

ПРИКЛАДНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

JOURNAL
OF APPLIED
SPECTROSCOPY

<http://imaph.bas-net.by/JAS>

3

МАЙ — ИЮНЬ

2012

ТОМ 79

Ж

У

Р

Н

А

Л

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ДИСУЛЬФИДА ТАЛЛИЯ И ИНДИЯ $TlInS_2$

А. В. Короткий ^{а*}, А. У. Шелег ^а, В. В. Шевцова ^а, А. В. Мудрый ^а,
С. Н. Мустафаева ^б, Э. М. Керимова ^б

УДК 535.34:548

^а Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
220072, Минск, ул. П. Бровки, 19; e-mail: anatoli-karotki@physics.by

^б Институт физики НАН Азербайджана, Баку

(Поступила 31 октября 2011)

В области края фундаментального поглощения при 4.2 К измерены спектры пропускания, фотолюминесценции и отражения монокристаллов $TlInS_2$, выращенных методом Бриджмена—Стокбаргера. В спектрах пропускания наблюдались узкие линии ~ 2.5535 и ~ 2.5694 эВ, которые отнесены к основному и возбужденному состояниям свободных экситонов. Определены энергия связи свободных экситонов ~ 21.2 мэВ и ширина запрещенной зоны $E_g \sim 2.5747$ эВ. Предложен механизм рекомбинации для близкравой и глубокой люминесценции $TlInS_2$.

Ключевые слова: дисульфид таллия и индия, фотолюминесценция, пропускание и отражение света, свободные экситоны, механизм рекомбинации.

Transmission, photoluminescence, and reflection spectra of $TlInS_2$ single crystals grown by Bridgman-Stockbarger method have been measured near the fundamental absorption edge at 4.2 K. The narrow lines at 2.5535 eV and 2.5694 eV observed in the transmission spectrum were assigned to ground and excited free exciton states respectively. The free exciton binding energy and band gap energy were found to be correspondingly ~ 21.2 meV and ~ 2.5747 eV. A recombination mechanism has been offered for the $TlInS_2$ near-band-edge and deep emission.

Keywords: $TlInS_2$, photoluminescence, transmission and reflection of light, free excitons, recombination mechanism.

Введение. Трехкомпонентное соединение $TlInS_2$ относится к группе полупроводников типа $A^3B^3C_2^6$, кристаллизующихся в пяти возможных конфигурациях элементарной ячейки: тетрагональной, гексагональной, ромбической, моноклинной и триклинной [1—4]. Известно, что дисульфид таллия и индия ($TlInS_2$) в обычных условиях при комнатной температуре представляет собой слоистый кристалл с моноклинной сингонией и пространственной группой симметрии $C2/c-C_{2h}^6$ [5]. Полупроводниковые соединения $TlInS_2$, $TlInSe_2$, $TlInTe_2$, $TlGaS_2$, $TlGaSe_2$, $TlGaTe_2$ имеют необычные структурные, оптические, фотоэлектрические, сегнетоэлектрические и другие свойства и могут представлять определенный интерес для полупроводниковой опто- и микроэлектроники [6—8]. Оптические свойства $TlInS_2$ в области края фундаментального поглощения изучались с использованием различных методов — пропускания, люминесценции, отражения, фотопроводимости и др. [9—17]. На основании этих исследований установлен прямозонный характер энергетической структуры, определены энергия связи экситонов, ширина запрещенной зоны и другие оптические характеристики материала. Однако экспериментальные данные по оптической спектроскопии полупроводникового соединения $TlInS_2$ в большинстве случаев противоречивы, что предполагает необходимость проведения дальнейших исследований по уточнению известных и определению неизвестных фундаментальных оптических параметров. В частности, значение такого важного параметра, определяющего ширину запрещенной зоны, как энергия связи экситонов, варьируется в широких пределах: от 12.3 мэВ [12] до 33 мэВ [18], что не позволяет точно определять значение ширины запрещенной зоны

OPTICAL PROPERTIES OF THALLIUM AND INDIUM DISULFIDE ($TlInS_2$) SINGLE CRYSTALS

A. V. Karotki ^{а*}, A. U. Sheleg ^а, V. V. Shevtsova ^а, A. V. Mudryi ^а, S. N. Mustafaeva ^б, and E. M. Kerimova ^б
(^а Scientific-Practical Material Research Centre, National Academy of Sciences of Belarus, 19 P. Brovki Str., Minsk, 220072, Belarus; e-mail: anatoli-karotki@physics.by; ^б Institute of Physics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku)

E_g TlInS_2 и с единых позиций анализировать оптические свойства дихалькогенидных полупроводниковых соединений. Кроме того, требуется уточнение характера строения зонной энергетической структуры TlInS_2 в области прямых разрешенных переходов.

В настоящей работе с использованием методов пропускания и отражения света, фотолюминесценции (ФЛ) и регистрации спектров возбуждения люминесценции получены новые данные по оптическим характеристикам полупроводникового соединения TlInS_2 , которые могут быть полезны для контроля технологии оптическими методами при получении в максимальной степени структурно-совершенных монокристаллов.

Эксперимент. Слоистые монокристаллы TlInS_2 выращивались методом Бриджмена—Стокбаргера [15]. Измерение пропускания проводилось на тонких (~ 2 — 40 мкм) плоскопараллельных пластинках, полученных расщеплением более массивных образцов по плоскостям спайности. Следует отметить, что коэффициент поглощения в области края фундаментального поглощения соединения TlInS_2 составляет $\alpha \sim 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ [12] и $\alpha \sim 1 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ [18]. Сколотые тонкие пластинки размером $\sim 5 \times 5$ мм имели желтый цвет, зеркально-гладкую поверхность, которая совпадала с кристаллографической плоскостью (001). При измерении ФЛ возбуждение неравновесных носителей заряда в кристаллах осуществлялось излучением He—Cd-лазера ($\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм, мощность до 10 мВт). В ряде случаев ФЛ измерялась при возбуждении светом ксеноновой лампы ДКСЭЛ-1000 (1000 Вт) или вольфрамовой лампы (~ 400 Вт), разложенным монохроматором МДР-12 с фокусным расстоянием зеркального объектива $f \sim 30$ см, оснащенный дифракционной решеткой 1200 штр/мм (линейная дисперсия $\sim 13 \text{ \AA/мм}$) в области 250—420 нм. Этот монохроматор использовали для записи спектров возбуждения люминесценции. Для регистрации спектров оптического пропускания и люминесценции применялся монохроматор МДР-23У с фокусным расстоянием зеркального объектива $f \sim 60$ см и дифракционной решеткой 600 штр/мм (линейная дисперсия $\sim 26 \text{ \AA/мм}$). Детекторами оптических сигналов служили фотоэлектронные умножители R7400U-20 и R9110 (Hamamatsu, Япония). Сигналы с детекторов обрабатывались узкополосным низкочастотным усилителем и преобразовывались на основе метода синхронного детектирования в постоянные сигналы с последующим аналогово-цифровым преобразованием и записью спектров на компьютере. Спектры оптического пропускания и отражения также регистрировались на двухлучевом спектрофотометре Cary-500 UV-VIS-NIP (Varian, США) в диапазоне 200—3000 нм. Спектры ФЛ при низких температурах регистрировались при непосредственном погружении исследуемых образцов TlInS_2 в охлаждающую жидкость — азот (78 К) или гелий (4.2 К). Дополнительные особенности методики эксперимента изложены в [19, 20].

Обсуждение результатов. На рис. 1, а представлены спектры пропускания образца полупроводникового соединения TlInS_2 при разных температурах (~ 4.2 , 78 и 300 К) со спектральным разрешением ~ 0.2 мэВ. Как видно, соединение TlInS_2 обладает довольно высоким значением оптического пропускания, увеличивающимся с 53 до 60 % при уменьшении температуры измерений от 300 до 4.2 К. Обращает на себя внимание наличие в спектрах относительно узких линий с полушириной ~ 6 мэВ и максимумами $A_{n=1} \sim 2.5535$ эВ и $A_{n=2} \sim 2.5694$ эВ при 4.2 К, которые можно отнести к поглощению на свободных экситонах — основном $n = 1$ и первом возбужденном $n = 2$. С увеличением температуры эксперимента линии уширяются и смещаются в область низких энергий. При температуре жидкого азота ~ 78 К в спектрах присутствует бесструктурная линия $A_{n=1} \sim 2.54$ эВ с затянутым высокоэнергетическим крылом, которая уширяется и смещается в область энергий до ~ 2.44 эВ при 300 К. Исходя из энергетического положения линий основного и первого возбужденного состояний в водородоподобном приближении теории эффективной массы, можно определить энергию связи свободных экситонов в TlInS_2 с использованием соотношения [21]:

$$E_{\text{св}} = \frac{4}{3} (E_{A_{n=2}} - E_{A_{n=1}}) \approx 21.2 \text{ мэВ}. \quad (1)$$

В то же время энергия связи свободных экситонов может быть теоретически оценена на основании следующего выражения [21]:

$$E_{\text{св}} \text{сЭ} = \frac{\mu e^4}{2\hbar^2 \varepsilon^2 n^2} = 13.6 \frac{\mu}{\varepsilon^2}, \quad (2)$$

где n — квантовое число ($n \geq 1$), определяющее различные экситонные состояния; ε — диэлектрическая проницаемость; e — заряд электрона; \hbar — постоянная Планка. Приведенная эффективная масса экситона μ определяется соотношением [21]:

$$\mu = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}, \quad (3)$$

где m_e и m_h — эффективные массы электрона и дырки. Принимая во внимание известные значения эффективной массы экситонов $\mu \sim 0.15$ [9], а также низкочастотной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 10$ [22],

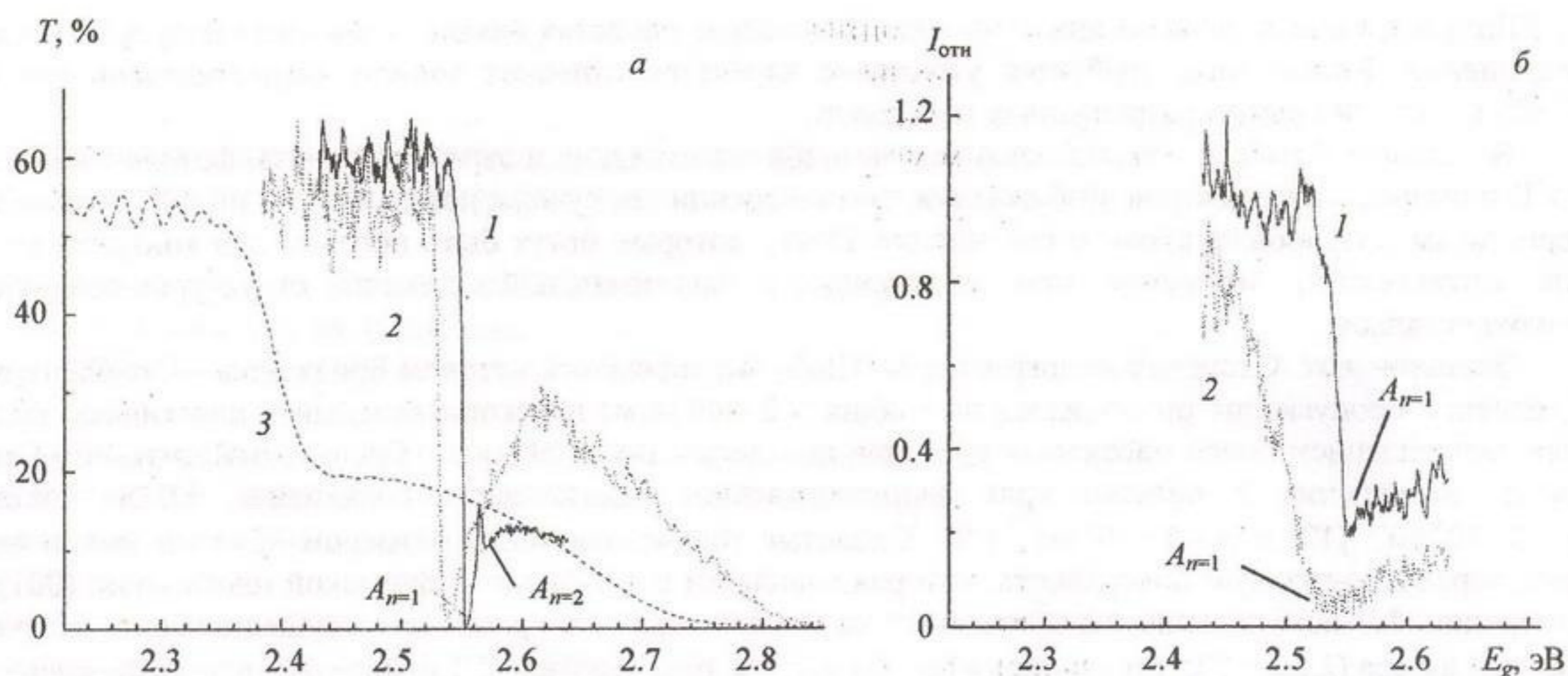


Рис. 1. Спектры пропускания (а) и отражения (б) монокристаллов TlInS_2 (образец А9), снятые при температурах 4.2 (1), 78 (2) и 300 К (3)

находим по (2) энергию связи свободных экситонов $E_{\text{св}} \sim 20.4$ мэВ, что хорошо согласуется со значением, определенным экспериментально в настоящей работе. С учетом экспериментального значения энергии связи экситона ~ 21.2 мэВ и в предположении, что эта энергия не зависит от температуры, ширина запрещенной зоны E_g соединения TlInS_2 будет составлять 2.5747, 2.561 и 2.461 эВ при 4.2, 78 и 300 К соответственно.

На рис. 1, б показаны спектры отражения монокристалла TlInS_2 , снятые в области края собственного поглощения при 4.2 и 78 К со спектральным разрешением 0.5 и 1 мэВ. Как видно, спектры отражения содержат резонансы в области 2.553 и 2.540 эВ при 4.2 и 78 К, которые могут быть отнесены к экситонному отражению основного состояния ($n = 1$) свободных экситонов. Экситонные резонансы отражения несколько уширены по сравнению с узкими линиями экситонного поглощения, что может быть объяснено относительным несовершенством и наличием дефектных поверхностных слоев у сколотых образцов TlInS_2 . Однако энергетическое положение минимумов резонансного экситонного отражения совпадает с минимумами пропускания в области основного ($n = 1$) состояния свободных экситонов (рис. 1).

В настоящей работе впервые зарегистрировано резонансное отражение свободных экситонов, что в совокупности с данными по пропусканию и люминесценции подтверждает прямозонный характер энергетической структуры полупроводникового соединения TlInS_2 .

В качестве примера на рис. 2 приведены спектры ФЛ различных образцов монокристаллов TlInS_2 , зарегистрированные при 8 К со спектральным разрешением ~ 2 мэВ при возбуждении излучением He—Cd-лазера на длине волны ~ 325 нм мощностью ~ 0.2 Вт/см². Спектры А3, А5, А7, А8, А9 принадлежат тонким

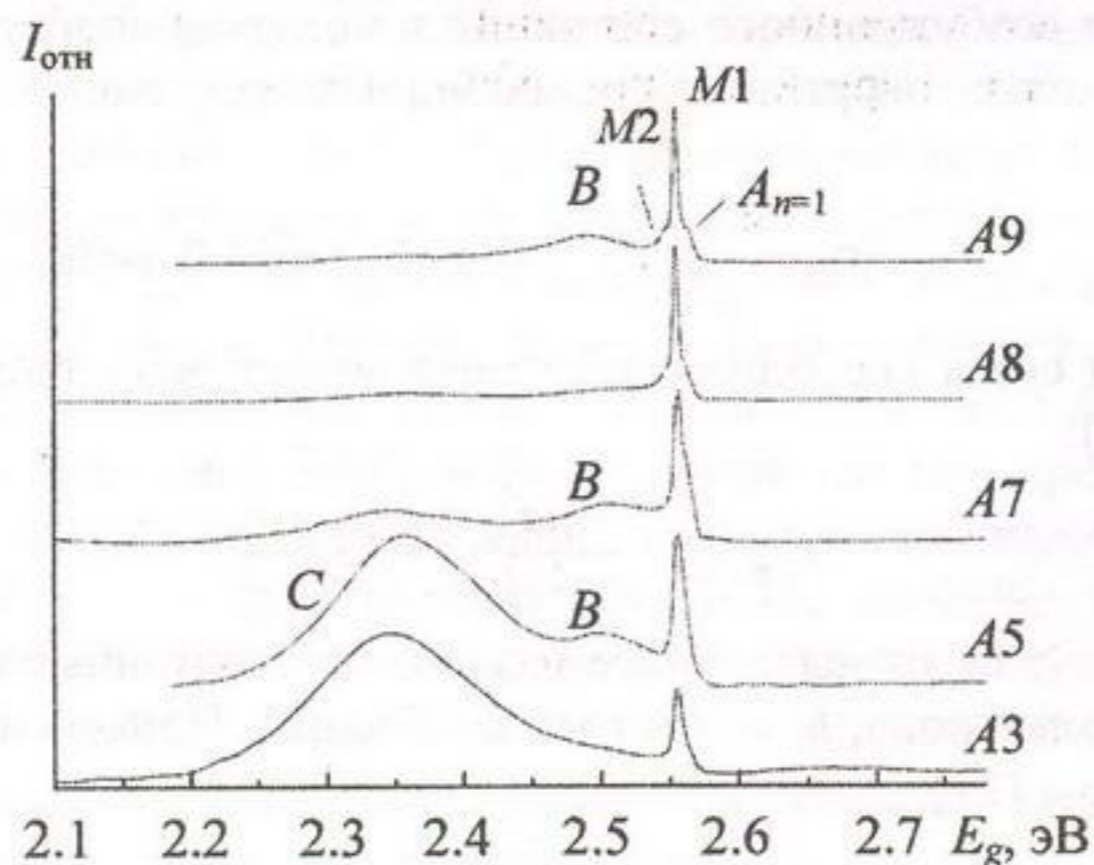


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции различных образцов монокристаллов TlInS_2 , снятые при 8 К со спектральным разрешением ~ 2 мэВ

монокристаллическим пластинкам, сколотым от различных частей нескольких слитков. Для большинства образцов TlInS_2 характерно наличие широкой полосы C с максимумом вблизи ~ 2.35 эВ. В спектрах ФЛ всех кристаллов наблюдаются другая относительно широкая полоса B с максимумом при ~ 2.51 эВ и интенсивная линия $M1$ при ~ 2.548 эВ с затянутым низко- и высокоэнергетическим крыльями. Для образца $A9$ в этой области спектра ФЛ удалось выделить низкоэнергетическую компоненту $M2$ при ~ 2.544 эВ и высокоэнергетическую с максимумом $A_{n=1}$ при ~ 2.553 эВ. Можно предположить, что самая интенсивная узкая линия $M1$ ~ 2.548 эВ обусловлена рекомбинацией связанных экситонов, поскольку ее энергетическое положение не совпадает с положением линии в спектрах пропускания, отнесенной нами к основному ($n=1$) состоянию свободных экситонов. Низкоэнергетическая линия ~ 2.544 эВ может быть отнесена к излучательной рекомбинации экситонов, локализованных на мелких донорах (или акцепторах), а высокоэнергетическая $A_{n=1}$ при ~ 2.553 эВ — к рекомбинации свободных экситонов. Доказательство вышеизложенной интерпретации получено нами из дополнительных экспериментов по исследованию люминесценции и оптического пропускания одного и того же образца TlInS_2 толщиной ~ 2 — 3 мкм при 4.2 К. На рис. 3 представлены соответствующие оптические спектры, снятые при 4.2 К со спектральным разрешением ~ 0.2 мэВ. Спектры ФЛ регистрировались при возбуждении излучением твердотельного лазера на $\lambda \sim 457$ нм мощностью до 50 мВт. Как видно, наиболее интенсивная линия $M1$ при ~ 2.548 эВ не попадает в область поглощения свободных экситонов, что подтверждает ее отнесение к рекомбинации связанных экситонов. Одна из двух разрешенных в этом эксперименте линий ФЛ $A_{n=1}$ (~ 2.553 эВ) по энергетическому положению точно совпадает с максимумом поглощения, а вторая линия (~ 2.558 эВ) попадает на затянутый контур линии экситонного поглощения. Наблюдаемое расщепление линий люминесценции может быть интерпретировано как проявление эффекта экситон-поляритонного взаимодействия. В этом случае линии ~ 2.553 эВ и ~ 2.558 эВ соответствуют рекомбинации свободных экситонов в области нижней и верхней поляритонных ветвей соответственно. Отметим, что эффект расщепления линий и отнесение их к экситон-поляритонной рекомбинации недавно обнаружен для свободных экситонов в соединении CuInS_2 [23]. Возможно и другое альтернативное объяснение, в соответствии с которым обе линии ФЛ можно отнести к рекомбинации свободных экситонов, связанных с двумя расщепленными кристаллическим полем подзонами валентной зоны соединения TlInS_2 , по аналогии с трехкомпонентным соединением CuInSe_2 [24]. Важно отметить, что в немногочисленных исследованиях люминесценции TlInS_2 при низких температурах, выполненных ранее [11, 25], в области края фундаментального поглощения обнаружен ряд узких линий, в том числе в области более высоких энергий (по сравнению с основной, наиболее интенсивной линией). Однако данные даже одних и тех же авторов противоречивы. Так, в работе [11] указано следующее энергетическое положение узких линий: $C \sim 2.54$ эВ, $D \sim 2.545$ эВ, $E \sim 2.550$ эВ (самая интенсивная линия), $F \sim 2.554$ эВ и $G \sim 2.559$ эВ, а в работе [25] дано иное положение линий: $D \sim 2.547$ эВ, $E' \sim 2.565$ эВ, $E \sim 2.570$ эВ (самая интенсивная линия), $F \sim 2.576$ эВ и $G \sim 2.581$ эВ. При этом отмечалось, что появление каждой из них в спектрах ФЛ может быть обусловлено рекомбинацией экситонов, существующих в различных политапах соединения TlInS_2 .

Подтверждение отнесения линий к свободным и связанным экситонам получено нами из исследования зависимости интенсивности этих линий от уровня возбуждения. Эксперименты показали, что интенсивность широких полос и узких линий в зависимости от уровня возбуждения описывается известным соотношением $I \sim P^k$ (I — интенсивность полос, P — мощность возбуждения, k — безразмерный коэффициент) и увеличивается по-разному для разных центров люминесценции при возрастании уровня возбуж-

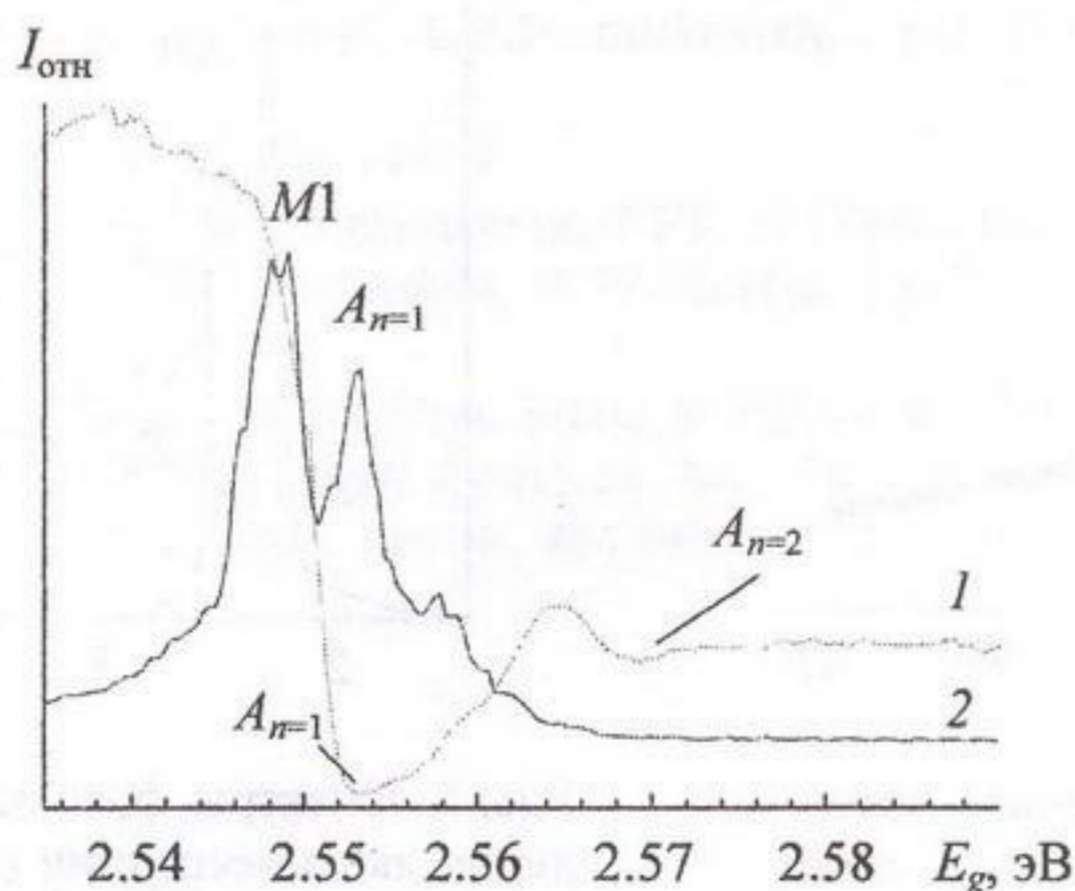


Рис. 3. Спектры пропускания (1) и люминесценции (2) монокристаллов TlInS_2 , снятые при 4.2 К

дения. Коэффициент k для линий 2.548 и 2.554 эВ при малых интенсивностях возбуждения (≤ 0.5 Вт/см²) составил 1.11 и 1.15. Известно, что значение $1 < k < 2$ характерно для излучательной рекомбинации свободных и связанных экситонов [26]. Для широких полос в спектрах ФЛ TlInS₂ в области энергий 2.35 и 2.51 эВ экспериментально найдено $k = 0.78$ и 0.88. Такие значения k , по данным [26], указывают на возможность реализации в этом случае излучательной рекомбинации через донорно-акцепторные пары или через оптические переходы зона—глубокий уровень. Наши эксперименты на образцах TlInS₂ показывают, что полоса 2.35 эВ с увеличением уровня возбуждения от 0.05 до 1 Вт/см² смещается в высокоэнергетическую область спектра, а с увеличением температуры от 4.2 до 50 К сдвигается в низкоэнергетическую область. Все вышеперечисленные факты позволяют связать появление полосы 2.35 эВ в спектрах ФЛ с процессом излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда на донорно-акцепторных парах. Отметим, что ранее подобная по спектральной форме “глубокая” полоса в спектрах ФЛ TlInS₂ с максимумом 2.41 эВ связывалась с рекомбинацией на донорно-акцепторных парах с участием глубоких донорных уровней ~ 0.25 эВ и мелких акцепторов ~ 0.02 эВ [14]. По нашему мнению, полоса с максимумом 2.51 эВ может быть отнесена к оптическим переходам носителей заряда непосредственно из зоны проводимости на относительно мелкие акцепторные состояния ловушек с энергией ионизации ~ 60 —70 мэВ.

Эксперименты показывают, что в процессе облучения монокристаллов TlInS₂ с помощью He—Cd-лазера интенсивностью ~ 0.3 —1.0 Вт/см² постепенно уменьшается сигнал люминесценции. В частности, для близкраевой люминесценции, обусловленной излучательной аннигиляцией свободных экситонов, интенсивность линии 2.548 эВ убывает со временем в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 4. Обнаруженный эффект, по-видимому, обусловлен формированием на поверхности безызлучательных центров рекомбинации неравновесных носителей заряда при воздействии УФ лазерного излучения. Не исключены также перезарядка отдельных дефектов на поверхности и структурная перестройка поверхностного слоя с образованием соединения TlInS₂ другого политипа, содержащего центры безызлучательной рекомбинации при воздействии высокоэнергетических квантов УФ излучения, которые ответственны за тушение интенсивности линий в спектрах ФЛ.

На рис. 5 представлены спектры ФЛ образца A5 при 4.2 К и возбуждении неравновесных носителей заряда в TlInS₂ квазимонохроматическим светом ксеноновой лампы в области ~ 3.8 эВ. Как видно, спектры ФЛ этого образца по спектральной форме близки к спектрам, снятым при возбуждении монокристаллов TlInS₂ излучением He—Cd-лазера (рис. 2). Впервые в спектрах возбуждения люминесценции зарегистрирована широкая полоса с максимумом в области 3.1 эВ при двух различных энергиях детектирования: $E_{\text{дет}} \sim 2.35$ эВ, соответствующей максимуму широкой полосы C, относящейся к рекомбинации на донорно-акцепторных парах, и $E_{\text{дет}} \sim 2.548$ эВ, соответствующей линии M1, обусловленной рекомбинацией связанных экситонов. Обнаружение широкой полосы в спектрах возбуждения люминесценции свидетельствует о существовании высокоэнергетической зоны поглощения по отношению к краю фундаментального поглощения, что согласуется с ранее полученными данными [12, 13]. В частности, в работе [12] в спектрах поглощения монокристаллов TlInS₂ при 20 К в области 3.14 эВ обнаружена широкая полоса с большим коэффициентом поглощения $\alpha \sim 1.45 \cdot 10^4$ см⁻¹, что хорошо согласуется с энергетическим положением полосы в области 3.1 эВ, выявленной нами в спектрах возбуждения люминесценции (рис. 5). Возникновение этой полосы связано, скорее всего, со спин-орбитальным расщеплением валентной зоны.

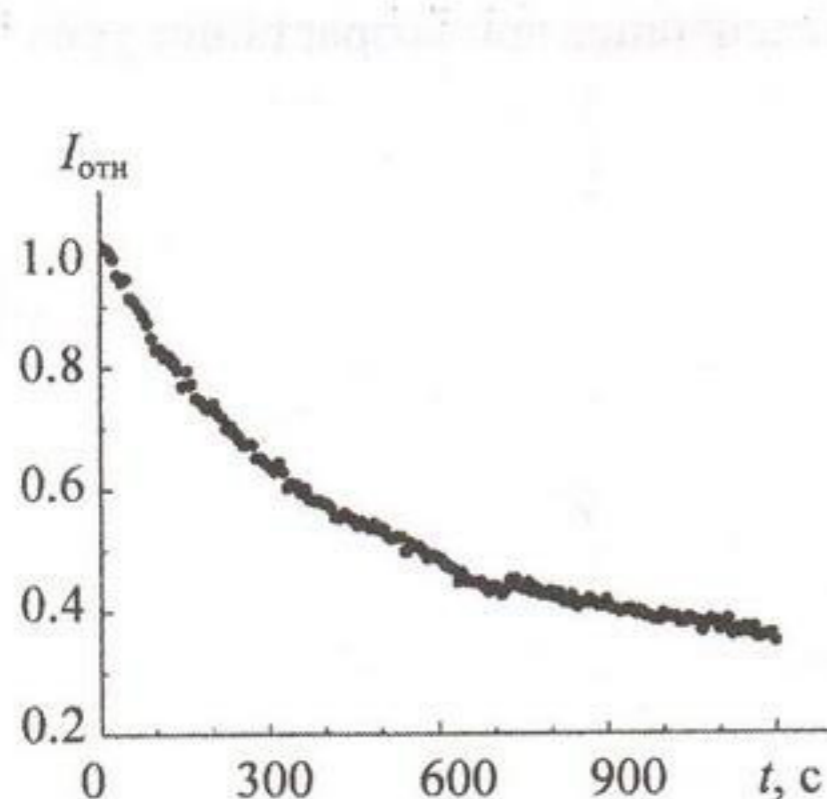


Рис. 4. Кинетика тушения интенсивности люминесценции для линии M1 ~ 2.548 эВ при 8 К, $\lambda_{\text{возб}} \approx 325$ нм

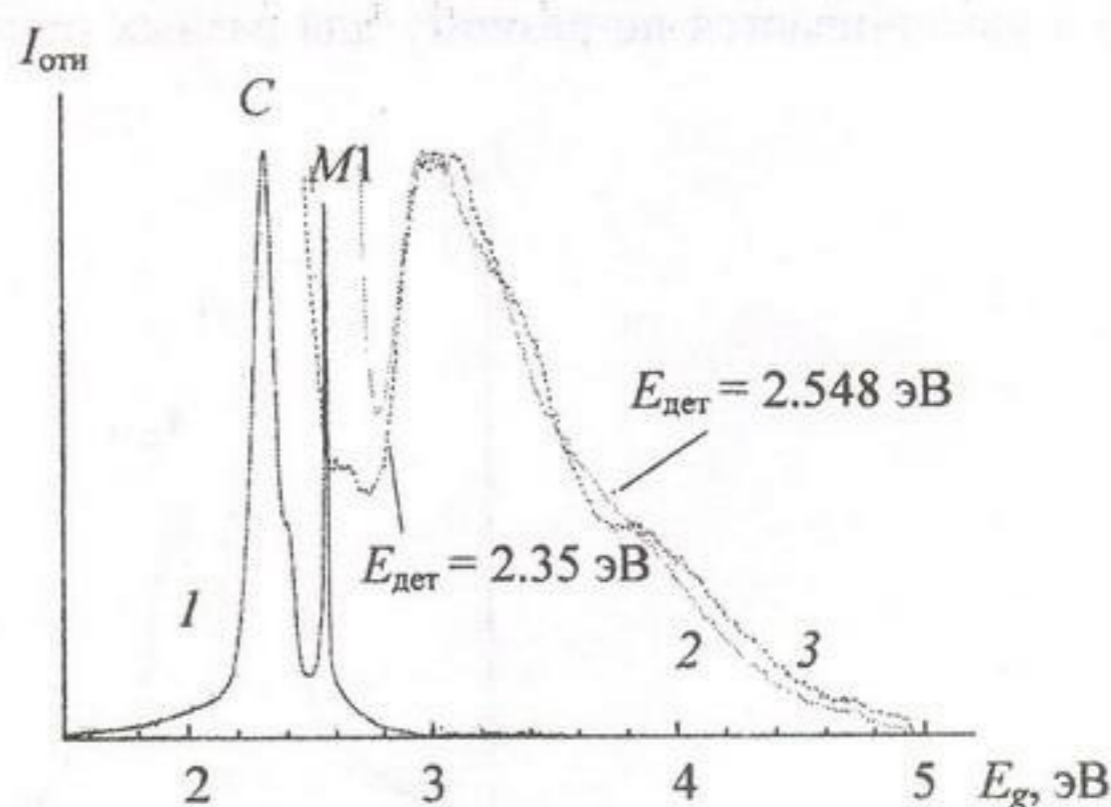


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции (1) и возбуждения люминесценции (2, 3) монокристаллов TlInS₂ (образец A5) при 4.2 К

Заключение. На основании исследования спектральной зависимости пропускания монокристаллов TlInS_2 при 4.2 К и определения положения линий, относящихся к основному ($A_{n=1} \sim 2.5535$ эВ) и первому возбужденному ($A_{n=2} \sim 2.5694$ эВ) состояниям свободных экситонов в водородоподобном приближении, уточнено значение энергии связи экситонов (~ 21.2 мэВ). Это позволило по данным оптического пропускания уточнить значение ширины запрещенной зоны: 2.5747, 2.561 и 2.461 эВ при 4.2, 78 и 300 К соответственно. Впервые в области края фундаментального поглощения обнаружен резонанс отражения в области ~ 2.553 эВ при 4.2 К, отнесенный к свободным экситонам в соединении TlInS_2 . Выявлен эффект уменьшения интенсивности люминесценции при возбуждении монокристаллов TlInS_2 излучением He—Cd-лазера на $\lambda = 325$ нм мощностью >0.2 Вт/см², обусловленный образованием центров безызлучательной рекомбинации. Проанализированы возможные механизмы излучательной рекомбинации, ответственные за появление близкраевой люминесценции, включающие в себя рекомбинацию свободных и связанных экситонов, донорно-акцепторных пар.

Выражаем благодарность Г. П. Яблонскому, М. В. Ржеутскому и другим сотрудникам Института физики им. Б. И. Степанова за содействие в проведении измерений люминесценции и обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты Ф11-031 и Ф11М-052.

- [1] D.Müller, F.E.Poltmann, H.Hahn. *Z. Naturforsch.*, **29b** (1974) 117—118
- [2] О.З.Алекперов, А.И.Наджафов. *Неорг. матер.*, **45** (2009) 9—14
- [3] O.Z.Alekperov, G.B.Ibragimov, A.I.Nadjafov, A.R.Fakix. *Phys. Status Solidi (c)*, **6** (2009) 977—980
- [4] T.J.Isaaks. *Z. Kristallogr. B*, **141** (1971) 104—108
- [5] D.Müller, H.Hahn. *Z. Anorg. Allg. Chem. B*, **438** (1978) 258—272
- [6] M.P.Hanias, A.N.Anagnostopoulos, K.Kambas, J.Spyridelis. *Mater. Res. Bull.*, **27** (1992) 25—38
- [7] A.F.Qasrawi, N.M.Gasanly. *Phys. Status Solidi (a)*, **199** (2003) 277—283
- [8] A.M.Panich. *J. Phys.: Condens. Mater*, **20** (2008) 293202-1—293202-42
- [9] M.Ya.Bakirov, N.M.Zeinalov, S.G.Abdullayeva, V.A.Gajiyev, E.M.Gojayev. *Solid State Commun.*, **44** (1982) 205—207
- [10] Г.Б.Абдулаев, Г.И.Абуталыбов, А.А.Алиев, Л.С.Ларионкина, И.К.Нейман-заде, Э.Ю.Салаев. *Письма в ЖЭТФ*, **38** (1983) 525—526
- [11] T.Arai, J.Aoyagi, V.Maruyama, S.Onari, K.R.Allakhverdiev, E.Bairamova. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, Suppl. 32-3 (1993) 754—756
- [12] J.A.Kalomiros, A.N.Anagnostopoulos. *Phys. Rev. B*, **50** (1994) 7488—7494
- [13] С.Иида, Н.Мамедов, В.Ю.Рудь, Ю.В.Рудь. *ФТП*, **32** (1998) 78—81
- [14] A.Aydinli, N.M.Gasanly, I.Yilmaz, A.Serpengüzel. *Semicond. Sci. Technol.*, **14** (1999) 599—603
- [15] С.Н.Мустафаева, Э.М.Керимова, Н.З.Гасанов. *ФТТ*, **43** (2001) 427—430
- [16] K.R.Allakhverdiev, T.G.Mammadov, R.A.Suleimanov, N.Z.Gasanov. *J. Phys.: Condens. Matter*, **15** (2003) 1291—1298
- [17] M.M.El-Nahaass, M.M.Sallam, A.H.S.Abd Al-Wahab. *Current Appl. Phys.*, **9** (2009) 311—316
- [18] Г.И.Абуталыбов, С.Г.Абдуллаева, Н.М.Зейналов. *ФТП*, **16** (1982) 2086—2088
- [19] А.В.Мудрый, А.В.Короткий, М.В.Якушев, Р.Мартин. *Журн. прикл. спектр.*, **76**, № 2 (2009) 232—236
- [20] M.V.Yakushev, R.W.Martin, A.V.Mudryi, A.V.Ivaniukovich. *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 111908-1—111908-3
- [21] R.J.Elliott. *Phys. Rev. B*, **108** (1957) 1384—1389
- [22] С.Н.Мустафаева, М.М.Асадов, В.А.Рамазанзаде. *ФТТ*, **38** (1996) 14—18
- [23] A.V.Mudryi, A.V.Ivaniukovich, M.V.Yakushev, R.W.Martin. *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 111908-1—111908-3
- [24] M.V.Yakushev, R.W.Martin, A.V.Mudryi. *Phys. Status Solidi (c)*, **6** (2009) 1082—1085
- [25] K.R.Allakhverdiev, N.M.Gasanly. *Solid State Commun.*, **94** (1995) 777—782
- [26] T.Schmidt, K.Lischka, W.Zulehner. *Phys. Rev. B*, **45** (1992) 8989—8994