

Акустооптический эффект в спектре возбуждения люминесценции кристалла HgI_2

© Б.К. Кардашев, В.А. Степанов*, П.А. Степанов*, В.М. Чернов*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Физико-энергетический институт,
249020 Обнинск, Калужская обл., Россия

E-mail: B.Kardashev@pop.ioffe.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 30 марта 1999 г.)

Приводятся данные об изучении спектра возбуждения фотолюминесценции в кристалле дийодида ртути. Обнаружено, что каждая из двух исследованных полос люминесценции с максимумами 543 и 572–575 nm обладает своим собственным спектром возбуждения. Спектр возбуждения линии 575 nm в длинноволновой дублетной полосе оказался чувствительным к воздействию интенсивных ультразвуковых колебаний и к предварительному облучению образца светом с длиной волны 590 nm. Эта линия связана с излучательной рекомбинацией фотоносителей на собственных точечных дефектах (вакансиях или междоузлиях иода или ртути), расположенных вблизи дислокаций. По изменению спектра возбуждения произведена оценка энергии связи фоточувствительного центра с дислокацией.

Широкое использование кристалла HgI_2 в качестве чувствительного элемента детекторов ионизирующего (рентгеновского и гамма-) излучения, способных работать при комнатной температуре, в значительной мере ограничивается наличием дефектов различной природы. Как показывает анализ литературных данных (см. обзоры [1,2]), дефекты в структуре дийодида ртути изучены еще в недостаточной степени. В особенности это касается дислокаций и их роли в формировании ловушек для свободных носителей тока. Существуют экспериментальные доказательства, например [3,4], о наличии взаимодействия фотоиндуцированных носителей (электронов и дырок) с движущимися дислокациями. Обнаруженный недавно фотоакустический эффект в HgI_2 [5,6] свидетельствует о том, что состаренные дислокации также могут служить ловушками для фотоносителей. Разработка модели фотоакустического эффекта позволила предсказать и затем обнаружить экспериментально акустооптический эффект в спектре люминесценции кристалла HgI_2 [7].

Оказалось, что полоса фотолюминесценции, расположенная в области длин волн $\lambda = 565\text{--}585\text{ nm}$, при комнатной температуре состоит из двух ярко выраженных линий 572 и 575 nm (рис. 1). Длинноволновая часть полосы проявляет наиболее высокую (по сравнению с коротковолновой) чувствительность к воздействию интенсивного ультразвука. Помимо ультразвука эта же линия (575 nm) оказалась весьма чувствительной и к предварительному облучению кристалла оранжевым светом с длиной волны около 590 nm, при которой наблюдаются максимум фотопроводимости [1,8] и максимальный фотоакустический эффект [5,6,9]. В [7] было сделано предположение о том, что линия 575 nm обязана своим существованием излучательной рекомбинации фотозлектрон–дырка на собственных точечных дефектах решетки HgI_2 , локализованных вблизи дислокаций.

Акустооптический эффект был не очень большим: интенсивность линии 575 nm после воздействия ультразвука с большой амплитудой уменьшалась примерно на 20–25%, а линии 572 nm — всего на 10–13%; интенсивность коротковолновой полосы с максимумом около 543 nm после ультразвуковой обработки образца не менялась.

В [7] было замечено, что каждая полоса фотолюминесценции HgI_2 обладает своим собственным спектром возбуждения, который может меняться в зависимости от внешних условий и предыстории образца. Результаты экспериментального исследования спектров возбуждения составляют основное содержание данной статьи. Основная задача работы состояла в подробном изучении поведения спектра возбуждения линии 575 nm, которая, как отмечалось в [7], присутствует в спектре благодаря наличию дислокаций в кристалле.

Данная работа продолжает исследования, начатые в [7], и связана с экспериментальным изучением влияния интенсивного ультразвука на спектр фотолюминесценции, и, по существу, посвящена дальнейшей разработке акусто-оптической методики изучения дефектной структуры кристалла HgI_2 .

1. Методика

Как и в [5–7,9], в данной работе исследования проводились на кристалле дийодида ртути, выращенном из газовой фазы методом статической сублимации. Размер образцов был около $(10 \times 4 \times 1)\text{ mm}^3$. Широкая грань пластинки совпадала с кристаллографической плоскостью (001).

Образец приклеивался на одну из граней акустического преобразователя в средней части кварцевого стержня (длиной 27 mm), где при возбуждении стоячей ультразвуковой волны имеют место максимальные

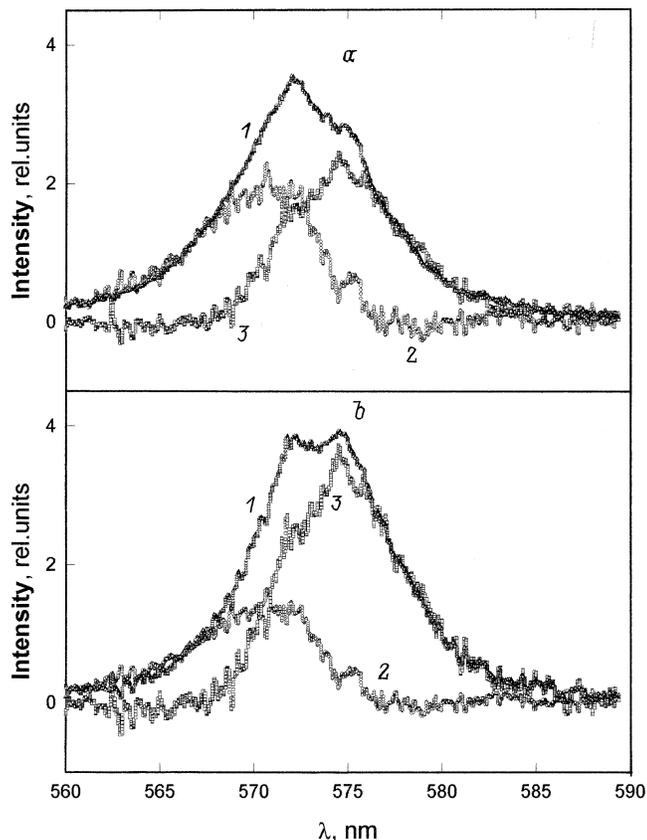


Рис. 1. Дублетная полоса фотолюминесценции кристалла HgI_2 (1) и ее разделение на коротковолновую (2) и длинноволновую (3) составляющие. *a* — спектр, измеренный до облучения, *b* — спектр, измеренный после облучения образца светом с длиной волны 590 nm.

колебательные механические напряжения. Резонансные ультразвуковые продольные колебания акустической системы "образец-кварц" осуществлялись на частоте около 100 kHz. Амплитуда деформации могла меняться в широких пределах от 10^{-7} до 10^{-4} , что позволяло изучать поведение оптических характеристик под действием интенсивного ультразвука, когда внутреннее трение (затухание ультразвука) становилось уже амплитудно-зависимым. Во время оптических измерений (время измерения спектра составляло около 10 min) амплитуда колебаний поддерживалась постоянной автоматически, как это делалось в [7]. Все измерения проводились на воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Спектры возбуждения в данной работе получали с помощью ртутной лампы высокого давления ДРШ-250-2. Длина волны света, падающего от лампы на грань (001) образца, изменялась с помощью монохроматора МДР-4. Интенсивность люминесценции на выбранных длинах волн, например соответствующих максимумам 543, 572 или 575 nm, или немного отличающихся от них, измерялась с помощью спектрометра МДР-23.

На рис. 1 представлена дублетная полоса из спектра фотолюминесценции кристалла HgI_2 , полученная в работе [7], и ее разделение на две составляющие: коротковолновую — с максимумом 572 nm и длинноволновую — с максимумом при 575 nm по методу М.Н. Аленцева [10]. При выполнении этой процедуры было использовано то обстоятельство, что под действием интенсивного ультразвука или предварительного освещения соотношение интенсивностей той и другой линии менялось [7], о чем упоминалось выше. Из рис. 1 следует, что по спектру возбуждения люминесценции на длине волны 577 nm можно получать сведения о свойствах только длинноволновой составляющей этой полосы, поскольку вклад в измеряемую интенсивность от коротковолнового пика 572 nm на этой длине волны пренебрежимо мал.

2. Результаты измерений

В этом разделе представлены данные по изучению спектра возбуждения фотолюминесценции в кристалле HgI_2 для длин волн 543, 572, 575 и 577 nm, которые были получены на одном из исследованных образцов.

На рис. 2 показаны спектры возбуждения люминесценции на длинах волн 543, 572 и 575 nm. Из рисунка видно, что спектр на 543 nm существенно отличается от спектров для двух других длин волн. Оказалось (рис. 2),

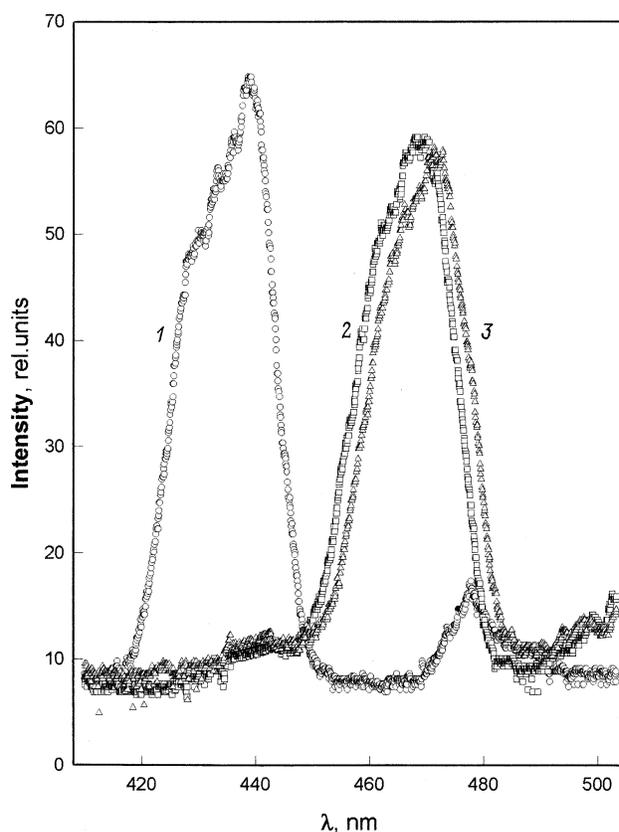


Рис. 2. Спектры возбуждения люминесценции кристалла HgI_2 на длинах волн 543 (1), 572 (2) и 575 (3) nm.

что невозможно наблюдать достаточно яркое свечение на длинах волн 572–575 nm, когда длина волны падающего света короче 450 nm или длиннее 490 nm. Как видно из рисунка, спектры для длин волн 572 и 575 nm оказались похожими, однако сдвинутыми друг относительно друга примерно на 3 nm.

Спектры возбуждения на длине волны 577 nm, которая в соответствии с рис. 1 связана с люминесценцией только длинноволнового пика в дублетной полосе, могли заметно отличаться друг от друга для различных областей одного и того же кристалла (размер пятна падающего на образец излучения был около 1 mm^2). Это наглядно демонстрируется на рис. 3. По всей видимости, неоднородное распределение дефектов существенным образом сказывается на интенсивности свечения на 577 nm при возбуждении светом с различной длиной волны.

Наиболее интересные результаты о поведении люминесценции на длине волны 577 nm представлены на рис. 4. Спектр (1) на этом рисунке получен после предварительного облучения образца светом с длиной волны 590 nm. В этом спектре ярко выделяются два максимума при 454 и 493 nm. После воздействия на образец интенсивной ультразвуковой нагрузки в течение 18 min был измерен спектр возбуждения. Как видно из рисунка, в результате ультразвукового воздействия

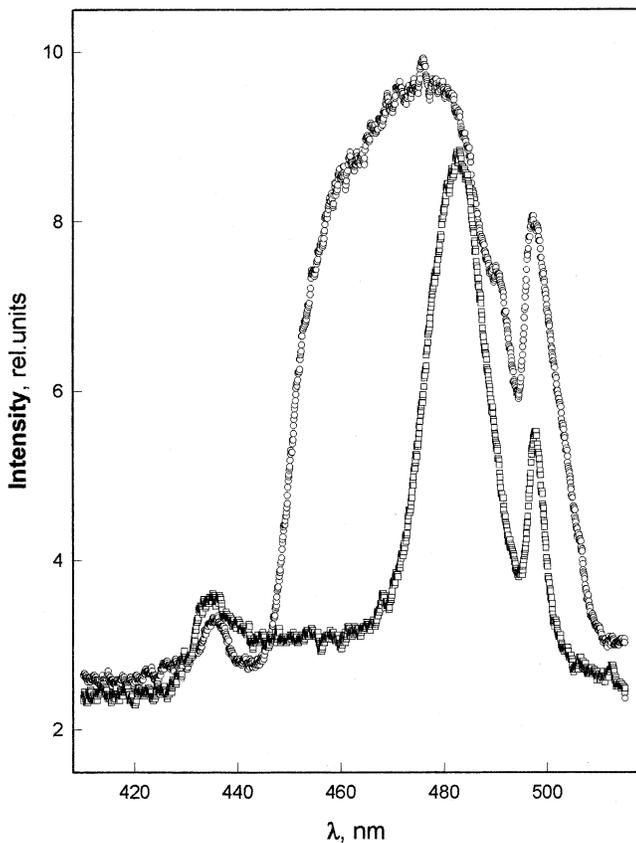


Рис. 3. Спектры возбуждения люминесценции кристалла HgI_2 на длине волны 577 nm в различных областях кристалла.

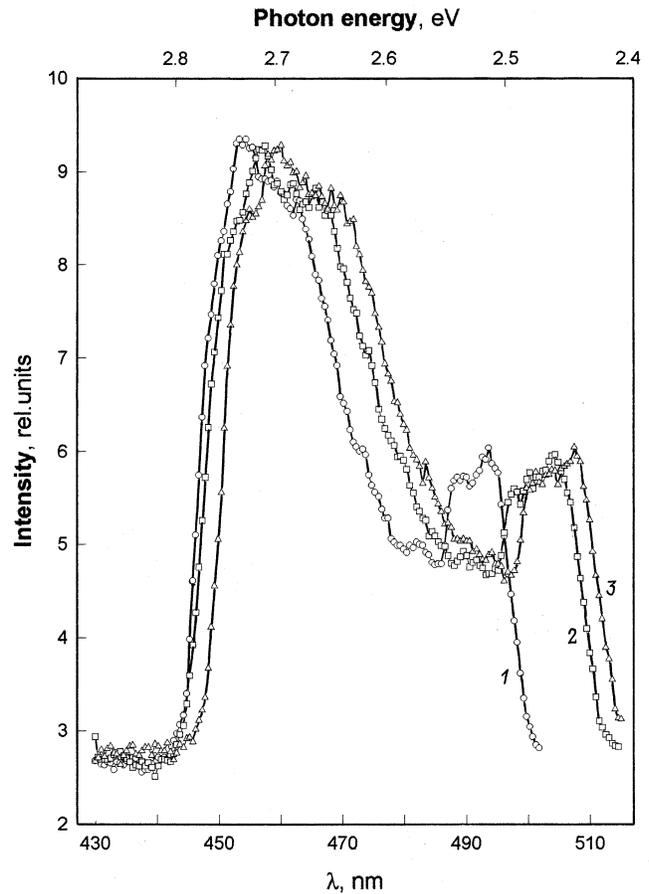


Рис. 4. Спектры возбуждения фотолюминесценции HgI_2 на длине волны 577 nm: 1 — после облучения образца оранжевым светом с длиной волны 590 nm; 2, 3 — после акустического воздействия на образец с амплитудой $1.0 \cdot 10^{-5}$ в течение 18 и 31 min соответственно.

произошли существенные изменения в длинноволновой части спектра, что нетрудно заметить при сравнении спектров (1) и (2). Максимум, наблюдавшийся при 493 nm, сместился в область длинных волн примерно на 12 nm. При этом смещение коротковолновой части спектра было не более 3 nm. Дальнейшие изменения под влиянием акустического воздействия — это небольшое смещение спектра (3) в сторону длинных волн.

3. Обсуждение

Спектры возбуждения фотолюминесценции наряду со спектрами самой люминесценции могут давать информацию о свойствах центров свечения. Существенное различие в спектрах возбуждения полос на 543 nm, с одной стороны, и на 572 и 575 nm — с другой, представленное на рис. 2, свидетельствует о различной природе центров люминесценции этих полос. В то же время небольшая разница в спектрах для длин волн 572 и 575 nm указывает на то, что основные свойства центров, обеспечивающих

люминесценцию на этих длинах волн, должны лишь немногим отличаться друг от друга. Подробный анализ и сопоставление с литературными данными, проведенные в [7], показали, что полоса 543 nm при комнатной температуре соответствует низкотемпературным полосам, наблюдаемым в области 530 nm (4.2 К) или 535 nm (77 К), и является следствием излучательной рекомбинации экситона. Полоса на 572–575 nm (560 nm при 4.2 К и 563 nm при 77 К) связана с излучением на собственных дефектах решетки, т.е. либо на вакансиях, либо междоузлиях иода или ртути [2,11]. Более высокая чувствительность линии 575 nm в дублетной полосе к воздействию ультразвука и света была связана (при сопоставлении акусто- и фото-оптического эффектов с фотоакустическим [7]) с теми же стехиометрическими точечными дефектами, но локализованными вблизи дислокаций. Данные настоящей работы по изучению влияния интенсивности ультразвука на спектр возбуждения люминесценции (рис. 4) подтверждают этот вывод и делают его более наглядным. При этом оказалось, что можно выявить еще и дополнительные сведения о свойствах центров люминесценции.

Из рис. 4 видно, что изменение интенсивности люминесценции под влиянием ультразвука и предварительного освещения в полосе 572–575 nm происходит благодаря деформации спектра возбуждения вдоль оси длин волн практически без изменения его интенсивности. Это свидетельствует о том, что внешние воздействия вызывают деформацию энергетического спектра кристалла, причем тех уровней, которые обеспечивают безызлучательный переход электрона на другой, более низкий энергетический уровень, соответствующий излучательной рекомбинации фотоэлектрон–дырка.

Интересно отметить, что знак акусто-оптического и фото-оптического эффектов, обнаруженных в [7], в соответствии с данными рис. 4 может меняться в зависимости от длины волны возбуждающего люминесценцию света от положительного (рост интенсивности свечения) до отрицательного, вплоть до полного исчезновения люминесценции на выбранной длине волны.

Если принять во внимание, что свет (590 nm) создает (или упрочняет уже имевшиеся) стопоры для дислокаций, а интенсивный ультразвук их разрушает, то изменение положения характерных точек спектров возбуждения, представленных на рис. 4, соответствует энергии связи дислокации с центром закрепления или ее увеличению. Свойства этого центра, по данным [5–7,9], меняются при захвате фотоносителей. Уровень энергии связи дислокации с фоточувствительным центром составляет величину от 0.03 eV (сдвиг коротковолновой части спектра возбуждения) до 0.1 eV (смещение длинноволновой части спектра).

Таким образом, в данной работе предлагается новый подход к изучению дислокаций в кристалле HgI_2 . Представленная здесь акустооптическая методика позволяет не только качественно следить за эволюцией дефектной

структуры, но и производить количественную оценку изменений в энергетическом спектре подсистемы дефектов кристалла под влиянием внешних воздействий.

Авторы выражают признательность В.М. Залетину за предоставленные для исследований кристаллы.

Список литературы

- [1] X.J. Bao, T.E. Schlesinger, R.B. James. *Semiconductors and Semimetals* **43**, 111 (1995).
- [2] X.J. Bao, T.E. Schlesinger, R.B. James. *Semiconductors and Semimetals* **43**, 168 (1995).
- [3] J. Marschall, F. Milstein. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **261**, 131 (1992).
- [4] J. Marschall, F. Milstein. *Appl. Phys. Lett.* **62**, 22, 2784 (1993).
- [5] Б.К. Кардашев, С.Н. Голяндин, С.Б. Кустов, В.М. Залетин. *ФТТ* **34**, 7, 2148 (1992).
- [6] В.К. Kardashev. *J. All. Comp.* **211/212**, 160 (1994).
- [7] Б.К. Кардашев, А.В. Резвушкин, П.А. Степанов, В.А. Степанов, В.М. Чернов, В.М. Залетин. *ФТТ* **38**, 5, 1511 (1996).
- [8] P. Suryanarayana, H.N. Acharya. *J. Electronic Mat.* **18**, 4, 481 (1989).
- [9] В.К. Kardashev. *J. de Phys. IV* **4**, C8-871 (1996).
- [10] М.В. Фок. *Труды ФИАН* **59**, 3 (1972).
- [11] Н.Н. Овсюк. *ФТТ* **33**, 11, 3436 (1991).