



Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005" International Conference "Fizika-2005" Международная Конференция "Fizika-2005"

7 - 9
İyun
June 2005
Июнь

№194
səhifə
page 734-738
стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОВ BaSiO_3 АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+} и Yb^{3+}

БАРТОВ С.², БЕНАЛОУЛ П.², ТАГИЕВ О.Б.¹,
АБУШОВ С.А.¹, КАЗЫМОВА Ф.А.¹, ТАГИЕВ К.О.³

¹Институт Физика Национальной Академии Наук Азербайджана, Баку.

²Франция, Париж F-75252, Университет им.П.и М.Кюри, CNRS-UMR 7601,

³Бакинский Государственный Университет

E-mail: azepl@physics.ab.az

Представлены результаты исследования стоксовой и антистоксовой люминесценции нелегированных и легированных редкоземельными элементами Er^{3+} и Yb^{3+} соединения BaSiO_3 в интервале 78-450К и диапазоне мощностей возбуждающего излучения 10÷1000мВ.

В данной работе приводятся результаты исследования люминесцентных свойств кристаллов BaSiO_3 , $\text{BaSiO}_3:\text{Er}^{3+}$, $\text{BaSiO}_3:\text{Yb}^{3+}$, и $\text{BaSiO}_3:5\% \text{Yb}:5\% \text{Er}$. Выбор ионов Yb^{3+} и Er^{3+} обусловлен тем, что между ними возможна эффективная передача энергии, а также превращение инфракрасного излучения в видимое [1-5]. Эти результаты способствуют широкому применению данных кристаллов включая лазеры, превращающие инфракрасное излучение в видимое, цветные дисплеи, оптическую запись, био-медицинскую диагностику и оптических коммуникации. [6-8]

В работах [9-10] при изучении ряда разрезов системы $\text{BaO-SiO}_2\text{-GeO}_2$ указано на возможность существования широких областей твердых растворов между соединениями аналогично состава. В разрезах $\text{BaSiO}_3\text{-BaGeO}_3$ обнаружены непрерывные твердые растворы. Соединение BaSiO_3 кристаллизуется в двух полиморфных разновидностях с кольцевой (псевдололастонитовой, $a=7,50$, $c=10,58$) и цепочечной (пироксеноидной $a=4,54$, $b=5,56$, $c=12,27$) структурами. При твердофазовом синтезе, BaSiO_3 кристаллизуется в цепочечном полиморфном виде. Кольцевая форма BaSiO_3 впервые была синтезирована гидротермальным путем [12].

Исходные вещества для синтеза силикатов бария [11] BaCO_3 и аморфный SiO_2 , взятые в необходимых стехиометрических отношениях подвергались автоклавной обработке в течение 48 часов при температуре 350°C в атмосфере насыщенного водяного пара. По термограмме и рентгенограмме псевдолола-

стонитовой формы BaSiO_3 , снятые при нагревании от комнатной температуры до 1300°C, установлено два полиморфных превращения при 990-1040 и 1260-1300 °C, сопровождающиеся эндотермическими эффектами.

По данным высокотемпературного рентгеновского анализа первый эффект соответствует переходу псевдололастонитовой формы BaSiO_3 (α) в цепочечную (β), второй эффект, по данным термического исследования, в новую фазу (β'). На кривых охлаждения наблюдался иногда незначительный экзотермический эффект, соответствующий $\beta' \rightarrow \beta$ превращению BaSiO_3 . Результаты [11] исследования показывают, что $\alpha \rightarrow \beta$ превращение BaSiO_3 является необратимым, поскольку даже длительный отжиг в широком диапазоне температур цепочечной разновидности BaSiO_3 , не обеспечил переход β -формы в кольцевую, α -форму. Рентгенограммы высокотемпературной формы BaSiO_3 , снятые в интервале 20-1300°C демонстрирует высокую устойчивость цепочечной разновидности в широком интервале температур. В работах [13,14] приведены результаты исследований полиморфизма, структуры и кристаллооптических свойств Rb_2BeF_4 и RbBeBeF_3 как фтор-бериллатных «моделей» соответственно, BaSiO_4 и BaSiO_3 . Диаграммное состояние системы $\text{CaSiO}_3\text{-BaSiO}_3\text{-SrSiO}_3$ подробно рассматривается в работе [15].

Пространственные группы возможных полиморфов $\alpha\text{-BaSiO}_3$ состоят из тройных колец и слоев октаэдра, полученные укладкой операторов, а пересчет различ-

ных политипов так же был проведен умножением этих операторов. Четырехслойные политипы встречаются в двух различных пространственных группах и содержат только четыре типа структур, включающих антиподы. Шестислойные политипы содержат девять пространственных групп и десять типов структур, исключая антиподные и кон-груэнтные структуры, которые принадлежат пространственным группам [16]. Параметры решетки четырехслойной структуры α -BaSiO₃ следующие:

$$\alpha = 6,853, b = 11,895, c = 19,674 A, \\ \alpha = 90 - 12, \beta = 90 - 55, \gamma = 90 - 00^0$$

Они были определены методом наименьших квадратов, используя данные, полученные на четырех круговом дифрактометре.

Фазовые равновесие в системе BaO- SrO- SiO₂ изучены в работе [17]. Показано, что в системе BaO-SiO₂ существует не менее семи составов: Ba₃SiO₅, BaSiO₄, BaSiO₃, BaSiO₅, Ba₃Si₅O₁₃, Ba₅Si₈O₂₁ и Ba₃Si₅O₁₃, существует орторомбическое α -BaSiO₃ и гексагональные β -BaSiO₃ фазы кристалла α -BaSiO₃.

В работе [15] исследованы кристаллические фазы и люминесцентные свойства тройной системы SrO - BaO- SiO₂, активированной ионами Ce³⁺. Спектр возбуждения состоит из трех максимумов 190, 230 и 330нм, а спектр излучения с максимумами 392 и 475нм, связанными с ионами Ce³⁺. В этой работе показано также влияние разных зарядов компенсации на спектры возбуждения и излучения.

Анализ литературных данных показывает, что люминесцентные свойства кристалла BaSiO₃, активированного ионами Eu³⁺ и Yb³⁺, не исследованы. В частности, в работе [19] приводятся результаты исследования люминесценции ионов Eu²⁺ в кристаллах SrSiO₃ и CaSiO₃, изоструктурных с кристаллом BaSiO₃, (максимум излучения для SrSiO₃: Eu²⁺ и CaSiO₃: Eu²⁺ при 4,2К имеют длину волны 440 и 465нм соответственно). В другой работе [20] этих же авторов показано, что спектр излучения кристалла BaSiO₃: Eu²⁺ состоит из широкой полосы с максимумом 550нм. Эта полоса излучения симметрична по энергетической шкале. С повышением температуры от 4,2К до комнатной наблюдается сдвиг максимума излучения от 550 до 575нм. При этом полуширина полосы излучения также растет, но при 90К внезапно уменьшается. Когда температура продолжает повышаться, полуширина увеличивается снова. Такой ход температурной зависимости полуширины авторы связывают с фазовым переходом в кристалле BaSiO₃:Eu²⁺. В работе [21] рассмотрены люминесцентные свойства металлосиликатов MO- SiO₂:Eu²⁺ (M-Ca, Sr, Ba).

В данной работе представлены результаты исследования стоксовой и антистоксовой люминесценции нелегированных и легированных редкоземельными элементами Er³⁺ и Yb³⁺ соединений метасиликата бария (BaSiO₃) в интервале температур 78÷450К и диапазоне мощностей возбуждающего излучения 10÷1000мВ.

ОБРАЗЦЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Соединение BaSiO₃ может быть получено двумя методами: в графитовом тигле под слоем активированного угля в атмосфере воздуха и в вакуированной кварцевой ампуле.

В первом случае взятые в стехиометрических соотношениях бинарные соединения BaO и SiO₂ в виде мелкодисперсного порошка помещались в графитовый контейнер. Контейнер опускался в вертикальную однотемпературную печь. Температура синтеза составляла 1100°С, длительность процесса -4 часа. После окончания синтеза проводился отжиг при температуре 600°С в течении 24 часов, после чего печь выключалась и охлаждалась вместе с ампулой до комнатной температуры.

Во втором случае компоненты помещались в кварцевую ампулу, которая затем запаивалась и откачивалась до 10⁻⁵÷10⁻⁶мм.рт.ст., температурный режим соблюдался так же как и в первом случае.

Соединение BaSiO₃ активировалось фторидами лантаноидов: эрбия, иттербия. Близость ионных радиусов PЗЭ (0,80÷1,04) и Ba(0,99) способствует изоморфному внедрению активатора в матрицу, что обуславливает высокую яркость люминесценции и резкость линий в спектрах люминесценции. Одним из возможных путей компенсации заряда при замещении двухвалентного кальция трехвалентным ионом PЗЭ является наличие катионных вакансий или внедрении соактиватора, например, фтора.

При возбуждении 337,1нм применялся импульсный азотный лазер (Lazer Photonics LN 1000 с энергией 1,4мДж, длительность импульса 0,6нс). Для применения инфракрасного возбуждения использован лазерной диод. Спектры люминесценции снимались на спектрометре HR460, приемником излучения в видимой и ближнем инфракрасной области являлся детектор ССД, а в инфракрасной области детектор "PDA Hamamatsu".

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 представлен спектр люминесценция кристалла BaSiO₃ в интервале температур 78÷450К. С понижением температуры, начиная с 200К, на спектре выявляется 3-й максимум с $\lambda_3=600$ нм. Изменение температуры по-разному влияет на максимум излучения. Первый максимум ($\lambda_1=405$ нм) с понижением температуры до 78К смещается в длинноволновую область спектра на 50нм по сравнению с комнатной температурой. Два других максимума ($\lambda_2=510$ нм и $\lambda_3=600$ нм) не изменяют энергетическое местоположение с изменением температуры.

Введение иона Er³⁺ незначительно изменяет вид спектра люминесценции (рис.2) кристалла BaSiO₃. В области 500-550нм наблюдается узкая линия поглощения.

Как видно из рис.3а, линия излучения $\lambda_3=600$ нм, наблюдаемая в нелегированном кристалле BaSiO₃ исчезала.

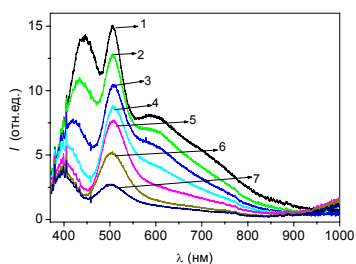


Рис.1. Спектр люминесценции ($\lambda_{\text{воз}}=337,1\text{nm}$) кристалла BaSiO_3 : 1-78, 2-150, 3-200, 4-250, 5-300, 6-400, 7-450К

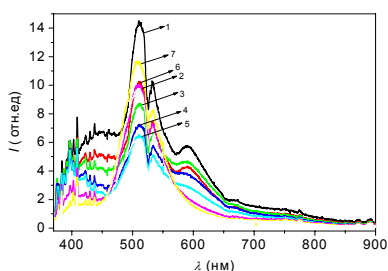


Рис.2. Спектр люминесценции ($\lambda_{\text{воз}}=337,1\text{nm}$) кристалла $\text{BaSiO}_3:5\%\text{Er}^{3+}$ 1-78, 2-100, 3-150, 4-200, 5-250, 6-300, 7-350К

На рис.3а представлен спектр люминесценции кристалла $\text{BaSiO}_3:5\%\text{Yb}^{3+}$.

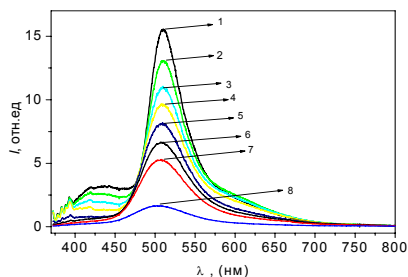


Рис.3а. Спектр люминесценции ($\lambda_{\text{воз}}=337,1\text{nm}$) кристалла $\text{BaSiO}_3:5\%\text{Yb}^{3+}$ 1-78, 2-125, 3-175, 4-225, 5-275, 6-325, 7-350, 8-450К.

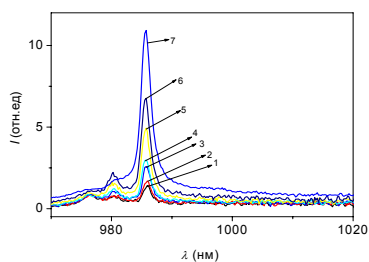


Рис.3б. Спектр люминесценции ($\lambda_{\text{воз}}=337,1\text{nm}$) кристалла $\text{BaSiO}_3:5\%\text{Yb}^{3+}$ 1-78, 2-125, 3-175, 4-225, 5-275, 6-325, 7-350К

В инфракрасной области (рис.3в) наблюдается внутрицентровое излучение ($\lambda_{\text{max}}=986\text{nm}$) иона Yb^{3+} . С ростом температуры увеличивается интенсивность излучения этой линии. (рис.4)

ПРИ $\lambda_{\text{воз}}=976\text{nm}$.

В кристаллах $\text{BaSiO}_3:5\%\text{Er}^{3+}$ и $\text{BaSiO}_3:5\%\text{Er}^{3+}:5\%\text{Yb}^{3+}$ при возбуждении инфракрасным излучением наблюдается превращение инфракрасного

излучения видимое (рис.5 и рис.6). При этом в инфракрасной области (1500-1550nm) спектра мы наблюдаем обычную люминесценцию, связанную с ионами Er^{3+} .

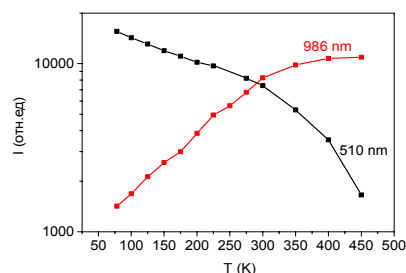


Рис.4. Температурная зависимость интенсивности излучения полосы 510nm и 986nm.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как было отмечено выше, на спектре фотолюминесценции кристалла BaSiO_3 (рис.1.) наблюдаются три максимума с длинами волн 405, 510 и 600nm. Первый максимум (405nm) с повышением температуры перемещается в длинноволновую часть спектра, что обусловлено краевой люминесценцией. Максимумы 510 и 600 nm обусловлены, соответственно, межзонными переходами и структурными дефектами кристаллической решетки.

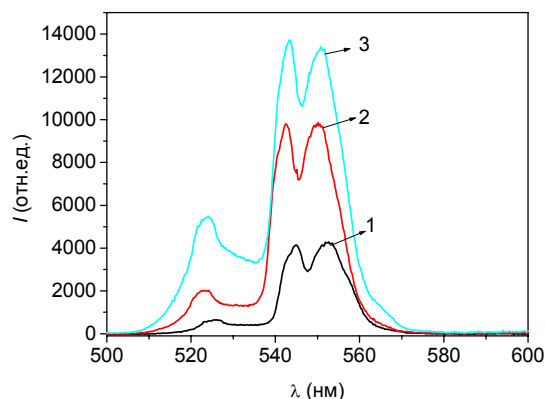


Рис.6. Спектр люминесценции ($\lambda_{\text{воз}}=976\text{nm}$) кристалла $\text{BaSiO}_3:5\%\text{Er}^{3+}$: 1-200, 2-400, 3-1000mBt.

С целью получения превращения инфракрасного излучения в видимое кристалл BaSiO_3 был активирован ионом Er^{3+} . Линия поглощения в области 500-550nm (рис.2), по-видимому, связана с поглощением иона Er^{3+} . В данном случае ни в ближней, ни в дальней инфракрасной областях не наблюдается излучение иона Er^{3+} . Как видно из рис.2, с ростом температуры интенсивность излучения ($\lambda_{\text{max}}=510\text{nm}$) уменьшается, но при 300К интенсивность увеличивается вплоть до 350К, а затем снова уменьшается. По-видимому, это связано с фазовым переходом кристалла $\text{BaSiO}_3:5\%\text{Er}^{3+}$ [20].

Введение иона Yb^{3+} (рис.3а) изменяет спектр люминесценции кристалла BaSiO_3 . Так как не происходит аномального изменения максимума излучения при 510nm и исчезает максимум при 600nm. Полоса с $\lambda_{\text{max}}=600\text{nm}$ связана со структурными дефектами

кристаллической решетки.

Ионы Yb^{3+} не способны излучать в видимой области спектра, поэтому передача энергии ионам Yb^{3+} не возможна. Можно предположить, что происходит залечивание дефекта кристаллической решетки редкоземельным ионом [24], вследствие чего исчезает полоса излучения с $\lambda_{\text{max}}=600\text{nm}$. С ростом температуры увеличивается интенсивность излучения линии с максимумом 986nm (рис.3б). Эта линия ($\lambda_{\text{max}}=986\text{nm}$) связана с переходом ${}^2F_{3/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ иона Yb^{3+} . На рис.4 приведена температурная зависимость интенсивности излучения линии 510 и 986nm. С повышением температуры интенсивность линии 510nm уменьшается, а интенсивность линии 986 увеличивается с последующим переходом к насыщению [25,26].

Превращение инфракрасного излучения в видимое (рис.5) в кристалле $\text{BaSiO}_3:5\% \text{Er}^{3+}$ может возникать при следующей последовательности переходов в возбуждении ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$ иона Er^{3+} . Исходя из схемы уровней иона Er^{3+} можно заключить, что полосы 525nm (${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$), 550nm (${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) и 1500nm (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) требуют суммирования двух элементарных возбуждений на одном ионе Er^{3+} [22,23].

Спектр люминесценции кристалла $\text{BaSiO}_3:5\% \text{Er}^{3+}:5\% \text{Yb}^{3+}$ при $\lambda_{\text{воз.}}=337,1\text{nm}$ представляет совокупность излучения матрицы и редкоземельных ионов, полоса поглощения (500-550nm) иона Er^{3+} и излучения (950-1000nm) иона Yb^{3+} .

Введение пары ионов Yb^{3+} и Er^{3+} в различные матрицы является известным методом для получения эффективного излучения в видимой области спектра, т.к. ионы Yb^{3+} и Er^{3+} имеют близко расположенные энергетические уровни. [27-29].

При возбуждении $\text{BaSiO}_3:5\% \text{Er}^{3+}:5\% \text{Yb}^{3+}$ инфракрасным лазерным излучением ($\lambda_{\text{воз.}}=976\text{nm}$) при 300К наблюдается антистоксовая люминесценция в области 500÷550nm (рис.6).

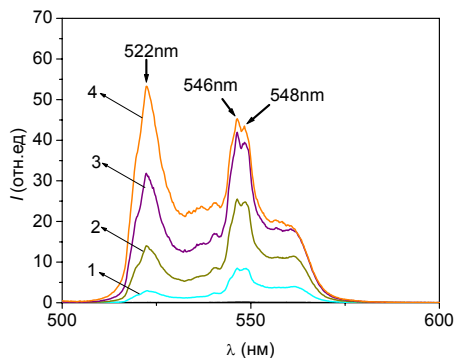


Рис.6. Спектр люминесценции ($\lambda_{\text{воз.}}=976\text{nm}$) кристалла $\text{BaSiO}_3:5\% \text{Er}^{3+}:5\% \text{Yb}^{3+}$: 1-200, 2-400, 3-600, 4-1000mBt.

Как видно, спектр антистоксовой люминесценции состоит из ярко выраженного пика ($\lambda_{\text{max.}}=522\text{nm}$) и нескольких едва заметных пиков и дублета ($\lambda_{\text{max.}}=546$ и 548nm). Схема, иллюстрирующая всю

совокупность процессов от возбуждения до люминесценции, представлена на рис.7 [30]. Здесь уровень ${}^2F_{7/2}$ представляет собой основное состояние иона Yb^{3+} , а уровень ${}^2F_{5/2}$ -возбужденное. Уровень ${}^2F_{5/2}$ отстоит от уровня ${}^2F_{7/2}$ на 10000cm^{-1} , т.е. поглощение кванта инфракрасного света с длиной волн 976nm переводит ион Yb^{3+} с уровня ${}^2F_{7/2}$ на уровень ${}^2F_{5/2}$.

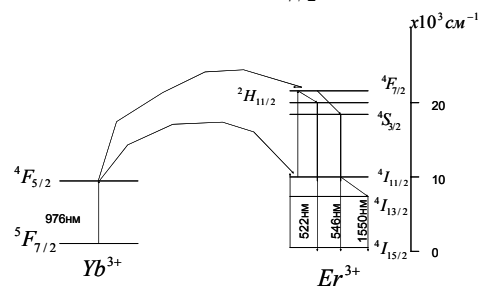
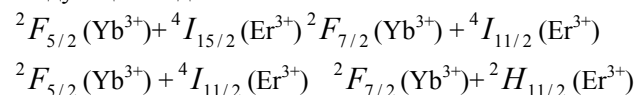


Рис.7. Энергетический спектр передачи энергии

Уровень ${}^4I_{15/2}$ обозначает Er^{3+} в основном энергетическом состоянии, при этом ион Er^{3+} в отличие от иона Yb^{3+} имеет несколько уровней возбужденного состояния: ${}^4I_{11/2}$, ${}^4S_{3/2}$, ${}^2H_{11/2}$, ${}^4F_{7/2}$ и т.д.

Миграция энергии возбуждения по кристаллу люминофора может привести к переносу энергии возбуждения с уровня ${}^2F_{5/2}$ иона Yb^{3+} на близкий энергетический уровень ${}^4I_{11/2}$ возбужденного состояния иона Er^{3+} . Если после этого ион Er^{3+} перешел с уровня ${}^4I_{11/2}$ возбужденного состояния на уровень ${}^4I_{15/2}$ с излучением кванта света, то имела бы место обычная сенсibilизированная люминесценция. Однако при наличии пары $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ возможен другой перенос энергии от Yb^{3+} к Er^{3+} , в результате которого Er^{3+} с уровня ${}^4I_{11/2}$ переходит на уровень ${}^4F_{7/2}$. После термической релаксации на уровень ${}^2H_{11/2}$ и ${}^4S_{3/2}$ происходят излучательные переходы ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (522nm) и ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (546, 548nm). Инфракрасное излучение (1500nm) соответствует переходу ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. Таким образом, передачу энергии между ионами Yb^{3+} и Er^{3+} можно написать в следующем виде:



Механизмом наблюдаемого преобразования квантов является последовательный перенос энергии возбуждения от сенсibilизатора к излучающему активатору, т.е. последовательная сенсibilизация. Зависимость интенсивности излучения ($\lambda_{\text{воз.}}=976\text{nm}$) при 300К в диапазонах 500-541nm (крив.2), 542-600nm (крив.3) и 1400-1600nm (крив.1) от мощности возбуждающего излучения представлена на рис.8.

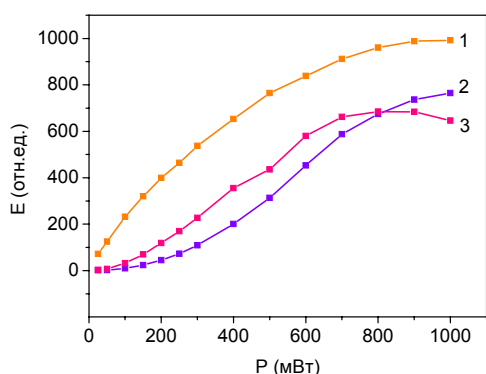


Рис.8. Зависимость интенсивности излучения от мощности возбуждающего излучения 1-14000-1600; 2-500-541; 3-542-600

Видно, что интенсивность излучения с ростом мощности возбуждающего излучения сначала растет, а затем переходит к насыщению. Этот эффект может быть связан с поглощением энергии накачки свобод-

ными носителями, с ростом отражения накачки при увеличении числа свободных носителей, а также насыщением промежуточных агентов, через которые идет передача энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что фотолюминесценция в чистых образцах соединения BaSiO_3 связана с межзонными переходами и дефектами кристаллической решетки. Легирование BaSiO_3 ионами Er^{3+} и Yb^{3+} позволяет наблюдать внутрицентровую люминесценцию редкоземельных ионов, а также антистоксовую люминесценцию. Механизм антистоксовой люминесценции является последовательная сенсбилизация с двумя переносами энергии т.е. ионы Yb^{3+} в соединении BaSiO_3 являются сенсбилизаторами люминесценции, а Er^{3+} активаторами.

- [1]. I.Z.Meng, K.Nagamatsu, M.Higashihati, Y.Nakata, T.Okada, Y.Kubota, Y. Nishimura, T.Teshima, S.Buddhu. *J. of Luminescence* 106(2004)187-194.
- [2]. A.S.Oliveira, M.T.de Araujo, A.S.Gouveia-Neto, J.A.Medeiros Neto, A.S.B.Sombra, Y.Messaddeq. *Applide Physics letters*. 72(1998) 7, 753-755.
- [3]. C.Strohhofer, A.Polman. *J. of Applied Physics* 90(2001) 9, 4314-4320.
- [4]. Bor-Chyuan Hwang, S.Jiang, T.Luo, J.Watson, G.Sorbello, N.Peyghambarian. *J. Opt. Soc. Am. B* 17(2000) 5, 833-839.
- [5]. B.Simondi-Teisseire, B.Viana, D.Vivien, A.M.Lejus. *Opt. Mater.* 6(1996), 267-274.
- [6]. S.Xu, Z.Yang, J.Zhang, G.Niang, S.Dai, L.Hu, Z.Jiang. *Chem.Phys.Lett.* 385 (2004)263
- [7]. A.S.Oliveira, M.T.De Araujo, A.S.Gouveia-Neto, A.S.B.Sombra, J.A.Medeiros Neto, N.Aranha. *J. Appl.Phys.* 83(1998) 604
- [8]. S.Xu, Z.Yang, S.Dai, G.Wang, L.Hu, Z.Jiang *Mater. Lett*, 58(2004), 1026.
- [9]. Р.Г.Гребенщиков, Н.А.Торопов, В.И.Шитова *Докл.АН СССР*, 153(1963) 842-844.
- [10]. Р.Г.Гребенщиков, Н.А.Торопов, В.И.Шитова *Неорган.материалы* 1(1965), 1130-1142
- [11]. Р.Г.Гребенщиков, Н.А.Торопов, В.И.Шитова *Неорган.материалы* 3(1967), 1620-1626.
- [12]. H.Funk, *Z.anorgan. und allgem. Chem.*296(1958), 46
- [13]. Н.А.Торопов, Р.Г.Гребенщиков *Журн.неорг.хим.*1,7,(1956), 1619
- [14]. Н.А.Торопов, Р.Г.Гребенщиков *Журн.неорг.хим.*1,12,(1956), 2686
- [15]. R.C.DeVries *J.Am.Ceram.Soc.*71(1988), 10, c416-c417
- [16]. T.Yamanaka, H.Mori. *Acta Cryst.* B37.,(1981), 1010-1017.
- [17]. J.M.Fields, P.S.Dear, J.J.Brown. *J. of The American Ceramic Society.* 55, (1972), 12, 585-588.
- [18]. P.Victor Kelscy, J.J.Brown. *J.Electrochem.Soc.: Solid-State Science and Technolgy.* 123(1976), 9, 1384-1388
- [19]. S.H.M.Poort, G.Blasse. *J. of Luminescence* 72-74 (1997), 247-249
- [20]. S.H.M.Poort, H/M/Reijnhoudt, H.O.T.Van der Kuip, G.Blasse. *J. of alloys and compounds* 241 (1996), 75-81
- [21]. G.Blasse, W.L.Wanmaker, J.W.ter Vrugt, A.Brill *Philips Res. Repts* 23, (1968), p. 189-200
- [22]. G.N.Hoven, E.Snoeks, A.Polman, C.Dam, J.W.M.Uffelen, K.Smit. *J. Appl. Phys.* 79(3), (1996), p.1258-1266
- [23]. K.Kojima, S.Voshida, H.Shiraishi, A.Maegawa. *Appl.Phys.Lett.* 67(23), (1995), p.3423-3425
- [24]. Ю.П.Гнатенко, З.Д.Ковалюк, П.А.Скубенко. *УФЖ.*, 27 (1982), 6, с.838-842
- [25]. Ю.П.Чукова. *Труды ФИАН*, 50 (1970), с.94-106.
- [26]. А.Н.Георгбиани, В.И.Демин, Е.С.Логодинская. *Труды ФИАН*, 182 (1987), с.69-123.
- [27]. H.Sun, S.Dai, S.Xu, J.Zhong, L.Hu, Z.Jianq. *Physica B.*352, 92004), p.366-371.
- [28]. L.F.Johnson, H.J.Guggenheim, T.C.Rich, F.W.Ostermayer. *J.Appl.Phys.* 43, (1972), 3, p.1125-1137
- [29]. A.S.Oliveira, M.T.de Araujo, A.S.Gouveia-Neto, A.S.B.Sombra, J.A.Medeiros Neto, N.Aranha. *J. Appl. Phys.* 83(1), 1998, p.604-606
- [30]. B.S.Teisseire, B.Viana, D.Vivien, A.M.Lejus. *Optical Materials.* 6n(1996), p.267-274.