

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.15>**КРАЕВАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ  $\beta$ - $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$  ( $0 \leq X \leq 0,015$ )**

Научная статья

**Матиев А.Х.**<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д.Милионщикова, Грозный, Российская Федерация<sup>1</sup>Ингушский государственный университет, Магас, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (matiyev-akhmet[at]yandex.ru)

**Аннотация**

В работе представлены результаты экспериментального исследования краевой люминесценции монокристаллов твердых растворов  $\beta$ - $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$  ( $0 \leq X \leq 0,015$ ) при температуре 300 К, выращенных методом Бриджмена – Стокбаргера для выявления механизма излучательной рекомбинации. Люминесценция возбуждалась излучением диодного лазера AM-LDN-FV с длиной волны излучения 450 нм под углом 45°. Энергетические положения максимумов излучения, полуширины и интенсивности полос излучения указывают на межзонный характер излучательной рекомбинации. Показано, что в монокристаллах твердых растворов замещения  $\beta$ - $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$  ( $0 \leq X \leq 0,015$ ) увеличение концентрации атомов меди приводит к сужению полосы излучения и сдвигу ее в длинноволновую область.

**Ключевые слова:** фотолюминесценция, монокристалл, твердые растворы, излучательная рекомбинация, спектр.**EDGE PHOTOLUMINESCENCE OF MONOCRYSTALS  $\beta$ - $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$  ( $0 \leq X \leq 0,015$ )**

Research article

**Matiyev A.C.**<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Grozny State Oil Technical University named after M.D. Millionshchikov, Grozny, Russian Federation<sup>1</sup>Ingush State University, Magas, Russian Federation

\* Corresponding author (matiyev-akhmet[at]yandex.ru)

**Abstract**

The work presents the results of an experimental study of the edge luminescence of single crystals of  $\beta$ - $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$  ( $0 \leq X \leq 0.015$ ) solid solutions at 300 K grown by the Bridgman-Stockbarger method to reveal the mechanism of radiative recombination. The luminescence was excited by emission from an AM-LDN-FV diode laser with an emission wavelength of 450 nm at an angle of 45°. The energy positions of emission maxima, half-widths and intensities of emission bands indicate the interzone nature of radiative recombination. It is shown that in single crystals of  $\beta$ - $Tl_{1-x}Cu_xInS_2$  solid substitution solutions ( $0 \leq X \leq 0.015$ ), an increase in the concentration of copper atoms leads to a narrowing of the emission band and its shift to the long-wavelength region.

**Keywords:** photoluminescence, single crystal, solid solutions, radiative recombination, spectrum.**Введение**

Слоистые и цепочечные полупроводниковые кристаллы  $TlV^{III}C_2^{VI}$  (ВIII-In, Ga; CVI-S, Se, Te) обладают сильной анизотропией физических свойств вдоль различных кристаллографических направлений. Исследования данных кристаллов показали перспективность их использования в качестве материалов для изготовления фотоэлектрических преобразователей, анализаторов спектра, тензо- и рентгендетекторов и др. [1].

Одним из представителей этого класса материалов  $\beta$ - $TlInS_2$  ( $\beta$ -модификация), является сегнетоэлектриком – полупроводником  $p$ -типа, и представляет в настоящее время заметный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения благодаря широкому набору необычных диэлектрических, транспортных, термодинамических и упругих свойств. В частности,  $TlInS_2$  представляет собой прямозонный полупроводник, который проявляет новое сегнетоэлектрическое, сегнетоупругое поведение. Благодаря своей кристаллической структуре он также известен как полупроводник второго поколения гармоник [2], [3].

Монокристалл  $\beta$ - $TlInS_2$  состоит из элементов III и VI группы периодической системы Менделеева и обладает слоистой структурой. В кристалле  $\beta$ - $TlInS_2$  ионно-ковалентные связи происходят между атомами, тогда как слабые ван-дер-ваальсовские связи создаются между последовательными двумерными слоями, которые перпендикулярны направлению (001). Согласно [4], [5], [6] пространственная группа  $C_{2h}^6$  характеризует кристаллическую симметрию  $\beta$ - $TlInS_2$ , которая имеет моноклинную структуру при комнатной температуре. Оптические свойства кристаллов  $TlInS_2$  были исследованы в работе [7] посредством измерений спектров пропускания и отражения. Из анализов данных поглощения кристаллов  $TlInS_2$  при комнатной температуре выявлено сосуществование не прямых и прямых переходов с ширинами запрещенных зон  $E_{gd} = 2,32$  и  $E_{gi} = 2,29$  эВ. В работе [8] исследованы спектральные и оптические параметры монокристаллов  $TlInS_2$  с помощью спектрофотометрических измерений коэффициентов пропускания и отражения в диапазоне длин волн 200 - 2500 нм и определены прямые и не прямые запрещенные зоны, равные 2,34 и 2,258 эВ, соответственно. В [9] показано, что для твердых растворов  $TlIn_{1-x}Cr_xS_2$  ( $x = 0,005; 0,01$ ) имеет место закономерное сужение запрещенной зоны по мере возрастания концентрации замещающих атомов Cr в пределах его растворимости. Из зависимости  $(a\hbar\omega)^2$  от  $\hbar\omega$  определили минимальное значение энергии прямых переходов  $TlInS_2$

(ширину запрещенной зоны)  $E_g = 2,393$  эВ при температуре 290 К. Авторами [10] По оптическому поглощению света исследовано влияние легирования примесями Ag, Al, B, Er, Fe, Nd, Tb в концентрациях от 0,1 до 3 % кристаллов  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$  на характер ширины запрещенной зоны данных кристаллов. Установлено, что спектры пропускания кристаллов  $TlInS_2$  и  $TlGaSe_2$ , легированные Ag, характеризуются наличием двух участков с различной энергией активации.

Анализ литературных данных позволил выявить как закономерности в изменениях физических свойств этих кристаллов при легировании различными примесями и образовании твердых растворов замещения на их основе, так и обнаружить пробелы в исследовании их некоторых свойств. Люминесцентные свойства на краю собственной полосы поглощения, вышеуказанной системы практически вообще не изучены. Имеется работа [11], авторы которой исследуя температурную зависимость излучения, указали на межзонный характер излучательной рекомбинации.

В настоящей работе исследована краевая фотолюминесценция монокристаллов  $\beta-Tl_{1-x}Cu_xInS_2$  ( $0 \leq X \leq 0,015$ ) при комнатной температурес целью выявления механизма излучательной рекомбинации.

### Методы и принципы исследования

Исходными материалами являлись элементы особой чистоты: Tl-000 Cu – ОСЧ-4-11-4; In-000; S – ОСЧ-16-5. Для удаления окисной плёнки медь протравливали 5% раствором азотной кислоты с последующей промывкой её в проточной дистиллированной воде, а таллий подвергался вакуумной дистилляции. Чтобы не контактировать с таллием, полученным после вакуумной дистилляции в нужном весовом количестве, производят расчет остальных компонентов под него. Ампулы для синтеза, изготовленные из толстостенного кварца внутренним диаметром 25 мм, вначале травил 40% раствором HF в течение 5 минут, интенсивно промывали дистиллированной водой, а затем отжигали в вакуумной печи при температуре 1300 К. Для предотвращения контакта расплава веществ с поверхностью кварца внутреннюю часть ампул покрывали слоем графита.

Исходное соединение получали непосредственным сплавлением компонентов, взятых в стехиометрическом соотношении в вакуумированных до остаточного давления  $1 \cdot 10^{-3}$  Па кварцевых ампулах. С целью уменьшения скорости протекания реакции и, как следствие, предотвращения роста давления в ампуле, синтез осуществляли в двухсекционной печи. Исходные элементы в ампулах располагались таким образом, чтобы основная масса серы находилась во второй секции печи, а таллий, индий и медь – в первой секции печи. На первой стадии синтеза температура первой секции печи поднималась со скоростью 100 К/час на 40-50 градусов выше температуры плавления соединения  $TlInS_2$ , то есть до 1100 К, а температура второй секции – со скоростью - 60 К/час до 392 К, то есть до температуры плавления серы. После того как вся сера перегалялась в основную, находящуюся в первой секции печи часть ампулы, приступали ко второй стадии синтеза. Для этого температуру второй секции поднимали до температуры первой секции и выдерживали расплав в течение  $\sim 4$  часов, подвергая его непрерывному интенсивному перемешиванию, а затем температуру медленно опускали до 700 К. Для приведения сплавов в равновесное состояние использовали гомогенизирующий отжиг при указанной температуре в течение 240 часов. Однофазность и однородность полученных твердых растворов замещения  $\beta-Tl_{1-x}Cu_xInS_2$  ( $0 \leq X \leq 0,015$ ) контролировали методами дифференциально-термического и рентгенофазового анализа [12]. Выращивание монокристаллов  $\beta-Tl_{1-x}Cu_xInS_2$  ( $0 \leq X \leq 0,015$ ) осуществляли модифицированным методом Бриджмена – Стокбаргера. Градиент температуры в зоне кристаллизации составлял 50 К/см, а скорость опускания ампул – 0,4 мм/час [12]. Выращенные монокристаллы имели слоистую структуру. Образцы для измерений получали скалыванием кристаллов по плоскостям спайности. Полученные пластинки имели естественные зеркальные поверхности и не нуждались в дальнейшей обработке перед измерениями.

Люминесценция возбуждалась излучением диодного лазера AM-LDN-FV с длиной волны излучения 450 нм. Излучение светодиода фокусировалось с помощью линзы в волоконно-оптический световод и затем направлялось с помощью специального устройства на плоскость образца под углом 45°. Отраженное от поверхности образца излучение направлялось на входную щель регистрирующего монохроматора МДР-23, являющегося составной частью автоматизированного спектрально-вычислительном комплексе СДЛ-2. Сканирование осуществляли с шагом 0,1 нм в интервале длин волн 200 – 650 нм с использованием охлаждаемого термоэлектрическим холодильником фотоэлектрического умножителя ФЭУ-100, сигналы с которого поступали на цифровой частотомер, работающий в режиме счета одноэлектронных импульсов с диапазоном счета от 0 до  $10^5$  имп./с.

### Основные результаты

На рис. 1 приведен нормированный спектр излучения монокристаллов монокристалла  $TlInS_2$ , измеренный в интервале длин волн 200-650 нм при 300 К. В спектре наблюдается явно выраженный максимум 508 нм.

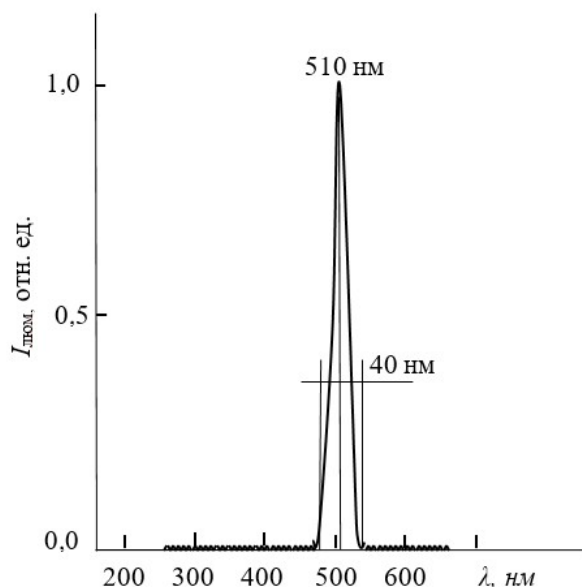


Рисунок 1 - Спектры фотолюминесценции монокристаллов  $\beta$ -TlInS<sub>2</sub>  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.15.1>

Полуширина  $\Gamma$  - полосы люминесценции составляет 40 нм. Линия фотолюминесценции обусловлена рекомбинационными излучениями глубоких акцепторно-донорных пар, имеющих в тройных полупроводниковых соединениях [13], [14], [15], [16]. Рекомбинация носителей заряда акцепторов или доноров, фотовозбуждаемая в акцепторно-донорных парах происходит излучательным образом. При малых интенсивностях возбуждения только малая доля акцепторных или донорных ловушечных центров захватывают носители заряда. На рис. 2 приведен нормированный спектр излучения монокристаллов  $\beta$ -Tl<sub>0,985</sub>Cu<sub>0,015</sub>InS<sub>2</sub> с максимумом 520 нм и полушириной  $\Gamma$  - полосы люминесценции 35 нм.

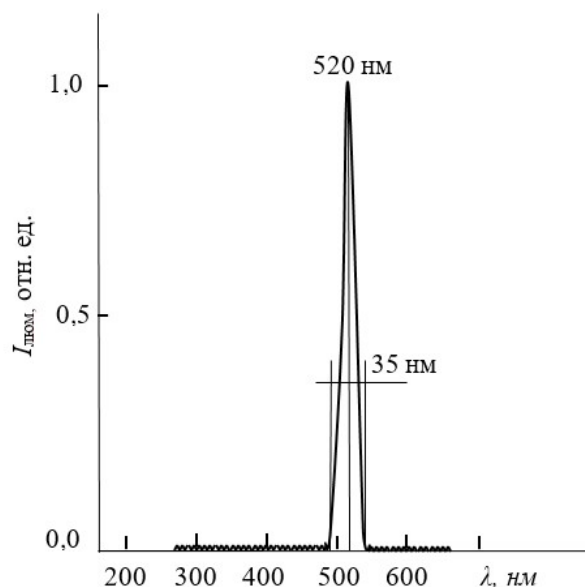


Рисунок 2 - Спектры фотолюминесценции монокристаллов  $\beta$ -Tl<sub>0,985</sub>Cu<sub>0,015</sub>InS<sub>2</sub>  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.15.2>

Видно, что при частичном замещении атомов таллия атомами меди в решетке  $\beta$ -TlInS<sub>2</sub> наблюдается сужение  $\Gamma$  - полосы люминесценции и ее сдвиг в длинноволновую область спектра. Согласно существующим представлениям [17], при замещении тяжелого атома на более легкий, частота соответствующего колебания должна сдвигаться в сторону больших значений частоты и максимум излучения должен смещаться в коротковолновую область. Однако в нашем случае наблюдается противоположное, то есть частичное замещение более тяжелых атомов таллия более легкими атомами меди приводит к сдвигу частот в длинноволновую область. Здесь, по-видимому, играет существенную роль, кроме фактора массы, также резкое изменение силы связи между атомами. Частичное замещение атомов таллия атомами меди, на наш взгляд, приводит к существенному ослаблению силы связи Tl – S в восьмивершинниках, которая

проявляется на спектрах ИК-отражения данных кристаллов [18] и подтверждается полученными результатами. Энергетические положения максимумов люминесценции хорошо согласуются с данными работы [6]. Исследование люминесценции монокристаллов  $\text{TlInS}_2$  и твердых растворов катионного замещения на его основе показали, что в исследованном спектральном диапазоне все спектры люминесценции были поляризованы в направлении параллельном кристаллографической оси  $C$  кристалла при этом кинетика импульса излучения повторяла форму диодного лазерного импульса. Отсутствие в спектрах люминесценции выраженных полос, связанных с экситонными состояниями, которые были обнаружены в спектрах отражения и электропоглощения [12], по всей видимости, связано с отсутствием в научной литературе экспериментальных данных по исследованию спектров люминесценции этих кристаллов при низких температурах. Это должно стать предметом дальнейших исследований.

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование краевой люминесценции монокристаллов твердых растворов  $\beta\text{-Tl}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InS}_2$  ( $0 \leq x \leq 0,015$ ) при температуре 300 К. Определенные энергетические положения максимумов излучения, полуширины и интенсивности полос излучения указывают на межзонный характер излучательной рекомбинации. Показано, что в монокристаллах твердых растворов замещения  $\beta\text{-Tl}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InS}_2$  ( $0 \leq x \leq 0,015$ ) увеличение концентрации атомов меди приводит к сужению полосы излучения и сдвигу ее в длинноволновую область.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Panich A.M. Electronic properties and phase transitions in low-dimensional semiconductors / A.M. Panich // *Phys.:Condens. Mattr.* — 2008. — 20(6). — P. 3-31.
2. Allakhverdiev K.R. Mamedov. Behavior of the layered crystals  $\text{TlInS}_2$  and  $\text{TlGaSe}_2$  near phase transitions in a static field / K.R. Allakhverdiev, N.D. Akhmed-zade, T.G. Mamedov // *Low. Temp. Phys.* — 2000. — Vol.26. — Iss. 1. — P. 56-61.
3. Сеидов М.-Х.Ю. Нетрадиционные эффекты термической памяти несоизмеримой фазы в сегнетоэлектриках-полупроводниках  $\text{TlInS}_2$  / М.-Х.Ю. Сеидов, Р.А. Сулейманов [и др.] // *Физика твердого тела.* — 2009. — Т. 51. — Вып. 3. — С. 533-542.
4. Guseinov G.D. On some properties of  $\text{TlInS}_2$  ( $\text{Se}_2, \text{Te}_2$ ) single crystals / G.D. Guseinov, E. Mooser, E.M. Kerimova [et al.] // *Physica Status Solidi.* — John Wiley & Sons, 1969. — 34(1). — P. 33-34.
5. Offergeld G.R. Semiconductive materials containing gallium / G.R. Offergeld. — 1963.
6. Гусейнов Г.Д. Поиск и физические исследования новых полупроводниковых аналогов. дис. ... д-ра физ.-мат наук / Г.Д. Гусейнов. — Баку, 1969.
7. Сардарлы Р.М. Тип оптических переходов на краю фундаментального поглощения кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ , подвергнутых  $\gamma$  - облучению / Р.М. Сардарлы, Ф.Т. Салманов, Н.А. Алиева [и др.] // *Оптика и спектроскопия.* — Санкт-Петербург, 2019. — 127(3). — С. 420-424.
8. El-Nahassa M.M. Optical and photoelectric properties of  $\text{TlInS}_2$  layered single crystals / M.M. El-Nahassa, M.M. Sallamb, A.H.S. AbdAl-Wahab // *Current Applied Physics.* — 2009. — 9. — P. 311-316.
9. Керимова Э.М. Оптические свойства на краю поглощения монокристаллов новых полупроводниковых соединений  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$  ( $x = 0,005; 0,01$ ) / Э.М. Керимова, А.И. Гасанов, А.К. Заманова [и др.] // *Материалы междунац. конф. Оптика полупроводников.* — Ульяновск, 2006. — С. 21-23.
10. Кааби Сабах Абед Дауд Ф. Оптическое поглощение света в легированных кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  / Ф. Кааби Сабах Абед Дауд, Н.А. Дроздов, Ал.В. Скрипаль // *Сборник статей седьмой Всероссийской научной школы-семинара / Под ред. Ал.В. Скрипаля.* — Саратов, 2020. — 180 с.
11. Балтрамеюнас Р. Люминесценция монокристаллов при лазерных уровнях возбуждения / Р. Балтрамеюнас, А. Жукаускас, Н. Зейналов [и др.] // *Физика и техника полупроводников.* — 1983. — 17(10). — С. 1898-1900.
12. Матиев А.Х. Фазовые равновесия и электронно-оптические свойства систем  $\text{TlB}_3\text{C}_62$  -  $\text{A}_1\text{B}_3\text{C}_62$  (A-Cu, Ag; B-In, Ga; C-S, Se): дисс. ... д-ра физ.-мат наук / А.Х. Матиев. — Ульяновск. УлГУ, 2005.
13. Aydinli A. Radiative donor-acceptor pair recombination in  $\text{TlInS}_2$  single crystals / A. Aydinli, N.M. Gasanly, I. Yilmaz [et al.] // *Semicond. Sci. Technol.* — 1999. — 14(7). — P. 599-603.
14. Damaskin I.A. Multi-quantum photoconductivity in  $\text{CaIn}_2\text{S}_4$  / I.A. Damaskin, S.L. Pashkin, S.I. Radautsan [et al.] // *Optoelectron.* — 1973. — 5(5). — P. 405-410.
15. Pankove J.J. Optical processes in Semiconductors / J.J. Pankove // Prentice-Hall, Englewood Cliffs. — 1975. — P. 8-185.
16. Yu P.Y. Fundamentals of Semiconductors / P.Y. Yu, M. Cardona. — Berlin: Spinger, 1995. — 348 p.
17. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. — М., Наука, 1978. — 204 с.
18. Матиева Т.А. Закономерности оптических и колебательных спектров твердых растворов  $\beta\text{-Tl}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InS}_2$  ( $0 \leq x \leq 0,015$ ): дисс. ... канд. физ.-мат наук / Т.А. Матиева. — Ульяновск, УлГУ, 2008. — 189 с.

## Список литературы на английском языке / References in English

1. Panich A.M. Electronic properties and phase transitions in low-dimensional semiconductors / A.M. Panich // *Phys.:Condens. Mattr.* — 2008. — 20(6). — P. 3-31.
2. Allakhverdiev K.R. Mamedov. Behavior of the layered crystals TlInS<sub>2</sub> and TlGaSe<sub>2</sub> near phase transitions in a static field / K.R. Allakhverdiev, N.D. Akhmed-zade, T.G. Mamedov // *Low. Temp. Phys.* — 2000. — Vol.26. — Iss. 1. — P. 56-61.
3. Seidov M.-H.Ju. Netradicionnye jeffekty termicheskoj pamjati nesoizmerimoj fazy v segnetoelektrikah-poluprovodnikah TlInS<sub>2</sub> [Non-traditional effects of thermal memory of the incommensurable phase in segnetoelectric semiconductors TlInS<sub>2</sub>] / M.-H.Ju. Seidov, R.A. Sulejmanov [et al.] // *Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]*. — 2009. — Vol. 51. — Iss. 3. — P. 533-542. [in Russian]
4. Guseinov G.D. On some properties of TlInS<sub>2</sub> (Se<sub>2</sub>,Te<sub>2</sub>) single crystals / G.D. Guseinov, E. Mooser, E.M. Kerimova [et al.] // *Physica Status Solidi.* — John Wiley & Sons, 1969. — 34(1). — P. 33-34.
5. Offergeld G.R. Semiconductive materials containingallium / G.R. Offergeld. — 1963.
6. Gusejnov G.D. Poisk i fizicheskie issledovaniya novyh poluprovodkovykh-analogov [Search and physical studies of new semiconductor analogues]. dis. ... PhD in Phys.-Math Sciences / G.D. Gusejnov. — Baku, 1969. [in Russian]
7. Sardarly R.M. Tip opticheskikh perehodov na kraju fundamental'nogo pogloshhenija kristallov TlGaSe<sub>2</sub> i TlInS<sub>2</sub>, podvergnutyh  $\gamma$ -oblucheniju [Type of optical transitions at the fundamental absorption edge of TlGaSe<sub>2</sub> and TlInS<sub>2</sub> crystals subjected to  $\gamma$ -irradiation] / R.M. Sardarly, F.T. Salmanov, N.A. Alieva [et al.] // *Optika i spektroskopija [Optics and Spectroscopy]*. — St. Petersburg, 2019. — 127(3). — P. 420-424. [in Russian]
8. El-Nahassa M.M. Optical and photoelectric properties of TlInS<sub>2</sub> layered single crystals / M.M. El-Nahassa, M.M. Sallamb, A.H.S. AbdAl-Wahab // *Current Applied Physics*. — 2009. — 9. — P. 311-316.
9. Kerimova Je.M. Opticheskie svojstva na kraju pogloshhenija monokristallov novyh poluprovodnikovyh soedinenij TlIn<sub>1-x</sub>CrxS<sub>2</sub> (x = 0,005; 0,01) [Optical properties at the absorption edge of single crystals of new semiconductor compounds TlIn<sub>1-x</sub>CrxS<sub>2</sub> (x = 0.005; 0.01)] / Je.M. Kerimova, A.I. Gasanov, A.K. Zamanova i dr. // *Materialy mezhd. konf. Optika poluprovodnikov [Proceedings of Int. Conf. Optics of Semiconductors.]*. — Ulyanovsk, 2006. — P. 21-23. [in Russian]
10. Kaabi Sabah Abed Daud F. Opticheskoe pogloshhenie sveta v legirovannykh kristallah TlGaSe<sub>2</sub> i TlInS<sub>2</sub> [Optical absorption of light in doped crystals TlGaSe<sub>2</sub> and TlInS<sub>2</sub>] / F. Kaabi Sabah Abed Daud, N.A. Drozdov, Al.V. Skripal' // *Sbornik statej sed'moj Vserossijskoj nauchnoj shkoly-seminara [Proceedings of the Seventh All-Russian Scientific School-Seminar]* / Ed. by Al.V. Skripal'. — Saratov, 2020. — 180 p. [in Russian]
11. Baltramejunas R. Ljuminescencija monokristallov pri lazernyh urovnjah vzbuzhdenija [Luminescence of single crystals at laser excitation levels] / R. Baltramejunas, A. Zhukauskas, N. Zejnalov [et al.] // *Fizika i tehnika poluprovodnikov [Physics and Technology of Semiconductors]*. — 1983. — 17(10). — P. 1898-1900. [in Russian]
12. Matiev A.H. Fazovye ravnovesija i jelektronno-opticheskie svojstva sistem TlV<sub>3</sub>S<sub>6</sub> -A1V<sub>3</sub>S<sub>6</sub> (A-Su, Ag; V-Ip, Ga; S-S, Se) [Phase equilibria and electron-optical properties of the systems TlB<sub>3</sub>C<sub>6</sub> -A1B<sub>3</sub>C<sub>6</sub> (A-Cu, Ag; B-In, Ga; C-S, Se)]: diss. ... *Physic-Mat. Sciences* / A.H. Matiev. — Ulyanovsk. UISU, 2005. [in Russian]
13. Aydinli A. Radiative donor-acceptor pair recombination in TlInS<sub>2</sub> single crystals / A. Aydinli, N.M. Gasanly, I. Yilmaz [et al.] // *Semicond. Sci.Technol.* — 1999. — 14(7). — P. 599-603.
14. Damaskin I.A. Multiquantum photoconductivity in CaIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> / I.A. Damaskin, S.L. Pashkin, S.I. Radautsan [et al.] // *Optoelectron.* — 1973. — 5(5). — P. 405-410.
15. Pankove J.J. Optical processes in Seviconductors / J.J. Pankove // *Prentice-Hall, Englewood Cliffs.* — 1975. — P. 8-185.
16. Yu P.Y. Fundamentals of Semiconductors / P.Y. Yu, M. Cardona. — Berlin: Spinger, 1995. — 348 p.
17. Kittel' Ch. Vvedenie v fiziku tverdogo tela [Introduction to solid state physics] / Ch. Kittel'. — M., Nauka, 1978. — 204 p. [in Russian]
18. Matieva T.A. Zakonomernosti opticheskikh im kolebatel'nykh spektrov tverdykh rastvorov  $\beta$ -Tl<sub>1-x</sub>CuxInS<sub>2</sub> (0 ≤ x ≤ 0, 015) [Regularities of optical and vibrational spectra of solid solutions  $\beta$ -Tl<sub>1-x</sub>CuxInS<sub>2</sub> (0 ≤ x ≤ 0, 015)]: diss. ... PhD in Physical and Mathematical Sciences / T.A. Matieva. — Ulyanovsk, UISU, 2008. — 189 p. [in Russian]