

УДК 535.6

© 1991

## ФОТОХРОМНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИМЕСНЫХ И СТРУКТУРНЫХ ЦЕНТРОВ В ИАГ

*И. Ш. Ахмадуллин, В. А. Голенцев-Кутузов,  
С. А. Мигачев, С. П. Миронов, М. В. Коржик*

Путем сопоставления поведения линий ионов  $Fe^{3+}$  в спектре ЭПР при УФ-облучении и компонент спектра фотоиндуцированного поглощения в восстановленных кристаллах ИАГ: Fe, а также в результате исследования спектров возбуждения люминесценции редкоземельных ионов в ИАГ:  $Nd^{3+} : Fe^{3+}$  и ИАГ:  $Yb^{3+} : Fe^{3+}$  определены полосы переноса заряда  $O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$  для ионов железа в тетраэдрической и октаэдрической координациях. Обнаружено появление полосы с  $\lambda_0 = 407$  нм, отнесенной нами к  $F$ -центрам, и определены полосы фотоионизации ионов  $Fe^{2+}$ . На основе полученных результатов составлена схема расположения энергетических уровней ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  и  $F$ -центров в запрещенной зоне ИАГ.

Кристаллы ИАГ:  $Nd^{3+}$  продолжают широко применяться в лазерной технике. В связи с этим исследования влияния различных примесных центров, как неконтролируемых, так и специально вводимых в кристаллическую матрицу, на оптические свойства граната не утратили своей актуальности. Более того, в работе [1] высказывается мысль о том, что за счет полос переноса заряда (ППЗ) ионов  $Fe^{3+}$  может быть осуществлена сенсбилизация излучения редкоземельных активаторов. Для выяснения роли ионов  $Fe^{3+}$  в сенсбилизации необходимо провести разделение ППЗ, связанных с октаэдрической ( $Fe_0^{3+}$ ) и тетраэдрической ( $Fe_T^{3+}$ ) координациями этих ионов.

Ранее было установлено [2-4], что наличие примесных ионов Fe обуславливает появление полос оптического поглощения с центрами вблизи 260 и 315 нм, причем за полосу 260 нм ответственны ионы  $Fe^{3+}$ , а за полосу 315 нм —  $Fe^{2+}$ . В работе [5] сообщалось, что полоса 260 нм является суперпозицией ППЗ  $O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$ , связанных с ионами железа в разных координациях, а впервые обнаруженная полоса с центром вблизи 230 нм является ППЗ  $O^{2-} \rightarrow Fe_T^{3+}$ .

Облучение образцов, содержащих ионы  $Fe^{2+}$ , светом широкого диапазона (от УФ- до ИК-области), например ксеноновой лампой, приводило к усилению поглощения вблизи 260 нм и просветлению около 315 нм [2, 4].

Спектры ЭПР ионов  $Fe^{3+}$  в ИАГ при облучении также претерпевают изменения — интенсивность линий  $Fe^{3+}$  увеличивается. Но если при 77 К появляется новая линия с  $g = 1.996$ , приписываемая  $F^+$ -центрами ( $V_0 - e$ ), то при комнатной температуре она не наблюдается. В связи с этим было выдвинуто предположение [6] о том, что электроны, фотоионизованные с ионов  $Fe^{2+}$ , локализируются в кислородных вакансиях попарно, образуя  $F$ -центры, не являющиеся парамагнитными. Однако существование  $F$ -центров требовало прямого экспериментального подтверждения. Кроме того, недостаточные, а в ряде случаев противоречивые сведения о природе дефектных центров в ИАГ: Fe не в состоянии были объяснить ряд фото- и термоиндуцированных явлений в гранате. Поэтому представлялось необходимым получить достоверный вид фото- и термоиндуцированных спектров оптического поглощения, интерпретировать их и на этой основе построить схему энергетических уровней дефектных центров.

В данной работе представлены результаты исследования кристаллов ИАГ:Nd<sup>3+</sup>, содержащих ионы Fe в различных концентрациях (табл. 1). Методами ЭПР и оптической спектроскопии исследовались процессы, происходящие при различных условиях термического отжига и светового облучения. Ранее было установлено [6], что свет ближнего УФ-диапазона на полностью окисленные кристаллы заметного влияния не оказывает. Поэтому для того, чтобы перевести ионы Fe<sup>3+</sup> в состояние Fe<sup>2+</sup>, производился восстановительный отжиг в вакууме при температуре 1350—

Таблица 1  
Исследованные кристаллы

Номер образцов	Общая концентрация ионов Fe ( $\cdot 10^{18}$ см <sup>-3</sup> )	Концентрация ионов Fe <sup>2+</sup> (в % от общей)
1	0.2	>95
2	3.5	100
3	15.0	100
4	35.0	100
5	~10	~6

1450 °С (парциальное давление O<sub>2</sub> ~ 10<sup>-6</sup> ÷ 10<sup>-7</sup> атм) несколькими циклами по 8 ч. Облучение осуществлялось лазерами ИЛГИ-503 ( $\lambda=337$  нм), ЛГН-215 ( $\lambda=632$  нм) и ЛТИ-701 (вторая гармоника  $\lambda_2=532$  нм и четвертая гармоника  $\lambda_4=266$  нм). Образцы облучались либо в резонаторе ЭПР-спектрометра РЭ-1306 в процессе регистрации спектров, либо в ячейке спектрофотометра СФ-46, причем оптические спектры записывались до и после облучения. «Стирание» наведенных изменений производилось, так же как и в [6], нагревом образцов до температуры  $\approx 300$  °С.

В спектрах оптического поглощения образцов № 1—4 в исходном состоянии наблюдалась полоса с центром вблизи 260 нм, интенсивность которой коррелировала с концентрацией ионов Fe<sup>3+</sup>. В образце № 5, прошедшем длительный восстановительный отжиг сразу после выращивания, присутствовала широкая полоса с центром около 310 нм и слабо-выраженная полоса вблизи 260 нм. Более того, в спектрах дополнительного поглощения образцов, отожженных таким образом, чтобы изменения поглощения в полосе 260 нм не превышали 3—5 %, кроме ранее обнаруженных полос, наблюдалась еще одна с центром вблизи 212 нм.

Для подтверждения предположения о суперпозиции ППЗ Fe<sub>2</sub><sup>3+</sup> и Fe<sub>3</sub><sup>2+</sup> в области 255 нм дополнительно исследовались спектры возбуждения люминесценции (СВЛ) специально выращенных кристаллов ИАГ: Yb<sup>3+</sup>: Fe<sup>3+</sup>. Обнаружилось, что в спектрах возбуждения ИК люминесценции редкоземельных ионов Yb<sup>3+</sup> (длина волны регистрации  $\lambda_p=1028.5$  нм) имелась полоса с максимумом вблизи 263 нм, в то время как в кристаллах ИАГ: Nd<sup>3+</sup>: Fe<sup>3+</sup> ( $\lambda_p=1064$  нм) максимум аналогичной полосы сдвинут в коротковолновую область [1].

Спектры ЭПР регистрировались при H<sub>0</sub> || [100]. Интенсивность линий ЭПР ионов Fe<sup>3+</sup> в кристаллах № 2—4 увеличивалась пропорционально весовой концентрации допирующей примеси Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в шихте, из которой осуществлялось выращивание. Заметного изменения ширины линий при этом не наблюдалось. Концентрация Fe<sup>3+</sup> в образцах № 1 и 5 определялась сравнением интенсивности линий ЭПР с аналогичными в образцах № 2—4 с известными концентрациями.

Отжиг в одинаковой степени действует на ионы железа, о чем свидетельствует пропорциональное уменьшение интенсивности линий ЭПР как Fe<sub>2</sub><sup>3+</sup>, так и Fe<sub>3</sub><sup>2+</sup>. Однако с увеличением концентрации железа доля ионов Fe<sup>3+</sup>, перешедших в состояние Fe<sup>2+</sup>, уменьшается, о чем свидетель-

Таблица 2

Влияние восстановительного отжига  
на концентрацию ионов  $Fe^{3+}$   
(за единицу принята концентрация  $3.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ )

Номер образца	Концентрация $Fe^{3+}$		
	до отжига	после 1-го отжига	после 2-го отжига
1	0.06	<0.001	—
2	1	0.5	0.25
3	4	3.5	3.2
4	10	~10	~9

ствует изменение интенсивностей линий ЭПР на одинаковую величину при одновременном отжиге (табл. 2).

В отличие от отжига, одинаково воздействующего на ионы железа вне зависимости от координации, УФ-облучение действует на них по-разному, причем это действие зависит от общей концентрации Fe и относительной концентрации  $Fe^{2+}$  ( $N[Fe^{2+}]/N[Fe]$ ). В табл. 3 приведены данные о воздействии УФ-облучения различных длин волн на некоторые из исследованных образцов.

Таблица 3

Изменение концентрации ионов  $Fe^{2+}$  под действием УФ-облучения

Номер образца	Исходная концентрация, $\text{см}^{-3}$	% от общей	$\lambda_{\text{обл.}}$ , нм	После облучения (в % для данной координации)	
				тетраэдр.	октаэдр.
1	~ $10^{15}$	~1	337	65	<5
			266	40	30
3	~ $12 \cdot 10^{18}$	80	337	90	75
			266	—	—
5	~ $0.6 \cdot 10^{18}$	6	337	25	5
			266	14	8

Наряду с изменениями ЭПР спектров наблюдались и изменения в спектрах оптического поглощения. Заметим, что поведение образцов при облучении качественно было одинаковым, как для всех кристаллов

Таблица 4

Параметры полос спектра наведенного поглощения

Номер образца	Положение центра полосы $\lambda_0$ , нм	Ширина полосы $\Delta E$ , эВ
1	246	0.48
2	258	0.36
3	261	0.15
4	310	1.38
5	407	0.34

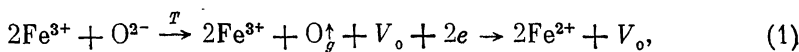
ИАГ, подвергнутых восстановительному отжигу. Поэтому основные закономерности будем иллюстрировать на примере образца № 5, в котором исследуемые эффекты проявляются наиболее ярко. В нем после облучения светом с  $\lambda = 337$  нм наблюдалось появление несимметричной полосы поглощения с максимумом около 246 нм, а после облучения светом с  $\lambda = 266$  нм появлялось дополнительное поглощение с максимумом около 255 нм. При этом просветлялась область 280—370 нм и происходило небольшое увеличение поглощения в области 370—470 нм.

Сдвиг максимума наведенного поглощения при изменении  $\lambda_{\text{обл.}}$  говорит о неэлементарности полосы. Полагая, что форма полосы поглощения описывается гауссовой кривой, все изменения в поглощении в области длин волн  $230 < \lambda < 500$  нм удалось представить как суперпозицию пяти элементарных полос, параметры которых приведены в табл. 4.

Для идентификации этих полос образец № 5 был подвергнут последовательно облучению светом с  $\lambda = 266, 337, 532$  нм, причем после каждого облучения регистрировались оптические и ЭПР-спектры, а стирание нагревом не проводилось. Наведенные изменения оптического поглощения и составляющие их компоненты приведены на рис. 1. Кроме того, на диаграмме (рис. 2) показано изменение концентрации  $Fe_0^{3+}$  и  $Fe_T^{3+}$  (по изменению интенсивности их линий ЭПР) и интенсивностей компонент наведенного поглощения с центрами 246 и 261 нм после каждого воздействия. Необходимо заметить, что облучение с  $\lambda = 632$  нм действует аналогично облучению с  $\lambda = 532$  нм, но менее эффективно.

## 2. Обсуждение результатов

Как известно из предыдущих работ [2, 4, 6], различие в поведении окисленных и восстановленных образцов ИАГ связано с исходным валентным состоянием ионов железа. Ионы  $Fe^{3+}$ , заменяющие ионы  $Al^{3+}$ , являются изоморфной примесью и не вызывают структурных изменений. Однако наличие ионов  $Fe^{2+}$  создает нескомпенсированный отрицательный заряд. Из химического состава ИАГ следует, что единственным дефектом, который может скомпенсировать избыточный заряд, является кислородная вакансия. Исходя из этого, полагают, что восстановление железа протекает по схеме

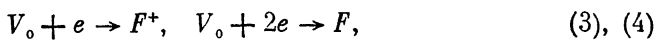


где число кислородных вакансий  $V_o$  определяется температурой и продолжительностью отжига. Естественно, что при этом не будет меняться соотношение между числом ионов  $Fe^{3+}$  в обеих координациях.

Облучение восстановленных образцов светом УФ-диапазона приводит к переходу



Согласно ранее предложенной модели, мы полагаем, что фотоионизованные электроны вновь захватываются ионами  $Fe^{3+}$ , либо кислородными вакансиями с образованием  $F^+$ - и  $F$ -центров



$F^+$ -центры нестабильны при комнатной температуре. При 77 К они наблюдаются как методом ЭПР, так и методом оптической спектроскопии, когда при облучении появляется широкая полоса поглощения, захватывающая весь видимый диапазон [2, 6].  $F$ -центры же диамагнитны. Не наблюдались они также и оптическими методами, что, видимо, связано с весьма малой силой осциллятора этих центров. Однако в пользу их существования свидетельствуют, во-первых, наблюдения за динамикой распада  $F^+$ -центров и изменением количества ионов  $Fe^{3+}$  при повышении температуры с 77 К до комнатной [6] и, во-вторых, обнаружение полосы поглощения с  $\lambda_0 = 407$  нм. Для наблюдения этой полосы число  $F$ -центров должно быть достаточно велико, что может быть получено только в силовосстановленных образцах. Тот факт, что под действием УФ-облучения не все ионы железа, перешедшие в состояние  $Fe^{2+}$  в процессе отжига, переходят в состояние  $Fe^{3+}$ , говорит о том, что наряду с образованием  $F$ -центров происходит их распад. Кроме того, это означает, что энергия фотоионизации  $Fe^{2+}$  выше энергии распада  $F$ -центров и соответствующая полоса должна располагаться в области более коротких длин волн, что и будет показано ниже.

Динамическое равновесие наступит тогда, когда количества распадающихся и вновь образующихся  $F$ -центров и ионов  $Fe^{2+}$  сравняются. Прекращение облучения приводит к небольшому уменьшению концентрации  $Fe^{3+}$  за счет захвата электронов, находящихся в зоне проводи-

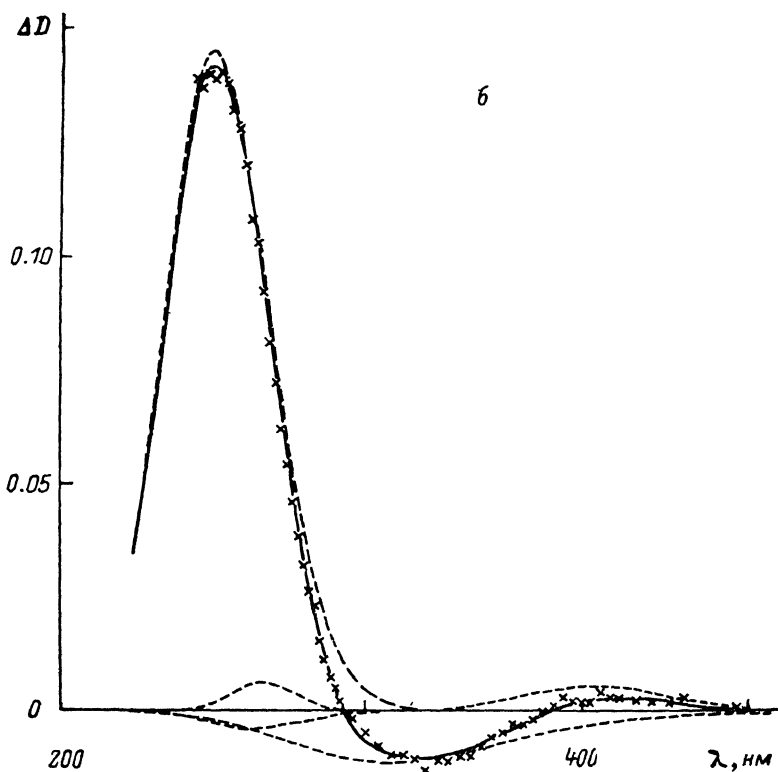
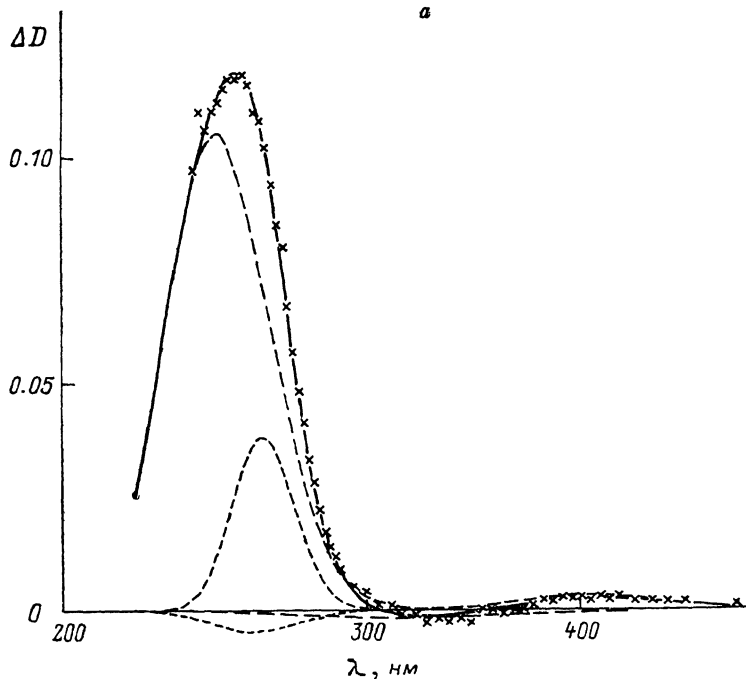


Рис. 1. Фотоиндуцированное изменение оптического поглощения образца № 5 в результате последовательного облучения светом с длиной волны 266 (а), 337 (б), 532 нм (в).

Точки — эксперимент, штриховые линии — компоненты спектра, сплошная линия — сумма компонент.

мости во время облучения. Число образовавшихся  $F$ -центров равно половине числа образовавшихся ионов  $Fe^{3+}$ , следовательно, интенсив-

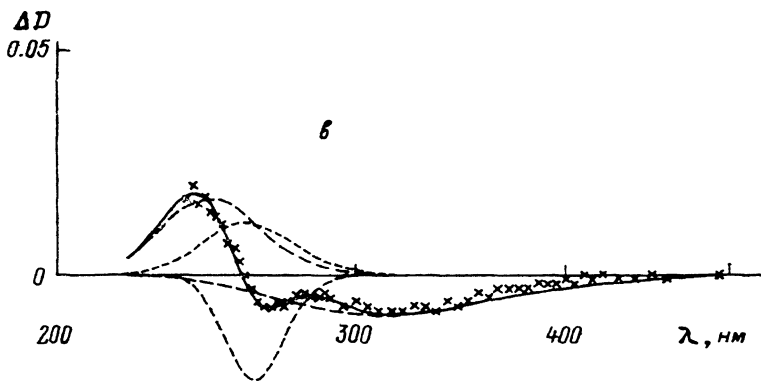


Рис. 1 (продолжение).

ность оптической полосы  $F$ -центров [должна быть пропорциональна  $\Delta N[Fe^{3+}]$ ]. Полоса с центром 407 нм удовлетворяет этому условию

$$\Delta D_{407} \sim \Delta N[Fe_T^{3+}] + \Delta N[Fe_0^{3+}], \quad (5)$$

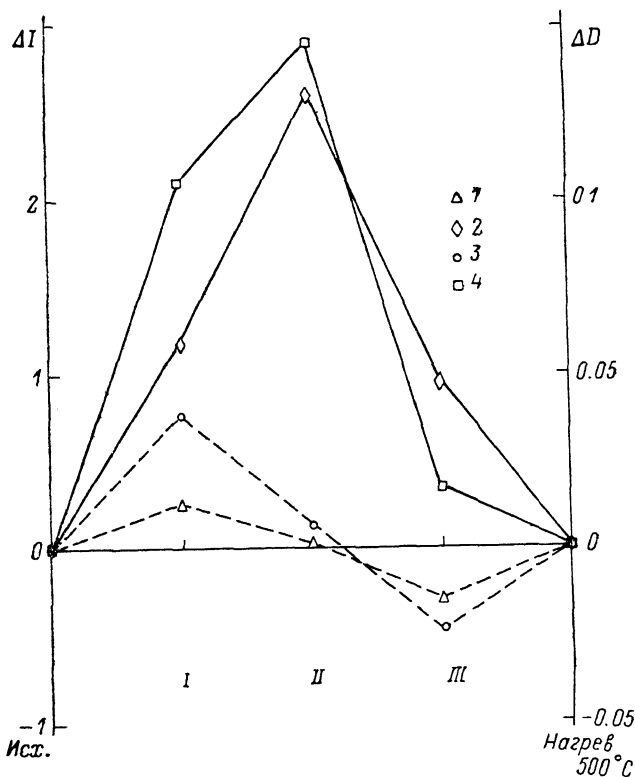


Рис. 2. Фотоиндуцированные изменения интенсивности линий ЭПР ионов  $Fe_0^{3+}$  (1) и  $Fe_T^{2+}$  (2) (в отн. ед.  $\Delta I$ ) и компонент наведенного поглощения с центрами  $\lambda_0=266$  (3) и 246 нм (4) (изменение оптической плотности  $\Delta D$ ) при последовательном облучении светом с  $\lambda=266$  (I), 337 (II), 532 нм (III) образца № 5.

т. е. можно утверждать, что эта наблюдавшаяся впервые полоса принадлежит  $F$ -центрам. Нагрев до 300 °C приводит к распаду  $F$ -центров и возвращает образец в исходное состояние.

Необходимо отметить, что в области 408 и 415 нм присутствуют полосы внутрицентровых переходов ионов  $Fe_T^{3+}$  [7], однако ввиду их малой

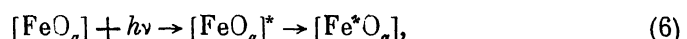
интенсивности (почти на два порядка слабее, чем ППЗ) и малой ширины ( $\sim 0.05$  эВ) их вклад в полосу 407 нм пренебрежимо мал.

Поведение СВЛ кристаллов с разными редкоземельными ионами ( $Yb^{3+}$  и  $Nd^{3+}$ ) объясняется следующим образом. Ионы  $Yb^{3+}$  в кристаллах граната обладают внутрицентровым излучательным переходом  ${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$ , и единственное возбужденное состояние  ${}^4F_{7/2}$  имеет энергию  $E \simeq 10\,000$  см $^{-1}$  [8], которая находится в хорошем резонансе с первым возбужденным термом  ${}^4T_{1g}({}^4G)$  ионов  $Fe_0^{3+}$  и на 4000 см $^{-1}$  меньше энергии  ${}^4T_1({}^4G)$  ионов  $Fe_T^{3+}$  [7]. Таким образом, ионы  $Fe_0^{3+}$  будут принимать преимущественное участие в переносе энергии возбуждения ионам  $Yb^{3+}$  и в СВЛ ионов  $Yb^{3+}$  за счет сенсбилизации появится полоса, связанная с переходом  $O^{2-} \rightarrow Fe_0^{3+}$ . Напротив, если в качестве акцепторов энергии использовать ионы  $Nd^{3+}$ , то перенос энергии будет осуществляться преимущественно за счет резонанса полосы люминесценции  $Fe_T^{3+}$  и излучательного термина  ${}^4F_{3/2}$  ( $E \simeq 11\,500$  см $^{-1}$ ) [8] ионов  $Nd^{3+}$ .

Как явствует из диаграммы (рис. 2), интенсивность полосы с  $\lambda_0 = 261$  нм в спектре наведенного поглощения хорошо коррелирует с концентрацией  $Fe_0^{3+}$ . Очевидно, что она принадлежит ППЗ  $O^{2-} \rightarrow Fe_0^{3+}$ , причем наблюдается хорошее соответствие с результатом анализа СВЛ ИАГ:  $Yb^{3+} : Fe^{3+}$ . Полоса с центром 246 нм имеет хорошую корреляцию с концентрацией  $Fe_T^{3+}$  и, следовательно, ее можно отнести ППЗ  $O^{2-} \rightarrow Fe_T^{3+}$ . То, что ранее не проявлялась неэлементарность ППЗ  $O^{2-} \rightarrow Fe_T^{3+}$ , связано с тем, что облучение осуществлялось широким спектром, приводящим к одновременному росту обеих ее компонент.

Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что если переход с  $\lambda_0 = 203$  нм является вторым разрешенным переходом  $O^{2-} \rightarrow Fe_T^{3+}$  [5], то аналогичный переход для  $Fe_0^{3+}$  должен лежать в промежутке между 203 нм и первой ППЗ  $O^{2-} \rightarrow Fe_0^{3+}$ . Очевидно, что ему принадлежит полоса с  $\lambda_0 = 212$  нм.

Схема наиболее вероятного процесса энергетического обмена при возбуждении в ППЗ была предложена в [5]



где  $[FeO_a]$  ( $a=4; 6$ ) означает координационную сферу ионов  $Fe^{3+}$ . Таким образом, наблюдаемые ППЗ можно связать с возбужденными конфигурациями ионов  $Fe^{3+}$  в тетраэдрической и октаэдрической координациях.

Две оставшиеся компоненты спектра фотоиндуцированного поглощения принадлежат ионам  $Fe^{2+}$  в различных координациях. Исходя из результатов наших экспериментов, можно утверждать, что компонента с  $\lambda_0 = 310$  нм является полосой фотоионизации  $Fe_T^{3+}$ , а компонента с  $\lambda_0 = 258$  нм — полосой фотоионизации  $Fe_0^{3+}$ . Действительно, обе компоненты лежат в области более коротких длин волн, чем полоса  $F$ -центров. Свет с  $\lambda = 337$  нм попадает почти в центр полосы, принадлежащей  $Fe_T^{3+}$ , и захватывает самый край полосы, относящейся к  $Fe_0^{3+}$ . Поэтому мы наблюдаем сильный рост числа ионов  $Fe_T^{3+}$  и некоторое уменьшение или весьма слабое увеличение числа ионов  $Fe_0^{3+}$  (в зависимости от концентрации Fe). Облучение с  $\lambda = 266$  нм действует на  $Fe_T^{3+}$  с той же эффективностью, что и  $\lambda = 337$  нм, и вызывает интенсивную перезарядку  $Fe_0^{2+} \rightarrow Fe_0^{3+}$ . Поэтому концентрация  $Fe_0^{3+}$  заметно повышается. С другой стороны, в связи с увеличением числа электронов в зоне проводимости динамическое равновесие между  $Fe_T^{3+}$  и  $Fe_0^{3+}$  устанавливается на новом уровне.

Различие в потенциалах ионизации  $Fe^{2+}$  в тетраэдрической и октаэдрической координациях можно объяснить следующим образом. Ионизация  $Fe^{2+}$  — это переход электрона из основного состояния в зону проводимости. Основное состояние определяется двумя энергиями: 1) энергией кулоновского отталкивания электрона  $E_g$  от пяти  $d$ -электронов иона  $Fe^{3+}$ . Эта энергия не зависит от координации; 2) энергией электронной поляризации кристалла  $E_{pol}$ , обусловленной дополнительным  $d$ -электроном, захватываемым ионом  $Fe^{3+}$ . Эта энергия зависит от коор-

динации и, очевидно, пропорциональна координационному числу. В то время как  $E_q$  повышает энергию основного состояния  $Fe^{2+}$  одинаково в тетраэдрах и октаэдрах, энергия  $E_{pol}$ , имеющая противоположный знак [9, 10], понижает, причем величина понижения зависит от координации.

Свет с длиной волны  $\lambda > 400$  нм не действует на ионы  $Fe_0^{2+}$  и очень слабо на ионы  $Fe_T^{3+}$ , но разрушает  $F$ -центры, поэтому такой свет будет стирать изменения, наведенные УФ-облучением.

В результате облучения светом с  $\lambda = 532$  нм (рис. 1, в) происходит полное стирание  $F$ -центров. При этом высвободившиеся электроны захватываются ионами  $Fe^{3+}$  пропорционально их числу в каждой координации. Из диаграммы (рис. 2) видно, что при этом количество ионов

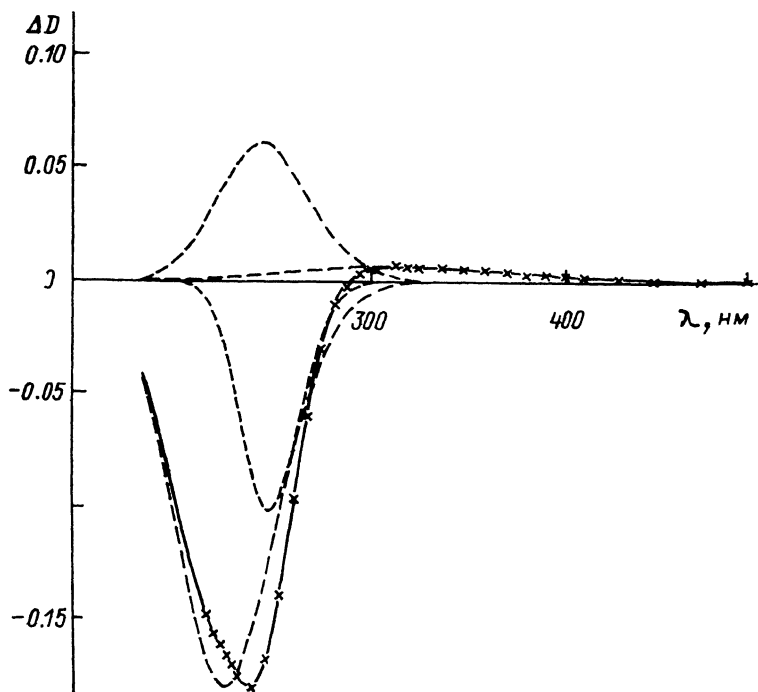


Рис. 3. Вызванное восстановительным отжигом изменение поглощения в образце № 1. Точки — эксперимент, штриховые линии — компоненты спектра, сплошная линия — сумма компонент

$Fe_0^{3+}$  становится меньше исходного, т. е. происходит перераспределение части электронов с  $Fe_T$  на  $Fe_0$ . Так как все  $F$ -центры стертые, то, казалось бы, данное состояние должно быть стабильным, во всяком случае при температурах более низких, чем те, при которых осуществлялся отжиг образцов. Однако нагрев образцов до температуры  $500^\circ C$  возвращает все ионы в то состояние, в котором они находились до облучения, т. е. «лишние» ионы  $Fe_0^{2+}$  отдают электроны, а  $Fe_T^{3+}$  захватывают их. Это, возможно, объясняется тем, что при такой температуре все ионы  $Fe^{2+}$  термоионизируются, а затем, при остывании, электроны распределяются по ионам  $Fe^{3+}$  пропорционально их числу в каждой координации.  $F$ -центры при этом образовываться не будут, так как они имеют более низкую температуру распада.

В качестве проверки правильности разложения фотоиндуцированного поглощения мы использовали выделенные компоненты при разложении дополнительного поглощения, наведенного восстановительным отжигом. В качестве примера (рис. 3) приведена разность спектров поглощения образца № 1 в восстановленном и исходном состояниях. Как и следовало ожидать, при этом полосы переноса заряда исчезли (на рисунке



соответствующие компоненты имеют отрицательный знак) и появились полосы фотоионизации двухвалентного железа. Полоса с  $\lambda_0=407$  нм в разностном спектре отсутствует, так как  $F$ -центры при отжиге не образуются.

На основе всего вышеизложенного мы предлагаем схему расположения уровней примесных и дефектных центров в запрещенной зоне ИАГ (рис. 4).

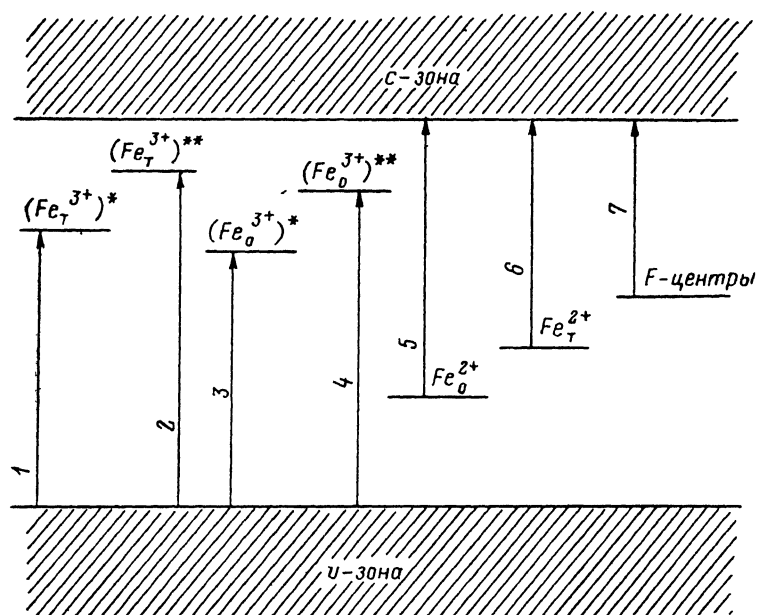


Рис. 4. Схема расположения энергетических уровней  $F$ -центров и ионов Fe в запрещенной зоне ИАГ.

$(Fe^{3+})^*$ ,  $(Fe^{3+})^{**}$  — возбужденные уровни энергии, соответствующие первому и второму разрешенным переходам]  $O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$ .  $\lambda$ , нм 1 — 246, 2 — 203, 3 — 261, 4 — 212, 5 — 258, 6 — 310, 7 — 407

Выражаем глубокую благодарность Б. И. Минкову за предоставленные образцы.

#### Список литературы

- [1] Коржик М. В., Лившиц М. Г., Багдасаров Х. С., Кеворков А. М., Мелконян Т. А., Мейльман М. Л. // Квант. электр. 1989. Т. 16. № 3. С. 519—522.
- [2] Mori K. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 42. N 1. P. 375—384.
- [3] Scott G. B., Page J. L. // Phys. St. Sol. (b). 1977. V. 79. N 1. P. 203—213.
- [4] Masumoto T., Kuwano Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. N 5. P. 546—551.
- [5] Коржик М. В., Лившиц М. Г., Зотов Н. И., Мейльман М. Л. // ЖПС. 1988. Т. 48. № 6. С. 972—975.
- [6] Ахмадуллин И. Ш., Бухараев А. А., Голенищев-Кутузов В. А., Мигачев С. А., Миронов С. П. // Хим. физика. 1989. Т. 8. № 8. С. 1050—1055.
- [7] Вейткевич Ю. А., Коржик М. В., Кузьмин В. В., Лившиц М. Г., Мейльман М. Л. // Опт. и спектр. 1987. Т. 63. № 4. С. 810—815.
- [8] Dieke G. H., Crosswhite H. M. // Appl. Optics. 1963. V. 2. N 7. P. 675—686.
- [9] Fowler W., Elliott R. // Phys. Rev. B. 1986. V. 34. N 8. Pt 2. P. 5525—5529.
- [10] Stoneham A., Sangster M. // Phylos. Mag. 1981. V. B43. N 4. P. 609—617.

Казанский физико-технический институт

Поступило в Редакцию  
5 сентября 1990 г.