

УДК 541.1; 535.37; 535.376

**КРИСТАЛЛОФОСФОРЫ ДЛЯ ЗАПОМИНАЮЩИХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЭКРАНОВ**

© 1992 г. Гурвич А.М., Михайлин В.В.

Приведен обзор работ в области фотостимулируемых кристаллофосфоров для запоминающих люминесцентных экранов, применяемых для цифровой радиографии. Рассмотрены существенные для этого применения свойства флюорогалогенидов бария, в особенности BaFBr:Eu. Значительное внимание уделено влиянию препаративных условий на эти свойства, физико-химическим закономерностям процессов образования и взаимодействия дефектов кристаллической решетки и представлениям о механизме фотостимулированной люминесценции.

Библиография — 94 ссылки.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

I. Введение. Запоминающие люминесцентные экраны как альтернатива галогеносеребряным фотоматериалам .....	1047
II. Выбор кристаллофосфоров для запоминающих экранов .....	1048
III. Структура и основные свойства флюорогалогенидов бария .....	1049
IV. Зависимость свойств BaFBr:Eu-фосфора от условий его получения .....	1051
V. Дефекты кристаллической решетки BaFBr:Eu-фосфора и механизм ФСЛ .....	1052
VI. Спектры возбуждения стационарной люминесценции, фосфоресценции и ФСЛ флюорогалогенидов бария .....	1054
VII. Некоторые применения запоминающих люминесцентных экранов .....	1056

**I. ВВЕДЕНИЕ. ЗАПОМИНАЮЩИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЭКРАНЫ КАК АЛЬТЕРНАТИВА ГАЛОГЕНОСЕРЕБРЯНЫМ ФОТОМАТЕРИАЛАМ**

Неорганические люминофоры (кристаллофосфоры), запасующие энергию и освобождающие ее в виде света — фотостимулированной люминесценции (ФСЛ) под действием излучения инфракрасного (ИК) или видимого диапазонов — известны давно. Они нашли применение в дозиметрии и для визуализации ИК-излучений [1—4]. С появлением компьютеров и лазеров открылись новые возможности для их использования, реализация которых привела к созданию люминесцентной цифровой (компьютерной) радиографии (ЛДР) [5, 6]. От обычной радиографии этот метод отличается тем, что вместо фотографической (радиографической) пленки или ее комбинации с усиливающими экранами применяют запоминающий изображение экран из кристаллофосфора (называемого сокращенно фосфором), обладающего способностью к ФСЛ.

Проявление скрытого изображения осуществляется путем сканирования экрана остро сфокусированным лучом гелий-неонового лазера. Возникающие при этом вспышки света преобразуются с помощью фотоэлектронного умножителя в серию электрических сигналов, а затем, после дискретизации, — в цифровой код. Дигитализованная таким образом информация записывается на оптическом диске или

магнитной ленте и после обработки компьютером вновь превращается в аналоговые сигналы, модулирующие интенсивность электронного луча дисплея или излучения второго лазера, сканирующего фотопленку<sup>1</sup>.

По сравнению с обычной (пленочной) радиографией ЛДР обладает рядом преимуществ [7], главным из которых является большой динамический диапазон [8, 9]. Это позволяет, например, достичь высокого контрастного разрешения участков объекта, сильно различающихся поглощением ионизирующего излучения, а также уменьшить риск получения недоброкачественного изображения из-за неправильного выбора экспозиции.

Идея создания ЛДР давно «носила в воздухе» (см., например [10]), но реализовать ее удалось лишь после того, как были найдены фосфоры, удовлетворяющие всему комплексу необходимых требований.

## II. ВЫБОР КРИСТАЛЛОФОСФОРОВ ДЛЯ ЗАПОМИНАЮЩИХ ЭКРАНОВ

Фосфоры для запоминающих экранов должны обладать [7, 11]: 1) высоким энергетическим выходом ФСЛ при комнатной температуре для уменьшения шума, связанного с флуктуациями световых фотонов; 2) достаточно далеко друг от друга расположенными полосами излучения и стимуляции для обеспечения возможности спектрального разделения стимулирующего света и ФСЛ; 3) быстрым затуханием вызываемых лазером вспышек света для обеспечения необходимой скорости считывания изображения и предотвращения наложения друг на друга сигналов от различных его участков; 4) длительным сохранением запасенной энергии (малым федингом); 5) линейной зависимостью интенсивности ФСЛ от дозы излучения, что является условием достижения большого динамического диапазона; 6) эффективным поглощением ионизирующего излучения для сведения к минимуму квантового шума и уменьшения доз, необходимых для получения высококачественного изображения.

С позиций этих требований была исследована возможность применения большого числа обладающих способностью к ФСЛ люминофоров. К ним относятся: сульфиды цинка и щелочноземельных металлов, например,  $\text{SrS:Ce, Sm}$  и  $\text{SrS:Eu, Sm}$  [1, 17]; галогениды щелочных металлов [10, 13], в особенности  $\text{RbBr:Tl}$  [9, 11]; оксиды ( $\text{ThO}_2\text{:Er}$ ) и оксисульфиды ( $\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Eu, Sm}$ ) [12]; флюорогалогениды щелочноземельных металлов [5, 14]; некоторые сульфаты, бораты и силикаты [11, 13, 15]; галобораты, галосиликаты, галофосфаты и галогерманаты щелочноземельных металлов, в особенности  $\text{Ba}_5\text{SiO}_4\text{Br}_6\text{:Eu}$  [11, 16]. Применительно к ЛДР наилучшими из этих люминофоров оказались флюорогалогениды бария, активированные европием ( $\text{BaFHal:Eu}$ ), способность которых к ФСЛ исследована в работах [5, 14], а позднее в большом количестве других публикаций. Особенно благоприятным сочетанием свойств обладает  $\text{BaFBr:Eu}$ -фосфор [12, 17—19], используемый для выпускаемых в промышленном масштабе запоминающих экранов [17]. Энергетический выход его ФСЛ достигает 5% [19], полосы излучения ( $\lambda_{\text{max}} = 390 \text{ нм}$ ) и стимуляции ( $\lambda_{\text{max}} = 590\div 600 \text{ нм}$ ) далеко отстоят друг от друга, затухание ФСЛ характеризуется  $\tau = 0,8 \text{ мкс}$  [8], фединг по данным [17] не превышает 25% за 8 ч, наличие бария в основании люминофора обеспечивает эффективное поглощение рентгеновского излучения [20]. Следует отметить, что делались и продолжают делаться безуспешные попытки улучшить те или иные свойства  $\text{BaFBr:Eu}$  путем частичной замены Br на Cl или I [13].

<sup>1</sup> В последних системах фирмы «Фуджи» для сканирования запоминающего экрана и фотопленки используется один и тот же лазер.

### III. СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ФЛЮОРОГАЛОГЕНИДОВ БАРИЯ

Из флюорогалогенидов бария первым привлек к себе внимание  $\text{BaFCl}$  как объект для исследования центров окраски [21—24] и (при активации европием) как эффективный люминофор для усиливающих рентгеновских экранов [25, 26]. Высокая эффективность фото- и катодolumинесценции  $\text{MFNaI:Eu}^{2+}$ -фосфоров ( $\text{M} = \text{Sr}, \text{Ba}$ ;  $\text{NaI} = \text{Cl}, \text{Br}$ ) отмечена в работе [27].

Флюорогалогениды бария и стронция обладают слоистой тетрагональной структурой типа  $\text{PbFCl}$  [28, 29], которую можно изобразить в виде последовательности слоев  $\text{F}_2\text{MNaI} \text{NaIM} \dots$ , расположенных вдоль направления  $[001]$  (рис. 1). Индекс 2 при символе фтора означает, что число ионов в слое  $\text{F}^-$  в два раза больше, чем в слоях  $\text{NaI}$  и  $\text{M}$ . Расстояния между ионами  $\text{F}^-$  в  $\sqrt{2}$  раз меньше расстояний между  $\text{Br}^-$  и  $\text{Ba}^{2+}$  в соответствующих слоях.

Наличие в кристаллах флюорогалогенидов бария анионов двух типов обуславливает возможность образования двух различных типов центров окраски ( $F$ -центров), например, захвативших электроны вакансий фтора<sup>2</sup> ( $V_{\text{F}}$ ) и хлора ( $V_{\text{Cl}}$ ) в  $\text{BaFCl}$  или фтора и брома ( $V_{\text{Br}}$ ) в  $\text{BaFBr}$ . Появление соответствующих полос в спектре поглощения кристаллов подтверждено экспериментально, причем на основании исследования ЭПР [22] и теоретического анализа [23] коротковолновая полоса приписана  $V_{\text{F}}$ -центрам, обозначаемым часто символом  $F$  ( $F^-$ ). Показано также, что при аддитивном окрашивании образуются только  $F$ -центры типа  $V_{\text{F}}$  [30]. Это можно объяснить тем, что избыток  $\text{Ba}$  проникает в глубь кристаллов вдоль дислокаций, которые образуются на краю двух смежных слоев  $\text{F}_2$  и  $\text{Ba}$ , обрывающихся внутри кристалла (на краю слоев  $\text{BrBrBa}$  их образование менее вероятно по стерическим причинам).

В работе [14] изучены характеристики люминесценции системы  $\text{BaCl}_2\text{—BaF}_2$  и показано, что избыток  $\text{BaF}_2$  образует в  $\text{BaFCl}$  твердый раствор. Это означает, что часть ионов  $\text{Cl}^-$  замещается ионами  $\text{F}^-$  с образованием антиструктурных дефектов  $\text{F}_{\text{Cl}}$  [19]. Наличие подобных дефектов предполагается и в  $\text{BaFBr}$  [33]. Их ассоциация<sup>3</sup> с  $V_{\text{Cl}}(V_{\text{Br}})$  приводит к возникновению  $F$ -центров, несколько отличающихся параметрами от неассоциированных центров этого типа [19].

Флюорогалогениды бария обладают способностью к люминесценции, не связанной с наличием примесей. Как и в случае других галогенидных фосфоров [34], ее объясняют рекомбинацией электронов с  $V_{\text{K}}$ -центрами (молекулярными центрами  $\text{NaI}_2$ , образующимися при захвате дырки двумя соседними ионами галогена) [35, 36]. Наличие в кристалле двух различных галогенов обуславливает возможность образования по крайней мере двух типов  $V_{\text{K}}$ -центров, например,  $\text{F}_2$  и  $\text{Cl}_2$  в  $\text{BaFCl}$ . С  $\text{F}_2$  связывают коротковолновую полосу излучения, наблюдаемую лишь при низких температурах во всех флюорогалогенидах и в  $\text{BaF}_2$  [35]. Люминесценция неактивированных  $\text{BaFCl}$  и  $\text{BaFBr}$  при комнатной температуре приписывается рекомбинации электронов с  $\text{Cl}_2^-$  и  $\text{Br}_2^-$  центрами соответственно. Они образуются ионами  $\text{NaI}^-$ , расположенными на кратчайшем расстоянии друг от друга в смежных слоях. При этом вследствие меньшей электроотрицательности  $\text{Br}$  по сравнению с  $\text{Cl}$  в смешанных кристаллах

<sup>2</sup> Индекс при символе дефекта указывает узел решетки, в котором этот дефект образуется, или междоузлие ( $i$ ), как это принято в литературе по физической химии твердого тела [31, 32].

<sup>3</sup> Здесь и ниже точкой обозначен эффективный положительный заряд дефекта по отношению к окружающей решетке, а штрихами — эффективный отрицательный заряд (их число указывает величину заряда).

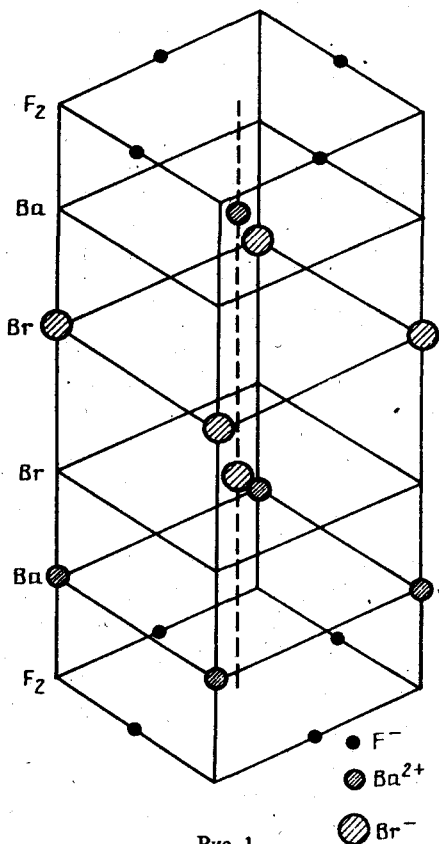


Рис. 1

Рис. 1. Схема расположения ионов в кристаллической решетке BaFBr

Символами F, Ba, Br указаны слои, образованные ионами  $F^-$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Br^-$  соответственно

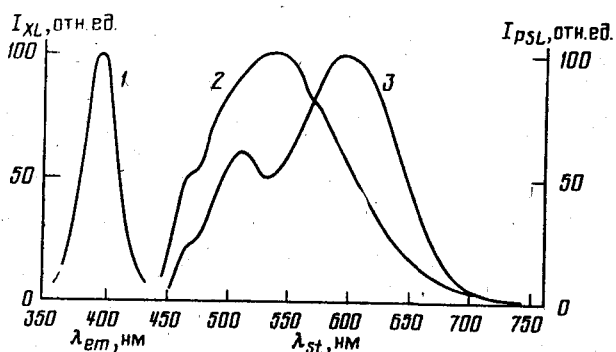


Рис. 2

Рис. 2. Спектр излучения (1) и стимуляции (2, 3) BaFBr:10<sup>-4</sup> Eu-люминофора, полученного прокаливанием шихты при 800°C без дополнительного отжига (2) и с отжигом при 550°C (3) по данным измерений при 20°C

По оси абсцисс — длина волны испускаемого ( $\lambda_{em}$ ) и стимулирующего ( $\lambda_{st}$ ) света, по оси ординат — интенсивность рентгенолюминесценции ( $I_{XL}$ ) и ФСЛ ( $I_{PSL}$ ). Спектральное распределение ФСЛ BaFBr:Eu-фосфора совпадает со спектром рентгенолюминесценции. Кривые нормированы по максимуму [41]

BaFCl<sub>x</sub>Br<sub>1-x</sub> преобладают  $V_k$ -центры типа  $Br_2^-$  [35]. Наличие вакансий бария  $V_{Ba}''$  может оказывать стабилизирующее влияние на образующиеся по соседству с ними  $V_k$ -центры.

Флюорогалогениды бария и стронция легко активируются двухвалентными ионами редкоземельных элементов —  $Eu^{2+}$  [5, 25, 37, 38] и  $Sm^{2+}$  [39, 40], поскольку такая активация не требует компенсации заряда. Спектр излучения  $Eu^{2+}$ , характеризующийся наличием при комнатной температуре интенсивной полосы излучения с максимумом при 385 нм у BaFCl и 390 нм у BaFBr, весьма благоприятен для использования этих люминофоров в ЛДР, поскольку он отвечает области максимальной чувствительности обычных фотокатодов и в то же время значительно смещен по отношению к полосам стимуляции [5], как это показано на рис. 2 на примере<sup>4</sup> BaFBr:10<sup>-4</sup> Eu [41].

<sup>4</sup> Числом перед символом активатора указана его концентрация в г-атом · моль<sup>-1</sup> в шихте, из которой получается фосфор.

Кроме полосы излучения, отвечающего переходу  $4f^{65}d \rightarrow 4f^7$  в ионе  $\text{Eu}^{2+}$ , может наблюдаться линия при 363 нм, обусловленная  $4f^7 \rightarrow 4f^7(^6P_{7/2} \rightarrow ^8S_{7/2})$ -переходом [37]. Последний становится возможным благодаря тому, что из-за относительно слабого расщепления  $5d$ -состояния на  $^2e_g$  и  $^2t_{2g}$  наиболее низко расположенный возбужденный  $4f$ -уровень оказывается несколько ниже уровней  $^2e_g$ . Линия 363 нм ослабляется по отношению к полосе излучения при замещении Sr на Ba и Cl на Br или I и при повышении температуры [37], так что у  $\text{BaFBr:Eu}$  и  $\text{BaFI:Eu}$  при комнатной температуре она уже практически не наблюдается.

При использовании  $\text{BaFCl:Eu}$ -фосфора для изготовления усиливающих экранов одной из наиболее сложных проблем оказалось устранение слабого, но очень длительного послесвечения [26, 38, 42], указывающего на наличие глубоких центров захвата. Именно изучение этого явления, более четко выраженного у  $\text{BaFBr:Eu}$  [25], привело к обнаружению способности флюорогалогенидов к запасанию большой светосуммы и освобождению ее при оптической стимуляции. Разделение зарядов, являющееся условием запасаания энергии, обуславливается эффективным захватом дырок  $\text{Eu}^{2+}$ -центрами и электронов анионными вакансиями. Участие вакансий  $V_F^\bullet$  и  $V_{\text{Hal}}^\bullet$  в этом процессе подтверждается сопоставлением спектров стимуляции со спектрами поглощения  $F$ -центров, образующихся при захвате электронов [43]. Энергетический выход ФСЛ у  $\text{BaFBr:Eu}$ -фосфора, возбужденного рентгеновским излучением, достигает 5% [19]. Существенно также быстрое затухание всплеск ФСЛ, обусловленное тем, что лимитирующей скоростью процесса стадией является разрешенный внутри-центральный переход  $4f^{65}d \rightarrow 4f^7$ . При непрерывной оптической стимуляции скорость опустошения ловушек ( $\tau_{em}^{-1}$ ) пропорциональна максимальной интенсивности ФСЛ ( $I_{PSL}$ ), которая в свою очередь определяется интенсивностью стимулирующего света ( $I_{st}$ ) и начальной концентрацией захваченных  $F$ -центрами электронов ( $n_F$ ):

$$I_{PSL} = \sigma I_{st} n_F. \quad (1)$$

Здесь  $\tau_{em}$  — время, в течение которого интенсивность ФСЛ в условиях непрерывной стимуляции уменьшается в  $e$  раз,  $\sigma$  — поперечное сечение оптической стимуляции [44].

#### IV. ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ $\text{BaFBr:Eu}$ -ФОСФОРА ОТ УСЛОВИЙ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ

Из ряда известных способов получения флюорогалогенидов бария [20, 25, 29, 45] для приготовления  $\text{BaFBr:Eu}$ -фосфора нашли применение три способа. Один из них, упоминаемый в большинстве работ (см., например, [12, 18, 44]), состоит в проведении твердофазной реакции, осуществляемой путем прокаливании шихты из смеси  $\text{BaF}_2$  и  $\text{BaBr}_2$ , содержащей бромид [12] или фторид [42] европия. Второй способ отличается от первого тем, что начальная стадия процесса проводится в водной суспензии мелко-дисперсного  $\text{BaF}_2$  в растворе  $\text{BaBr}_2$  [25, 46, 47]. После упаривания суспензии и добавления  $\text{EuBr}_3$  полученная шихта прокаливается, как правило, в восстановительной среде. Особенностью третьего способа является то, что источником фтора служит  $\text{NH}_4\text{F}$  [19, 41, 48, 49], взаимодействующий с  $\text{BaBr}_2$  вначале в растворе, а затем (после его упаривания) — в твердой фазе.

Свойства  $\text{BaFBr:Eu}$  чрезвычайно сильно зависят от условий его получения [10, 41, 50, 51]. Для достижения наибольшего выхода ФСЛ концентрация европия должна быть, как правило, ниже, чем для обеспечения максимального выхода стационарной люминесценции [41]. При использовании  $\text{NH}_4\text{F}$  в качестве фторирующего агента эта концентрация почти на порядок ниже, чем при взаимодействии  $\text{BaBr}_2$  с  $\text{BaF}_2$ , и составляет  $10^{-4}$  г-атом/моль [52]. Фторирующее действие  $\text{NH}_4\text{F}$  благоприятствует также встраиванию в решетку других редкоземельных активаторов и удалению из нее

кислорода<sup>5</sup>, увеличивающего фосфоресценцию и снижающего интенсивность ФСЛ, по-видимому, вследствие образования дефектов типа  $O'_{Br}V^*_{Br}$  [19]. Хотя активация  $BaFBr$  двухвалентным европием довольно эффективно происходит при прокаливании шихты с  $NH_4F$  и плавнем (например,  $KBr$  [41]) на воздухе, предпочтительно использование слабо восстановительной среды — азота с примесью водорода [12, 44] или  $CO$  [19, 26, 53]. Впрочем, и в этом случае не исключено образование  $O'_{Hal}$ -центров [54]. Природа плавня заметно влияет на спектр стимуляции [52], а его концентрация (наряду с температурой прокаливания) — на размер зерен [45]. При выборе способа удаления плавня следует иметь в виду, что гигроскопичность соединений  $MFHal$  и их склонность к гидролизу возрастают с уменьшением размера катиона  $M^{2+}$  и увеличением размера аниона  $Hal^-$  [29], так что у  $BaFBr$  она заметно больше, чем у  $BaFCl$ .

Существен выбор температурного режима прокаливания шихты [41] и соотношения компонентов, образующих основание люминофора. Это соотношение влияет на полноту протекания твердофазной реакции [29, 57], спектр стимуляции и фединг [12]. Особенно примечательны изменения свойств  $BaFBr:Eu$ -фосфора в зависимости от скорости его охлаждения и условий отжига [41, 55, 56]. Как оказалось, при условии предварительного удаления избытка  $BaBr_2$  [52] отжиг люминофора при 450—650°C приводит к смещению максимума спектра стимуляции (см. рис. 2) из желто-зеленой области (520—540 нм) в оранжево-красную (595—600 нм). Одновременно уменьшается интенсивность стационарной рентгенолюминесценции, резко ослабляется фосфоресценция при комнатной температуре и по крайней мере на порядок величины снижается светосумма, освобождаемая при термической стимуляции, причем высокотемпературные пики на кривой термовысвечивания (КТВ) ослабляются значительно больше, чем низкотемпературные. В то же время выход ФСЛ в ряде случаев даже возрастает. Измерение спектров стимуляции при температуре жидкого азота в процессе последовательного отжига пиков КТВ дало дополнительные указания на отсутствие прямой связи между характеристиками термически и оптически стимулированной люминесценции [41]. Это следует и из того, что оптическое высвечивание люминофора не устраняет термолюминесценцию и фосфоресценцию [50, 52].

## V. ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ $BaFBr:Eu$ -ФОСФОРА И МЕХАНИЗМ ФСЛ

В предположении, что возможно термическое разупорядочение решетки  $BaFBr$  как по Френкелю, так и по Шоттки, а также антиструктурное разупорядочение, следует принять во внимание образование в  $BaFBr:Eu$ -фосфоре следующих точечных дефектов [19, 33, 57, 58]:  $V''_{Ba}$ ,  $V^*_F$ ,  $V^*_{Br}$ ,  $F'_i$ ,  $Br'_i$ ,  $F_{Br}$  и  $Eu_{Ba}$ . Компьютерное моделирование дефектов в кристаллах [59] позволило вычислить энтальпию и энтропию процессов разупорядочения решетки  $BaFBr$  [33]. Основанный на этих данных термодинамический анализ показал [58], что из числа эффективно заряженных точечных дефектов в регулярной решетке при температурах образования и отжига преобладают  $V^*_{Br}$  и  $F'_i$  (при 550°C их концентрация на порядок ниже, чем при 800°C). При этом равновесию отвечает приближенное уравнение

$$[F'_i] \approx [V^*_{Br}]. \quad (2)$$

Между тем сопоставление спектра стимуляции со спектрами ослабления ЭПР под действием стимулирующего света [8] приводит к заключению, что вакансиям  $V^*_{Br}$

<sup>5</sup> Источником кислорода может служить кристаллизационная вода, с которой галогениды бария легко взаимодействуют [21].

принадлежит лишь длинноволновая область спектра стимуляции с максимумом при 595—600 нм, в то время как коротковолновая область, преобладающая у неотожженного люминофора (см. рис. 2), связана с  $V_F^*$ .

Это кажущееся несоответствие между теоретическим расчетом и экспериментом устраняется, если учесть приведенные в предыдущем разделе данные о влиянии отжига BaFBr:Eu на его термостимулированную люминесценцию (ТСЛ) и ФСЛ [41, 58]. Очевидно, отжиг, подобно медленному охлаждению при получении ZnS:Cu-электролюминофоров [32, 60], приводит к сегрегации точечных дефектов в области дислокаций и границ блоков. Как уже отмечено (см. раздел III), дислокации скорее всего образуются на краю двух смежных слоев  $F_2$  и Ва. Такие дислокации могут генерировать вакансии  $V_F^*$  (как и  $V_{Ba}''$ ), которые, однако, остаются в области кристалла, прилегающей к протяженному дефекту. При отжиге люминофора вакансии  $V_{Br}^*$ , преобладающие в объеме кристалла, а также междоузельные ионы  $F_i'$  и примесные дефекты  $Eu_{Ba}$  выходят в область дислокаций и межблочных поверхностей. Этот процесс, сопровождающийся взаимодействием  $F_i'$  с  $V_F^*$ ,

$$F_i' + V_F^* = F_F, \quad (3)$$

приводит к увеличению отношения концентраций  $[V_{Br}^*]/[V_F^*]$ . Если теперь предположить, что ФСЛ разыгрывается преимущественно в области линейных и поверхностных дефектов, в то время как ТСЛ обусловлена в основном процессами, происходящими в регулярной решетке, то становятся понятными все приведенные данные в отношении влияния отжига: усиление ФСЛ в длинноволновой области спектра стимуляции, принадлежащей  $V_{Br}^*$ , отсутствие прямой связи между ТСЛ, ослабляющейся при отжиге, и ФСЛ, которая может при этом даже усилиться, и уменьшение послесвечения, а также выхода стационарной люминесценции при отжиге. Более того, получают объяснение и данные ряда работ, говорящие в пользу туннельного механизма ФСЛ. К числу таких данных относится слабая зависимость времени затухания ФСЛ от температуры при стимуляции короткими импульсами света [18] (что имеет место также у фосфоров типа KI:Tl [10]) и отсутствие фотопроводимости при стимуляции в условиях, когда ФСЛ происходит при участии почти одних только  $V_F$ -центров [61]. С изложенной точки зрения возможность туннельного перехода электронов является результатом того, что вследствие сегрегации точечных дефектов вблизи линейных и поверхностных центры свечения ( $Eu_{Ba}$ ) и анионные вакансии оказываются близко друг от друга [41]. То обстоятельство, что ФСЛ с участием  $V_{Br}$ -центров сопровождается фотопроводимостью, спектр возбуждения которой сходен со спектром стимуляции [43, 61], следует рассматривать как указание на сосуществование туннельного механизма оптической стимуляции с ФСЛ, происходящей в результате перехода электронов через зону проводимости [41], хотя преобладает, по-видимому, первый механизм. В то же время ТСЛ и наблюдаемая при комнатной температуре фосфоресценция во всех случаях происходят при участии зоны проводимости и обусловлены преимущественно дефектами, расположенными в регулярной решетке.

В процессе измерения спектров стимуляции BaFBr:Eu при температуре жидкого азота после производившегося последовательно отжига пиков КТВ установлено, что такой отжиг приводит к значительному увеличению выхода ФСЛ и доли коротковолновых составляющих в спектре стимуляции [41]. Это можно объяснить переселением электронов из ловушек, отвечающих преимущественно за ТСЛ, в ловушки, наиболее активно участвующие в ФСЛ. Такое же объяснение дано и эффекту частич-

ного восстановления ФСЛ после полного оптического высвечивания фосфора [52]. Кинетика этого процесса, характеризуемая уравнением

$$I_{PSL} = k\sqrt{t} \quad (4)$$

(где  $t$  — время выдержки фосфора после высвечивания,  $k$  — коэффициент), свидетельствует о диффузионном характере переселения электронов. Следует заметить, что предложенная с учетом туннельного механизма ФСЛ модель, базирующаяся на предположении о радиационном создании  $F$ -центров в результате образования  $F$ — $H$ -пар при распаде околоактиваторного эксимера [18, 36], не объясняет всей совокупности описанных фактов, в частности сильного влияния режима охлаждения и отжига люминофора на спектр стимуляции и выход ФСЛ.

При внимательном изучении спектра стимуляции обнаруживается, что он имеет сложную структуру, не сводимую к наличию двух полос [19, 41]. Это можно объяснить тем, что определяющие форму спектра  $F$ -центры отличаются друг от друга не только природой анионной вакансии ( $V_F$ ,  $V_{Br}$ ), но и ее окружением, в частности, вследствие упоминавшейся выше ассоциации с другими дефектами, в первую очередь с антиструктурными типа  $F_{Br}$  [19, 62]. Определенную роль может играть также расщепление возбужденного  $p$ -состояния  $F$ -центров [22, 63].

При исследовании активированных  $Eu^{2+}$  и  $Sm^{2+}$  фосфоров на основе  $BaFCl$  обнаружено резкое изменение их свойств, в том числе усиление фосфоресценции, при избытке  $BaF_2$  [38, 39, 45]. Есть указания на то, что избыток  $BaF_2$  влияет и на свойства  $BaFBr:Eu$ , увеличивая в спектре стимуляции долю полос, связанных с  $V_{Br}$  [12]. Это может быть связано с интеркристаллическими реакциями типа



Первая из них может быть названа антиструктурным разупорядочением по Френкелю [52]. Она, по-видимому, играет особенно важную роль, поскольку в ней участвуют доминирующие в регулярной решетке дефекты  $V_{Br}^{\bullet}$  и  $F_i^{\bullet}$ . Отсюда следует сделать вывод о необходимости строго контролировать препаративные условия, влияющие на избыток  $BaF_2$ , в частности на стадии отмывки от плавня и отжига  $BaFBr:Eu$ -фосфора [52, 64] (вследствие гидролиза при отмывке из  $BaFBr$  удаляется некоторое количество  $BaBr_2$ ).

#### VI. СПЕКТРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СТАЦИОНАРНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ, ФОСФОРЕСЦЕНЦИИ И ФСЛ ФЛЮОРОГАЛОГЕНИДОВ БАРИЯ

В ряде работ [14, 36, 38—40, 50, 64—70] исследованы в широком интервале энергий спектры возбуждения стационарной люминесценции, фосфоресценции и ФСЛ флюорогалогенидов бария и стронция, представляющие интерес как в познавательном отношении, так и с утилитарной точки зрения. По длинноволновому краю главной, наиболее интенсивной полосы возбуждения фосфоресценции, которая, очевидно, связана с междузонными переходами, оценена ширина запрещенной зоны ( $E_g$ )  $BaFCl$  [14]. Она составляет 8,5—9 эВ. Соответствующая величина для  $BaFBr$  равна 8—8,5 эВ [40, 43, 71].

При  $E < E_g$  спектры возбуждения стационарной люминесценции зависят от природы центров свечения и потому различны для неактивированных люминофоров и люминофоров, содержащих  $Eu^{2+}$  и  $Sm^{2+}$  [38, 40]. Зависят они, по крайней мере при активации европием, и от окислительно-восстановительных свойств среды, в которой производится прокаливание люминофора [38]. Так, спектр возбуждения  $BaFCl:2 \cdot 10^{-2} Eu$ , полученного в среде  $CO$ , содержит интенсивную активаторную полосу, простираю-



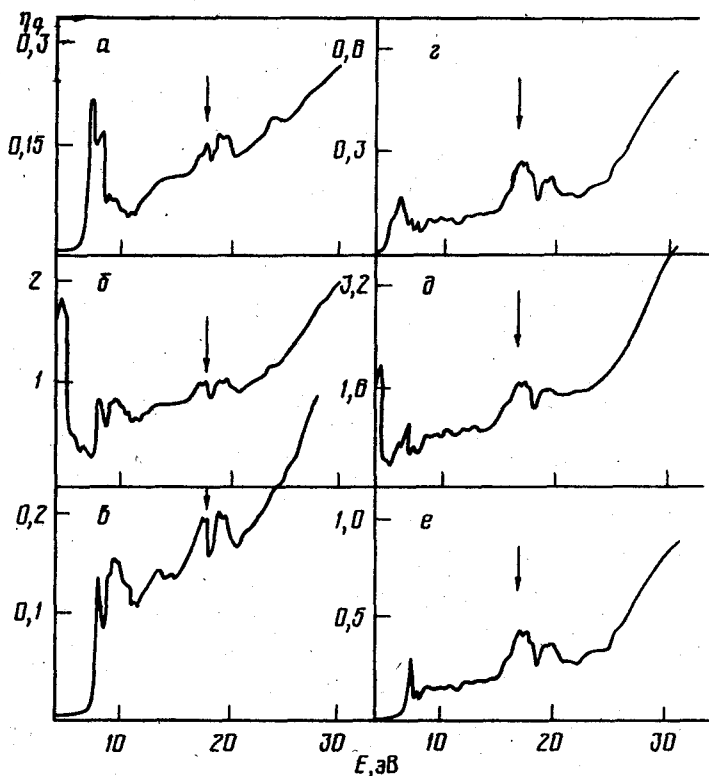


Рис. 3. Спектры возбуждения стационарной люминесценции неактивированного BaFCl (а), BaFCl:2 · 10<sup>-2</sup> Eu (б), BaFCl:10<sup>-2</sup> Sm (в), неактивированного BaFBr (з), BaFBr:10<sup>-3</sup> Eu (д), BaFBr:10<sup>-2</sup> Sm (е). По оси ординат отложен относительный (по сравнению с салицилатом натрия) квантовый выход. Стрелками указаны вычисленные значения энергии плазмона [40]

пущуюся от 3,3 до 5,4 эВ с едва намечающимся расщеплением на две полосы, принадлежащие  $5d(^2e_g)$  и  $5d(^2t_{2g})$ -состояниям иона  $\text{Eu}^{2+}$ . При прокаливании же люминофора на воздухе при 650—700°C полоса  $\text{Eu}^{2+}$  резко ослабляется (хотя интенсивность стационарной рентгенолюминесценции даже несколько возрастает [26]). При этом в длинноволновой части полосы возбуждения остается слабый пик при 318 нм, а в коротковолновой части, отвечающей  $^2t_{2g}$ -состоянию, возникает структура, которая объясняется переходами электронов с уровня  $4f^7(^8S)$  на уровни расщепленного спин-орбитальным взаимодействием  $4f^6(^7F_1)5d(^2t_{2g})$ -состояния. Прокаливание в СО размывает эту структуру из-за восстановления европия на поверхности люминофора, где ионы  $\text{Eu}^{2+}$  могут находиться в различном окружении [38]. Структуру участка спектра, расположенного между полосой, отвечающей внутрицентровым переходам, и  $E_g$ , приписывают ионизации  $\text{Eu}^{2+}$  и наличию краевых Г-экситонов (при 8,4 эВ у BaFCl и при 7,4 и 7,9 эВ у BaFBr [39, 66, 71]), связанных с  $4p$ -состояниями ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Br}^-$ .

Вид спектров возбуждения стационарной люминесценции при  $E > E_g$  практически не зависит от активатора, причем имеет место значительное качественное сходство между спектрами BaFCl и BaFBr (рис. 3). Наиболее примечательной особенностью их в области 9—30 эВ является наличие двугорбого максимума при 16—20 эВ у BaFCl и 15—19,5 эВ у BaFBr. Его можно связать с совместным влиянием образования плазмона и основного экситона [40], обусловленного возбуждением электронов  $5p$ -оболочки ионов  $\text{Ba}^{2+}$ . Вызывая рост коэффициента поглощения, образование

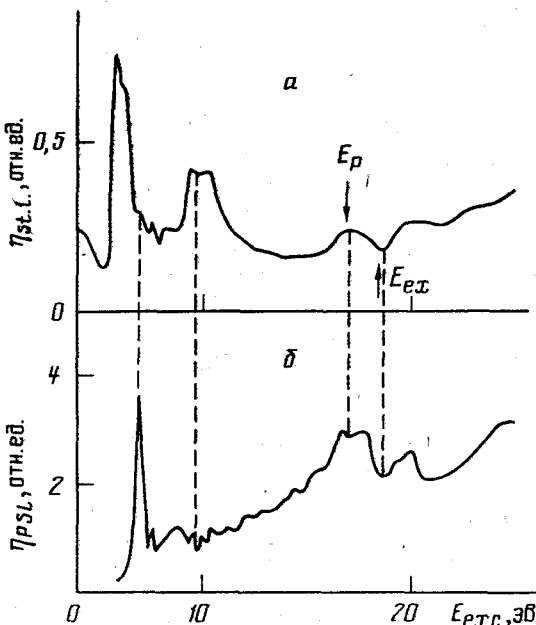


Рис. 4. Спектры возбуждения стационарной люминесценции (а) и ФСЛ (б) BaFBr:10<sup>-4</sup> Eu-фосфора, отожженного при 550°C. Стрелками указаны вычисленное значение энергии плазмона ( $E_p$ ) и энергии основного экситона ( $E_{ex}$ ), образующегося при возбуждении электронов 5p-оболочки иона Ba<sup>2+</sup> [50]

экситона приводит к увеличению приповерхностных потерь и к соответствующему узкому провалу в спектре при 18,1—18,3 эВ. Что касается фотонного умножения, то оно проявляется в большей степени в тенденции к установлению постоянного энергетического выхода люминесценции  $\eta$ , нежели в скачкообразном увеличении квантового выхода  $\eta_k$  [39, 40]. Уже в области 20—30 эВ  $\eta$  достигает значений, примерно равных энергетическому выходу рентгенолюминесценции:

11—12% у BaFCl:10<sup>-2</sup> Eu и 16—18% у BaFBr:Eu [40, 41]. Применительно к BaFBr:Eu постоянство  $\eta$  подтверждено измерениями в интервале от 10 до 1000 эВ [70]. Отжиг BaFBr:Eu при 550±100°C уменьшает выход стационарной люминесценции при  $E > 11$  эВ примерно в 2 раза; в то же время в области 10 эВ выявляется интенсивная полоса возбуждения (рис. 4, а), малозаметная у неотожженных люминофоров. Возможно, что она обусловлена образованием кластеров F<sub>Br</sub> (10 эВ — начальная энергия возникновения экситонов, связанных с 2p-состояниями ионов F<sup>-</sup> [36]).

Спектр возбуждения ФСЛ BaFBr:Eu был в несколько различных условиях измерен двумя группами исследователей независимо друг от друга [36, 50, 64—66]. Как видно из рис. 4, при  $E > 11$  эВ этот спектр в основном сходен со спектром возбуждения стационарной люминесценции. В то же время при  $E < 11$  эВ эти два спектра существенно различаются. Так, при 10 эВ вместо максимума, наблюдаемого в спектрах возбуждения стационарной люминесценции отожженных фосфоров, в соответствующем спектре ФСЛ имеет место провал. Весьма характерен для спектра возбуждения ФСЛ узкий интенсивный пик при 7 эВ. Соответственно двум изложенным выше концепциям относительно механизма ФСЛ этот пик связывают с переходом электрона от Eu<sup>2+</sup> к расположенной по соседству анионной вакансии или с экситоном, при распаде которого образуется F—H-пара [36, 50]. Существенно, что фосфоресценция BaFBr:Eu начинает эффективно возбуждаться при более высоких энергиях — около 8 эВ [50].

## VII. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАПОМИНАЮЩИХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЭКРАНОВ

Создание запоминающих люминесцентных экранов и основанного на их использовании метода ЛДР открыло новые возможности перед рентгенодиагностикой. Эти возможности базируются на сочетании компьютерной техники с требуемой для медицины площадью изображения, относительно высоким пространственным разрешением и большим динамическим диапазоном. Уже есть ряд сообщений о применении ЛДР для исследования легких, молочных желез и других органов [72—77], а также для проверки положения пучка излучения и для получения данных о распределении доз в облучаемом теле при лучевой терапии [56, 78, 79]. Широкое рас-

пространение метода в медицине сдерживается пока технико-экономическими трудностями [7, 80].

В ряде работ [81, 87] описано применение ЛДР для получения дифрактограмм, в особенности при исследовании биологических объектов с помощью синхротронного излучения. Таким путем удастся получать высококачественные снимки при времени экспозиции, в десятки раз меньшем, чем обычно [81, 84, 85]. Имеются предложения об использовании ЛДР для трансмиссионной электронной микроскопии [88] и для регистрации различных излучений, как электромагнитных — от ВУФ-области [40, 89] до тормозного излучения ускорителей электронов [56], так и корпускулярных [89], включая измерение естественного фона. При этом, правда, следует учесть, что соли бария, используемые в качестве фосфоров, содержат обычно небольшую примесь радия [17, 20]. Очевидно, что ЛДР может быть использована и для астрофизических исследований, в том числе в рентгеновской астрономии, где большой динамический диапазон запаасающих энергию люминесцентных экранов может быть особенно полезен.

В связи с различными применениями таких экранов появились исследования их параметров, определяющих качество получаемых с помощью ЛДР изображений и пороговые значения плотности потока детектируемых излучений [6, 81, 90—92]. Как и обычно, определяющую роль играют эффективность преобразования энергии возбуждающего люминесценцию излучения, шум, частотно-контрастная характеристика, динамический диапазон и кинетические параметры [93]. В то же время на эти показатели качества экранов и системы в целом влияет ряд факторов, специфичных для ЛДР [7, 90]. К числу таких факторов, зависящих от свойств применяемых фосфоров и экранов, относятся рассеяние стимулирующего света [11], фединг [13, 94] и флуктуации световых фотонов (люминесцентный шум) [87]. Последний из перечисленных факторов приобретает существенное значение как составляющая общего шума при малом выходе ФСЛ и больших потерях света на пути от экрана к фотоэлектронному умножителю.

Таким образом, разработка эффективных кристаллофосфоров для запоминающих изображение экранов и основанного на их применении метода ЛДР положила начало новой области исследований, которая в настоящее время интенсивно развивается в различных направлениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов-Романовский В.В., Левшин В.Л., Моргенштерн З.Л., Трапезникова З.А. // ДАН СССР. 1946. Т. 54. С. 19.
2. Левшин В.Л., Митрофанова Н.В., Тимофеев Ю.П. и др. // Труды Физ. ин-та АН СССР. 1972. Т. 59. С. 64.
3. McKeever S.W.S. Thermoluminescence of solids. Cambridge: Univ. Press, 1985.
4. Тимофеев Ю.П., Фридман С.А., Фок М.В. Преобразование света. М.: Наука, 1985. 176 с.
5. Sonoda M., Takano M., Miyahara J., Kato H. // Radiology. 1983. V. 148. P. 833.
6. Digital imaging in diagnostic radiology / Ed. J.D. Newell, Ch. A. Kelsey. N.Y.; Edinburg; L.; Melbourne: Churchill Livingstone, 1990. 163 p.
7. Гурвич А.М., Мягкова М.Г., Рюдигер Ю. // Мед. техника. 1990. № 3. С. 27.
8. Takahashi K., Miyahara J., Shibahara V. // J. Electrochem. Soc. 1985. V. 132. P. 1492.
9. Seggern von H., Voigt T., Schwarzmichel K. // Siemens Forsch. Entwickl. Ber. 1988. B. 17. № 3. S. 125.
10. Власов Г.И., Калныныш Р.А., Нагли Л.Е. и др. // Автометрия, 1980. № 1. С. 66.
11. Meijerink A. Luminiscence of new X-ray storage phosphors. Utrecht: Drukkerij Elinkwijk BV, 1990. 175 p.
12. Takahashi K., Nakamura T. Pat. USA. 4535237. 13.12.83/13.08.85.
13. Degenhardt H. Pat. FRG (OS) DE 3347207 A1, 27.12.83/11.07.85.

14. Гурвич А.М., Ильина М.А., Кааторова В.П. и др. // Журн. прикл. спектроскопии. 1983. Т. 38. С. 765.
15. Meijering A., Blasse G., Glasbeek M. // J. Phys.: Condens. Matter. 1990. V. 2. P. 6303.
16. Meijering A., Blasse G. // Mat. Chem. and Phys. 1989. V. 21. P. 261.
17. Miyahara J. // Computed radiography / Ed. Y. Tateno, T. Linuma, M. Takano. Berlin: Springer-Verlag, 1987. P. 7.
18. Seggern von H., Voigt T., Knüpfer W., Lange G. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. P. 1405.
19. Gurvič A.M., Kavtorova W.P., Mjagkova M.G. et al. // Second international meeting on luminescence — 35 years luminescence in Greifswald, proceedings. Greifswald: Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 1989. P. 114.
20. Gurvič A.M. Röntgenleuchtstoffe und Röntgenlumineszenzbildwandler. Leipzig: Akad. Verlag. Geest & Portig. K.-G., 1988. 164 S.
21. Nicklaus E., Fischer F. // Phys. stat. sol. (b). 1972. V. 52. P. 453.
22. Yuste M., Taurer L., Rahmani M., Lemiyne D. // J. Phys. Chem. Solids. 1976. V. 37. P. 961.
23. Lefrant S., Harker A.H. // Solid State Commun. 1975. V. 19. P. 853.
24. Somaiah K., Veeresham P., Prasad K.L.N., Hari Babu V. // Physica stat. sol. (a). 1979. V. 56. P. 737.
25. Stevels A.L., Pingault F. // Philips Res. Repts. 1975. V. 30. P. 737.
26. Гурвич А.М., Катомина Р.В., Социн Н.П. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1977. Т. 41. С. 1372.
27. Sommerdijk J.L., Verstegen J.M.P.J., Bril A. // J. Luminesc. 1974. V. 8. P. 502.
28. Sauvage M. // Acta Cryst. (B.). 1974. V. 30. P. 2786.
29. Beck H.P. // J. Solid State Chemistry. 1976. V. 17. P. 275.
30. Lemoyne D., Duran J., Yuste M., Brillardon M. // J. Phys. C.: Solid State Phys. 1975. V. 8. P. 1455.
31. Kröger F.A. The chemistry of imperfect crystals. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1974.
32. Гурвич А.М. Введение в физическую теорию кристаллофосфоров. М.: Высш. шк., 1971. 336 с; 1982. 376 с.
33. Baetzold R.C. // Phys. Rev. (B.). 1987. V. 36. P. 9182.
34. Калдер К.А. Электронные возбуждения кристаллов  $A^{IV}_{VII}$ : Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Тарту, 1972.
35. Crawford M.K., Brixner L.H., Somaiah K. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. P. 3758.
36. Rütter H.H., Seggern von H., Reininger R., Saile V. // Phys. Rev. Letters. 1990. V. 65. P. 2438.
37. Sommerdijk J.L., Verstegen J.M.P.J., Bril A. // J. Luminesc. 1974. V. 8. P. 502.
38. Гурвич А.М., Гутан В.Б., Ильина М.А. и др. // Оптика и спектроскопия. 1982. Т. 52. С. 289.
39. Гурвич А.М., Ильина М.А., Михайлин В.В. и др. // Журн. прикл. спектроскопии. 1988. Т. 49. С. 246.
40. Гурвич А.М., Михайлин В.В., Мякова М.Г., Терехин М.А. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1990. Т. 31. С. 44.
41. Гурвич А.М., Мякова М.Г., Рюдигер Ю., Кааторова В.П. // Журн. прикл. спектроскопии. 1990. Т. 53. С. 56.
42. Brixner L.H. // Mat. Chem. and Phys. 1987. V. 16. P. 253.
43. Takahashi K., Kohda K., Miyahara J. et al. // J. Luminesc. 1984. V. 31. № 32. P. 266.
44. De Leeuw D.M., Kovats T., Herko S.P. // J. Electrochem. Soc. 1987. V. 134. P. 491.
45. Research Disclosure. 1978. № 165. P. 17.
46. Campbell A.N. Campbell A.J.R. // Trans. Faraday Soc. 1939. V. 35. P. 241.
47. Stevels A.L.N., Schrama-de Pauw A.D.M., Pingault F. Пат. США. 4157981. 3.04.78/12.06.79.
48. Su Mian-Zeng, Xu Xiao-Lin, Ruan Shen-Kang, Gong Man-Lin // J. Less-Common Metals. 1983. V. 93. P. 361.
49. Гурвич А.М., Головова С.И., Ильина М.А. и др. // Люминесцентные приемники и преобразователи ионизирующего излучения. Новосибирск: Наука, 1985. С. 72.
50. Belskiy A.N., Gurvich A.M., Kamenskikh I.A. et al. // Nucl. Instr. Methods. (A). 1991. V. 308. P. 190.

51. Starick D., Gurvich A.M., Miagkova M.G. et al. // Third international meeting on luminescence: Abstr. Trassenheide. 1991. P. 16.
52. Gurvich A.M., Mjagkova M.G., Rüdiger J., Kavtorova V.P. // International Sympos. «Luminescent detectors and transformers of ionizing radiation». Proc. Riga: Univ. of Latvia, 1991. D1.
53. Ye Biao, Nin Jian-Hua, Su Miang-Zeng // J. Luminesc. 1988. V. 40. № 41. P. 323.
54. Spaeth J.-M. // International sympos. «Luminescent detectors and transformers of ionizing radiation»: Proc. Riga: Univ. of Latvia, 1991. P. 13.
55. Gurvich A.M., Kavtorova V.P., Mjagkova M.G. et al. // International Sympos. «Luminescent X-ray screens»: Abstr. M., 1989. P. 29.
56. Gurvich A.M., Milshitejn R.S., Myakhova M.G. et al. // Radiation Protection Dosimetry. 1990. V. 34. P. 265.
57. Baetzold R.C. // J. Phys. Chem. Solids. 1989. V. 50. P. 915.
58. Гурвич А.М. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1992. Т. 56. С. 139.
59. Catlow C.R.A., Dixon M., Mackrodt W.C. Computed simulation of solids. Berlin: Springer-Verlag, 1982.
60. Казанкин О.Н. // Сб. тр. Гос. ин-та прикладной химии. Л., 1966. Вып. 53. С. 12.
61. Imabuchi Y., Umemoto Ch., Takahashi K., Shionoya S. // International Conf. on luminescence: Abstr. Lisbon, 1990. P. 158.
62. Gurvich A.M., Kavtorova V.P., Myagkova M.G. et al. // International symp. on imaging systems-150 years photography: Abstr. Dresden, 1989. P. 179.
63. Sun Xiao-Ping, Su Mian-Zeng // J. Luminesc. 1988. V. 40. № 41. P. 171.
64. Gurvich A.M., Myagkova M.G., Rudiger Ju. et al. // J. Rare Earths (Special issue): Proc. 2nd Int. Conf. Rare Earths, Development & Applications. Beijing, 1991. V. 2. P. 730.
65. Rüter H.-H., Seggern von H., Reininger R., Saile V. HASYLAB Jahresbericht. 1989. S. 149.
66. Rüter H.-H., Seggern von H., Reininger R., Saile V. // International conf. on luminescence Abstr. Lisbon, 1990. P. 629.
67. Алексеев В.И., Васильев А.Н., Гурвич А.М. и др. // Препринт Физического ин-та им. П.Н. Лебедева АН СССР. 1986. № 20.
68. Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1986. 296 с.
69. Mikhailin V.V., Terekhin M.A. // Nucl. Instr. Meth. (A). 1989. V. 282. P. 607.
70. Rüter H.-H. Erzeugung photostimulierbarer Zentren im VUV und XUV Spektralbereich. Hamburg: HASYLAB, 1991. 169 S.
71. Nicklaus E. // Phys. stat. sol. (a). 1979. V. 53. P. 217.
72. Müller R.D., John V., Voss M., Löhr E. et al. // International sympos. «Luminescent X-ray screens». Abstr. M., 1989. P. 27.
73. Goodman L.R., Wilson C.R., Foley W.D. // Amer. J. Roentgenol. 1988. V. 150. P. 1241.
74. Schwermer B., Witte G., Spielman R.P. et al. // Fortschr. Röntgenstr. 1990. B. 153. S. 161.
75. Boijen E. // Charite-sympos. «CT and MR medicine»: Abstr. book. Berlin, 1988. P. 130.
76. Bergh B., Döhning W. // Digital Radiographie: Referate und Vorträge. Konstanz: Schnetztor-Verlag GmbH, 1989. S. 117.
77. Neufang K.F., Krug B., Lorenz R., Steinbrich N. // Fortschr. Röntgenstr. 1990. B. 152. S. 501.
78. Wilenzick R.M., Merritt C.R.B., Balter S. // Med. Phys. 1987. V. 14. P. 389.
79. Gur D., Deutsch M., Fuhrmann C.R. et al. // Ibid. 1989. V. 16. P. 132.
80. Schittenhelm R. // Electromedica. 1986. B. 54. S. 72.
81. Miyahara J., Takahashi K., Amemiya Y., Kamiya N. et al. // Nucl. Instr. Meth. (A.). 1986. V. 246. P. 572.
82. Amemiya Y., Kamiya N., Miyahara J. // Oyo Buturi. 1986. V. 55. P. 978 (in Japanese).
83. Kamiya N., Amemiya Y., Miyahara J. // J. Crystallogr. Soc. Jap. 1986. V. 28. P. 350.
84. Amemiya Y., Matsushita T., Nakagawa A., Satow Y. et al. // Nucl. Instr. Meth. (A). 1988. V. 266. P. 645.
85. Amemiya Y., Wakabayashi K., Tanaka H., Ueno Y. et al. // Science. 1987. V. 237. P. 164.
86. Whiting R.B., Owen J.F., Rubin B.H. // Nucl. Instr. Meth. (A). 1988. V. 266. P. 628.
87. Bilderbeck D., Moffat K., Owen J. et al. // Nucl. Instr. Meth. (A). 1988. V. 266. P. 636.
88. Mori N., Oikawa T., Katoh T. et al. // Ultramicroscopy. 1988. V. 25. P. 195.
89. Miyahara J. // J. Soc. Instrum. Control. Eng. 1987. V. 26. P. 657 (in Japanese).

90. Hillen W., Schiebel U., Zaengel T. // Med. Phys. 1987. V. 14. P. 744.  
91. Fujita H., Ueda K., Morishita J., Fujikawa T. et al. // Ibid. 1989. V. 16. P. 52.  
92. Klingenberg K., Conrad B. // Siemens Forsch. und Entwickl. Ber. 1987. B.16. S. 192.  
93. Гурвич А.М. Физические основы радиационного контроля и диагностики. М.: Энерго-  
атомиздат, 1989. 168 с.  
94. Seggern von H. // Cryst. Latt. Def. and Amorph. Mat. 1989. V. 18. P.399.

Московский научно-исследовательский  
рентгенорадиологический институт,  
Московский государственный  
университет

## PHOSPHORS FOR THE STORAGE LUMINESCENT SCREENS

*Gurvich A.M., Mikhailin V.V.*

The review of research on the photostimulable phosphors for storage luminescent screens applicable in the digital radiography has been presented. The sufficient usage properties of barium fluorohalides and BaFBr:Eu in particular have been discussed. A particular attention has been drawn to the effect of preparation conditions on the mentioned properties, to physico-chemical regulations of processes of formation and interaction of crystal defects as well as to the photo-stimulated luminescent mechanism.

The bibliography contains 94 references.