяли с использованием шкалы на основе люминесценции рубина [6] с учетом поправок на изменение температуры, при которой проводятся измерения [7]. Температуру регистрировали с помощью кремниевого диода DT-470-SD и прибора Lake Shore 330. Датчик температуры контактировал с медной прокладкой ячейки высокого давления. Обычно измерения КРС-спектров образцов алмаза и положение линий люминесценции рубина проводили не ранее чем через сутки после изменения давления в камере для релаксации напряжений в ячейке высокого давления.

Таблица 1. Частоты и ширины (FWHM) линии КРС (рамановского пика первого порядка) образцов алмаза при нормальных условиях

Номер образца	$w, \text{см}^{-1}$	$\nu, \text{см}^{-1}$ в вакууме	$\nu, \text{см}^{-1}$ в воздухе	$\nu - \nu_0, \text{см}^{-1}$	Цвет образца
1	1.85	1331.86	1332.24	0	бесцветный
2	2.95	1330.98	1331.37	-0.88	серо-черный
3	5.98	1329.87	1330.25	-1.99	серо-голубой
4	10.64	1327.38	1327.76	-4.48	серо-черный

Примечание. Концентрации примеси бора в образцах: №1 — $c_B < 0.001$ ат. % (чистый алмаз); №2 — $c_B \approx 0.04$ ат. %; №3 — $c_B \approx 0.1$ ат. %; №4 — $c_B > 0.1$ ат. %.

Таблица 2. Параметры уравнений (1) и (2), представляющих зависимости от давления частоты ν и ширины w рамановской линии для чистого алмаза и алмазов с примесью бора при давлениях до 3 ГПа

Номер образца	$\nu_0, \text{см}^{-1}$	$w_0, \text{см}^{-1}$	$A = d\nu/dP, \text{см}^{-1}/\text{ГПа}$	$K = dw/dP, \text{см}^{-1}/\text{ГПа}$
1	1332.26	1.84	2.947 ± 0.01	-0.01 ± 0.01
2	1331.50	2.92	3.01 ± 0.04	0.02 ± 0.02
3	1330.27	6.14	3.01 ± 0.06	-0.1 ± 0.05

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты исследования влияния давления на КРС-спектры алмазов с примесью бора приведены на рис. 2, 3 и в табл. 2. На рис. 2а представлены зависимости частоты рамановской линии от давления. Рамановская частота ν для всех образцов алмаза при увеличении давления растет линейно с барическим коэффициентом $A = d\nu/dP$:

$$\nu = \nu_0 + AP, \tag{1}$$

где $\nu_0 = \nu(P = 0)$. Барический коэффициент для образцов с примесью бора несколько выше, чем для чистого алмаза (см. табл. 2), однако это отклонение незначительно превышает погрешности эксперимента.

На рис. 2б представлены зависимости от давления ширины w (FWHM) рамановских линий для этих образцов. Результаты описаны линейными зависимостями

$$w(P) = w_0 + KP \tag{2}$$

с барическим коэффициентом $K = dw/dP$; $w_0 = w(P = 0)$. Ширина w для образца чистого алмаза при увеличении давления остается постоянной. Аналогичное постоянство ширины наблюдается и для образца №2 с концентрацией бора

$c_B \approx 0.04$ ат. %. Для образца №3 с максимальной концентрацией бора ($c_B \approx 0.1$ ат. %) при увеличении давления наблюдается уменьшение ширины линии.

На рис. 3 представлены КРС-спектры образца №3, имеющие форму линии, соответствующей резонансу Фано (смещение однофононного рамановского пика и специфическая форма пика с подъемом одной из сторон и понижением другой), при различных давлениях. Они не претерпевают качественного изменения в исследованном диапазоне давлений.

Для получения достоверных результатов контролировали гидростатичность жидкости ПЭС5, применявшейся в качестве среды высокого давления. Линии люминесценции рубина, R_1 и R_2 , очень чувствительны к появлению сдвиговых напряжений в среде, передающей давление. Обычные признаки отклонения от гидростатичности среды высокого давления — увеличение ширины линий R_1 и R_2 и изменение расстояния между ними. На рис. 4 представлены ширины (FWHM) линий R_1 и R_2 люминесценции рубина и расстояние R_1-R_2 между ними при увеличении давления. Можно заключить, что в области до 3 ГПа среда ПЭС5 остается гидростатичной. При больших экспозициях на спектрах алмаза с примесью бора наблюдались дополнительно две слабые

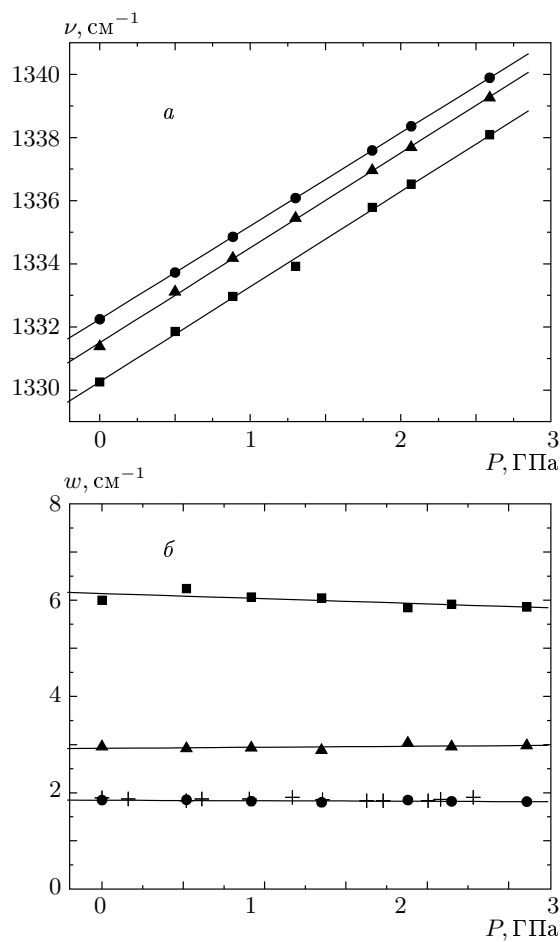


Рис. 2. Изменения частоты (а) и ширины (б) линии КРС для образцов алмаза с примесью бора при увеличении давления: ● — образец № 1; ▲ — № 2; ■ — № 3; + — чистый алмаз [9]

КРС-линии (1419 и 1464 см^{-1} при $P = 0$), обусловленные ПЭС5. При повышении давления эти линии (см. рис. 3) смещаются с барическим коэффициентом $d\nu/dP \approx 2.0 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Зависимость частоты рамановского фонона от давления

Результаты измерений зависимостей частоты ν и ширины w КРС-линии от давления для чистого алмаза можно сопоставить с результатами предшествующих работ в диапазоне давлений до 2.4 ГПа [8–11] (табл. 3). Значение $d\nu/dP$ было измерено в гидростатических камерах с оптическими окнами [8, 9], в камере с твердой средой [10] и рассчитано на основе

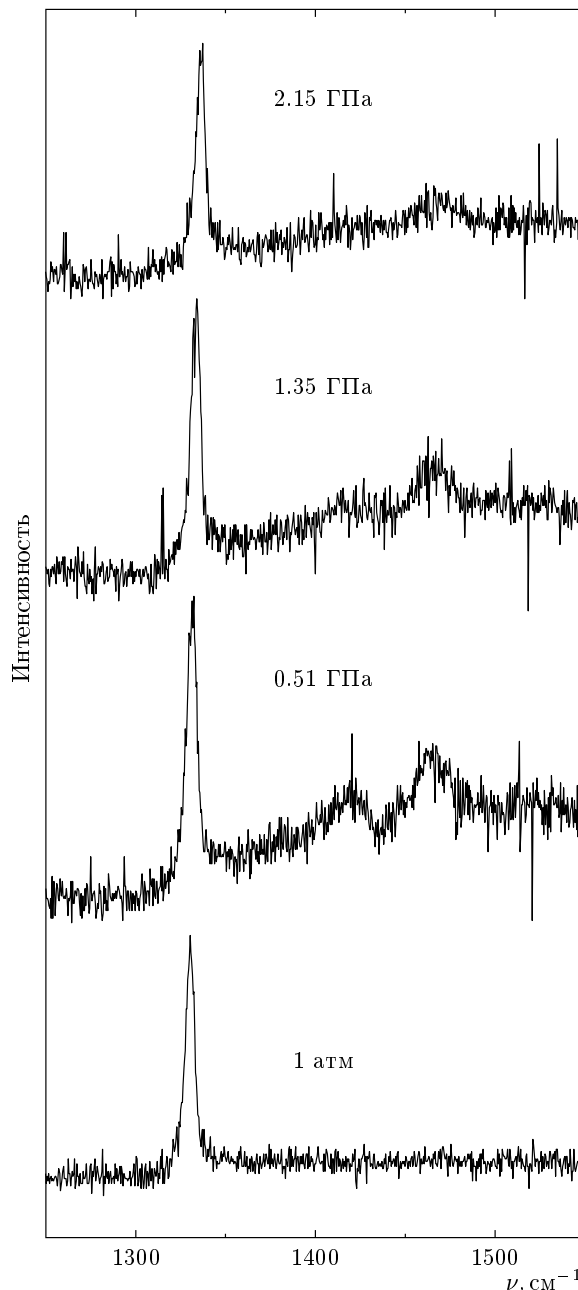


Рис. 3. Спектры КРС для алмаза (образец № 3), имеющие особенность, соответствующую резонансу Фано, при различных давлениях. Наблюдаются также две широкие линии, обусловленные КРС в среде ПЭС5

измерений, выполненных на одноосно нагруженных образцах [11].

Полученные в настоящей работе значения $d\nu/dP$ и w (см. табл. 3 и рис. 2б) для чистого алмаза хорошо согласуются с результатами работы [9], но имеют

Таблица 3. Зависимость от давления частоты рамановской линии первого порядка в алмазе

$d\nu/dP$, см ⁻¹ /ГПа	Способ измерения давления	Среда высокого давления	$P_{max} - P_{min}$, ГПа	Работа
2.8 ± 0.3	Манганиновый датчик	Масло Octoil S	0–0.9	[8]
2.96 ± 0.11	Манганиновый датчик, калибровка по грузопоршневому манометру	Гидростатика	0–2.3	[9]
3.6 ± 0.3	–	Твердая среда	0–2.4	[10]
3.2 ± 0.2	Расчет для гидростатики	Одноосные напряжения	0–1	[11]
2.947 ± 0.05	Люминесценция рубина	Жидкость ПЭС5	0–2.6	Настоящая работа

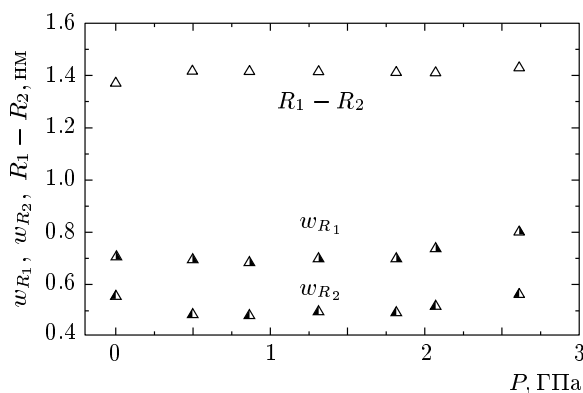


Рис. 4. Изменение ширины линий R_1 и R_2 люминесценции рубина и расстояния между ними при увеличении давления

меньшую погрешность. На этом основании можно рекомендовать (при использовании алмазного датчика давления в оптических камерах с давлением до 10 ГПа) полученное значение барического коэффициента

$$d\nu/dP = 2.947 \pm 0.005 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа}$$

как наиболее точное.

Применение камер с алмазными наковальнями позволило измерить зависимость $\nu(P)$ для чистого алмаза при давлениях до 140 ГПа [12–17]. Однако в области давлений ниже 10 ГПа на сигнал от образца алмаза накладывался широкий спектр, обусловленный КРС от различных участков напряженной алмазной наковальни. Поэтому при $P < 10$ ГПа высококачественных измерений в камерах с алмазными наковальнями провести не удастся. До 40 ГПа зави-

симость $\nu(P)$ остается линейной. Барический коэффициент $d\nu/dP$ оказался равным

$$2.90 \pm 0.05 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа} [13], \quad 2.87 \pm 0.10 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа} [14],$$

$$3.01 \pm 0.10 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа} [16],$$

что согласуется с измерениями настоящей работы.

Исследованные в настоящей работе образцы алмаза, легированные бором, имеют барические коэффициенты $d\nu/dP$, близкие к полученным для чистого алмаза (см. табл. 2).

4.2. Зависимость ширины линии от давления

Измерения зависимости от давления ширины линии рамановского фона представляют большой интерес для выявления преобладающих аномалий в собственных энергиях фононов [18]. Однако до настоящего времени получено очень мало экспериментальных данных о зависимости ширины фононных линий от давления.

Для углерода, кремния и германия со структурой алмаза зависимости от давления ширины рамановской линии исследованы теоретически [19]. Экспериментально измеренные барические зависимости ширин рамановских линий кремния и германия при $P < 9$ ГПа в алмазных наковальнях с гелиевой средой, передающей давление [20], неплохо согласуются с расчетами [19]. При более высоких давлениях всегда существует дилемма, приписать ли наблюдаемое небольшое увеличение ширины линии изучаемому влиянию гидростатического давления или это результат уширения фононного пика вследствие неоднородности давления.

Предсказанное теоретически [19] уширение рамановской линии алмаза под давлением очень мало, а

влияние негидростатичности даже в наилучшей среде высокого давления — гелии — на результаты рентгеновских и рамановских измерений при давлениях $P > 35$ ГПа существенно [15], поэтому в диапазоне до 100 ГПа невозможно получить значимые экспериментальные данные для ширины КРС-линии чистого алмаза.

Результаты данной работы (см. табл. 2, рис. 2б) позволяют сделать заключение, что величина dw/dP для чистого алмаза очень мала, и ее прямое измерение является гораздо менее перспективным путем изучения основных закономерностей, чем исследования, в которых влияние высокого давления моделировали изменением изотопного состава образцов алмаза $^{12}\text{C}_{1-x}^{13}\text{C}_x$. В измерениях с образцами алмаза различного изотопного состава [21] при нормальных условиях наблюдалось увеличение ширины рамановской линии алмаза до 7 см^{-1} , причем зависимость ширины от изотопного состава хорошо описывается теорией [21].

Образцы алмаза, сильно легированные бором, значительно менее изучены, чем чистый алмаз. Обнаруженное в настоящей работе ошутимое уменьшение ширины рамановского фонона в образце № 3 с высоким содержанием бора требует дальнейших исследований.

4.3. Металлическая проводимость в легированном алмазе

Ранее мы наблюдали на КРС-спектрах алмаза с концентрацией бора $c_B \approx 0.1$ ат. % рамановские пики, имеющие характерные особенности, соответствующие резонансу Фано [1]. Такие линии появляются в случае, когда дискретное состояние взаимодействует с континуумом [22].

Резонанс Фано подробно изучен в кремнии [23]. В образцах кремния, сильно легированных бором ($c_B \approx 1$ ат. %), линии LO -фононов, активных в КРС, уширяются и искажаются вследствие взаимодействия со свободными дырками. В кремнии взаимодействие с континуумом возникает вследствие почти вертикальных переходов между заполненными состояниями зоны легких дырок и незаполненными состояниями зоны тяжелых дырок. На КРС-спектрах кремния резонанс Фано проявляется в смещении однофононного рамановского пика (на -4.9 см^{-1} при комнатной температуре) и в специфической форме пика с подъемом одного его крыла и понижением другого [23]. Чтобы наблюдался резонанс Фано, уровень Ферми должен находиться в валентной зоне кремния и ширина образующейся зоны дырочной

проводимости у максимума валентной зоны должна превышать энергию рамановского фонона.

Такое объяснение не подходит для алмаза, легированного бором, вследствие глубокого залегания акцепторного уровня (на 0.37 эВ выше максимума валентной зоны). Поэтому проводимость по валентной зоне при комнатной температуре незначительна и становится пренебрежимо малой уже при 200 К . Как показали измерения на образцах синтетических алмазов, легированных бором до концентраций $5 \cdot 10^{-5}$ ат. %, в алмазе реализуются различные механизмы прыжковой проводимости по примесной зоне [24]. Малая величина радиуса Бора (около $4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$) для основного состояния акцептора позволяет до начала металлической проводимости в алмазе получить очень высокую концентрацию примеси бора и, следовательно, большую ширину примесной зоны проводимости. По оценке из работы [24] ширина зоны должна достигнуть 200 мэВ при увеличении концентрации бора до 0.05 ат. %. Таким образом, в алмазе, легированном бором, в отличие от германия и кремния резонанс Фано может быть обусловлен взаимодействием рамановского фонона с континуумом переходов в пределах примесной зоны [1]. Имеются теоретические работы, которые объясняют появление металлической проводимости и сверхпроводимости в алмазе, легированном бором, тем, что энергетические уровни примеси образуют примесную энергетическую зону [25].

Образцы алмаза, на которых был обнаружен сверхпроводящий переход [2], были сильно легированы бором ($c_B \approx 3$ ат. %) и в них был реализован другой режим металлической проводимости. В теоретических работах [26–28] показано, что при концентрациях бора, существенно превышающих концентрацию, соответствующую моттовскому переходу диэлектрик–металл ($c_B \approx 0.1$ ат. %), дырки в валентных зонах определяют металлическое поведение сильнолегированного сверхпроводящего алмаза. Такой подход приводит к предсказанию сверхпроводимости в германии и кремнии при сильном легировании [26]. Экспериментальные работы [4, 29] также указывают на то, что дырки в валентных зонах алмаза играют существенную роль в металлическом поведении сверхпроводящего алмаза.

Анализ зависимости спектров с резонансом Фано от давления может дать дополнительную информацию о металлической проводимости. Резонанс Фано сильнее выражен при более сильном легировании и, следовательно, более высокой проводимости по образующейся зоне. Проведенная оценка зависимости от давления степени выраженности специфической

формы рамановского пика с подъемом одного его крыла и понижением другого недостаточно показательна и позволяет утверждать, что качественного изменения спектров в исследованном диапазоне давлений не происходит. Количественные оценки металлической проводимости в алмазе можно получить с помощью резонанса Фано при использовании образцов с концентрацией бора выше 1 ат. % и проведении измерений в более широком диапазоне давлений.

4.4. Совместный анализ КРС-спектров

Рамановская спектроскопия — эффективный метод исследования влияния давления, температуры, напряжений, легирования и дефектов кристаллической решетки на оптические фононы в алмазе. Ширина рамановской линии первого порядка определяется ангармоническими взаимодействиями оптических фононов, приводящими к их распаду на комбинацию фононов меньшей энергии. Различные виды беспорядка в кристалле вызывают возмущения нормальных частот колебаний решетки алмаза и, следовательно, частично нарушают сохранение импульса для оптических фононов, соответствующих точке Г зоны Бриллюэна и обуславливающих рамановское рассеяние первого порядка. Следствием этого возмущения являются сдвиг частоты и уширение рамановской линии, а также уменьшение ее интенсивности. Поскольку величина этого возмущения фононного спектра различна для различных видов несовершенства решетки, полезно сравнить изменения рамановского спектра, обусловленные различными факторами.

На рис. 5 представлена зависимость ширины w КРС-линии первого порядка от сдвига $\nu - \nu_0$ частоты этой линии относительно значения $\nu_0 = 1332.4 \text{ см}^{-1}$, соответствующего чистому алмазу для различных типов внешних возмущений и несовершенства кристаллической решетки. При легировании алмаза бором концентрации примеси бора обычно определены приближенно и не могут быть использованы для аккуратного представления экспериментальных зависимостей. Приведенный на рис. 5 график в координатах w и $\nu - \nu_0$ весьма удобен, поскольку оба параметра, ν и w , измерены с хорошей точностью.

Влияние температуры на рамановский фонон в алмазе измерено с высокой точностью [30] и хорошо согласуется с теорией, использующей достаточное число членов в разложении ангармонического потенциала [19]. Влияние примеси изотопа ^{13}C с концентрацией от 1 ат. % до 99 ат. % на рамановский фонон в алмазе измерено в ряде работ и хорошо описывается теорией [21]. Гораздо бо-

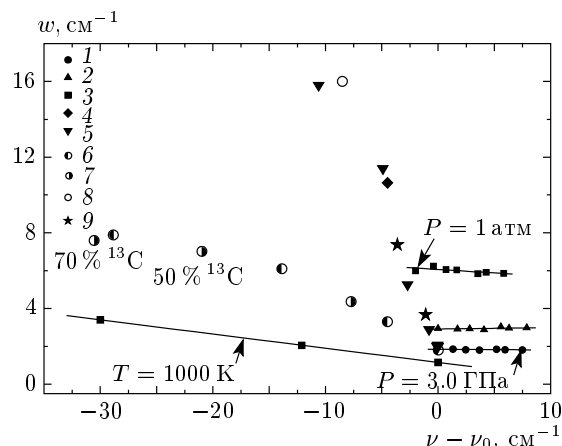


Рис. 5. Ширина (FWHM) рамановской линии первого порядка в алмазе в зависимости от сдвига ее частоты ($\nu - \nu_0$) относительно чистого алмаза при комнатной температуре для разных факторов, вызывающих сдвиг и уширение линии: 1, 2 и 3 — влияние давления на образцы алмаза (соответственно чистого, с примесью бора $c_B \approx 0.04$ ат. % и $c_B \approx 0.1$ ат. %); 4 — влияние примеси бора более 0.1 ат. % (образец № 4); 5 — влияние примеси бора на алмазы, синтезированные из углеводородов [1]; 6 — влияние изотопического беспорядка по данным работы [20]; 7 — влияние изотопического беспорядка, измерения авторов настоящей работы; 8 — влияние примеси бора 0.1 ат. % в CVD-алмазе по данным работы [32]; 9 — влияние дефектов, индуцированных потоком нейтронов, по данным работы [31], прямая линия — влияние температуры по данным работы [30]. Стрелки указывают на точки, соответствующие приведенным значениям давления и температуры

лее заметное влияние оказывают дефекты, радиационно-индуцированные облучением алмаза потоком нейтронов выше $2 \cdot 10^{18}$ нейтр./ см^2 [31], и дефекты структуры пленок алмаза, легированных бором [32].

На рис. 5 также представлены полученные в настоящей работе результаты для влияния давления на КРС-спектры образцов чистого алмаза и алмаза, легированного бором. Можно заключить, что давление, в отличие от других видов внешних возмущений и несовершенства кристаллической решетки, позволяет в большой степени изменять частоту оптического фонона алмаза, не вызывая уширения линии КРС. Следует отметить также хорошее согласие полученных в настоящей работе результатов, соответствующих $P = 0$, с данными предшествующей работы [1].

Авторы благодарят С. М. Стишова за полезные предложения и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Утюж, Ю. А. Тимофеев, А. В. Рахманина, Неорганические материалы **40**, 1062 (2004).
2. E. A. Ekimov, V. A. Sidorov, E. D. Bauer et al., Nature **428**, 542 (2004).
3. Y. Takano, M. Nagao, I. Sakaguchi et al., Appl. Phys. Lett. **85**, 2851 (2004).
4. V. A. Sidorov, E. A. Ekimov, S. M. Stishov et al., Phys. Rev. B **71**, 502 (2005).
5. Ю. А. Тимофеев, А. Н. Утюж, ПТЭ № 5, 152 (2003).
6. G. J. Piermarini, S. Block, J. D. Barnett et al., J. Appl. Phys. **46**, 2774 (1975).
7. W. L. Vos and J. A. Schouten, J. Appl. Phys. **69**, 6744 (1991).
8. S. S. Mitra, O. Brafman, W. B. Daniels et al., Phys. Rev. **186**, 942 (1969).
9. E. Whalley, A. Lavergne, and P. T. T. Wong, Rev. Sci. Instr. **47**, 845 (1976).
10. B. J. Parson, Proc. Roy. Soc. London A **352**, 397 (1977).
11. M. Grimsditch, E. Anastassakis, and M. Cardona, Phys. Rev. B **18**, 901 (1978).
12. А. Ф. Гончаров, И. Н. Макаренко, С. М. Стишов, Письма в ЖЭТФ **44**, 150 (1985).
13. M. Hanfland, K. Syassen, S. Fahy et al., Phys. Rev. B **31**, 6896 (1985).
14. H. Voppart, J. Van Straaten, and I. F. Silvera, Phys. Rev. B **32**, 1423 (1985).
15. И. В. Александров, А. Ф. Гончаров, А. Н. Зисман и др., ЖЭТФ **93**, 680 (1987).
16. I. V. Aleksandrov, A. F. Goncharov, I. N. Makarenko et al., High Press. Res. **1**, 333 (1989).
17. F. Occelli, P. Loubeyre, and R. Letoullec, Nature Mater. **2**, 15115 (2003).
18. M. Cardona, High Press. Res. **24**, 17 (2004).
19. A. Debernardi, S. Baroni, and E. Molinari, Phys. Rev. Lett. **75**, 1819 (1995).
20. C. Ulrich, E. Anastassakis, K. Syassen et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 1283 (1997).
21. F. Widulle, J. Serrano, and M. Cardona, Phys. Rev. B **65**, 1 (2002).
22. U. Fano, Phys. Rev. **124**, 1866 (1961).
23. F. Cerdeira, T. A. Fjeldly, and M. Cardona, Phys. Rev. B **8**, 4734 (1973).
24. B. Massarani, J. C. Bourboin, and R. M. Chrenko, Phys. Rev. B **17**, 1758 (1978).
25. G. Bascaran, E-print archives, cond-mat/0404286.
26. L. Boeri, J. Kortus, and O. K. Anderson, Phys. Rev. Lett. **93**, 237002 (2004).
27. K. W. Lee and W. E. Pickett, Phys. Rev. Lett. **93**, 237003 (2004).
28. X. Blasé, Ch. Adessi, and D. Connetable, Phys. Rev. Lett. **93**, 237004 (2004).
29. T. Yokoya, T. Nakamura, T. Matsushita et al., Nature **438**, 647 (2005).
30. M. S. Liu, L. A. Bursill, and S. Prawer, Phys. Rev. B **61**, 3391 (2000).
31. H. Hanzawa, N. Umemura, Y. Nisida et al., Phys. Rev. B **54**, 3793 (1996).
32. P. Gonon, E. Gheeraert, A. Deneuve et al., J. Appl. Phys. **78**, 7059 (1995).