



УДК 549.211, 535.375.54

ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ КР-АКТИВНЫХ МОД ЛОНСДЕЙЛИТА

С. И. Исаенко, Т. Г. Шумилова

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

s.i.isaenko@gmail.com, shumilova@geo.komisc.ru

Приводятся результаты исследований спектроскопических особенностей КР-активных мод алмаза и лонсдейлита, проявляющихся при термостимулировании и позволяющих провести корректную идентификацию данных фаз при микроскопической размерности их частиц. Выявлено существенное по сравнению с алмазом термостимулированное изменение спектроскопических характеристик лонсдейлита с проявлением их частичной «релаксации» в динамике. Приводятся методические рекомендации для корректной диагностики лонсдейлита.

Ключевые слова: лонсдейлит, алмаз, спектроскопия КР

THERMOSTIMULATED SPLITTING OF RAMAN ACTIVE LONSDALEITE MODES

S. I. Isaenko, T. G. Shumilova

Institute of Geology of Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The results of research of spectroscopic peculiarities of thermostimulated Raman-active lonsdaleite modes, which allow provide correct identification of phases at microscopic dimension of particles are presented. Revealed significant, in comparison with a diamond, thermostimulated changing of spectroscopic characteristics of lonsdaleite with appearance of their partial "relaxation" in dynamics. Methodological recommendations for proper diagnostics of the lonsdaleite phase are presented.

Keywords: lonsdaleite, diamond, Raman spectroscopy

Метод спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) является на сегодняшний день одним из самых современных, локальных, экспрессных способов фазовой диагностики минералов, в большинстве случаев не требующий пробоподготовки. В частности, он успешно применяется для идентификации углеродных веществ и позволяет однозначно определять по КР-спектрам такие фазы, как алмаз, графит, фуллерен, нанотрубки и многие другие полиморфные модификации углерода. Тем не менее идентификация гексагонального алмаза (далее по тексту — лонсдейлита) с помощью спектроскопии КР на данный момент представляется весьма неоднозначной. Например, в ряде случаев за лонсдейлитовую фазу может быть ошибочно принят нанокристаллический алмаз, имеющий аналогичные особенности экспериментальных спектров, связанные с условиями возбуждения КР [1]. По этой причине необходима разработка методических приемов, позволяющих различать КР-активные моды кубического алмаза (далее по тексту — алмаза) и лонсдейлита. Актуальность данной проблемы приобретает особую значимость в связи с активно возросшим интересом к лонсдейлиту как к сверхтвердой фазе [2]. В данной работе рассматривается экспериментально установленное нами термостимулированное разделение КР-активных мод алмаза и лонсдейлита, которое позволяет корректно диагностировать лонсдейлит не только в виде обособленных частиц, но и в тесном срастании с алмазом.

Метод КР позволяет фиксировать малейшие изменения в кристаллической структуре минерала, вызванные, в частности, воздействием на образец давления или температуры, которое отражается в сдвиге положения линий КР в спектрах и/или изменении их полной ширины на половине максимума (FWHM — full width at half maximum, далее по тексту полуширина). При возбуждении комбинационного рассеяния света с помощью мощного лазерного излучения может возникать интенсивный локальный нагрев анализируемой области образца, что в свою очередь тоже приводит к изменению положений линий в КР-спектрах. Поэтому учитывать возможный нагрев образцов в процессе регистрации спектров крайне важно, особенно при исследовании углеродных частиц микронных размеров с целью идентификации лонсдейлитовой фазы.

Рассмотрим основные и наиболее важные спектроскопические характеристики лонсдейлита. В работе Н. Б. Решетняка и В. А. Езерского [3] отмечается, что теоретически в спектре лонсдейлита присутствуют три КР-активные моды. Две самые интенсивные из них представлены дублетом в области 1330 см^{-1} , вызванным расщеплением основного фундаментального трижды вырожденного колебания F_{2g} кубической фазы в гексагональном кристаллическом поле лонсдейлита. Положение дублета практически совпадает с положением линии алмаза 1332 см^{-1} , что существенно затрудняет его экспериментальное наблюдение. Третья мода представлена малоинтенсивной ли-

нией в области 1250 см^{-1} , связанной с продольным оптическим колебанием LO в точке L зоны Бриллюэна алмаза — 1252 см^{-1} , данная линия практически никогда экспериментально не наблюдалась.

Согласно наиболее современным данным [4] спектр КР лонсдейлита имеет три моды — A_{1g} , E_{1g} , E_{2g} с соответствующими расчетными положениями 1312 , 1305 , 1193 см^{-1} . При этом моде A_{1g} с положением 1312 см^{-1} соответствуют экспериментальные значения в диапазоне $1315\text{—}1326\text{ см}^{-1}$, а моде E_{2g} — $1170\text{—}1175\text{ см}^{-1}$. В экспериментальных КР-спектрах импактных алмазов Попигойской астроблемы (Саха-Якутия, Россия) и Западной (Украина), изученных Д. Смитом и Г. Годартом [5], была зафиксирована основная линия лонсдейлита $1324\pm 4\text{ см}^{-1}$ с полушириной 60 см^{-1} . Таким образом, положение основной диагностической линии лонсдейлита в спектрах КР может находиться в диапазоне $1315\text{—}1326\text{ см}^{-1}$.

Положение трижды вырожденной моды F_{2g} алмаза (1332 см^{-1} при комнатной температуре) в экспериментальном спектре может быть смещено в коротковолновую область вследствие нагрева. Так, нагрев алмаза при регистрации спектров КР до $850\text{—}870\text{ К}$ смещает диагностическую линию алмаза 1332 см^{-1} в положение 1325 см^{-1} [6], наибольшее смещение наблюдается у нанокристаллических алмазов [7]. При игнорировании температурного сдвига данное смещение линии алмаза в коротковолновую область может быть ошибочно проинтерпретировано как на-

личие лонсдейлитовой фазы в изучаемом объекте.

Для отработки методических приемов диагностики лонсдейлита методом спектроскопии комбинационного рассеяния света нами были детально исследованы те же самые препараты, в которых с помощью комплекса высокоразрешающих методов ранее нами были установлены лонсдейлитосодержащие и обособленные монокристаллические лонсдейлитовые частицы среди углеродной минерализации Кумдыкольского месторождения алмазов (Казахстан) [8, 9]. Регистрация спектров КР проводилась на спектрометре LabRam HR 800 (Horiba Jobin Yvon) при следующих условиях: решетка монохроматора — 1800 ш/мм, конфокальное отверстие 300 мкм, щель 100 мкм, время экспозиции 1 с, количество циклов накопления сигнала 10, мощность Ag⁺ лазера (514.5 нм) 1.2, 12.0 мВт.

Для выбора объектов регистрации спектров частицы внимательно анализировались в отраженном и проходящем свете с помощью микроскопа Olympus BX41 (объектив ×100). Преимущество для изучения отдавалось прозрачным уплощенным частицам размером от 1 до 5 мкм с тригональными элементами морфологии. В целом было исследовано около ста частиц, и в результате были зарегистрированы как типичные спектры КР алмаза с единственной узкой симметричной линией 1332 см⁻¹, иногда слабо смещавшейся на несколько обратных сантиметров в сторону уменьшения величины рамановского сдвига вследствие нагрева образцов, так и асимметричные — раздвоенные, уширенные, имеющие плечо, сильно сдвинутые в сторону уменьшения вышеуказанной величины.

В спектре одной из частиц (D0-B4-P12) было зарегистрировано расщепление линии 1332 см⁻¹ (0'00") на дублет 1321 см⁻¹ и 1329 см⁻¹ (2'19"), вызванное нагревом объекта после увеличения мощности лазера с 1.2 до 12 мВт (рис. 1). Три спектра, записанные через разные произвольные промежутки времени (2'39", 3'23", 3'32"), связанные с особенностями ручного управления программой спектрометра, показали, как меняется положение расщепленной линии. Через 1 мин 13 с (рис. 1, сп. 3'32") положения линий дублета соответствовали 1323 и 1330 см⁻¹ (табл. 1). Далее мощность лазерного излучения была уменьшена до 1.2 мВт, и в спектре КР этой частицы вновь фиксировалась лишь линия 1332 см⁻¹ (рис. 1, сп. 5'36"). После этого мощность лазера была опять увеличена до 12 мВт, и в спектрах КР мы снова наблюдали расщепление полосы 1332 см⁻¹ на

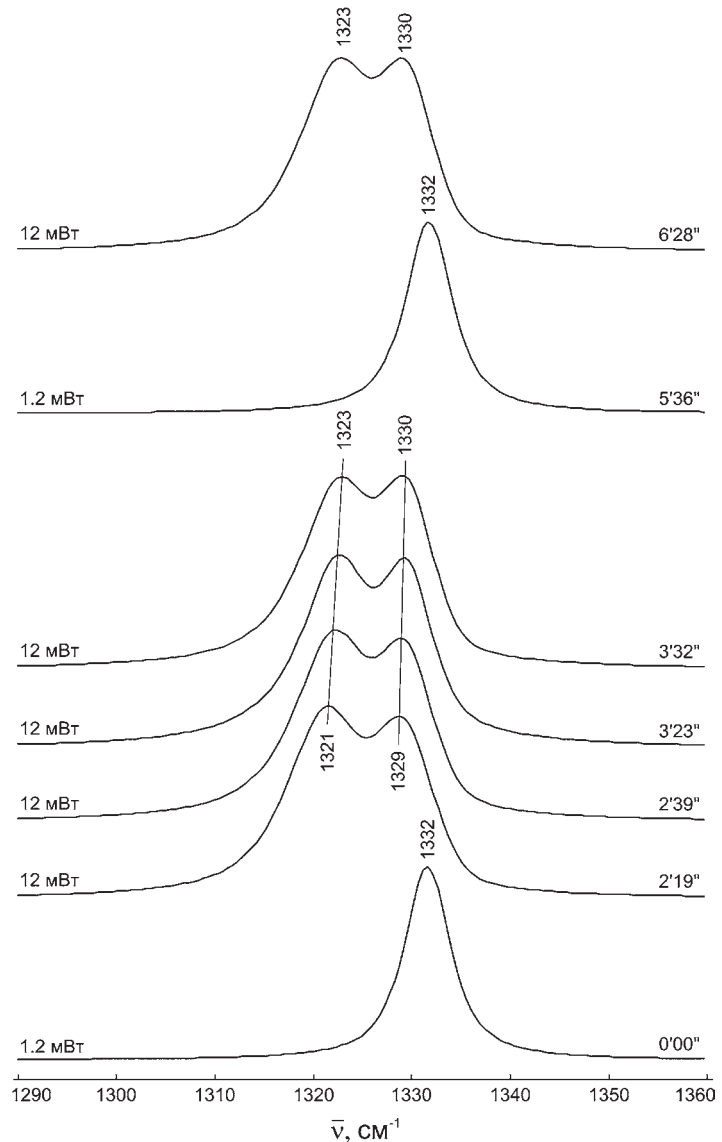


Рис. 1. Спектры КР частицы D0-B4-P12 в диапазоне 1290—1360 см⁻¹. Слева указана мощность возбуждающего излучения Ag⁺(514.4 нм) лазера, справа — время, прошедшее после регистрации первого спектра

Таблица 1
Характеристики спектра КР частицы D0-B4-P12 в зависимости от мощности лазерного излучения, диапазон регистрации 1290—1360 см⁻¹

Время, мин	Мощность лазера, мВт	Положение первой компоненты	FWHM	Положение второй компоненты	FWHM
0:00	1.2	Нет данных	Нет данных	1332	5.7
2:19	12.0	1321	9.6	1329	6.6
2:39	12.0	1322	9.6	1330	6.1
3:23	12.0	1322	8.9	1330	5.7
3:32	12.0	1323	9.4	1330	5.8
5:36	1.2	Нет данных	Нет данных	1332	5.7
6:28	12.0	1323	9.5	1330	5.9

дублет 1323 и 1330 см⁻¹ (рис. 1, сп. 6'28"). Расчет положений компонент и значений их полуширины в дублете производился с помощью программного обеспечения LabSpec 5.36 при помощи декомпозиции спектров КР функцией Гаусса-Лоренца (табл. 1).

При дальнейших исследованиях методом КР использовалась динамическая схема регистрации спектров КР под воздействием лазерного

нагрева (рис. 2). Первоначально регистрировался спектр при заданной мощности возбуждающего излучения 1.2 мВт, затем серия спектров с минимальным временным интервалом между регистрациями с увеличенной в 10 раз мощностью (до 12 мВт).

В динамическом режиме было изучено более тридцати соразмерных углеродных частиц микрометровой величины, в спектрах которых при

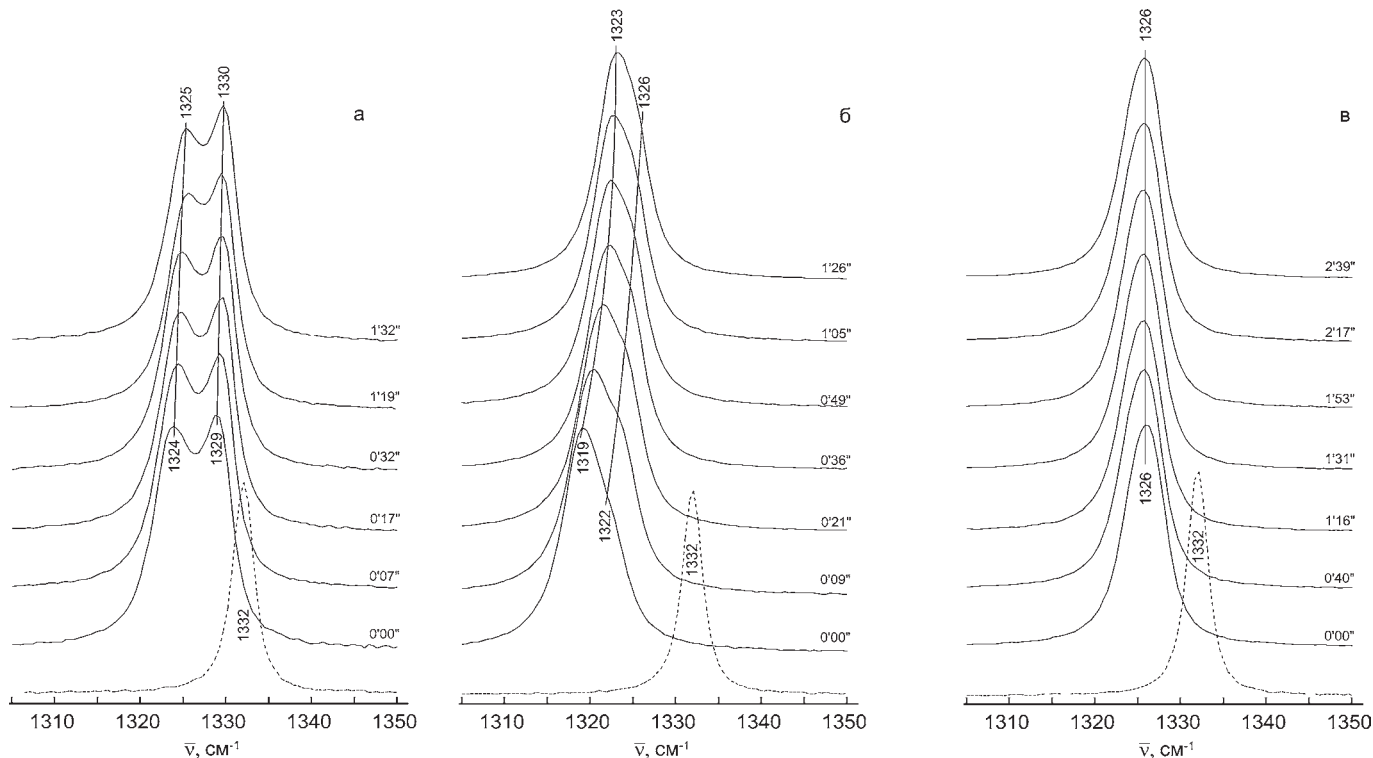


Рис. 2. Спектры КР углеродных частиц в динамике:

а — D0-B4-P27, алмаз с лонсдейлитом; б — D0-B4-P30, лонсдейлит; в — D0-B4-P48, алмаз. Пунктиром показан спектр КР частиц при мощности лазерного излучения 1.2 мВт (линия 1332 см⁻¹), сплошными линиями — спектры, зарегистрированные в определенные промежутки времени (указано справа время в формате мин' сек") при мощности лазера 12 мВт

увеличении мощности лазера наблюдалось либо расщепление линии 1332 см⁻¹ (рис. 2, а), либо ее преобразование до асимметричного вида, выражающегося в появлении плеча (рис. 2, б). В отдельных случаях с течением времени эксперимента какого-либо видимого изменения в спек-

тре не обнаруживалось (рис. 2, в). Спектры, приведенные на рис. 2 и ряд аналогичных спектров, полученных в ходе исследований, были разложены на составляющие (рис. 3) с помощью программного обеспечения LabSpec 5.36, путем декомпозиции спектров КР на составляю-

щие Гаусса-Лоренца. Полученные при этом значения положения компонент спектра в диапазоне 1300—1360 см⁻¹ и их полуширина приведены в табл. 2. Оказалось, что положение компонент при нагреве со временем меняется, причем у разных частиц начальные и конечные значения существенно различаются. При нагреве в течение эксперимента положения компонент спектра после начального сдвига в сторону уменьшения величины рамановского сдвига постепенно и с разной скоростью смещаются в сторону ее возрастания при заметном уменьшении их полуширины.

Рассмотрим характеристики спектров частицы D0-B4-P30 (рис. 3, а), зарегистрированных в динамическом режиме. При начальных условиях (1.2 мВт) в спектре фиксируется лишь линия 1332 см⁻¹ с полушириной 2.9 см⁻¹. После увеличения мощности излучения линия 1332 см⁻¹ уширяется с образованием плеча, наблюдается ее разложение на две компоненты Гаусса-Лоренца — 1319 см⁻¹ (полуширина 5.7 см⁻¹) и 1322 см⁻¹ (4.5 см⁻¹), которые уже через 1 мин 26 с немного смещаются обратно в сторону возрастания величины рамановского сдвига на 4 и 3 см⁻¹ соответственно. За время наблюдения было зарегистрировано семь спектров, и конечное положение (полуширина) компонент приобрело следующие значения — 1323 см⁻¹ (5.1 см⁻¹) и 1325 см⁻¹ (3.7 см⁻¹) соответственно.

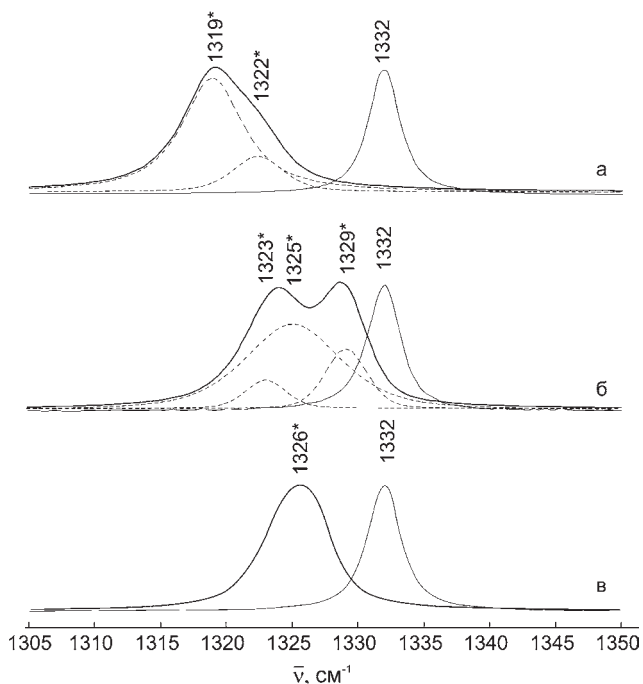


Рис. 3. КР-спектры углеродных частиц из Кумдыкольского месторождения (Казахстан):

а — D0-B4-P30, б — D0-B4-P27, в — D0-B4-P48. Темная линия — КР-спектр при мощности Ar⁺ лазера 12 мВт, пунктирная — результат декомпозиции спектра на компоненты Гаусса-Лоренца, светлая линия 1332 см⁻¹ — спектр КР при мощности лазера 1.2 мВт. Звездочкой отмечены положения КР-активных мод, полученных термостимулированным смещением



Характеристики спектров КР в зависимости от мощности лазерного излучения

Образец	P, мВт	Параметры эксперимента	Компоненты, см ⁻¹	FWHM, см ⁻¹	N	Время, мин:сек
D0-B4-P12	1.2	До нагрева	1332	5.6	4	01:13
	12	1 комп., t ₀	1321	4.1		
		1 комп., t ₁	1321	4.6		
		2 комп., t ₀	1323	11.4		
		2 комп., t ₁	1324	12.5		
		3 комп., t ₀	1330	5.3		
3 комп., t ₁	1330	4.7				
D0-B4-P27	1.2	До нагрева	1332	3.1	6	01:32
	12	1 комп., t ₀	1323	3.2		
		1 комп., t ₁	1325	2.8		
		2 комп., t ₀	1325	8.1		
		2 комп., t ₁	1327	7.8		
		3 комп., t ₀	1329	3.4		
3 комп., t ₁	1330	2.9				
D0-B4-P30	1.2	До нагрева	1332	2.9	7	01:26
	12	1 комп., t ₀	1319	5.7		
		1 комп., t ₁	1323	5.1		
		2 комп., t ₀	1322	4.5		
		2 комп., t ₁	1325	3.7		
D0-B4-P48	1.2	До нагрева	1332	3.0	11	02:39
	12	1 комп., t ₀	1326	5.6		
		1 комп., t ₁	1326	5.6		

Примечание. P — мощность излучения Ag⁺ лазера (514.5 нм); t₀ — положение компонент спектра КР в начале нагрева, t₁ — в конце нагрева; FWHM — полуширина компоненты; N — количество спектров в динамике; время — продолжительность наблюдения.

Подобным же образом ведут себя компоненты КР-спектров частиц D0-B4-P12 и D0-B4-P27 (рис. 3, б), в спектрах которых после нагрева наблюдается расщепление полосы на три компоненты — 1323 см⁻¹ (полуширина 3.2 см⁻¹), 1325 см⁻¹ (8.1), 1329 см⁻¹ (3.4). С течением времени их положение смещается с возрастанием величины рамановского сдвига, при этом происходит уменьшение их полуширины.

Более продолжительное тепловое воздействие на углеродные частицы в дальнейшем приводило в ряде случаев к сгоранию образца, либо к исчезновению асимметричных компонент в спектре, что, вероятно, было связано с трансформацией лонсдейлита в более устойчивую, кубическую фазу алмаза.

От рассмотренных выше спектров заметно отличается спектр КР частицы D0-B4-P48 — какого-либо видимого расщепления линий при нагреве в нем не обнаружено, положение линии 1332 см⁻¹ (полуширина 3.0) после нагрева составляет 1326 см⁻¹ (5.6), и в течение времени, превосходящего время предыдущих экспериментов в два раза, оно не меняется.

Для сравнения динамических характеристик изученных КР-спектров мы исследовали поведение спектров КР заведомо алмазных частиц разных размеров под лазерным нагревом. Для тестирования нами были использованы обломки измельченного кристалла, полученные от одного и того же синтетического алмаза марки АЗ 80/63. Три об-

ломка размером 1 мкм и один более крупный (величиной 10 мкм) были подвергнуты воздействию аргонового лазера (514.5 нм) мощностью 1.2, 12 и 120 мВт. Регулировка мощности излучения производилась с помощью фильтров оптической плотности спектрометра D0.3, D0.6, D1, D2, D3, D4, позволяющих уменьшать максимальную мощность лазерного пучка соответственно в 2, 4, 10, 100, 1000, 10 000 раз.

Спектральные характеристики (положение линии, полуширина) обломков синтетического алмаза в зависимости от мощности возбуждающего КР лазерного излучения

приведены в табл. 3. Отметим, что при увеличении мощности лазера от 1.2 мВт до 12 мВт, положение линии обломков алмаза крупностью 1 мкм незначительно сдвигается в сторону уменьшения величины рамановского сдвига линии от стандартного положения 1332.0 см⁻¹ до 1329.4—1329.8 см⁻¹, при этом происходит некоторое увеличение ее полуширины — от 3.4 до 4.1 см⁻¹ у обломка № 2, и от 7 до 9 см⁻¹ у обломка № 3. При дальнейшем увеличении мощности в 10 раз (до 120 мВт) обломки быстро сгорают, что отражается в уменьшении интенсивности сигнала КР в спектре вплоть до его пол-

Таблица 3

Влияние мощности лазерного излучения Ag⁺ лазера на спектральные характеристики моды T_{2g} (1332 см⁻¹) обломков синтетического алмаза

№	Размер обломка, мкм	P, мВт	ν , см ⁻¹	FWHM
1	1	1.2	1332.0	2.3
		12	1331.9	2.3
		120	1331.3	2.3
2	1	1.2	1332.0	3.4
		12	1329.4	4.1
		120	—	—
3	1	1.2	1332.0	7.0
		12	1329.8	9.2
		120	—	—
4	10	1.2	1332.0	2.2
		12	1331.8	2.3
		120	Нет данных	Нет данных

Примечание. P — мощность излучения лазера (514.5 нм), ν — положение максимума линии алмаза, FWHM — полуширина, прочерк означает, что образец сгорел.



ного исчезновения непосредственно в процессе регистрации, а также отмечается при визуальном контроле через видеокамеру микроскопа после окончания записи спектров. Следовательно, для минимизации нагрева лазером частиц алмаза размером в первые микрометры следует использовать излучение мощностью 1.2 мВт. Увеличение мощности излучения в десять раз (до 12 мВт) приводит к сдвигу линии алмаза на 2.6 см^{-1} и увеличению ее полуширины до 2 см^{-1} . Следует особо отметить, что в спектрах относительно крупных частиц алмаза (более 10 мкм) термостимулированное смещение полосы не наблюдается.

Интенсивность нагрева частиц алмаза лазерным излучением при проведении съемки спектров КР может быть оценена по коэффициенту температурного сдвига трижды вырожденной моды алмаза F_{2g} (1332 см^{-1}), рассчитанному Е. Зубулис и составляющему $0.012 \text{ см}^{-1}/\text{K}$ [6]. В проведенном нами эксперименте наблюдаемый сдвиг фундаментальной линии 1332 см^{-1} на 2.6 см^{-1} в спектре КР алмаза соответствует повышению температуры на 220 К, т. е. ее увеличению от комнатной примерно до 500 К.

По параметрам динамических КР-спектров частиц, среди которых ранее были обнаружены монокристаллический лонсдейлит и лонсдейлит с кубическим алмазом, и таких же спектров алмазных обломков можно выделить как минимум три разновидности веществ. Различаются три типа термостимулированных спектров лонсдейлита и алмаза. Первый тип спектров, на которых наблюдается частичная «релаксация» в сторону возрастания величины рамановского сдвига с линией 1319 см^{-1} (E_{1g}) с плечом 1322 см^{-1} (A_{1g}), соответствует лонсдейлитовой фазе (рис. 3, а). Второй тип объединяет «бимодальные» спектры с частичной «релаксацией» в сторону возрастания величины рамановского сдвига, которые отвечают лонсдейлитовой фазе с положением линий 1323 см^{-1} (E_{1g}) и 1325 см^{-1} (A_{1g}), находящихся совместно с алмазной линией (рис. 3, б) 1329 см^{-1} (F_{2g}). К третьему типу относятся спектры без проявления признаков «релаксации», соответствующие индивидуальной алмазной фазе (рис. 3, в) с положением линии 1326 см^{-1} (F_{2g}). Указанные термостимулированные положения полос соответствуют мощности лазерного возбуждения 12 мВт. Отметим, что компоненты всех этих трех типов спектров отличаются не только положением и шириной, но и скоростью их изменения в процессе нагрева. Этот интересный факт по мере

накопления данных будет подробно рассмотрен в отдельной работе.

Анализируя эксперименты регистрации спектров лонсдейлита в динамическом режиме, необходимо отметить ряд важных моментов. Поскольку расщепление линии лонсдейлита, совпадающей по положению с линией алмаза при комнатной температуре (1332 см^{-1}), происходит при увеличении мощности лазерного излучения в 10 раз (от 1.2 мВт до 12 мВт) и картина спектра меняется уже в течение первых секунд, необходимо регистрировать спектры в достаточно узком временном интервале, обеспечивающем получение оперативной информации о спектроскопических характеристиках вещества, например в диапазоне $1290\text{--}1360 \text{ см}^{-1}$. В динамическом режиме следует записывать не менее 5–10 спектров, регистрирующихся по 10 циклам накопления сигнала продолжительностью 1 сек.

В рамках проведенных нами исследований путем термического воздействия были определены спектроскопические особенности КР-активных мод алмаза и лонсдейлита, которые позволяют провести корректную идентификацию данных фаз при микроскопической размерности частиц.

В результате изучения частиц алмаза разной размерности мы установили, что в спектрах частиц порядка 1 мкм наблюдается небольшое одностороннее смещение F_{2g} моды алмаза в сторону уменьшения величины рамановского сдвига на 2.6 см^{-1} и увеличение ее полуширины до 2 см^{-1} , вызванное лазерным нагревом при увеличении мощности излучения до 12 мВт, в то время как в спектрах относительно крупных частиц (более 10 мкм) в аналогичных условиях изменения спектроскопических характеристик не фиксируются. Данное обстоятельство свидетельствует о необходимости более корректной диагностики частиц алмаза микронной и более мелкой размерности.

Исследование термостимулированных спектроскопических особенностей позволило впервые выявить сильное смещение E_{1g} моды лонсдейлита в сторону уменьшения рамановского сдвига ($6\text{--}13 \text{ см}^{-1}$) и получить экспериментальный спектр монокристаллического лонсдейлита, в котором проявляется расщепление моды F_{2g} на E_{1g} и A_{1g} в виде полосы 1319 см^{-1} (полуширина 5.7 см^{-1}) с плечом 1322 см^{-1} (4.5 см^{-1}). Установлено, что в отличие от алмаза спектр лонсдейлита в динамике характеризуется частичным обратным смещением диагностической линии в сторону возрастания величины рамановского сдвига.

В ходе исследований с помощью высокоразрешающей спектроскопии комбинационного рассеяния света нами была установлена возможность термостимулированного разделения КР-активных мод алмаза и лонсдейлита, находящихся в тесном срастании. Различие в динамическом поведении данных мод в процессе лазерного нагрева позволяет различать фазы алмаза и лонсдейлита даже в том случае, если положение их идентификационных линий практически совпадает.

Таким образом, на примере изучения спектров КР монокристаллического лонсдейлита Кумдыкольского месторождения нами отработана методика идентификации монокристаллической лонсдейлитовой фазы методом КР-спектроскопии, основанная на температурном разделении линий КР алмаза и лонсдейлита, имеющих одинаковое положение при нормальных условиях (1332 см^{-1}).

Литература

1. May P. W., Overton Ph., Smith J. A., Rosser K. N. Multi-wavelength raman spectroscopy of nanodiamond particles // Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 2008. Vol. 1039. 2. Pan Z., Sun H., Zhang Yi, Chen Ch. Harder than Diamond: Superior Indentation Strength of Wurtzite BN and Lonsdaleite // Phys. Rev. Lett. 102, 055503 (2009). 3. Реушняк Н. Б., Езерский В. А. Комбинационное рассеяние света в природных алмазах // Минералогический журнал, 1990. Т. 12. № 5. С. 3–9. 4. Wu B. R. Structural and vibrational properties of the 6H diamond: First-principles study // Diamond and related materials, 2007. № 16. P. 21–28. 5. Smith D. C., Godard G. UV and VIS Raman spectra of natural lonsdaleites: Towards a recognised standard // Spectrochimica Acta Part A 73 (2009) P. 428–435. 6. Zouboulis E. S., Grimditch M. Raman scattering in diamond up to 1900 K. Phys. Rev. B 1991, 43, 12490. 7. Praver S., Nugent K. W., Jamieson D. N. et al. The Raman spectrum of nanocrystalline diamond // Chemical Physics Letters 332, (2000). 93–97. 8. Шумилова Т. Г., Майер Е., Исаенко С. И. Монокристаллический лонсдейлит в регионально-метаморфизованных метасоматически измененных породах // Минералогические перспективы: Материалы Международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2011. С. 161. 9. Isaenko S. I., Shumilova T. G., Mayer J. Raman spectroscopy of lonsdaleite and diamond from Kumdykol deposit (Kazakhstan) // Abstracts of the 7th European Conference on Mineralogy and Spectroscopy, Potsdam, Germany, 4–7 September 2011. P. 36.

Рецензент
к. г.-м. н. В. П. Лютов