

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ АЛМАЗОВ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ КИМБЕРЛИТОВЫХ РУД

В. А. Чантурия¹, И. Ж. Бунин¹, Г. П. Двойченкова¹, О. Е. Ковальчук²

¹Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: dvoigp@mail.ru,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК “АЛРОСА”,
Чернышевское шоссе, 16, 678174, г. Мирный, Россия

Представлены новые экспериментальные данные по исследованию спектральных характеристик фотолюминесценции природных алмазов с глубоких горизонтов трубок “Мир” и “Интернациональная” (Республика Саха (Якутия)) в зависимости от состава основных и дополнительных оптически активных структурных дефектов в кристаллах и температурных режимов регистрации спектров с учетом кинетики люминесценции. Высказано предположение о возможности повышения эффективности фотолюминесцентной сепарации алмазных кристаллов за счет применения низкотемпературных воздействий.

Алмазы, фотолюминесценция, спектроскопия, микроструктурные характеристики, оптически активные дефекты, низкие температуры

Люминесценция алмазов в первую очередь характеризуется интенсивностью и цветом свечения [1]. В зависимости от источников возбуждающего излучения люминесценция подразделяется на рентгенолюминесценцию [2] и фотолюминесценцию [3]. Для спектра рентгенолюминесценции алмаза характерна так называемая А-полоса свечения [4] — широкий бесструктурный участок спектра в диапазоне длин волн от 330 до 600 нм с максимумом около 460 нм, визуально воспринимаемый как голубое свечение. Оно вызывается рентгеновским и гамма-излучением. Именно на возбуждении А-полосы люминесценции рентгеновскими лучами с последующей регистрацией свечения и основан метод рентгенолюминесцентной сепарации. В работах [5–7] показано, что высвечивание А-полосы имеет сложную кинетику, которая объясняется двухстадийностью процесса рекомбинации — в ней присутствуют как медленные, так и быстрые компоненты. На первой стадии возникает дырочная рекомбинационная люминесценция, на второй стадии происходит электронная безызлучательная рекомбинация “зона проводимости – примесь” [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН ПП-4.

АО НПП “Буревестник” (Группа “АЛРОСА”, Санкт-Петербург, Россия) на основе исследований кинетических характеристик рентгенолюминесценции алмазов разработана серия сепараторов повышенной селективности. Эти аппараты отделяют алмазы от других люминесцирующих минералов тяжелой фракции по скорости затухания люминесценции после прекращения подачи возбуждающего импульса и более точно “узнают” алмазы среди других минералов.

Фотолюминесценция (ФЛ) не используется для сепарации алмазов и сопутствующих минералов, поскольку часть алмазов не люминесцирует при ультрафиолетовом возбуждении, а другая их часть испускает излучение, трудно отличимое от свечения иных минералов. Примеси и дефекты, определяющие цвет фотолюминесценции алмаза, несут информацию об условиях его кристаллизации. Поэтому прежде всего этот метод представляет интерес для геологов при поисках кимберлитовых тел. При понижении температуры алмазов можно значительно увеличить интенсивность люминесценции алмазных кристаллов, что в совокупности с информацией о кинетике затухания люминесценции позволит разработать принципиально новый метод фотолюминесцентной сепарации алмазов, а также повысить эффективность технологии рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего минерального сырья за счет применения низкотемпературных воздействий.

Фотолюминесценция хорошо возбуждается излучением азотного лазера (N_2 -лазера) ЛГИ-521 с длиной волны излучения 337 нм. Ультрафиолетовое излучение необходимо для того, чтобы активировать все центры люминесценции, излучающие в видимой или ближней инфракрасной области. При выборе источника возбуждения необходимо учитывать, что время затухания у дефектов в алмазе находится в пределах от 2 нс до 20 мкс. Полуширина импульса используемого лазера ЛГИ-521 — 10 нс, интервал между импульсами от 10 до 200 мс, что позволяет исследовать кинетику затухания свечения дефектов алмаза, определять время жизни возбужденного состояния дефектов.

Для ФЛ природных алмазов характерно наличие оптически активных центров (дефектов). В спектре они обозначаются как центр N3 — голубое свечение, центры S и H — два различных семейства, дающие зеленое и желто-зеленое свечение, визуально довольно сходное. Оранжевую и красную люминесценцию дают центры с длинами волн 575 и 640 нм. В алмазах имеются и другие центры люминесценции, встречающиеся реже. Люминесцентные методы редко являются количественными из-за различного рода эффектов взаимного влияния центров люминесценции, неоднородностей их распределения и сложной формы кристаллов. В случае перекрытия полос люминесценции от разных центров для их идентификации применяется исследование спектрально-кинетических характеристик, т. е. разделение спектров по времени затухания. Время жизни — средняя продолжительность пребывания электрона в данном возбужденном состоянии — является важнейшей характеристикой дефектов.

Существуют дефекты, не активные в люминесценции, но проявляющиеся в задержке люминесценции некоторых центров или вызывающие новые компоненты в люминесценции с собственным временем затухания τ . Установлено, что время затухания наиболее часто встречающейся полосы люминесценции азотных центров N3 с бесфонной линией 415.2 нм (2.93 эВ) $\tau = 40$ нс; вместе с тем не люминесцирующие А-дефекты вызывают дополнительную полосу с $\tau = 6 - 23$ нс в зависимости от концентрации дефектов. Кроме того, N3-дефекту часто сопутствуют компоненты с $\tau = 2.3 \cdot 10^{-3}$ с и $\tau = 1$ с с бесфонными линиями 462 нм (N3a), 543 нм (N3b). Эти компоненты очень слабы по сравнению с N3, но через $\sim 10^{-5}$ с после прекращения возбуждения они определяют спектр люминесценции в синей области. Также имеются данные о снижении времени затухания N3 центров при росте концентрации А-дефектов.

В литературе обычно приводятся следующие значения времени затухания для различных дефектов: N3 — 17 нс, H4 — 19, GR1 — 1.3, 640 нм — 13 нс. Дополнительный оптически активный центр S2, проявляющийся в фотолюминесценции, имеет три группы полос с различным временем

затухания: у линии 523 нм время затухания $2.4 \cdot 10^{-4}$ с, а у линий 489 и 477 нм — $3.5 \cdot 10^{-6}$ с. Центр S1 обладает двумя бесфононными линиями — 503 и 510 нм с временем затухания $3.2 \cdot 10^{-3}$ и $10.4 \cdot 10^{-3}$ с соответственно. Люминесценция центров N и S лежит в близком интервале, поэтому по спектрам непрерывной во времени люминесценции разделить их бывает очень сложно.

За счет введения задержки регистрации люминесценции порядка $10^{-6} - 10^{-5}$ с можно добиться полного тушения люминесценции центров N, системы 640 нм (вакансия, захваченная изолированным примесным атомом азота [9]), N3; при этом идентификация полос значительно упрощается. Расшифровка спектров проводится по характерным бесфононным линиям, фононным повторениям и максимумам с учетом временных характеристик дефектов. Так, часто встречаются спектры с суперпозицией полос дефектов N и S. В этом случае вводится время задержки 1–2 мкс и регистрируются спектры с S-дефектами, по которым получают относительную интенсивность люминесценции этих центров с учетом снижения интенсивности за время задержки. В случае наложения полос центров N3, N и S спектр люминесценции можно получить с двумя задержками — 50 нс и 10 мкс. Компьютерная обработка полученных спектров позволяет разложить их на отдельные спектральные составляющие и вычислить относительные интенсивности спектров. Результаты приводятся в виде перечня обнаруженных центров люминесценции и их относительных интенсивностей.

На рис. 1 приведен спектр фотолюминесценции алмаза, зарегистрированный без задержки, с задержкой 2 мкс и их разность. Расшифровка такого спектра без учета кинетики люминесценции затруднительна вследствие наложения нескольких полос. Анализ спектров показывает, что быстрые компоненты люминесценции сформированы дефектами N3 и системой 640 нм с максимумами 450 и 690 нм, а медленные — дефектами S2 и S1 с максимумами 540 и 590 нм соответственно. Возможно присутствие N-дефектов в незначительных концентрациях, на что указывает затяжка длинноволнового края полосы N3. Для разделения дефектов N и N3 необходима задержка порядка 50 нс.

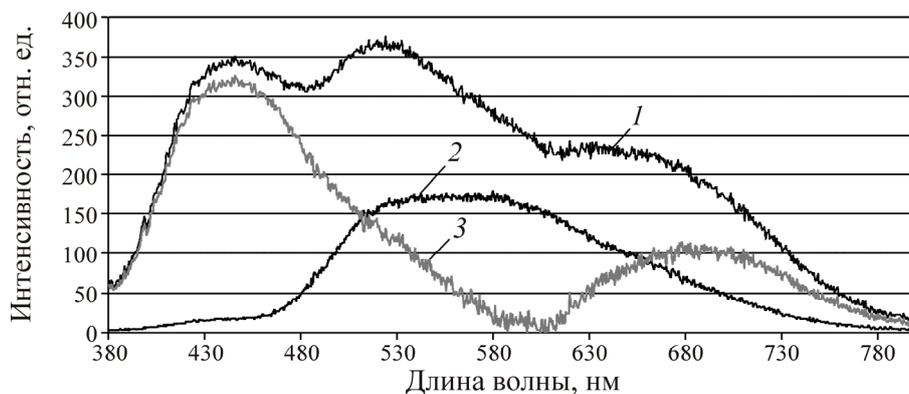


Рис 1. Спектры фотолюминесценции алмаза: 1 — без задержки; 2 — задержка 2 мкс; 3 — быстрые компоненты

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования кинетики люминесценции в температурном диапазоне 140–300 К проводили на кристаллах алмазов трубок “Мир” и “Интернациональная” (всего 301 кристалл) крупностью –8+4 мм, –4+2 мм, –2+1 мм. Фотолюминесценция возбуждалась азотным лазером ЛГИ-21 с длиной волны 337 нм, полуширина импульса лазера 40 нс, интервал между импульсами от 10 до 20 мс. Спектры ФЛ регистрировали в диапазоне 380–850 нм и анализировали с помощью спектрально-вычислительного комплекса на базе ДМР-4 с использованием оригинального программного обеспечения.

Эксперименты в условиях низких температур выполнены в лаборатории НИГП АК “АЛРОСА” с использованием проточного азотного оптического криостата для исследования образцов в диапазоне изменения температур 90–300 К, схема которого представлена на рис. 2.

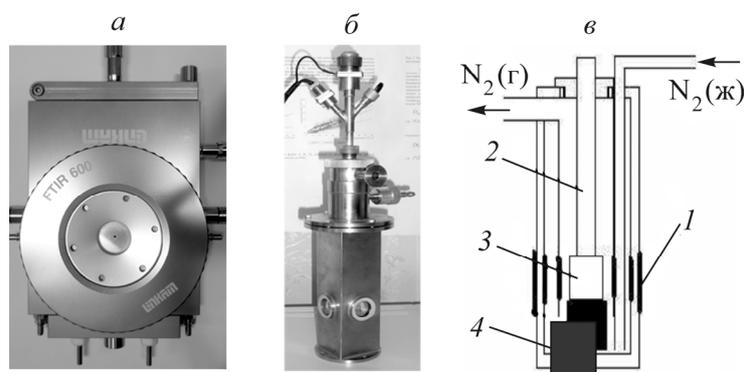


Рис. 2. Термокриокамера Linkam (а) универсального азотного криостата для регистрации спектров поглощения или люминесценции (б); схема проточного оптического криостата (в): 1 — кварцевые окна; 2 — вставка в криостат; 3 — прободержатель; 4 — медный хладопровод с нагревателем и термопарой; г — газообразный, ж — жидкий N₂

Криостат состоит из наружного кожуха и шахты, пространство между которыми вакуумировано, и вставки 2. Вставка в криостат предназначена для крепления держателя образца 3, имеет термопару и нагреватель на хладопроводе 4 для исследований при температурах более 90 К. Жидкий азот поступает в криостат из сосуда Дьюара под действием избыточного давления, создаваемого в сосуде нагревателем. Вставка в сосуд Дьюара имеет нагреватель и датчик минимального уровня жидкого азота. Управление работой криостата осуществляется блоком терморегулятора, управляемого автономно или с компьютера с помощью соответствующего программного обеспечения. Криостат имеет три кварцевых окна 1 для исследования образца на просвет и в геометрии 90°.

При проведении сравнительных исследований после установки образца в криостат до понижения температуры в криокамере регистрировали спектр люминесценции образца, затем, по достижении требуемой температуры, проверяли точность попадания лазерного луча на образец по интенсивности люминесценции. С целью экономии жидкого азота охлаждение образцов проводили до 140 К при регистрации спектров люминесценции и до 170–200 К при регистрации спектров поглощения.

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оптически активные дефекты в алмазах. Для фотолюминесценции алмазов характерен широкий набор дефектов по всему измеряемому диапазону длин волн, цвет ФЛ определяет большая интенсивность свечения тех или иных дефектов. Хотя N3 встречается в различных концентрациях у 98 % изученных кристаллов, лишь у 16 % в спектрах ФЛ регистрируется только этот дефект, вызывая ярко синее свечение кристаллов (рис. 3).

Общее содержание азота в этих алмазах низкое, в инфракрасной спектроскопии коэффициенты поглощения полос А и В1 дефектов не превышают 10 см⁻¹. С увеличением содержания азота яркость свечения системы N3 падает, увеличивается полуширина бесфонных полос, возможно, вследствие увеличения содержания азота в виде А-центра. В [10, 11] показано, что полуширина линии 415.6 нм не зависит от концентрации дефектов А, а определяется содержанием дефектов В2 и В1. Следует отметить, что на кристаллах алмазов изучаемой коллекции не удалось установить такую корреляцию из-за плохого качества спектров поглощения в ИК-области. Значительная искаженность, “зашумленность” полученных по стандартной методике спектров ИК-поглощения многих кристаллов вызвана округлой формой алмазов.

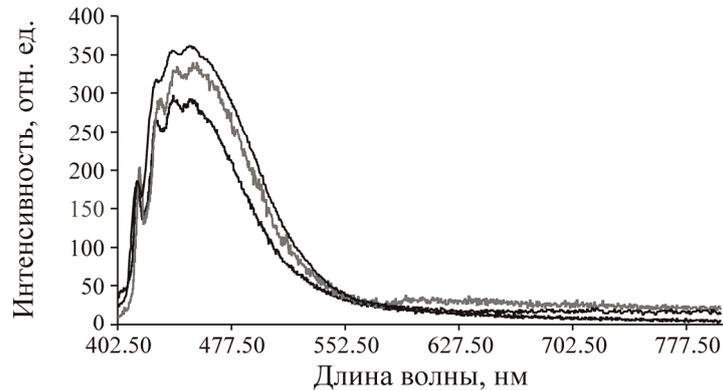


Рис. 3. Спектры синей фотолюминесценции алмазов

У 40 % изученных алмазов, помимо N3-дефекта, регистрируются дефекты с максимумами интенсивности при 630–640 и 700–720 нм, образующие фиолетовую ФЛ в случае слабой интенсивности этих максимумов и оранжево-розовую, если интенсивность близка или превосходит систему N3 по интенсивности свечения (рис. 4).

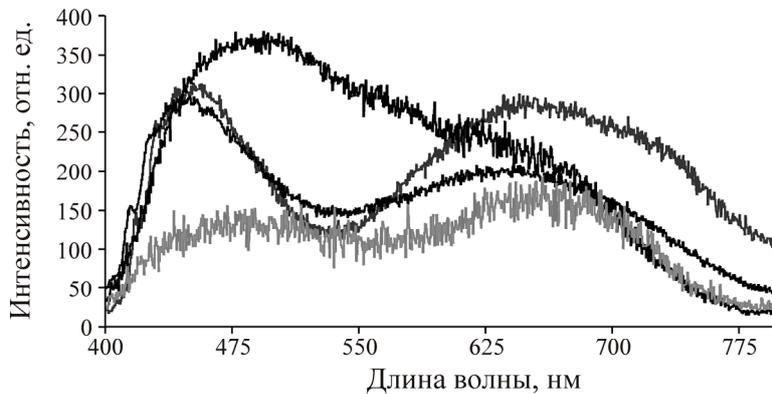


Рис. 4. Спектры розово-фиолетовой фотолюминесценции алмазов

Спектр ФЛ, отвечающий дефекту с максимумом на 630–640 нм, в большинстве случаев относительно быстро затухает. Только в некоторых случаях (~ 1 %) максимум медленной компоненты свечения, относящийся к дефекту S1, сравнительно отчетливо регистрируется через 4 мкс и находится на 600–610 нм (рис. 5).

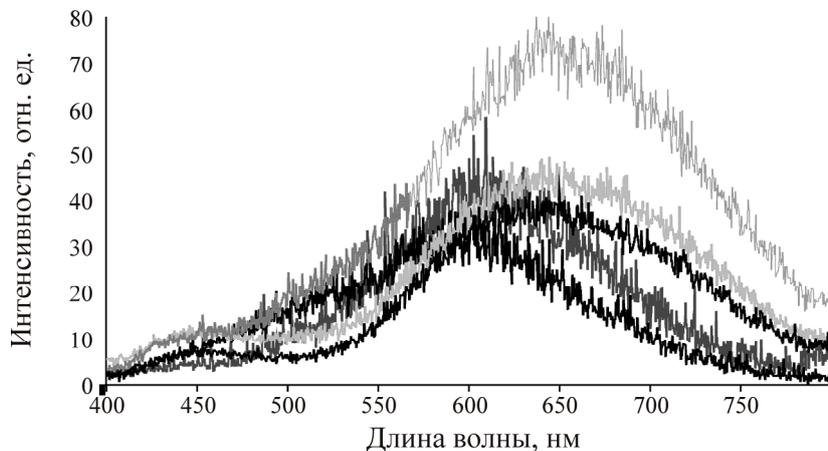


Рис. 5. Спектры розово-фиолетовой фотолюминесценции; задержка регистрации люминисценции 4 мкс

Примесный оптически активный дефект S1 является дополнительным к С-центру, наблюдается только в спектрах ФЛ природных алмазов типа Ib [9, 12]. Наличие двух бесфононных линий у центра свидетельствует о том, что у него в возбужденном состоянии есть два уровня с разными вероятностями излучательных переходов, запрещенных в поглощении. Время жизни для каждого из состояний разное, что приводит к небольшому смещению максимума при регистрации быстрой и медленной компонент свечения. Природа возникновения дефекта не установлена, предположительная модель NV-центра (азото-замещенная вакансия в алмазе); дефект S1 не присутствует в алмазах с высоким содержанием А-центра.

В изучаемой коллекции у 8 % алмазов от общего числа кристаллов наблюдается быстрое затухание свечения максимума на 630–640 нм. В этих кристаллах максимум относится к дефекту 575 нм, придающему оранжево-розовый оттенок свечению, спектр которого представляет собой широкую интенсивную полосу. Предполагаемая модель дефекта — атом азота, смещенный из узла решетки по направлению $\langle 100 \rangle$, вблизи вакансии, расположенной в центре тетраэдра I N $\langle 100 \rangle$ V [9].

Дефект 578 нм отмечается в спектрах мелкокристаллических агрегатов алмазов (разновидность IX), сильно графитизированных монокристаллов и мелких алмазов с пониженной концентрацией азотных примесей. Дефект с максимумом 690–720 нм регистрируется в 32 % от всех исследованных кристаллов алмазов и относится, по всей видимости, к центру 640 нм, быстро гаснущему, не регистрируемому через 4 мкс, что свидетельствует о наличии в алмазах С-центра.

В спектре алмазов с зеленой и сине-зеленой ФЛ, общее количество которых около 40 %, регистрируются, помимо N3-дефекта, дефекты с максимумами на 510–530 нм и более слабые по интенсивности на 630–640 нм, 670–680, 700–720, 750–770 нм (рис. 6). Зеленая фотолюминесценция наблюдалась у 15 % алмазных кристаллов и обуславливалась дефектом S2 (в некоторых случаях S3), который регистрировался даже через 20 мкс (рис. 7).

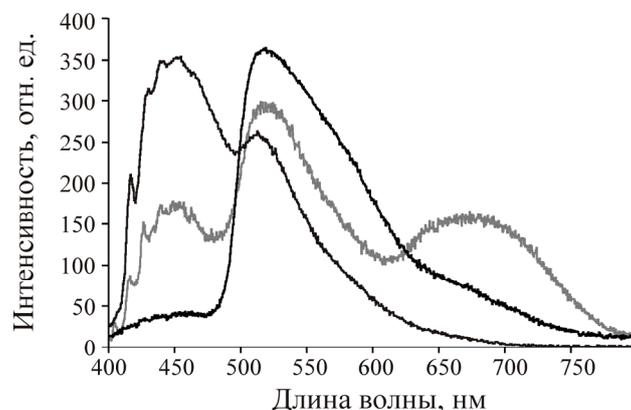


Рис. 6. Спектры сине-зеленой фотолюминесценции алмазов

Интенсивное свечение N3-дефекта придает голубой оттенок свечения трети от всех алмазов, содержащих в спектре эти максимумы. Исследование кинетики затухания свечения показало, что у 35 % алмазов с сине-зеленым свечением уже через 6 мкс дефекты не регистрируются. В этом случае зеленое свечение алмазов вызвано N3 и N4 центрами. Природа дефектов является примесно-вакансионной. Дефект N3 возникает в алмазах с А-центрами, а N4 — с В1, и коэффициенты поглощения в максимумах главных полос обеих систем находятся в зависимости от содержания в кристаллах дефектов А и В1. Предложенная в [13] модель N3-дефекта — два атома азота и присоединенные к ним две вакансии. Дефект N4 есть комплекс из дефекта В1 или его фрагмента и вакансий в гош-конфигурации. По оценке Дэвиса [9], в состав N3 и N4

дефектов входит около 0.1 % от всего количества азота в кристалле. В кристаллах изученной коллекции встречаются центры как N4, так и N3. Следовательно, в данных кристаллах имеются как А, так и В1 центры. Дефекты N3 и N4 сопровождаются в своем большинстве дефектами, образующими максимум на 670–680 нм с различными интенсивностями, не регистрируемыми уже через 4 мкс. Предположительно, этот максимум относится к дефекту 640 нм со смещенным максимумом вследствие наложения менее интенсивного максимума дефекта 575 нм.

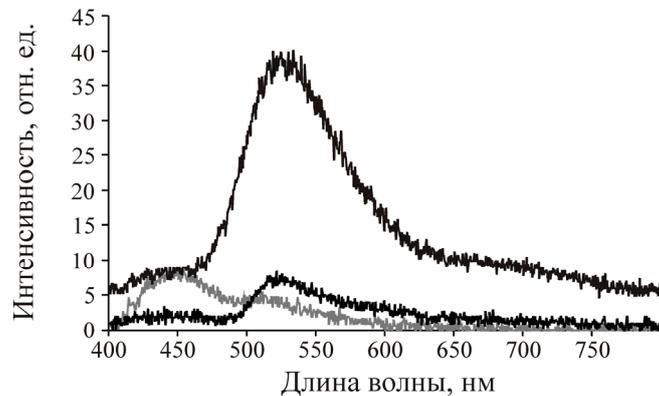


Рис. 7. Спектры зеленой фотолюминесценции алмазов; задержка регистрации люминисценции 20 мкс

При слабой интенсивности свечения N3-дефекта у 10 % алмазов с S2 и S3 дефектами свечение смещается в желто-зеленую область спектра. Дефект S2 является примесным дополнительным к В1-центру с тремя системами полос с бесфонными линиями, имеющими свою кинетику затухания, не проявляется в поглощении [9]. Для дефекта характерно уширение бесфонных линий в спектре ФЛ с ростом содержания дефекта В1 в алмазе. Природа S2 не установлена; предполагается, что это сложный дефект, в состав которого входит фрагмент N-V-N.

Предположительно, для 5 % изученных кристаллов смещение максимума с желто-зеленой ФЛ на 540 нм происходит также из-за присутствия дефекта S3, имеющего собственный максимум на 550–570 нм. Дефект S3 имеет две бесфонные линии с разными кинетическими кривыми затухания. Системы характерны для кубических секторов с нетангенциальным механизмом роста кристаллов алмазов секториального строения. Предположительно, в структуре данных дефектов присутствует один и тот же фрагмент из нескольких атомов азота и одной вакансии, в который, возможно, входит как структурный мотив группа атомов N-V-N, свойственная дефекту S2 (по [13]), смещающий максимум свечения в УФ-область к 540 нм. С понижением общей концентрации азота интенсивность и время жизни ФЛ возрастают. Алмазы с яркой ФЛ и низким содержанием азота фосфоризируют, а в спектрах через 20 мкс регистрируются интенсивные максимумы на 520–530 нм, относящиеся к S2 и к S3 дефектам. Спектры некоторых алмазов, в своем большинстве с S2 и S3, содержат быстро гаснущий максимум на 760–770 нм. Скорее всего, регистрируемый максимум относится либо к дефектам 700, 793 и 788 нм, которые наблюдаются только в спектрах ФЛ, быстро затухают и сопровождают S3-дефект, либо к GR1 с бесфонной линией на 741 нм.

Встречающийся у некоторых кристаллов в спектрах фотолюминесценции дефект с максимумом на 580 нм, предположительно, можно отнести к системе 545 нм, коррелирующей с полосой В2 и, возможно, представляющей собой фрагмент пластинчатых образований в плоскости {100}. Образование этого центра, как и N3, в синтетических алмазах происходит в ограниченной области при относительно низких температурах и длительных выдержках. Максимум на 540 нм, вероятно, относится к дефекту 490.7 нм в спектрах фотолюминесценции дымчато-коричневых и ро-

зово-фиолетовых алмазов со следами пластической деформации. В спектре фотолюминесценции этих алмазов регистрируются дефекты N3, N3, N4, 575 нм и широкая бесструктурная полоса с максимумом 720 нм. Максимум на 720 нм, возможно, относится к дефекту 640 нм.

Влияние температуры на спектральные характеристики ФЛ алмазов. Алмаз по своим свойствам отличается от других минералов. При комнатной температуре свойства алмаза соответствуют свойствам других минералов при значительно более низких температурах. Алмаз как бы “заморожен”, что выражается в его рекордно высокой температуре Дебая 1860 К [9, 14]. Это проявляется и в спектрах люминесценции некоторых систем — N3, N3, N4, структурированных даже при комнатной температуре. Однако большинство систем люминесценции при комнатной температуре образуют широкие размытые полосы, с большим трудом поддающиеся интерпретации. При комнатной температуре в спектрах фотолюминесценции электронно-колебательная полоса с бесфононной линией 2.917 эВ отсутствует, а интенсивность ее бесфононной линии снижается в 5 раз при росте температуры от 60 до 200 К. Структура в полосах люминесценции S1, S2, S3 и большинства других центров при комнатной температуре отсутствует. Таким образом, для определения набора центров люминесценции в конкретном кристалле, отражающем условия его роста и постростовую историю, необходима регистрация спектров люминесценции при пониженных температурах.

С повышением температуры происходит размытие электронных и электронно-колебательных уровней, что приводит к ослаблению вплоть до полного исчезновения структурированности в спектрах поглощения и люминесценции. Эта закономерность затрудняет, а часто делает невозможной интерпретацию спектров поглощения и люминесценции, зарегистрированных при комнатной температуре. В общем случае при снижении температуры наблюдается возрастание относительной интенсивности бесфононных линий, снижение полуширины, обостряется и контур фононных повторений, растет постоянная времени затухания люминесценции. Также со снижением температуры происходит рост общей интенсивности люминесценции из-за уменьшения доли безызлучательных переходов. Приведенные закономерности для алмаза хорошо иллюстрируются примером активного в процессах поглощения и люминесценции N3-дефекта, довольно часто встречающегося в природных алмазах. Структурная модель дефекта N3 в настоящее время установлена достаточно надежно — три атома азота и вакансия. Полуширина бесфононной линии 415 нм снижается в 5 раз при уменьшении температуры от 300 до 200 К, что сопровождается соответствующим ростом ее интенсивности. На рис. 8 приведены спектры люминесценции кристалла, зарегистрированные при температурах 145 и 200 К.

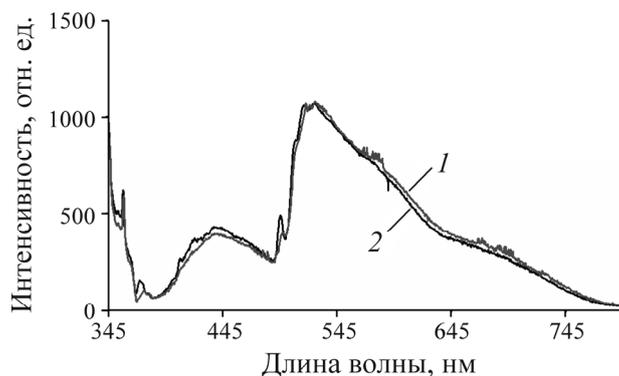


Рис. 8. Спектры люминесценции кристалла алмаза при температурах 200 (1) и 145 К (2)

На спектре выделяются полосы люминесценции N3 и N4 с бесфононными линиями при 415 и 496 нм. При комнатной температуре какая-либо структурированность в спектре отсутствует. Из сравнения спектров рис. 8 видно, что с уменьшением температуры растет относительная

интенсивность бесфононных линий и проявляются фонные повторения. Слабая выраженность линий системы N3 обусловлена, вероятно, сильными структурными искажениями в этом алмазном кристалле. Таким образом, при регистрации спектров люминесценции алмазов с системой N3 снижение температуры от 200 до 145 К приводит к более четкой регистрации как бесфононной линии, так и фонных повторений.

На рис. 9 представлены спектры люминесценции кристалла, зарегистрированные при температурах 300, 196 и 142 К, демонстрирующие изменение относительной интенсивности бесфононной линии и сужение полос фонных повторений при изменении температуры. Видно, что снижение температуры от 196 до 142 К не приводит к заметным изменениям в спектре. Это обстоятельство обусловлено тем, что дальнейшее снижение ширины бесфононной линии и фонных повторений не отслеживается регистрирующей системой вследствие ограниченности аппаратной функции.

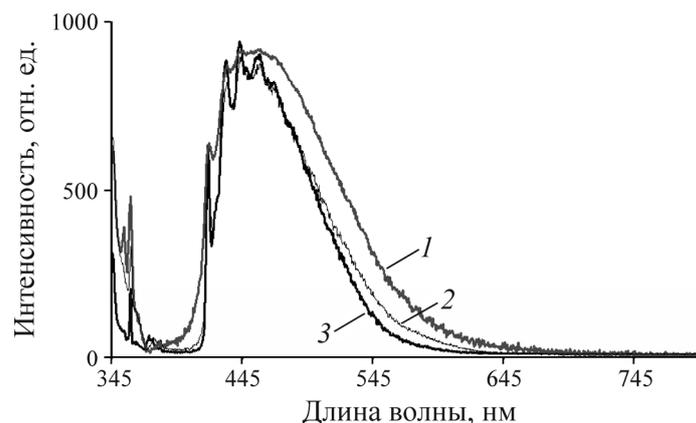


Рис. 9. Спектры люминесценции кристалла алмаза при температурах 300 (1), 196 (2) и 142 К (3)

Таким образом, применительно к системе люминесценции N3 в этом кристалле наиболее подходящей (рациональной) температурой регистрации спектров с использованием монохроматора ДМР-4 является 200 К. При низких температурах могут появляться линии, отсутствующие в спектрах при комнатной температуре, что демонстрируется спектрами люминесценции кристалла алмаза, приведенными на рис. 10.

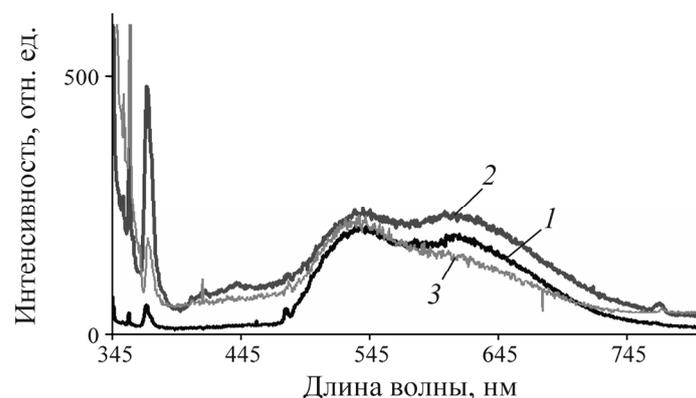


Рис. 10. Спектры люминесценции кристалла алмаза при 160 К (3) и 140 К, зарегистрированные с задержкой (1) и непосредственно в момент облучения (2)

На зарегистрированном без задержки спектре люминесценции выделяются линии с максимумами около 790 нм (возможно, линии 793 и 788 нм) и 478 нм (S2). Обращает на себя внимание, что линия 478 нм в спектре с задержкой выражена сильнее, что указывает на значительное время “раз-

горания” свечения, а не только затянутую кинетику затухания. Спектры 1 и 2 зарегистрированы не только при различных температурах, но и с изменением положения образца, что приводило к значительному изменению относительной интенсивности различных систем люминесценции.

Таким образом, регистрация спектров фотолюминесценции при пониженных температурах с применением проточного оптического криостата позволяет существенно повысить информативность исследований люминесцентных характеристик алмазов и сопутствующих минералов, что расширяет возможности эффективного разделения алмазов и породообразующих минералов.

ВЫВОДЫ

Исследования спектров свечения и кинетики затухания фотолюминесценции кристаллов природных алмазов (трубки “Мир” и “Интернациональная”), характеризующихся широким набором азотных и азотно-вакансионных дефектов, показали, что цвет фотолюминесценции определяется концентрацией и интенсивностью свечения оптически активных как основных, так и дополнительных структурных дефектов, а также общей концентрации азота.

При понижении температуры кристаллов происходит рост общей интенсивности люминесценции из-за уменьшения доли безызлучательных переходов, что существенно повышает информативность исследований люминесцентных характеристик алмазов. Применение низкотемпературных воздействий позволит разработать принципиально новый метод фотолюминесцентной сепарации алмазов, а также повысить эффективность технологии рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего минерального сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобец Б. С., Рогожин А. А. Спектры люминесценции минералов: справочник. — М.: Изд-во ВИМС, 2001. — 316 с.
2. Миронов В. П. Рентгенолюминесценция природных алмазов // Сб. тр. IX Междунар. шк.-семинара по люминесценции и лазерной физике (Иркутск, 13–17 сент. 2004 г.). — Иркутск: ИГУ, 2005. — С. 102–116.
3. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. — Изд. 2-е. — М.: Наука, 1984. — 170 с.
4. Природные алмазы России: науч.-справ. издание / ред. В. Б. Квасков. — М.: Полярон, 1997. — 303 с.
5. Мартынович Е. Ф., Морозникова Л. В., Новиков В. В. Рентгенолюминесценция алмазов // Люминесценция и спектральный анализ. — Иркутск: ИГУ, 1974. — № 3.
6. Мартынович Е. Ф., Морозникова Л. В., Парфианович И. А. Спектральные и кинетические характеристики центров рентгенолюминесценции в алмазе // ФТТ. — 1973. — Т. 15. — Вып. 3. — С. 927–929.
7. Мартынович Е. Ф., Морозникова Л. В., Клюев Ю. А., Плотникова С. П. Рентгенолюминесценция природных алмазов разных типов // Вопросы теории и практики алмазной обработки. — М.: НИИМАШ, 1977. — С. 28–38.
8. Миронов В. П. Сверхлюминесценция алмаза при импульсном возбуждении электронами // Сб. тр. IX Междунар. шк.-семинара по люминесценции и лазерной физике (Иркутск, 13–17 сент. 2004 г.) — Иркутск: ИГУ, 2005. — С. 94–101.
9. Новиков Н. В., Кочержинский Ю. А., Шульман Л. Н. и др. Физические свойства алмазов: справочник. — Киев: Наук. думка, 1987. — 189 с.
10. Плотникова С. П. Классификация и отбор природных алмазов для электронной техники // Алмаз в электронной технике / под ред. В. Б. Кваскова. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — С. 156–170.
11. Васильев Е. А., Иванов-Омский В. И., Помазанский Б. С., Богущ И. Н. Тушение люминесценции N3 центра примесью азота в природном алмазе // Письма в ЖТФ. — 2004. — Т. 30. — Вып. 19. — С. 7–11.
12. Бескрованов В. В. Онтогенез алмаза. — Новосибирск: Наука, 2000. — 264 с.
13. Соболев Е. В. Азотные центры и рост кристаллов природного алмаза // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. — Новосибирск: Наука, 1978. — С. 245–255.
14. Хмельницкий Р. А. Перспективы выращивания монокристаллического алмаза большого размера // Успехи физ. наук. — 2015. — Т. 185. — № 2. — С. 143–159.

Поступила в редакцию 11/II 2016