

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ
КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ *)****П. П. Феофилов**

Кристаллы были первыми объектами, позволившими наблюдать поляризацию в элементарных актах излучения. История изучения поляризованной люминесценции начинается с открытия Грайлихом поляризованного излучения оптически анизотропных кристаллов платино-синеродистых солей, описанного им почти сто лет тому назад в «Кристаллографически-оптических исследованиях»¹. Поляризация люминесценции изотропных сред — газов и жидкостей — была обнаружена лишь более полувека спустя (Вуд — двухатомные молекулы, 1908; Вейгерт — растворы сложных молекул, 1920; Рэлей — атомы, 1922). Относительно раннее обнаружение поляризованного излучения анизотропных кристаллов связано с тем, что в этом случае поляризация есть естественное следствие ориентированности отдельных излучающих центров относительно выделенных направлений — оптических осей — и для её наблюдения не требуется создавать какие-либо особые условия. Напротив, в случае сред с хаотическим расположением люминесцирующих атомов и молекул необходимо создавать эту ориентированность, осуществляя анизотропное возбуждение и, по возможности, устраняя все известные деполяризующие факторы. Тем не менее, в настоящее время мы располагаем, в значительной степени благодаря работам С. И. Вавилова и его школы, обильным экспериментальным материалом и достаточно развитой теорией поляризованной люминесценции изотропных сред **). Поэтому естественно возникает вопрос, может ли дать какие-либо существенно новые результаты исследование поляризованного излучения кристаллов кубической системы, являющихся, как принято считать, средами, вполне изотропными в оптическом отношении? Оказывается, несмотря на отсутствие дихроизма и двойного лучепреломления — характерных признаков анизотропных кристаллов, — в люминесцирующих кубических кристаллах могут наблюдаться своеобразные проявления анизотропии, связанные со спецификой кристаллического состояния, с наличием в кристаллах определённых выделенных направлений — осей симметрии.

*) Доклад, прочитанный на IV Совещании по люминесценции (Минск, июнь 1955 г.).

**) Обзор работ по поляризованной люминесценции растворов молекул был опубликован в УФН, т. 36, стр. 417, 1948.

§ 1. ОРИЕНТИРОВАННОСТЬ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ ЦЕНТРОВ В КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

Люминесценция кубических кристаллов, возбуждаемая поляризованным светом, может оказаться поляризованной, если акты поглощения и испускания света не разделены полупроводниковыми процессами, как это зачастую имеет место в кристаллах, и происходят в одном и том же центре. Сама по себе возможность возбуждения поляризованного излучения в оптически изотропной среде достаточно очевидна и хорошо изучена в многочисленных работах по поляризации люминесценции растворов сложных молекул. Несколько неожиданной и удивительной на первый взгляд может показаться, однако, обнаруженная нами в 1953 г. зависимость степени поляризации люминесценции кубических кристаллов от относительного положения плоскости поляризации возбуждающего света и осей симметрии кристалла^{2,3}. Наличие этой зависимости с несомненностью показывает, что, несмотря на оптическую изотропию люминесцирующих кубических кристаллов, их нельзя полностью уподобить, даже в отношении их оптических свойств, хаотической совокупности люминесцирующих молекул, например люминесцирующим растворам.

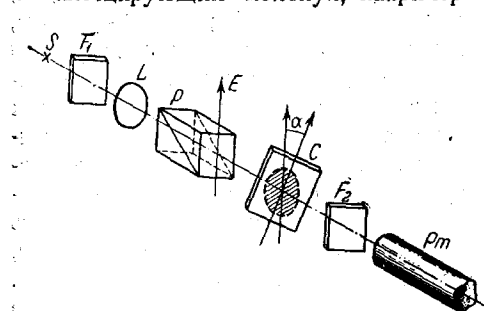


Рис. 1. Схема установки для наблюдения азимутальных зависимостей поляризации люминесценции: S — источник возбуждения; F_1 , F_2 — светофильтры; L — линза; P — поляризатор; C — исследуемый кристалл; Pm — фотоумножитель.

Элементарное рассмотрение показывает, что наличие резко выраженной азимутальной зависимости степени поляризации (так мы будем называть зависимость степени поляризации люминесценции, наблюдаемой по схеме рис. 1, от угла поворота исследуемой пластинки α) свидетельствует о существовании нескольких симметричных направлений, вдоль которых могут ориентироваться анизотропные люминесцирующие центры.

Установление факта ориентации центров люминесценции по осям симметрии кубических кристаллов составило основу комплекса исследований, обзору которого посвящена настоящая статья.

В кристаллах кубической системы имеются, как известно, три оси симметрии четвертого порядка, четыре оси третьего порядка и шесть осей второго порядка (рис. 2). Исходя из самых общих соображений, можно утверждать, что если вводимые в кристалл или создаваемые в нём анизотропные центры люминесценции располагаются в кристалле регулярно, то оси центров будут ориентироваться вдоль тех или иных осей симметрии кристалла. Характер и степень

Ориентации центров будут определяться кристаллохимическим строением системы, природой центров и характером их внедрения в кристаллическую решётку основного вещества. Нетрудно убедиться, что независимо от характера ориентации центров в среде не будет возникать дихроизма, поскольку при равновероятном распределении центров по возможным направлениям ориентации суммы квадратов проекций амплитуд элементарных осцилляторов (с помощью которых может быть описан процесс поглощения) на два произвольно выбранных взаимно перпендикулярных направления будут одинаковы. Тем не менее, несмотря на кажущуюся изотропию возбуждаемых пластинок, степень поляризации люминесценции будет, как правило, сильно зависеть от положения возбуждающего электрического вектора в плоскости пластинки.

Несложный расчёт позволяет получить теоретически азимутальные зависимости для различных случаев ориентации центров внутри кристалла⁴. В качестве модели центра может быть принята классическая осцилляторная модель, полностью оправдавшая себя при исследовании поляризации люминесценции изотропных растворов сложных молекул. Эта модель представляет собой комбинацию линейных осцилляторов, совпадающих по направлению и описывающих длинноволновое поглощение и излучение, и кругового осциллятора, ответственного за поглощение во второй полосе и расположенного

в плоскости, перпендикулярной к линейным осцилляторам. Введение кругового осциллятора или (что с точки зрения истолкования экспериментальных результатов то же самое) нескольких линейных осцилляторов, симметрично расположенных в плоскости, перпендикулярной к направлению излучающего осциллятора, необходимо для объяснения поляризационного спектра люминесценции, т. е. зависимости степени поляризации от длины волны возбуждающего света^{*)}.

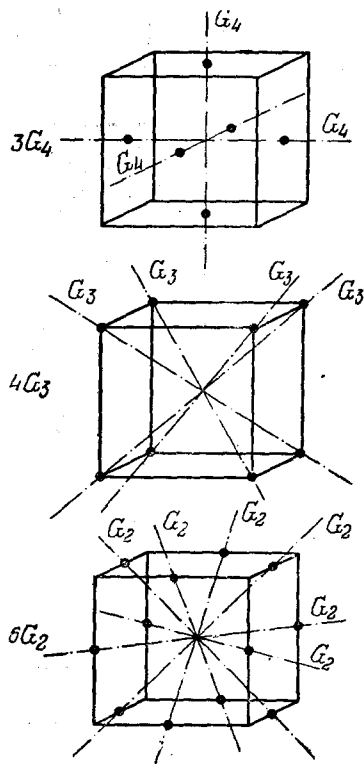


Рис. 2. Оси симметрии кристаллов кубической системы.

*) Азимутальные зависимости и поляризационные спектры могут быть столь же успешно истолкованы и с помощью другой осцилляторной модели, в которой линейным и круговым осцилляторам приданы иные функции, однако, как можно показать (см. § 2), адекватной является принятая модель.

Направление излучающего осциллятора является осью симметрии центра и, следовательно, направлением, определяющим его ориентацию.

Исходя из этой модели, мы произвели для трёх возможных случаев ориентации центров — по осям симметрии четвертого, третьего и второго порядков — расчёт азимутальных зависимостей поляризации люминесценции пластинок, вырезанных из кристалла параллельно плоскостям куба (100), ромбододекаэдра (110) и октаэдра (111). Расчёт был выполнен как для «длинноволнового» (поглощающий

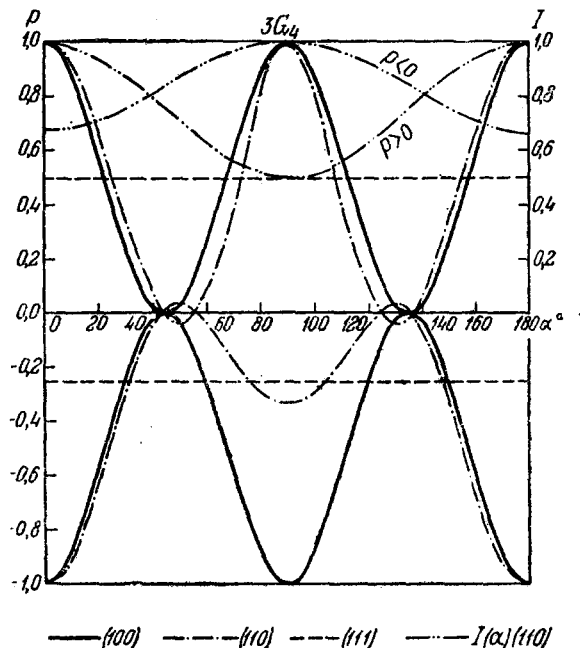


Рис. 3. Азимутальные зависимости поляризации люминесценции при ориентации осцилляторов по осям четвертого порядка.

и излучающий осцилляторы параллельны), так и для «коротковолнового» возбуждения (поглощающий круговой осциллятор перпендикулярен к излучающему). Результаты расчёта изображены графически на рис. 3—5. Как можно видеть из сопоставления азимутальных кривых, полученных для различных случаев, их исследование позволяет вполне однозначно установить характер ориентации центров в кристаллической решётке.

Поразительным на первый взгляд представляется наличие азимутальной зависимости интенсивности люминесценции пластинок, вырезанных из кристалла параллельно плоскости (110) и не обладающих, как мы видели, дихроизмом поглощения. Нетрудно, однако,

убедиться, что этот результат, предсказываемый расчётом и наблюдаемый на опыте, имеет простое объяснение. Хотя вероятность поглощения света, поляризованного в двух произвольных, взаимно перпендикулярных направлениях в плоскости пластинки, одинакова, относительная интенсивность света, посылаемого в направлении наблюдения осцилляторами, имеющими различную ориентацию, различна, что и определяет как азимутальную зависимость интенсивности

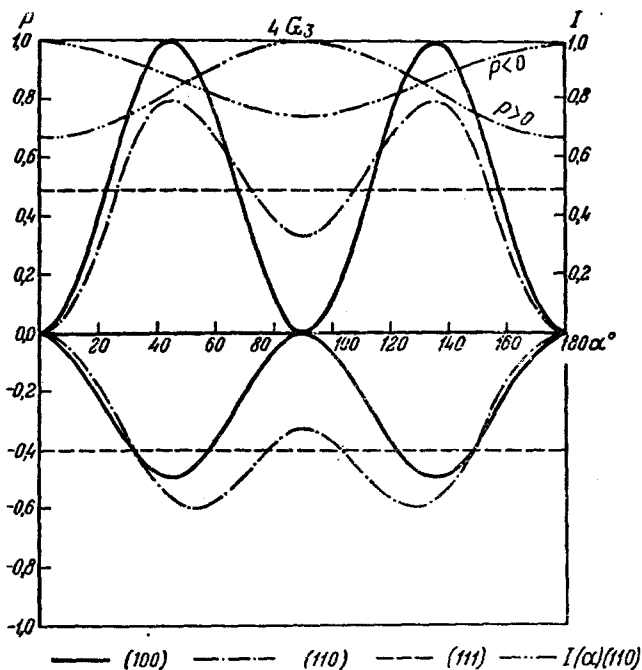


Рис. 4. Азимутальные зависимости поляризации люминесценции при ориентации осцилляторов по осям третьего порядка.

люминесценции, так и другое, также неожиданное для оптически изотропных сред явление — «спонтанную» поляризацию, т. е. поляризацию люминесценции, возбуждаемой в пластинках, вырезанных параллельно плоскости (110), естественным светом.

Метод изучения азимутальных зависимостей поляризации люминесценции был применён нами для установления характера ориентации люминесцирующих центров окраски в ионных кристаллах и ионов европия, введённых в кристаллическую решётку флуорита *).

*) Все монокристаллы, исследованные в этой работе, были выращены и предоставлены в наше распоряжение И. В. Степановым. Пользуюсь случаем выразить искреннюю признательность И. В. Степанову, благодаря работам которого по искусственным монокристаллам оказалось возможным провести излагаемые здесь исследования.

а) Ориентация люминесцирующих центров окраски в кристаллах флуорита². Азимутальные зависимости степени поляризации люминесценции центров окраски, обнаруженной нами в кристаллах флуорита, выражены чрезвычайно резко (рис. 6).

Сопоставление зависимостей, найденных экспериментально, с расчётными (рис. 3—5) не оставляет сомнений в том, что в этом

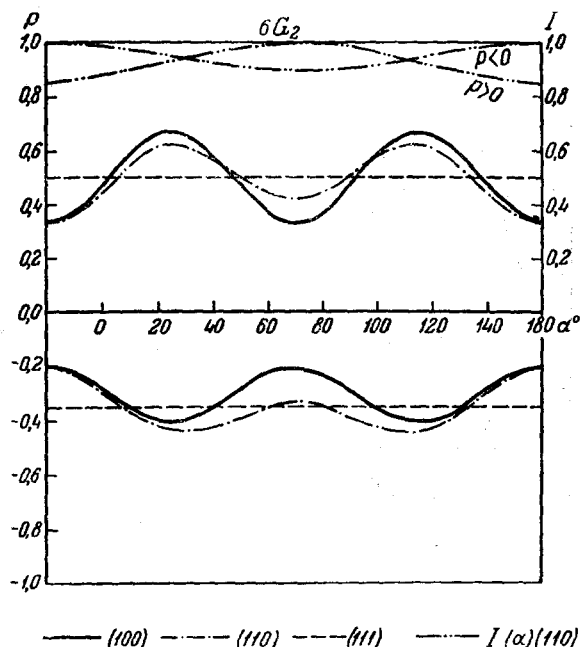


Рис. 5. Азимутальные зависимости поляризации люминесценции при ориентации осцилляторов по осям второго порядка.

случае анизотропные люминесцирующие центры окраски ориентируются вдоль осей симметрии четвёртого порядка. С целью всесторонней проверки расчётных зависимостей исследование производилось с пластинками, вырезанными параллельно плоскостям куба, ромбододекаэдра и октаэдра и возбуждаемыми как в длинноволновой полосе поглощения, так и в следующей за ней полосе ($\lambda_{\text{возб}} = 365 \text{ м}\mu$), при возбуждении в которой степень поляризации меняет знак. Характер всех зависимостей оказался в деталях соответствующим расчётному. В полном соответствии с данными расчёта у пластинок, вырезанных параллельно грани ромбододекаэдра (110) , наблюдалась азимутальная зависимость интенсивности люминесценции и «спонтанная» поляризация излучаемого света.

б) Ориентация люминесцирующих центров окраски в кристаллах фторидов щелочных металлов³. Совершенно аналогичное исследование было проведено с окрашенными путём рентгенизации кристаллами фтористого лития и фтористого натрия. В этих случаях, однако, характер азимутальных зависимостей оказался совершенно иным, чем в случае флуорита (рис. 7).

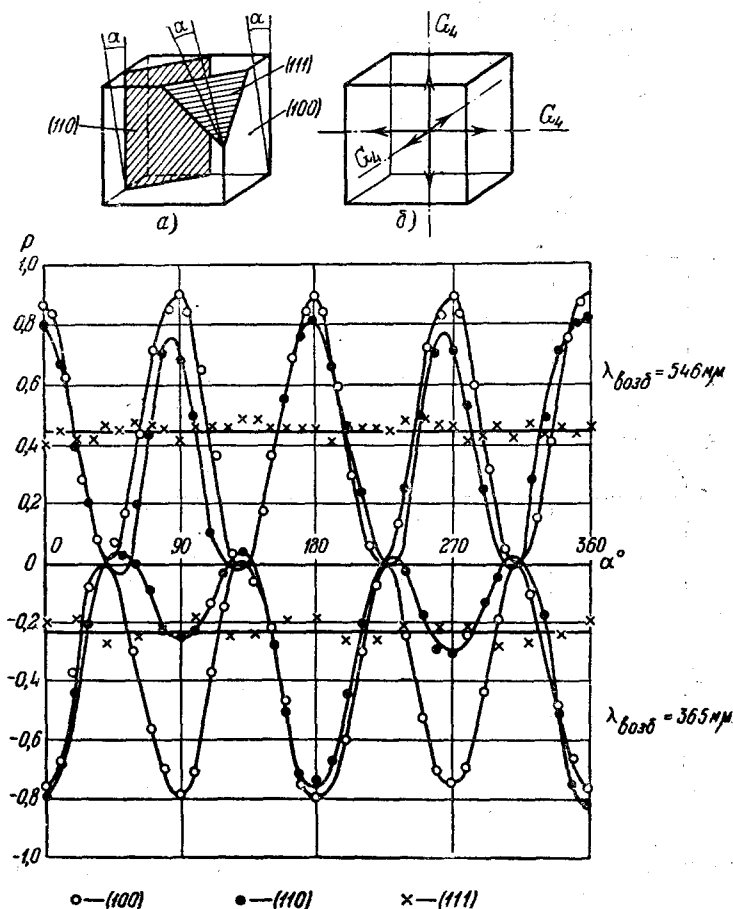


Рис. 6. Азимутальные зависимости поляризации люминесценции центров окраски в кристаллах флуорита.

Сопоставление экспериментальных кривых с расчётами показывает, что в исследованных щелочно-галогидных кристаллах люминесцирующие центры окраски ориентируются вдоль осей симметрии второго порядка.

Установленный в этих опытах характер ориентации люминесцирующих центров окраски в ионных кристаллах, в сочетании с данными об абсолютных значениях степени поляризации, позволил высказать предположение о том, что центрами окраски в исследованных ионных кристаллах являются так называемые F_2 -центры, т. е.

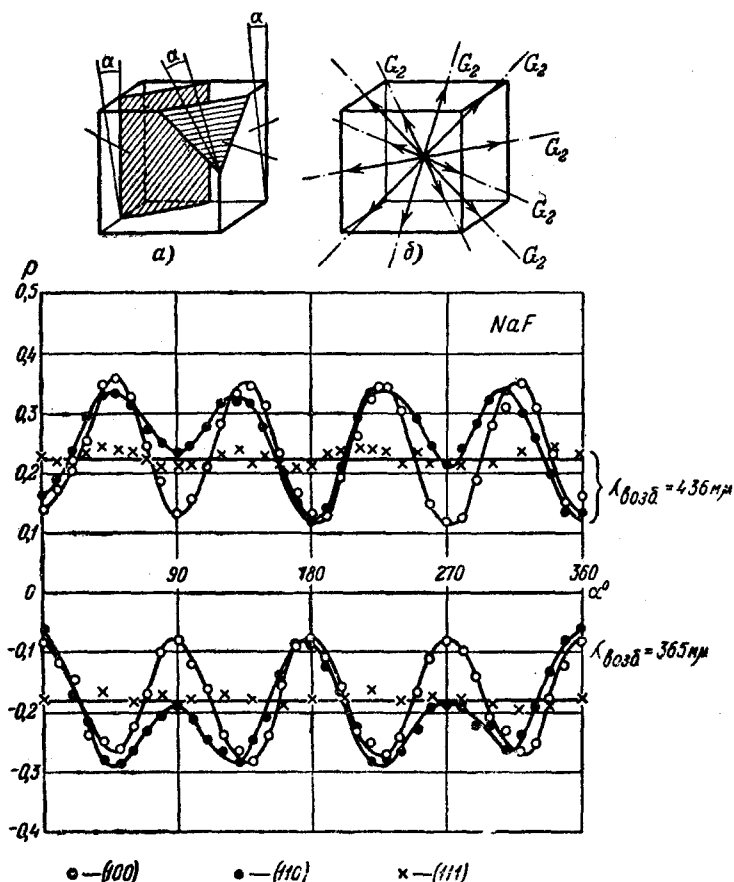


Рис. 7. Азимутальные зависимости поляризации люминесценции центров окраски в кристаллах фтористого натрия.

пары электронов, локализовавшихся в соседних вакантных анионных узлах⁴. Действительно, рассмотрение кристаллохимического строения исследованных кристаллов (рис. 8) показывает, что F_2 -центры, образующиеся в кристаллической решётке флуорита, ориентируются по осям симметрии четвёртого порядка, в то время как аналогичные центры в кристаллах щелочно-галогидных солей должны ориентиро-

ваться по осям второго порядка. Как мы видели, именно таков характер ориентации центров, установленный на основе поляризационных измерений.

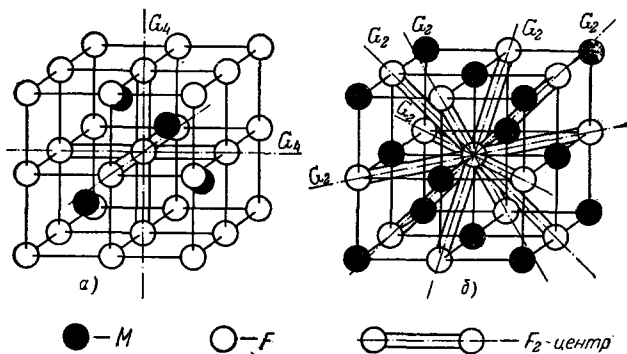


Рис. 8. Структура кристаллических решёток: а) флуорита; б) фторидов щелочных металлов.

в) Ориентация ионов Eu^{+++} в кристаллах флуорита⁶. Как известно, фториды иттрия и редкоземельных металлов (TR) образуют с CaF_2 смешанные кристаллы (например, природные минералы иттрофлуорит, иттроцерит и др.), сохраняющие кубическую решётку флуорита с несколько изменёнными параметрами. Образованию смешанных кристаллов способствует близость ионных радиусов Ca^{++} и TR^{+++} , находящихся в одном изоморфном гетеровалентном ряду.

Введённые в кристаллы флуорита ионы редких земель ярко люминесцируют, обнаруживая характерный линейчатый спектр излучения. Наличие поляризации люминесценции ионов европия, введённого в кристаллы флуорита, позволило применить для исследования характера их ориентации люминесцентно-поляризационный метод. Степень поляризации люминесценции оказалась различной для различных линий в спектре излучения Eu^{+++} и обнаружила резко выраженную азимутальную зависимость (рис. 9), сопоставление которой с расчётными позволяет однозначно заключить, что в этом случае люминесцирующие центры — ионы Eu^{+++} — ориентируются вдоль четырёх осей третьего порядка.

Если считать, в соответствии с общепринятой точкой зрения, что ионы редких земель входят в кристаллическую решётку флуорита, изоморфно замещая ионы Ca^{++} , то нетрудно убедиться, что в первой координационной сфере, окружающей каждый ион TR^{+++} , будет находиться 8 ионов F^- , расположенных по осям симметрии третьего порядка. В идеальном кристалле все эти четыре направления возможной ориентации вполне равноправны и в то же время

азимутальные зависимости поляризации люминесценции свидетельствуют об устойчивости ориентации ионов европия вдоль одного из этих направлений. Это может быть без труда объяснено с помощью принципа локальной компенсации заряда, нередко привлекаемого при рассмотрении детальной структуры люминесцирующих центров. Действительно, при изоморфном замещении ионом Eu^{+++} иона Ca^{++} необходимо компенсировать избыточный положительный заряд. Эта компенсация может осуществляться различными способами, однако во всех случаях она будет сопровождаться внесением асимметрии в ближайшее окружение иона TR^{+++} . Одним из возможных путей

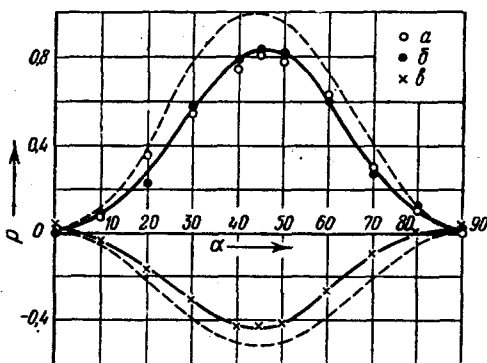


Рис. 9. Азимутальная зависимость степени поляризации отдельных линий в спектре люминесценции $\text{CaF}_2:\text{Eu}$: a — 5735 Å; b — 6165 Å; v — 6309 Å. Пунктир — теоретические кривые

этой компенсации, повидимому реализующимся в рассматриваемом случае, является изоморфное замещение одного из ионов F^- в координационной сфере, окружающей ион Eu^{+++} , ионом O^{--} . Возможность изоморфного замещения F^- на O^{--} обеспечивается близостью их ионных радиусов (1,33 и 1,36 Å). Возникающая при этом асимметрия координационной сферы определяет устойчивость ориентации данного иона европия вдоль одного из четырёх возможных направлений. В среднем, разумеется, ионы ориентируются с равной вероятностью по всем четырём направлениям. Таким образом, результаты, полученные при исследовании характера ориентации ионов Eu^{+++} , также полностью согласуются с кристаллохимическими представлениями о структуре смешанных кристаллов $\text{CaF}_2 - \text{TRF}_3$.

Рассмотренные примеры показывают, как можно думать, что исследование азимутальных зависимостей поляризации люминесценции кубических кристаллов позволяет, с одной стороны, пролить свет на природу люминесцирующих центров и, с другой стороны, высказать определённые соображения о характере расположения чужеродных атомов и ионов в данной кристаллической решётке.

§ 2. АНИЗОТРОПНЫЕ ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ⁷

Если на изотропную совокупность анизотропных частиц падает поляризованный свет, способный вызывать фотохимические превращения частиц, то их распределение становится анизотропным, поскольку поглощать свет и, следовательно, претерпевать фотохимические изменения будут преимущественно частицы, имеющие вполне определённую ориентацию относительно действующего вектора световой волны.

Это явление возникновения анизотропии в результате действия на изотропную среду фотохимически активного поляризованного света известно под названием эффекта Вейгерта.

Аналогичное явление было обнаружено нами при изучении люминесценции центров окраски в ионных кристаллах⁸). В этом случае, однако, явление может быть выражено значительно более резко, чем в случае хаотической совокупности центров, поскольку при закономерной ориентации центров, имеющей, как мы видели, место в кристаллах, возможно выбрать такое направление действующего вектора фотохимически активного света, чтобы поглощали свет и претерпевали изменения лишь центры, имеющие вполне определённую ориентацию. Так, если из кристалла флуорита, центры окраски в котором ориентированы по осям четвёртого порядка, вырезать пластинку параллельно плоскости куба (100) и направить электрический вектор фотохимически активного света ($\lambda = 365 \text{ м}\mu$, опыт ведётся при температуре жидкого воздуха) вдоль одной из осей четвёртого порядка, лежащих в плоскости пластинки, то из двух групп центров, расположенных в этой плоскости, поглощать свет и, следовательно, разрушаться будет только одна. В результате, после достаточно продолжительного воздействия активным светом, все центры окажутся ориентированными в одном направлении. Тогда, измеряя, например, спектральный ход дихроизма пластинки, можно определить ориентацию осцилляторов, описывающих поглощение света различных длин волн, относительно осей центра.

Такое исследование, проведённое нами для центров окраски в кристаллах флуорита и фтористого натрия, позволило сделать однозначный выбор между двумя вариантами осцилляторной модели, с равным успехом описывающими азимутальные зависимости и поляризационные спектры люминесценции центров окраски.

Поляризационные спектры дают картину относительного расположения поглощающих и излучающих осцилляторов при возбуждении люминесценции светом различных длин волн и не позволяют, вообще

⁸) Несколько ранее Уэта⁸ наблюдал появление дихроизма у кристаллов KCl, облучённых фотохимически активным поляризованным светом в области полос поглощения M-центров.

говоря, судить о том, направление которого из осцилляторов изменяется при изменении длины волны возбуждающего света. Исследование спектрального хода дихроизма или «спонтанной» поляризации люминесценции дихроичных пластинок позволяет дать однозначный ответ на этот вопрос. Если дихроизм не зависит от длины волны в спектре поглощения, то, очевидно, изменение поляризации следует связывать с изменением ориентации излучающего осциллятора при переходе от одной полосы поглощения к другой. Напротив, если дихроизм, определяемый ориентацией поглощающих осцилляторов, изменяется с длиной волны, а «спонтанная» поляризация люминесценции не зависит от длины волны возбуждающего света, поляризационный спектр следует истолковывать с помощью модели, описывающей люминесцирующий центр как совокупность неизменного по направлению излучающего осциллятора и нескольких поглощающих осцилляторов, имеющих различную ориентацию. Проведённые нами исследования показали, что спектральный ход дихроизма качественно совпадает с ходом поляризационного спектра, а «спонтанная» поляризация не зависит от длины волны возбуждающего света, т. е. что верной оказывается вторая модель, с успехом объясняющая, как известно, открытые С. И. Вавиловым поляризационные спектры люминесценции сложных органических молекул.

§ 3. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ И ПРИРОДА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Ориентированность отдельных люминесцирующих центров вдоль тех или иных осей симметрии кубических кристаллов вносит специфику в метод поляризационных диаграмм, развитый С. И. Вавиловым⁹ для установления природы (мультипольности) элементарных осцилляторов, с помощью которых может быть описан процесс люминесценции. Метод поляризационных диаграмм основан на различии в пространственном распространении излучения различных мультиполей: электрических и магнитных диполей, квадруполей и т. д. и состоит в исследовании степени поляризации люминесценции при варьировании углов между направлением наблюдения и возбуждающим электрическим вектором. При распространении метода поляризационных диаграмм на случай кубических кристаллов необходимо иметь в виду, что характеристичность поляризационных диаграмм в этом случае сильно зависит от условий наблюдения, а именно, от ориентации осей симметрии кристалла относительно направлений возбуждения и наблюдения. Для получения наиболее характерных зависимостей следует производить наблюдение по схеме рис. 10, возбуждая люминесценцию исследуемого кристалла через грань куба (100) линейно поляризованным светом. Плоскость, через которую производится наблюдение, целесообразно ориентировать параллельно

грани куба, если осцилляторы люминесцирующих центров расположены вдоль осей четвёртого порядка (например, в случае центров окраски в CaF_2), и параллельно грани ромбододекаэдра (011), если осцилляторы ориентированы по осям третьего или второго порядков (ионы европия в CaF_2 или центры окраски в кристаллах щелочно-галогенных солей). Изменяя угол η , определяющий направление возбуждающего электрического вектора в плоскости, перпендикулярной к направлению возбуждения, и исследуя интенсивность и поляризацию люминесценции, можно получать диаграммы, позволяющие (в большинстве случаев — однозначно) устанавливать природу (мультипольность) как поглощающей, так и излучающей систем люминесцирующего центра.

Соответствующие расчёты были выполнены нами для всех трёх возможных случаев ориентации центров (по осям четвёртого, третьего и второго порядков) и для всех возможных комбинаций поглощающих и излучающих дипольных осцилляторов. При этом рассматривались электрические и магнитные линейные (π_e и π_m) и круговые (σ_e и σ_m) осцилляторы.

Расчёт во всех случаях проводился по общей схеме: прежде всего вычислялись относительные вероятности $A_i(\eta)$ возбуждения

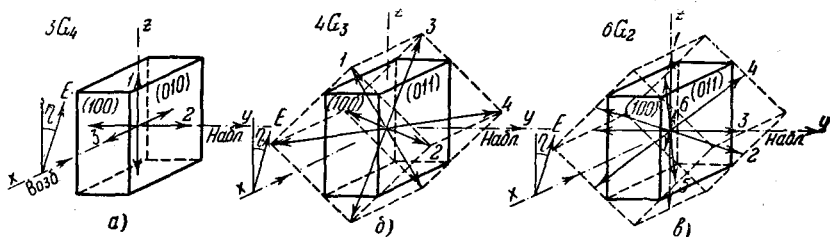


Рис. 10. Схема наблюдения поляризационных диаграмм люминесценции в кубических кристаллах при ориентации центров по осям: а) четвёртого порядка, б) третьего порядка, в) второго порядка.

поглощающих осцилляторов, имеющих определённую ориентацию i , как функции угла η ; затем определялись интенсивности (I_i) и поляризации (P_i) люминесценции соответствующих излучателей в направлении наблюдения, после чего по формулам

$$I(\eta) = \sum_i A_i(\eta) I_i$$

и

$$P(\eta) = \frac{\sum_i P_i A_i(\eta) I_i}{\sum_i A_i(\eta) I_i}$$

вычислялись искомые зависимости интенсивности и поляризации от угла поворота возбуждающего электрического вектора.

В качестве примера на рис. 11 представлены результаты расчёта для случая ориентации осцилляторов по осям симметрии четвёртого

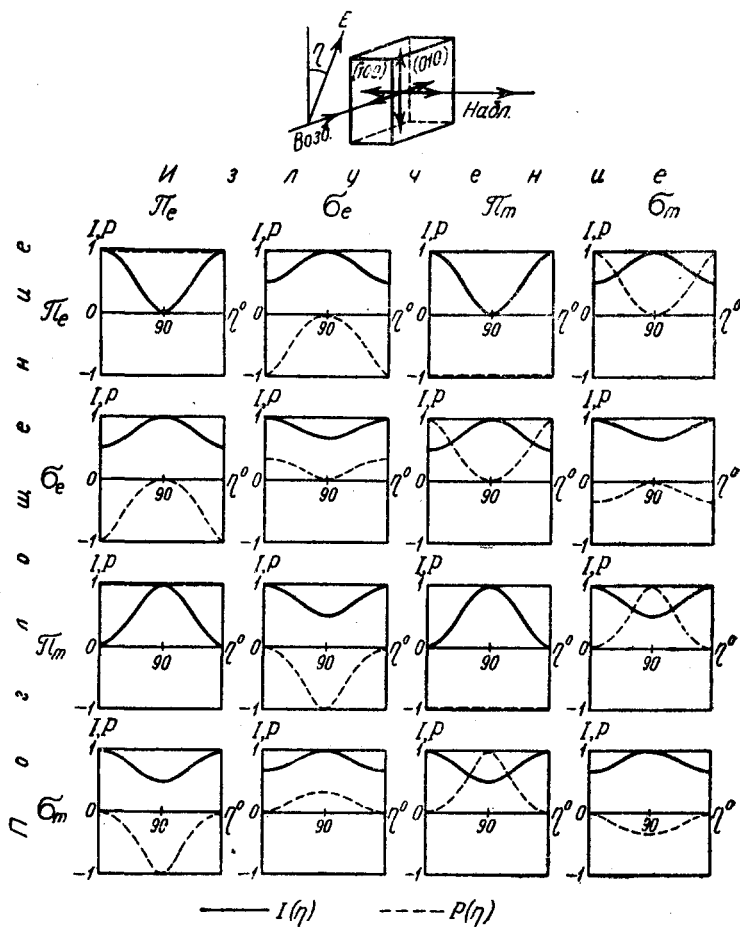


Рис. 11. Поляризационные диаграммы дипольных излучателей, ориентированных по осям симметрии четвёртого порядка.

порядка. Рассмотрение этих диаграмм показывает, что совместное исследование зависимостей $I(\eta)$ и $P(\eta)$ позволяет, в большинстве случаев однозначно, решить вопрос о природе элементарных осцилляторов. Для разграничения отдельных случаев, дающих тождественные диаграммы ($\pi_e \leftrightarrow \sigma_e$; $\pi_m \leftrightarrow \sigma_m$; $\pi_e \rightarrow \sigma_m$ и $\sigma_e \rightarrow \pi_m$; $\pi_m \rightarrow \sigma_e$

и $\sigma_m \rightarrow \pi_e$), необходимо привлечение дополнительных данных или соображений. В некоторых случаях таким дополнительным критерием могут оказаться, как мы видели, результаты исследования анизотропного фотохимического превращения центров люминесценции.

Развитый метод был применён нами к исследованию природы элементарных излучателей центров окраски в кристаллах флуорита и ионов европия, введённых в кристаллическую решётку CaF_2 .⁵ В первом случае удалось установить электрический дипольный характер люминесценции, полностью согласующийся с данными о длительности возбуждённого состояния и силах осцилляторов центров окраски. Значительно более интересными оказались данные, полученные при изучении природы элементарных излучателей ионов Eu^{+++} .

В этом случае центры люминесценции ориентируются по осям симметрии третьего порядка и наблюдение поляризационных диаграмм и диаграмм интенсивности производилось по схеме рис. 10, б. Результаты определения природы элементарных излучателей, соответствующих отдельным линиям в спектре люминесценции $\text{CaF}_2 \cdot \text{Eu}$, приведены в следующей таблице:

$\lambda \text{ Å} \dots\dots\dots$	5282	5735	5808	5900	5916	5930	6056
Тип излучателя $\dots\dots\dots$	π_e	π_e	σ_m	π_m	π_e	π_e	π_m
$\lambda \text{ Å} \dots\dots\dots$	6165	6309	6380	6404	6518	6545	6582
Тип излучателя $\dots\dots\dots$	π_e	σ_e	π_e	π_e	σ_e	π_e	σ_e

Как можно видеть из этой таблицы, в спектре люминесценции $\text{CaF}_2 \cdot \text{Eu}$ встречаются линии, соответствующие всем четырём возможным типам элементарных дипольных излучателей: π_e , σ_e , π_m и σ_m . Последний тип излучателей — магнитные круговые излучатели — ранее, повидимому, не наблюдался.

Рассмотренные в настоящем обзоре примеры показывают, что, исследуя поляризованное излучение кристаллов кубической системы, основные отличительные черты которого определяются ориентированностью люминесцирующих центров вдоль осей симметрии кристаллов, мы получаем новые возможности как для выяснения природы и деталей строения элементарных центров люминесценции, так и для решения вопросов, связанных с кристаллохимией смешанных кристаллов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. Grailich, Krystallographisch-optische Untersuchungen. Wien, 1858.
 2. П. П. Феофилов, ДАН СССР **92**, 545 (1953).
 3. П. П. Феофилов, ДАН СССР **92**, 743 (1953).
 4. П. П. Феофилов, ЖЭТФ **26**, 609 (1954).
 5. П. П. Феофилов, ДАН СССР **99**, 975 (1954).
 6. П. П. Феофилов, ДАН СССР **99**, 731 (1954).
 7. П. П. Феофилов, ДАН СССР **98**, 949 (1954).
 8. M. Ueta, J. Phys. Soc. Japan **7**, 107 (1952).
 9. С. И. Вавилов, ЖЭТФ **10**, 1363 (1940).
-