

Определение происхождения ограненных алмазов по фононному крылу спектров люминесценции*С. И. Зиенко, Д. С. Слабковский*

Впервые выполнено исследование фононных крыльев (ФК) спектров люминесценции, при комнатной температуре алмазов, изготовленных в природных (27 образцов) и лабораторных (14 образцов) условиях. Установлено, что по форме фононного крыла и положению его «центра тяжести» по оси частот природные алмазы делятся на три группы: с левой, правой и средней характеристиками. Для каждой группы существует свой эталон, у которых коэффициент когерентности близок к единице. Форма ФК у синтетических и облагороженных алмазов заметно отличаются от природных алмазов. Эти отличия связаны с разными по времени механизмами алмазообразования. Алмазы, изготовленные в лаборатории, демонстрируют неравномерное распределение кривой среднего арифметического значения частоты для всех образцов в диапазоне частот. У природных алмазов среднее арифметическое значение частоты описывается гладкой S-образной функцией.

Ключевые слова: спектр люминесценции, природные и искусственные алмазы, фононное крыло, коэффициент когерентности, центр тяжести, среднее арифметическое значение частоты.

Ссылка: Зиенко С. И., Слабковский Д. С. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 357.
Reference: S. I. Ziyenko and D. S. Slabkovsky, Usp. Prikl. Fiz. 7 (3), 357 (2019).

Введение

В связи с появлением высококачественных алмазов, изготовленных в лаборатории, проблема определения происхождения бриллиантов (ограненных алмазов) становится весьма актуальна.

Для определения признаков происхождения алмаза используют ИК и оптическую спектроскопию при температуре жидкого азота. Вспомогательными являются спектры люминесценции бриллиантов при возбуждении разными длинами волн [1].

В данной работе рассмотрен другой подход к решению данной задачи. Он заключается в использовании фононного крыла люминесценции при комнатной температуре.

Постановка работы

В общем случае спектр оптически активного центра люминесценции состоит из узкой бесфононной линии (БФЛ) и широкого фононного крыла (ФК), обусловленного вибронами переходами. Чем сильнее электрон-фононная связь, тем шире и интенсивнее ФК и слабее выражена БФЛ [2]. Степень влияния температуры на величину отношения интенсивностей БФЛ (I) и ФК (Φ) определяется фактором Дебая-Уиллера [3]: $\alpha = I/(I + \Phi)$. При комнатной температуре $\alpha \approx 0$ и, следовательно, форма спектра люминесценции определяется, в основном, ФК, который имеет широкую бесструктурную полосу и характеризует состояние кристаллической решетки по величине энергии [4, 5].

Зиенко Станислав Иванович, профессор, д.т.н.
Слабковский Денис Сергеевич, соискатель.
Смоленский филиал Национального исследовательского университета «МЭИ».
Россия, 214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1.
Тел. +7(8910) 718-81-52.
E-mail: stanislav-zienko@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2018 г.

© Зиенко С. И., Слабковский Д. С., 2019

Измерение спектров люминесценции проводили по методике описанной в работе [6]. Люминесценцию возбуждали лазером с длиной волны 532 нм. Для регистрации излучения использовали спектрометр-флуориметр РАОС-4 [7]. Диапазон измерений составляет 500–800 нм, что соответствует по шкале энергии E значениям 1,55–2,34 эВ. В запрещенной зоне алмаза находятся центры свечения примесных атомов с энергией от 0 до 0,789 эВ. Энергия центров $E = h\nu$, h – постоянная Планка, ν – частота локальных колебаний. Для упрощения анализа в дальнейшем принимаем $h = 1$. Частоту, при которой $h = 1$, обозначим буквой f . Частота измеряется в условных герцах. Такой подход позволяет проводить анализ люминесценции в частотной области с применением Фурье-преобразования.

Анализ фоновых крыла спектров люминесценции природных алмазов

Выполнено исследование 27 бриллиантов природного происхождения. Из них 15 ординарной окраски (эталонные по цвету) и 12 образцов с фантазийной окраской. Огибающая кривая контура спектра содержит высокочастотные колебания в виде «бахромы», небольшие структурные неоднородности, свойственные для отдельных компонент и т. д. В результате Фурье-фильтрации узкополосные сигналы люминесценции, практически полностью подавляются. После фильтрации удаляли постоянную составляющую спектра, затем нормировали его по амплитуде, равной единице.

Типовые спектральные кривые для бриллиантов, изготовленных из природных алмазов, приведены на рис. 1. Спектры 1, 2 и 3 отличаются друг от друга положением «центра тяжести» по оси частот и формой огибающей.

«Центр тяжести» находили по формуле:

$$M\{f\} = \int_0^{\infty} f \times G(f) df, \quad (1)$$

где $G(f)$ – функция распределения спектра люминесценции, удовлетворяющая условию нормировки:

$$\int_0^{\infty} G(f) df = 1.$$

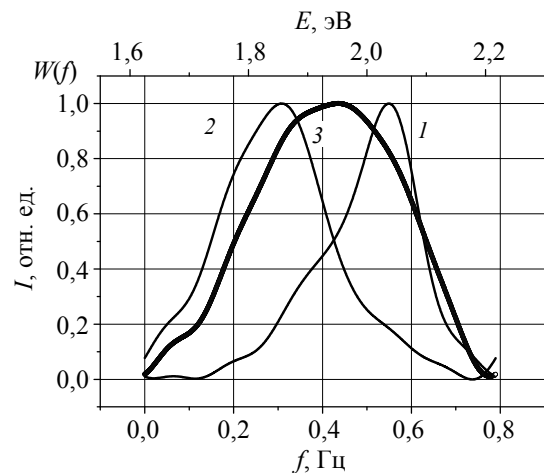


Рис. 1. Фоновые кривые с правой (1), левой (2) и средней (3) характеристиками бриллиантов природного происхождения. Температура $T = 300^\circ \text{K}$.

Представленные на рис. 1 кривые обладают сверхширокополосными свойствами (СШП). Мерой СШП свойств является показатель широкополосности [8, 9]:

$$\mu = \Delta f / f_{\text{cp}}, \quad (2)$$

где $\Delta f = f_{\text{макс}} - f_{\text{мин}}$ ширина спектра на его полувысоте, $f_{\text{cp}} = (f_{\text{макс}} + f_{\text{мин}}) / 2$ среднее значение частоты.

Когда сигнал узкополосный, то $\Delta f \rightarrow 0$ и $\mu \rightarrow 0$, и спектр вырождается в линию. В случае фоновых крыла показатель μ имеет конечную величину. Для природных алмазов $\mu \approx 0,3\text{--}1$ [5]. У них характерным признаком является форма их огибающей.

Цветовые характеристики исследованных натуральных бриллиантов приведены в табл. 1 и 2. Из 15 ординарных бриллиантов 12 образцов имеют спектры с правой характеристикой (кривая 1, рис. 1). К ним относятся бриллианты бесцветные и с небольшим нацветом. Три образца (позиции Н, М и Р), относящиеся к так называемому коричневому ряду, имеют спектры с левой характеристикой (кривая 2, рис. 1). Спектры природных бриллиантов фантазийных цветов имеют либо левую, либо среднюю характеристики (см. рис. 1). Среднюю характеристику имеют только три образца (позиции В, D и G, табл. 2). У них спектры имеют форму близкую к колоколу.

Степень сходства бриллиантов между собой, в каждой из групп определяем путем сравнения профиля ФК люминесценции исследуемого камня с профилем эталонного образца. В качестве эталона для спектров с пра-

вой характеристикой использовали образец D (табл. 1, кривая 1, рис. 1), и фантазийных образцы – J, D (табл. 2, кривые 2 и 3 соответственно, рис. 1).

Таблица 1

**Коэффициенты когерентности спектров люминесценции,
набора эталонов бриллиантов по цвету**

№	Тип бриллианта	Характеристика цвета	Правая характеристика Эталон: образец D (табл. 1)	Левая характеристика Эталон: образец J (табл. 2)
B	Кр-57, 1/6, 0,36 кар	бесцветный, с видимым голубоватым оттенком	0,989	
C	Кр-57, 2/7а, 0,42 кар	бесцветный	0,996	
D	Кр-57, 3/7, 0,41 кар	с едва уловимым оттенком	1,000	
E	Кр-57, 4/4, 0,50 кар	с незначительным оттенком	1,000	
F	Кр-57, 5/3, 0,71 кар	с небольшим желтоватым, сиреневым и серым оттенком, а также с незначительным коричневым оттенком	1,000	
G	Кр-57, 6/4, 0,43 кар	с видимым желтым и серым оттенком	0,989	
H	Кр-57, 6-1/7, 0,87 кар	с видимым коричневым оттенком	–	0,991
I	Кр-57, 7/4, 0,46 кар	с видимым желтым, лимонным и серым оттенком	0,994	
J	Кр-57, 8-1/7, 0,50 кар	очень слабо окрашенный желтый	0,996	
K	Кр-57, 8-2/7, 0,43 кар	слабо окрашенный желтый	0,913	
L	Кр-57, 8-3/4, 0,40 кар	легко окрашенный желтый	0,987	
M	Кр-57, 8-4/5, 0,42 кар	светло-желтый		0,991
N	Кр-57, 9-1/7, 0,51 кар	слабо окрашенный коричневый	0,988	
O	Кр-57, 9-2/6, 0,32 кар	легко окрашенный коричневый	0,992	
P	Кр-57, 9-3/8, 0,45 кар	коричневый	–	0,995

Таблица 2

**Коэффициенты когерентности спектров люминесценции ограненных природных алмазов (бриллиантов)
фантазийных цветов**

№	Характеристика цвета	Левая характеристика образец J (табл. 2)	Средняя характеристика образец D (табл. 2)
B	Кр-57, фантазийный очень слабый желтый /5, 0,90 кар		0,996
C	Кр-57, фантазийный коричнево-желтый /9, 0,81 кар	0,815	
D	П-65, фантазийный желтый /4, 0,55 кар		1,000

Окончание табл. 2

№	Характеристика цвета	Левая характеристика образец J (табл. 2)	Средняя характеристика образец D (табл. 2)
E	Кр-57, фантазийный глубокий желто-оранжеватый /8, 0,71 кар	0,990	
F	ЭО-105, фантазийный глубокий оранжево-коричневый /11, 0,72 кар	0,990	
G	Кр-57, фантазийный насыщенный коричневато-желтый /8, 0,54 кар		0,955
H	Ов-57, фантазийный темный оранжево-коричневый /9, 0,39 кар	0,980	
I	Кр-57, фантазийный коричневый /9, 0,54 кар	0,992	
J	Кр-57, фантазийный сероватый желто-оранжевый /7а, 0,60 кар	1,000	
K	Кр-57, фантазийный интенсивный лимонновато-желтый /8, 0,61 кар	0,994	
L	Кр-57, фантазийный насыщенный желто-оранжевый /8, 0,54 кар	0,991	
M	Кр-57, фантазийный желтовато-коричневый /8, 0,70 кар	0,993	

Параметры эталонов приведены в табл. 3. Из нее видно, что отличительным признаком «цветных» бриллиантов является большая величина показателя широкополосности, равная ~ 1. Тогда как у «бесцветных» он равен ~ 0,5.

Это объясняется более высокочастотными свойствами ординарных бриллиантов: пиковая частота ≈ 0,535 Гц, которая по величине, примерно, в 1,5–2 раза превышает пиковые частоты фантазийных бриллиантов.

Таблица 3

Параметры эталонов – бриллиантов

Тип бриллианта	Энергия спектра, эВ	Пиковая частота, Гц (Энергия, эВ)	Ширина спектра, Гц	Высота, отн. ед.	Показатель широкополосности μ
Ординарный D	0,263	0,535 (2,085)	0,214	0,999	0,40
Фантазийный J	0,311	0,292 (1,842)	0,280	0,999	0,96
Фантазийный D	0,430	0,435 (1,985)	0,431	0,999	0,99

В качестве меры степени сходства использовали функцию когерентности. Понятие когерентности формируется на основе понятия взаимного энергетического спектра. Когерентность или коэффициент когерентности вычисляется по формуле работы [10]:

$$\gamma = E_{12}(f) / \sqrt{E_{11}(f)} \sqrt{E_{22}(f)}, \quad (3)$$

где

$$E_{12} = \int_0^{\infty} W_1(f) \times W_2(f) df, \quad (4)$$

– взаимная спектральная плотность сигналов люминесценции 1 и 2;

$$E_{11}(f) = \int_0^{\infty} W_1^2(f) df, \quad (5)$$

– спектральная плотность энергии сигнала люминесценции-эталона;

$$E_{22}(f) = \int_0^{\infty} W_2^2(f) df, \quad (6)$$

– спектральная плотность энергии сигнала люминесценции исследуемого образца.

Когерентность (если «не обращать внимание» на ее нормирующий множитель) фактически является спектральной функцией взаимной корреляции двух энергетических спектров. Из этого следует: когда два спектра одинаковы по форме $\{W_1(f) = W_2(f)\}$, то ко-

эффицент когерентности $\gamma = 1$ и, наоборот, в случае отсутствия перекрытия спектральных кривых $W_1(f)$ и $W_2(f)$, коэффициент $\gamma = 0$. Следовательно, коэффициент когерентности ограничен интервалом: $0 < \gamma \leq 1$. Данные результата расчета представлены в табл. 1 и 2. Анализ экспериментальных данных показывает существование трех групп (популяций). В пределах каждой из групп коэффициенты когерентности близки друг к другу ($0,98 \leq \gamma \leq 1$). Бриллианты по спектрам люминесценции в пределах каждой популяции похожи друг на друга, но не одинаковы.

Среди ординарных бриллиантов имеется один образец (позиция К, табл. 1) у которого величина $\gamma = 0,913$, и, таким образом, он отличается от других. Исследование показало: этот образец имеет двугорбый спектр (один пик на частоте $\sim 0,560$ Гц и другой $\sim 0,334$ Гц). «Центр тяжести» равен $\sim 0,41$ Гц, что практически совпадает со средней частотой диапазо-

на частот (см. рис. 1). По существу, он занимает промежуточное положение между спектрами бриллиантов с левой и правыми характеристиками. При большом числе таких бриллиантов необходимо выделять отдельную для них группу. Другой образец (позиция С, табл. 2) является облагороженным в природных условиях.

Анализ фононного крыла спектров люминесценции синтетических бриллиантов

Представлены результаты исследование 14 образцов, изготовленных в лаборатории. Из них 7 синтетические (ростовые) желто-зеленой и желто-коричневой цветовой гаммы и 7 облагороженных синтетических бриллиантов, прошедших НРНТ-воздействие с целью изменения цвета. Кривые фононных крыльев для синтетического и облагороженного бриллиантов представлены на рис. 2, а и б.

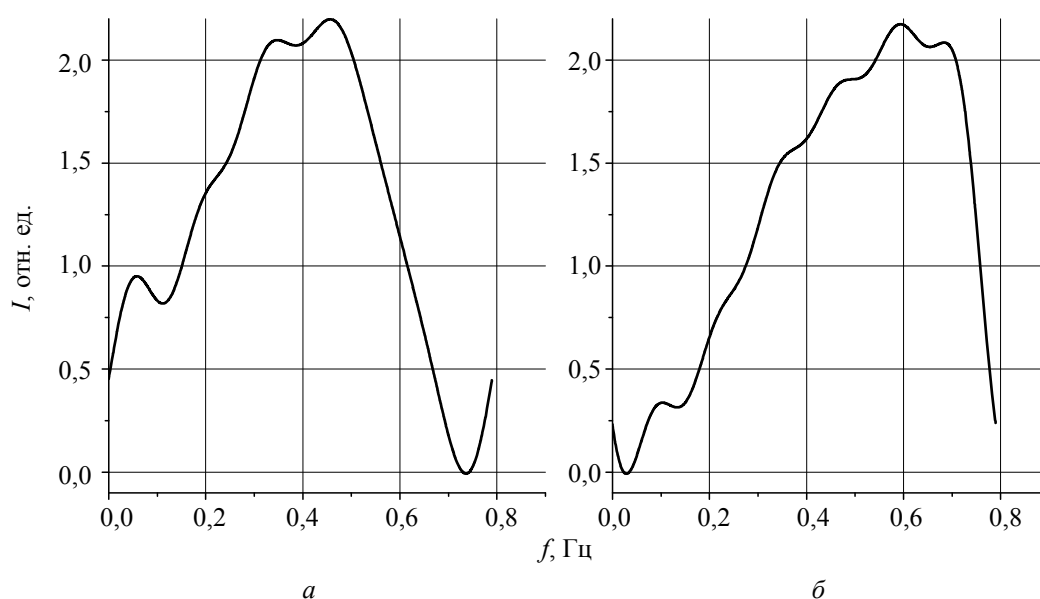


Рис. 2. Фононные крылья дифференциального закона распределения спектров люминесценции: а – синтетический бриллиант ЭО-59, фантазийный, интенсивный малиновато-желтый 1/6 1,64 кар, «центр тяжести» – 0,367 Гц ; б – облагороженный Кр-57, фантазийный, зеленовато-желтый, 1/5, 0,41 кар. Центр тяжести – 0,495 Гц.

Огибающая кривая фононного крыла синтетического бриллианта представляет собой неравномерную по форме линию с впадинами и возвышенностями и существенно отличается от природных алмазов (см. рис. 1). Среди 7 исследованных образцов синтетических бриллиантов похожих по форме образцов не обна-

ружено. «Центр тяжести» у 4 образцов расположен в левой и 3 в правой полуплоскости. У природных алмазов правая частотная область соответствует прозрачным или с небольшим оттенком цвета бриллиантам. Следовательно, синтетические бриллианты с такими параметрами должны быть исключены

из рассмотрения. Другая группа цветных синтетических бриллиантов по расположению центра тяжести ведут себя как природные – цветные, но по форме фононных крыльев существенно отличаются от природных образцов.

Облагороженные бриллианты, также как и синтетические, имеют неоднородную по форме огибающую фононного крыла (рис. 2, б). Среди них образцов похожих по форме нет. Для таких бриллиантов характерным признаком является крутой срез частотной характеристики в области верхних частот (рис. 2, б). «Центры тяжести» спектров люминесценции этих бриллиантов находится в правой полуплоскости. Поскольку они «цветные», то это расходится с расположением «центров тяжести» спектров люминесценции фантазийных бриллиантов природного происхождения (см. рис. 2, б). По этому признаку они согласуются с алмазами, облагороженными в природных условиях, и потому их трудно различить.

Обсуждение результатов

Для объяснения полученных результатов воспользуемся зависимостью среднеарифметического значения частоты $M_{cp}(f)$ от частоты f дифференциального закона распределения спектра люминесценции, поскольку она весьма чувствительна к воздействию экстремальных значений функции $G(f)$. Среднеарифметическое значение частоты дифференциального распределения на отрезке $0-f$ определяется через определенный интеграл. Для этого в соотношении (1) верхний предел интегрирования примем равным f , переменную интегрирования обозначим через t , чтобы не смешивать с верхним пределом f :

$$M_{cp}(f) = \int_0^f t \times G(t) dt, \quad (7)$$

Анализ соотношения (7) представляет большой интерес. Если функция $G(t)$ описы-

вается уравнением прямой $G(t) = k t$, то среднее арифметическое значение M_{cp} представляет собой кубическую функцию $k f^3/2$. При $G(f) = k$ функция M_{cp} имеет форму параболы $k f^2/2$. Когда $G(f) = k - k t$, то имеет место соотношение $M_{cp} = k t^2/2 - k t^3/3$, т. е. также, как в первом случае, имеет форму кубической параболы, но обращенной своей выпуклостью в сторону, противоположную оси абсцисс.

Наиболее простую форму огибающей кривой имеют фононные крылья бриллиантов натурального происхождения (рис. 1). Это позволяет левые и правые крылья спектральных кривых аппроксимировать отрезками прямых. На рис. 3, а представлена кривая дифференциального закона распределения (сплошная линия) ординарного бриллианта (кривая 1, рис. 1). Для аппроксимации использовали отрезки прямых «а в» и «в с». Координаты точек имеют следующие значения: в точке «а» частота $f = 0,22$ Гц, «в» – амплитуда равна 4,05 отн. ед., $f = 0,54$ Гц и «с» частота $f = 0,73$ Гц. По существу, исходный спектр представлен треугольником «а-в-с». При этом площадь этого треугольника должна быть как можно ближе к площади ограниченной кривой спектра.

Решение уравнения (7) с численными данными для исходного спектра и его аппроксимации выполнено с применением математического пакета Origin [11]. Результаты расчета приведены на рис. 3, б. Можно видеть, что приближенное решение хорошо согласуется с данными эксперимента. Подобные результаты получены и для спектра с левой характеристикой (кривая 2, рис. 1). В случае спектра со средней характеристикой (кривая 3, рис. 1) из-за пологой вершины он хорошо аппроксимируется фигурой в форме трапеции. Анализ показывает, что зависимость $M_{cp}(f)$ для алмазов природного происхождения имеет форму гладкой S-образной кривой, причем с различными значениями на верхней граничной частоте.

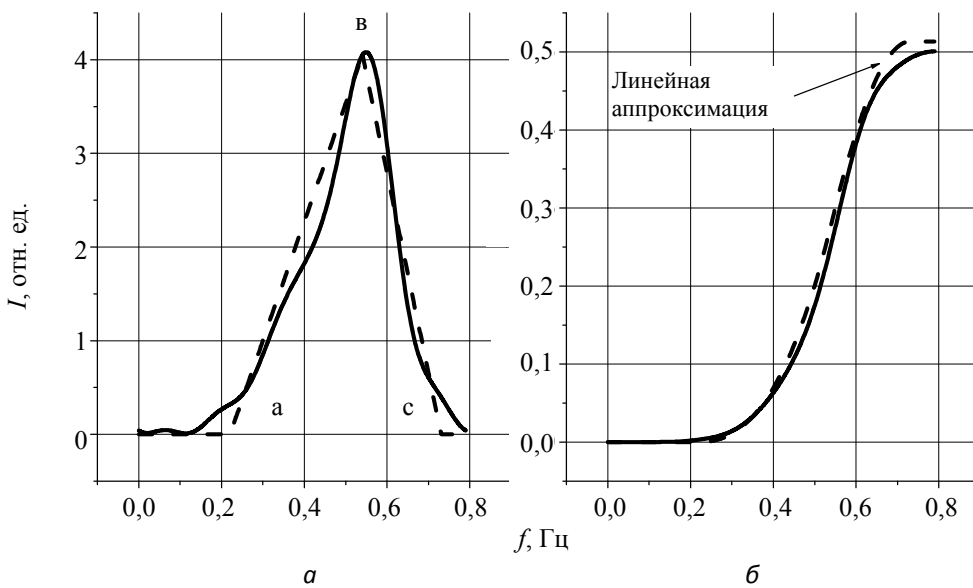


Рис. 3. Кривая дифференциального закона распределения спектра люминесценции ординарного бриллианта (сплошная линия) и ее аппроксимация отрезками прямых (а); зависимости средней арифметической частоты от спектральной частоты для исходной фонной кривой и ее аппроксимации (б).

Огибающие спектров люминесценции синтетических и облагороженных бриллиантов представить в виде элементарных треугольников или трапеций не удастся. На рис. 4, а и б представлены результаты численного расчета для некоторых образцов бриллиантов искусственного происхождения. Можно заметить, что кривые M_{cp} модулированы по интенсивности в соответствии с изменением формы огибающих фонных кривых (рис. 2, а и б), причем соответствующие им кривые показаны на рис. 4, а и б. Кривые демонстрируют нестабильный рост M_{cp} с увеличением частоты f . У синтетических образцов этот рост в первом приближении стремится к S-образной кривой. Тогда как у облагороженных этот рост происходит по параболе.

Таким образом, свойства природных и искусственных образцов заметно отличаются друг от друга. Это явление можно объяснить различным происхождением центров свечения люминесценции. Известно, что до ~ 98 % природных алмазов относятся по физической классификации к типу Ia [12, 13]. Они содержат азот в виде кластеров из четырех или двух атомов. Это так называемые подтипы IaA и IaB. Искусственные алмазы всегда соответствуют типам Ib, Pa, Pb. Среди природных алмазов они встречаются крайне редко. Тип Ib отличается тем, что атомы азота в составе таких алмазов изолированы и не объединены в кластеры.

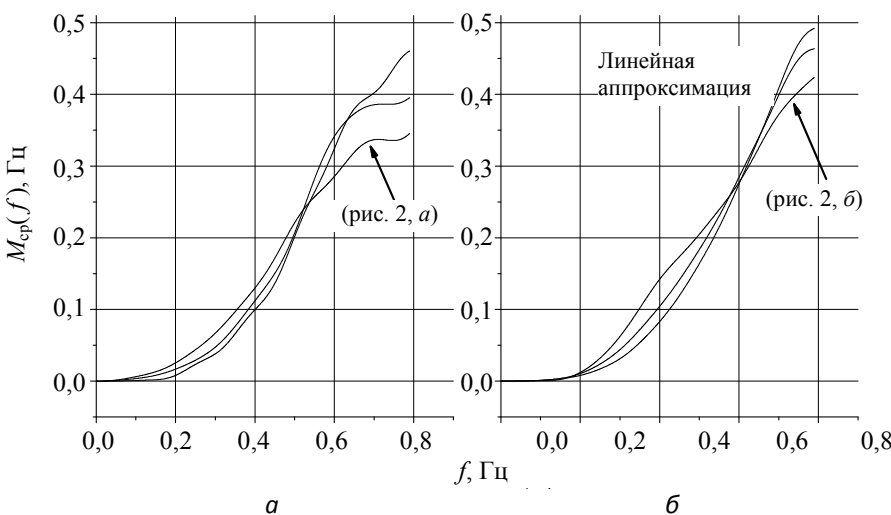


Рис. 4. Зависимость средней арифметической частоты синтетических (а) и облагороженных (б) бриллиантов от спектральной частоты люминесценции.

Заметим, что алмазы типа Па не содержат азота, в то время как Пв содержат химический элемент – бор. Такая примесная структура в природных и искусственных образцах обусловлена разной длительностью процесса алмазообразования. У природных она составляет десятки – сотни миллионов лет, тогда как в лабораторных алмазах единицы – сотни часов. Поэтому природные алмазы по сравнению с искусственными имеют (с позиции энергии центров свечения) более однородную кристаллическую решетку и более совершенные фоновые крылья спектра люминесценции.

Заключение

Природные алмазы по форме фоновых крыла и положению его «центра тяжести» по оси частот делятся на три группы, а именно, с левой, правой и средней характеристиками. Для каждой группы существует свой эталон, у которых коэффициент когерентности близок к единице. Форма ФК у синтетических и облагороженных алмазов заметно отличаются от природных. Эти отличия связаны с разными по времени механизмами алмазообразования. Алмазы, изготовленные в лаборатории, демонстрируют неравномерное распределение кривой среднего арифметического значения частоты для всех образцов в диапазоне спектральных частот. У природных алмазов сред-

нее арифметическое значение частоты описывается гладкой *S*-образной функцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диагностика желтых мелких бриллиантов. Геммологический центр МГУ [Электронный ресурс]. www.gem-center.ru/labnews-jellmeble.htm (дата обращения 25.06.2018).
2. Осадько И. К. // Успехи физических наук. 1979. Т. 128. № 1. С. 31.
3. Васильева М. А. Дис...докт. физ.-мат. наук. – М.: МПГУ, 2009.
4. Зиенко С. И., Слабковский Д. С. // Естественные и технические науки. 2014. № 9-10. С. 195.
5. Зиенко С. И., Слабковский Д. С. // Естественные и технические науки. 2014. № 9-10. С. 202.
6. Зиенко С. И., Слабковский Д. С. // Вестник МЭИ. 2015. № 5. С. 90.
7. Акустооптический спектрометр НТЦ УП РАН, версия 01.03.2003 г.
8. Лазоренко О. В., Черногор Л. В. // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т. 13. № 2. С. 166.
9. Зиенко С. И., Беляков М. В., Малышкин В. В. // Научные технологии. 2017. № 8. С. 40.
10. Банищikov А. И., Спасский Б. А. // Вестник Пермского университета. 2011. Вып. 1 (10). С. 40.
11. Исакова О. П., Тарасевич Ю. Ю., Юзюк Ю. И. Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета Origin. – М.: Книжный дом «Либриком», 2009.
12. Алмаз в электронной технике: сб. ст. Отв. ред. В. Б. Квасков. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
13. Природные алмазы России: научно-справ. изд. Ред. В. Б. Квасков. – М.: Полярон, 1997.

PACS: 78.40.Me

Determination of origin of the faceted diamonds on a phonon wing of ranges of luminescence

S. I. Ziyenko and D. S. Slabkovsky

The Branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Smolensk
1 Jenergeticheskij proezd, Smolensk, 214013, Russia
E-mail: stanislav-zienko@rambler.ru

Received September 7, 2018

The research of the phonon wings (PW) of ranges of a luminescence is for the first time executed at the room temperature of the diamonds made in natural (27 samples) and laboratory (14 samples) conditions. It is established: in a shape of a phonon wing and the provision of his "center of gravity" on an axis of frequencies natural diamonds are divided into three

groups: with the left, right and average characteristics. For each group there is the standard at which the coefficient of coherence is close to unit. A form of FC at the synthetic and improved diamonds considerably differ from natural. These differences are connected withalmazobrazovaniye mechanisms, different in time. The diamonds made in laboratory show uneven distribution of a curve of an arithmetic average of value of frequency for all samples in the range of frequencies. At natural diamonds an arithmetic average the value of frequency is described by smooth S-shaped function.

Keywords: luminescence range, natural and artificial diamonds, phonon wing, coherence coefficient, center of gravity, arithmetic average value of frequency.

REFERENCES

1. *Diagnostics of yellow small diamonds*. (Gemological Center of MSU [an electronic resource] www.gem-center.ru/labnews-jellmeble.htm (date of the address of 25.06.2018) [in Russian].
2. I. K. Osadko, *Sov. Phys. Usp.* **128** (1), 31 (1979).
3. M. A. Vasilyeva, Dissertation, (MPGU, 2009).
4. S. I. Ziyenko and D. S. Slabkovsky, *Natural and technical sciences*, No. 9–10, 195 (2014).
5. S. I. Ziyenko and D. S. Slabkovsky, *Natural and technical sciences*, No. 9–10, 202 (2014).
6. S. I. Ziyenko and D. S. Slabkovsky, *Vestnik MEI*, No. 5, 90 (2015).
7. *Optical-acoustic spectrometer STC RAS Unitary Enterprise*, (version of 01.03.2003).
8. O. V. Lazorenko and L. V. Chernogor, *Radiophysics and radio astronomy* **13** (2), 166 (2008).
9. S. I. Ziyenko, M. V. Belyakov, and V. V. Malyskin, *Naukoemkie Tekhnologii*, No. 8, 40 (2017).
10. A. I. Banshchikov and B. A. Spassky, *Vestnik Permskogo Universiteta*, No. 1 (10), 40 (2011).
11. O. P. Isakova, Yu. Yu. Tarasevich, and Yu. I. Yuzyuk, *Processing and visualization of these physical experiments by means of an Origin package*. (Librikom, Moscow, 2009) [in Russian].
12. *Diamond in the electronic equipment*. Ed. by V. B. Kvaskov (Energoatomizdat, Moscow, 1990) [in Russian].
13. *Natural diamonds of Russia: Handbook*. Ed. by V. B. Kvaskov (Polaron, Moscow, 1997) [in Russian].