

УДК 535.376

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Tl_xCu_{1-x}GaSe_2$

А. Н. Георгобиани<sup>1</sup>, А. М. Евлоев<sup>2</sup>, Н. П. Дацкевич, В. П. Токарева,  
Е. В. Перлов, С. В. Семендяев

*Представлены результаты исследования фотолюминесценции и спектров ее возбуждения в монокристаллах  $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$ . Исследуемые кристаллы являются слоистыми, обладающие анизотропными оптическими свойствами. В этом плане важным является изучение оптических свойств исследуемых кристаллов.*

**Ключевые слова:** широкозонные полупроводники, электрон, дырка, донор, акцептор, рекомбинационный процесс, люминесценция, фотоэлектрические явления.

Известно, что соединение  $TlGaSe_2$  кристаллизуется в моноклинной решетке, но имеет особенности,  $a = b$  (для моноклинной сингонии  $a \neq b$ ) и угол  $\beta$  мало отличается от  $90^\circ$  [1]. Монокристаллы  $Tl_xCu_{1-x}GaSe_2$  ( $0 < X \leq 0.02$ ) кристаллизуются в моноклинной решетке  $TlGaSe_2$  и являются твердыми растворами [2]. Так как исследуемые кристаллы являются слоистыми, то с большой долей вероятности можно считать, что они обладают анизотропными оптическими свойствами. В этом плане важным является изучение оптических свойств исследуемых кристаллов  $Tl_{1-x}Cu_xGaSe_2$  ( $0 \leq X \leq 0.02$ ) в направлениях, перпендикулярном и параллельном плоскости слоя. Для этого необходимо направлять свет параллельно и перпендикулярно плоскости скола. Так как не представляется возможным получить образцы большой площади, имеющие поверхности, перпендикулярные к плоскости спайности, то изучение анизотропии оптических свойств проводилось ранее при изменении угла падения плоскополяризованного света.

<sup>1</sup>E-mail: georg@sci.lebedev.ru

<sup>2</sup>E-mail: Evloev555@mail.ru

Образцы для измерения, имеющие хорошее оптическое качество и одинаковую толщину, получались скалыванием плоскопараллельных пластинок от монокристаллического слитка. Направляя линейно-поляризованный свет на поверхность скола под различными углами, определяли коэффициент прозрачности на спектрально-вычислительном комплексе СДЛ-2, приспособленном для этих целей [3]. Показатель преломления определяли по методике [4, 5].

При исследовании оптических постоянных структуру кристаллов типа  $\text{TlGaSe}_2$  мы считали псевдотетрагональной. Исследование системы  $\text{Tl}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$  ( $0 \leq X \leq 0.02$ ) прежде всего было стимулировано тем, что монокристаллы  $n - \text{CuGaSe}_2$  характеризуются наличием прямого перехода вблизи 1.2 мкм [5] и поэтому представляют большой интерес для создания преобразователей солнечной энергии.

В настоящей работе приведены результаты исследования спектров фотолюминесценции (ФЛ) и ее возбуждения в кристаллах  $\text{Tl}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ .

*Методика эксперимента.* Монокристаллы твердых растворов выращивались методом Бриджмена–Стокбаргера. Исходные образцы  $\text{TlGaSe}_2$  помещались в вакуумированный сосуд вместе с образцом меди, и при  $T = 1040$  К происходило частичное замещение Tl на Cu.  $\text{Tl}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$  ( $0 \leq X \leq 0.02$ ) имеют слоистую структуру типа  $\text{TlGaSe}_2$  и легко скалываются на пластинки. Удельное сопротивление кристаллов при 300 К составляет  $10^7 - 10^9$  Ом·см. Образцы, приготовленные скалыванием кристаллов по плоскостям спайности, имеют естественные зеркальные поверхности и для исследований оптических свойств не требуют дополнительной механической обработки.

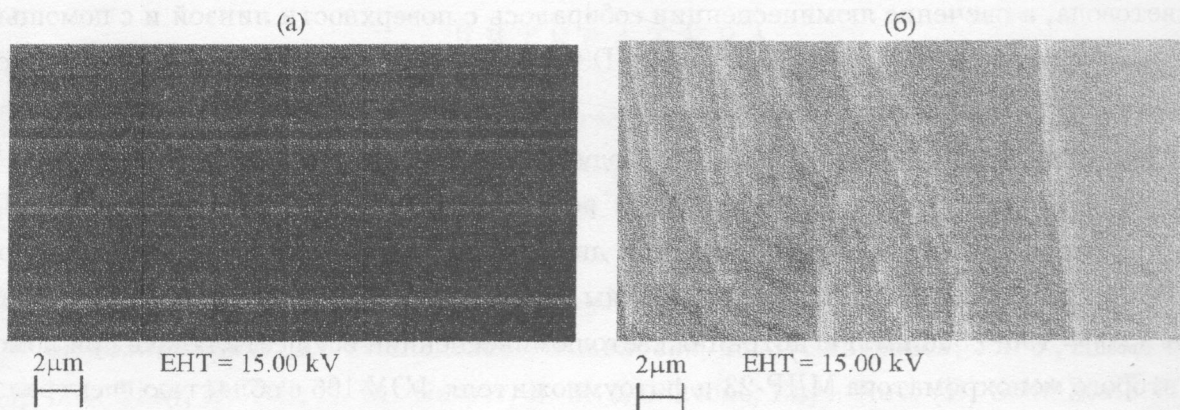


Рис. 1. Электронные микрофотографии кристаллов  $\text{Tl}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ : (а) вид сбоку, (б) вид сверху.

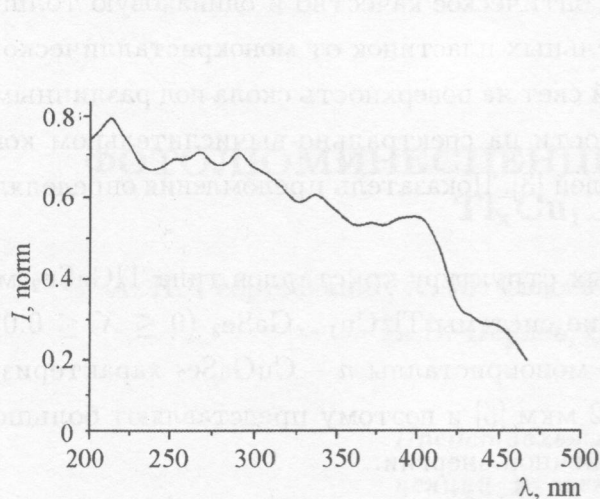


Рис. 2. Спектр возбуждения ФЛ в  $Tl_xCu_{1-x}GaSe_2$  при  $T = 300$  К,  $\lambda_{рег} = 624$  нм.

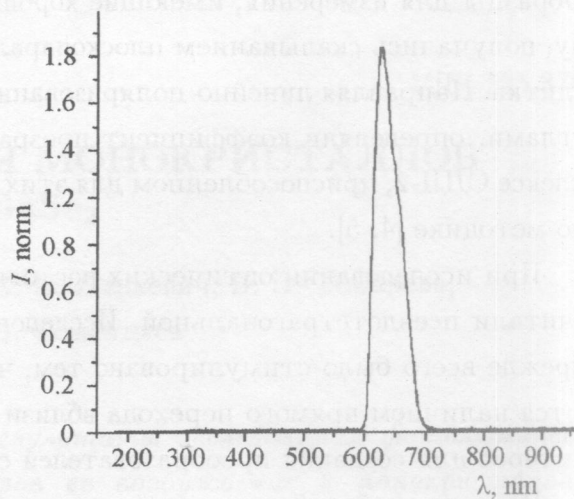


Рис. 3. Спектр фотолуминесценции  $Tl_xCu_{1-x}GaSe_2$  при  $\lambda_{возб} = 520$  нм и  $T = 300$  К.

С помощью электронного микроскопа получены электронные микрофотографии образцов, где видны зеркальная поверхность и слоистая структура, и в дополнительной полировке не было необходимости (рис. 1).

Спектры ФЛ  $Tl_xCu_{1-x}GaSe_2$  снимались при комнатной температуре. Источниками возбуждающего излучения являлись полупроводниковые светодиоды с длиной волны 520 нм. Излучение светодиода подводилось к поверхности образца с помощью кварцевого световода, а свечение люминесценции собиралось с поверхности линзой и с помощью световода подводилось к полихроматору FSD8 4. С полихроматора данные передавались на компьютер [6].

Измерение спектров возбуждения проводилось на спектроскопической установке, в которой для возбуждения люминесценции использовалась ксеноновая лампа ДКСШ-1000. Свет лампы фокусировался на вход дифракционно-решеточного монохроматора МДР-23, позволявшего менять длину волны возбуждающего света в диапазоне длин волн  $\lambda_{возб} = 190 - 500$  нм. Регистрация светолуминесценции осуществлялась при помощи второго монохроматора МДР-23 и фотоумножителя ФЭУ-106 с областью спектральной чувствительности 170–850 нм. Исследования проводились при комнатной температуре.

*Результаты и их обсуждение.* Спектр ВЛ  $Tl_xCu_{1-x}GaSe_2$  при длине волны регистрации  $\lambda_{рег} = 624$  нм, соответствующей наблюдаемому максимуму полосы ФЛ



представлены на рис. 2. Спектр имеет сложный характер, и область возбуждения простирается от ультрафиолетового света ( $\lambda_{\text{возб}} = 190$  нм) до голубого ( $\lambda_{\text{возб}} = 470$  нм). В них наблюдаются максимумы при  $\lambda_{\text{возб}} = 213, 268, 290, 336, 398, 448$  нм.

На рис. 3. показан спектр ФЛ, измеренный в интервале длин волн 200–900 нм при  $T = 300$  К. В спектре наблюдается ярко выраженный максимум 624 нм. Полуширина максимума составляет 31 нм.

Линия ФЛ обусловлена рекомбинационными излучениями глубоких акцепторно-донорных пар, имеющих в тройных полупроводниковых соединениях [7–10]. Фотовозбуждаемая в донорно-акцепторных парах рекомбинация носителей заряда доноров или акцепторов происходит излучательным образом. При малых интенсивностях возбуждения только малая часть донорных или акцепторных ловушечных центров захватывает носители заряда. При частичном замещении атомов таллия атомами меди происходит сужение пика и сдвиг излучения в коротковолновую область спектра: для  $\text{TlGaSe}_2$  – 630 нм и 36 нм [11], а для  $\text{Tl}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$  ( $0 \leq X \leq 0.02$ ) – 624 нм и 31 нм.

*Заключение.* Спектр ВЛ имеет сложный характер, и область возбуждения простирается в области от ультрафиолетового диапазона ( $\lambda_{\text{возб}} = 190$  нм) до голубого ( $\lambda_{\text{возб}} = 470$  нм). Получена линия ФЛ с максимумом 624 нм. Показано, что при частичном замещении атомов таллия атомами меди происходит сужение пика и сдвиг излучения в коротковолновую область спектра [10].

Авторы благодарят проф. В.С. Горелика за обсуждение полученных результатов ФЛ и к.ф.-м.н. Л.Л. Чайкова за помощь в работе над текстом.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Matiyev, Kh. R. Z. Ismailov, in: *Proceedings of the 9-th international on ternary and multinary compounds, Баку, 1993* (Baku, Azerbaijan, August, 1993).
- [2] Г. Б. Абдуллаев, Г. Д. Гусейнов, В. Д. Рустамов, Доклады АН Азерб. ССР **32**(1), 20 (1976).
- [3] Б. М. Хамхоев, А. Х. Матиев, в: *Труды Международной конференции “Оптика, оптоэлектроника и технологии”, Ульяновск, 2003* (Ульяновск, УлГУ, 2003), с. 14.
- [4] I. L. Shay, V. Tell, H. M. Kasper, L. M. Schiavone, *Phys. Rev. (B) Solid State* **7**(10), part 1, 4485 (1973).
- [5] П. И. Баранский, В. П. Клочков, И. В. Потыкеевич, *Полупроводниковая электроника* (Киев, Наукова Думка, 1970).
- [6] А. П. Гончаров, В. С. Горелик, Краткие сообщения по физике, **36**(9), 3 (2009).

- [7] A. Aydinli, N. M. Gasanly, I. Yilmaz, and A. Serpengüzel, *Semicond. Sci. Technol.* **14**(7), 599 (1999).
- [8] I. A. Damaskin, S. L. Pâshkin, S. I. Radautsan, V. E. Tezlevan, *Optoelectron.* **5**(5), 405 (1973).
- [9] J. I. Pankove, *Optical processes in Semiconductors* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1975).
- [10] P. Y. Yu, M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors* (Springer, Berlin, 1995).
- [11] А. Н. Георгобиани, А. М. Евлоев, Краткие сообщения по физике ФИАН, **36**(10), 19 (2009).

Поступила в редакцию 20 августа 2009 г.