

# ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $TlInSe_2$

Бархалов Б.Ш.<sup>1</sup>, Нуруллаев Ю.Г.<sup>2</sup>, Вердиева Н.А.<sup>3</sup>, Джафаров М.Б.<sup>4</sup>  
(Республика Азербайджан) Email: Barkhalov1150@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Бархалов Бархал Шабан оглу - доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория твердотельной электроники,

Институт физики

Национальная академия наук Азербайджана;

<sup>2</sup>Нуруллаев Юсиф Гушу оглы - доктор физико-математических наук, профессор, кафедра общей физики,

Бакинский государственный университет,

г. Баку;

<sup>3</sup>Вердиева Нурана Алишир кызы – диссертант;

<sup>4</sup>Джафаров Мантиг Бахадур оглы – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра общей физики,

Гянджинский государственный университет,

г. Гянджа,

Республика Азербайджан

**Аннотация:** в настоящее время одними из материалов, ставшими объектом обширных исследований в области электроники, являются полупроводниковые соединения типа  $A^{III}B^{III}X_2^{VI}$  (где A-Tl; B-Ga, In; X-S, Se, Te) со слоистой и цепочечной структурой. Особенности химических связей и чувствительность к ионизирующим излучениям такого типа соединений обусловлены непарными валентными электронами. Одним из кристаллических материалов, входящих в класс соединений  $A^{III}B^{III}X_2^{VI}$  типа, является соединение  $TlInSe_2$ . Соединения типа  $TlInSe_2$  кристаллизуются в решетках со слоистой и цепочечной структурой. Полупроводниковые соединения, входящие в этот класс, обладают рядом интересных физических свойств, включая свойства сегнетоэлектрика-полупроводника, эффекты памяти и переключения и т.д. Высокая чувствительность этих дефектных кристаллов к ультрафиолетовому, видимому, инфракрасному, рентгеновскому и  $\gamma$ -лучам увеличивает интерес к их исследованию.

**Ключевые слова:** соединение  $TlInSe_2$ , ионизирующие излучения, цепочечная структура, эффекты памяти, локальные уровни, монополярная инжекция.

## EFFECT OF IONIZING RADIATION ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF $TlInSe_2$ CRYSTALS

Barkhalov B.Sh.<sup>1</sup>, Nurullaev Yu.G.<sup>2</sup>, Verdiyeva N.A.<sup>3</sup>, Jafarov M.B.<sup>4</sup>  
(Азербайджанская Республика)

<sup>1</sup>Barkhalov Barkhal Shaban – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, LABORATORY OF SOLID STATE ELECTRONICS, INSTITUTE OF PHYSICS

AZERBAIJAN NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES;

<sup>2</sup>Nurullayev Yusif Qushu - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, DEPARTMENT OF GENERAL PHYSICS, BAKU STATE UNIVERSITY, BAKU;

<sup>3</sup>Verdieva Nurana Alihsir – Dissertator;

<sup>4</sup>Jafarov Mantiq Bahadur – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, DEPARTMENT OF GENERAL PHYSICS,

GANDJA STATE UNIVERSITY,

GANDJA,

REPUBLIC OF AZERBAIJAN

**Abstract:** at present, one of the materials that have become the object of extensive research in the field of electronics are semiconductor compounds of the type  $A^{III}B^{III}X_2^{VI}$  (where A - Tl; B - Ga, In; X - S, Se, Te) with a layered and chain structure. The features of chemical bonds and the sensitivity to ionizing radiation of this type compounds are due to unpaired valence electrons. One of the crystalline materials related to the compounds of this is the  $TlInSe_2$ . Compounds of the  $TlInSe_2$  type crystallize in lattices with a layered and chain structure. Semiconductor compounds in this class have a number of interesting physical properties, including the properties of a ferroelectric semiconductor, memory and switching effects, and so on. The high sensitivity of these defective crystals to ultraviolet, apparently infrared, X-ray and  $\gamma$ -rays increases the interest in their investigation.

**Keywords:** *TlInSe<sub>2</sub> compound, ionizing radiation, chain structure, memory effects, local levels, monopolar injection*

УДК 537.9/53.09

Развитие электронной техники, ядерной энергетики и нанотехнологии обуславливают поиск новых кристаллических материалов, обладающих широким спектром физических параметров. Достижения полупроводниковой и квантовой электроники неразрывно связаны с поиском и с детальным исследованием новых сложных полупроводниковых материалов, на базе которых развивается приборостроение, вычислительная техника, средства управления, автоматизации и другие отрасли промышленности [1].

Среди полупроводниковых кристаллов особое место занимают слоистые и цепочные полупроводники с присущей им сильной анизотропией физических свойств вдоль различных кристаллографических направлений. Представителями этой группы полупроводников являются соединений типа  $TIA^{III}B_2^{VI}$  (где  $A^{III}$  - Ga, In, Ln, Tl;  $B^{VI}$  - S, Se, Te). Эти слоисто-цепочные монокристаллы являются перспективными материалами для изготовления фотоэлектрических преобразователей, анализаторов спектра, тензорезисторов и рентгенодетекторов. Для расширения класса этих полупроводников и придания им новых физических свойств оказалось целесообразным легирование их различными примесями, интеркалирование, редкоземельными элементами. Одной из таких задач является получение совершенных полупроводниковых соединений, чувствительных к ионизирующему излучению и не теряющих качества в широком температурном диапазоне [2].

Одним из кристаллических материалов, входящих в класс соединений типа  $TIA^{III}B_2^{VI}$  обладающих фундаментальными свойствами и вызывающих практический интерес, является соединение *TlInSe<sub>2</sub>*.

Для исследования электрических свойств соединения *TlInSe<sub>2</sub>* были получены монокристаллы, выращенные видоизмененным методом Бриджмена-Стокбаргера в специально изготовленных ампулах из плавленого кварца. Внутренние стенки ампулы были покрыты слоем графита. Ампулы помещали в верхней высокотемпературной зоне устанавливали на 25-30 К выше температуры плавления ( $T_{пл}$ ) вещества, а температура низкотемпературной зоны была на 30-40 К ниже  $T_{пл}$ . Между этими двумя зонами имела переходная зона с градиентом температуры  $\sim 200$  К/см. Ампула с веществом с помощью специального механизма вводилась вдоль оси трубчатой печи в верхнюю высокотемпературную зону и после 15-20 часов стабилизации режима перемещалась вниз со скоростью 0,8 мм/час. Полученные таким образом слитки *TlInSe<sub>2</sub>* были составлены из ориентированных вдоль ампулы длинных (10-15 см) тончайших волокон образующих монокристалл. Синтез и выращивание монокристаллов соединения *TlInSe<sub>2</sub>* были проведены нами по аналогичной методике.

Соединение типа *TlInSe<sub>2</sub>* кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами элементарной ячейки  $a=8,03 \text{ \AA}$ ,  $c=6,84 \text{ \AA}$ . Рентгеноструктурные исследования показывают, что соединения *TlInSe<sub>2</sub>* обладают устойчивой цепочечной структурой и кристаллизуются в структуре *TlSe*. Атомы таллия в структуре находятся в окружении восьми атомов селена, а атомы индия окружены четырьмя атомы селена (рис. 1)

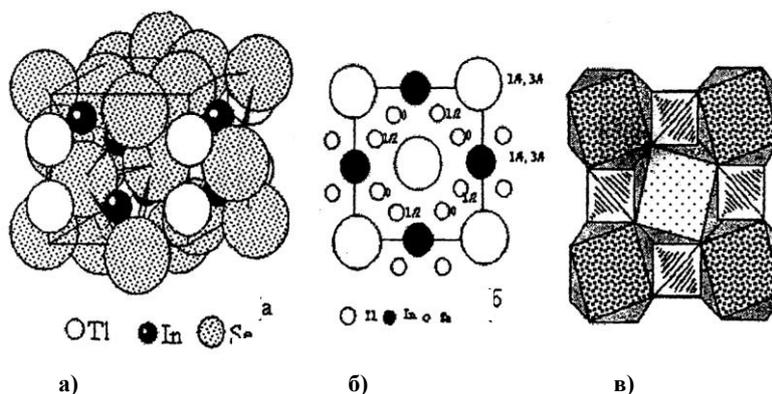


Рис. 1. Кристаллическая решетка *TlInSe<sub>2</sub>* (а), проекции атомов на базисной плоскости (б) и полиэдрах (в)

Кратчайшие межатомные расстояния для отдельного координационного многогранника ячейки, рассчитанные по соответствующим координатам атомов, составляют, в тетраэдрах  $In-Se \rightarrow 2,57 \text{ \AA}$ ,  $Se-Se \rightarrow 4,2 \text{ \AA}$ .

Различие в концентрации распределения дефектов ( $10^{16}$ - $10^{17}$  см<sup>-3</sup>) в разных направлениях относительно оси "с" вызывает анизотропию физических и химических свойств кристалла. Природа образованных в кристалле дефектов, их влияние на электрические, оптические и фотоэлектрические свойства всегда находятся в центре внимания. С этой точки зрения для исследования этих механизмов важно получать монокристаллы с совершенной структурой и исследовать их физические свойства при разных внешних условиях.

В работе монокристаллы  $TlInSe_2$  получены методом направленной кристаллизации в специальном температурном режиме. В соединениях типа  $A^{III}B^{III}X_2^{VI}$  особенности химической связи и электронных свойств образуются за счет неспаренных валентных электронов. Полученные монокристаллы имеют тетрагональную структуру и параметров решетки составляют:  $a = 8.0750 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.8470 \text{ \AA}$ . Тип проводимости кристаллов определяли по знаку термо-э.д.с. и было установлено, что  $TlInSe_2$  обладает проводимостью  $p$ -типа. Определенная из электропроводности и эффекта Холла концентрация свободных носителей заряда удельная электропроводность составляет, соответственно,  $2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> и  $10^3$ - $10^7$  Ом·см. Размеры образцов, использованных для исследования составляли  $0,3 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$ . Измерения проводились в специальном металлическом криостате в температурном интервале 80-600 К.

Целью исследования являлось установление влияния  $\gamma$ -квантов на токопрохождение в монокристаллах  $TlInSe_2$  и на процесс заполнения и опустошения локальных уровней в кристаллах.

Образцы после начальных измерений помещали в кварцевую ампулу и затем после откачки и запаивания помещали в камеру  $\gamma$ -облучения с источником  $Co^{60}$ . Доза облучения составляла от 50 до 100 *крад*. Исследования показали, что темновая вольт-амперная характеристика (ВАХ) монокристаллов  $p$ - $TlInSe_2$  в широком интервале температур и приложенных внешних электрических полей описывается степенной функцией, свойственной токам, ограниченным пространственным зарядом. Анализ полученных результатов показал, что в монокристаллах  $p$ - $TlInSe_2$  процессы взаимодействия инжектированных носителей заряда с мелкими уровнями захвата, их транспорта и рекомбинации происходит в присутствии дефектов вакансионного типа с высокой концентрацией. Это находит свое выражение в том, что в высоких электрических полях температурная зависимость и полученные результаты не согласуются с теоретическими положениями. При изучении вольт-амперных характеристик монокристаллов  $p$ - $TlInSe_2$  при комнатной температуре и напряженности электрического поля в интервале  $10$ - $10^3$  В/см найдено, что они в линейной и суперлинейной области подчиняются закону  $I \sim U^n$ . В указанном интервале значение степени  $n$  меняется в интервале  $1 \div 4$  (рис. 2, *кривая 1*). На I участке ВАХ наблюдается закон Ома, на II участке соблюдается квадратичный закон ( $I \sim U^2$ ), а на III участке с увеличением приложенного напряжения наблюдается резкий рост тока. Полученные результаты были проанализированы на основе теорий инжекционных токов и активированной проводимости в твердых телах [3].

Исследования показали, что вольт-амперные характеристики монокристаллов  $TlInSe_2$  подчиняются теории Ламперта и определяются токами, ограниченными пространственным зарядом. Из теории Ламперта известно, резкое изменение тока в высоких электрических полях может происходить в результате ионизации центров захвата под действием электрического поля. Энергия ионизации центров захвата также зависит от внешнего электрического поля:

$$\Delta F = kT \cdot \ln \frac{U_M}{U_{1-2}}, \quad (1)$$

где  $U_M$  - максимальное значение напряжения, приложенного к образцу,  $U_{1-2}$  – напряжение перехода от омической области к квадратичной области в ВАХ.

Анализ полученных результатов показывает, что резкое увеличение тока в электрическом поле  $E > 10^3$  В/см связано с увеличением концентрации дополнительных носителей заряда и связано с возникновением ионизации под действием сильного электрического поля. Полученные результаты согласуются с теорией Френкеля [4].

Из исследований ВАХ монокристаллов  $TlInSe_2$  установлено, что механизм токопрохождения при низких значениях электрического поля ( $E < 10^3$  В/см) связано с монополярной инжекцией, ограниченной пространственным зарядом, а в области с высоких полей ( $E > 10^3$  В/см) – процессом ионизации уровней захвата под воздействием сильного электрического поля [5]. Для выяснения механизма влияния радиационных дефектов на связь инжекционных токов с заполнением и опустошением локальных энергетических уровней в монокристаллах  $TlInSe_2$  исследованные исходные образцы комнатной температуре облучались при  $\gamma$ -лучами от источника  $Co^{60}$ .

ВАХ облученных образцов снимались при разных температурах и электрических полях в интервале  $10 \div 10^3$  В/см. Было установлено, что при значениях поглощенной дозы  $\gamma$ -квантов 50 *крад* и напряженности электрического поля  $E < 10^2$  В/см значение темнового тока уменьшается по сравнению с исходным значением до облучения, а значение напряжения перехода от омической области к квадратичной увеличивается. Это, в свою очередь, смещает омическую область в ВАХ в область высоких

напряжений. Уменьшение концентрации свободных носителей ( $p$ ) при дозе облучения 50 *крад* связано с образованием донорных уровней в кристалле, что приводит к уменьшению разности энергий между уровнями акцептора и донора.

На рис. 2 показаны ВАХ при температуре 300 К для необлученной и облученной  $\gamma$ -квантами 50 *крад* структуры  $Ag-TlInSe_2-Ag$ . На рисунке кривая 1 относится к необлученному, а кривые 2 и 3 - облученному образцу после 24 часа и 240 часов после облучения. Вольт-амперная характеристика облученного образца  $TlInSe_2$  (кривая 2) сначала линейно растет примерно до 35 В, затем до 50 В сила тока уменьшается до минимального значения, а далее быстро увеличивается с напряжением. Установлено, что после облучения со временем ВАХ сдвигаются влево и через 240 часов приближаются к характеристике необлученного образца (кривая 3).

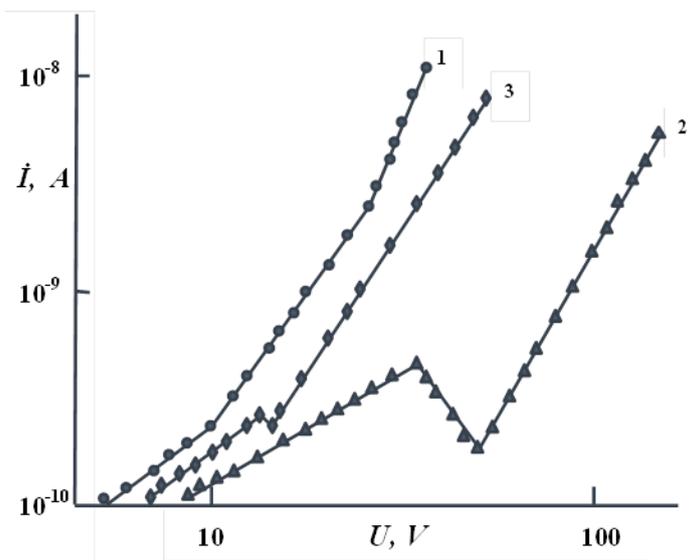


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структуры  $Ag-TlInSe_2-Ag$  (1 - необлученная, 2, 3 - после 24 и 240 часов облучения, соответственно)

Из графических зависимостей видно, что по мере увеличения напряженности внешнего электрического поля вероятность захвата электронов возрастает, а при определенном значении поля наблюдается не квадратичная, а  $N$ -образная зависимость. Такая зависимость тока от напряжения указывает на постепенное снижение тока в процессе образования доменов в образце. Такая необычная зависимость наблюдается в сильно компенсированных полупроводниках с глубокими центрами захвата. Экспериментальные и теоретические данные показывают, что в отличие от необлученных кристаллов, в облученных  $\gamma$ -квантами кристаллах возникают полярные домены, что приводит к появлению отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперной характеристике. В очень сильных электрических полях за счет инжектированных в кристалл из контактов носителей заряда на вольт-амперной характеристике отрицательная дифференциальная зависимость сменяется квадратичной зависимостью. Из ВАХ видно, что в облученных  $\gamma$ -квантами монокристаллах  $TlInSe_2$  значение отрицательного дифференциального сопротивления со временем уменьшается и через 10 дней полностью исчезает. Это указывает на то, что структурные дефекты, созданные под действием  $\gamma$ -квантов в облученных дозой 50 *крад* монокристаллах  $TlInSe_2$ , неустойчивы.

В результате проведенных исследований установлено, что в квадратичной области ВАХ облученных монокристаллов  $TlInSe_2$  перенос носителей заряда в полях  $E < 10^2$  В/см, как и в исходных кристаллах, связано с монополярной инжекцией, и с увеличением дозы облучения растет скорость заполнения и опустошения ловушек. А термополевая ионизация, наблюдаемая в области резкого роста тока, обусловлена воздействием  $\gamma$ -квантов и наблюдается в сильных электрических полях ( $E > 10^3$  В/см). Это связано с увеличением концентрации донорных центров в результате облучения. Согласно теории Френкеля, энергия ионизации носителей заряда в зависимости от величины электрического поля изменяется в соответствии с законом  $2e(eE/\epsilon)^{1/2}$  [5, 6]. Исходя из полученных экспериментальных результатов можно сказать, что дефекты, образующиеся в монокристаллах  $TlInSe_2$  в результате воздействия  $\gamma$ -квантов, по своей природе сходны с первоначальными дефектами и являются результатом радиационных процессов.

Таким образом, при облучении образцов  $TlInSe_2$   $\gamma$ -квантами возникают радиационно-стимулирующие процессы, связанные с активацией миграции собственных дефектов. Управление этими процессами позволяет целенаправленно изменять электрические параметры кристаллов [7].

### *Список литературы / References*

1. *Абасова А.З., Мадатов Р.С., Стафеев В.И.* Радиационно-стимулированные процессы в халькогенидных структурах. Баку: Элм, 2010. 352 с.
2. *Абасова А.З., Мадатов Р.С., Наджафов А.И., Газанфаров М.Р.* Влияние  $\gamma$ -облучения на электрические и фотоэлектрические свойства гетерепереходов р-TlInSe<sub>2</sub>/n-TlSe<Ge> // Прикладная физика. № 10. С. 2011-2018.
3. *Годжаев Э.М., Зарбалиев М.М., Алиев С.А.* Электрофизические свойства TlInTe<sub>2</sub>. // Неорганические материалы, 1983. Т. 19. № 3, 1983. С. 374-375.
4. *Мадатов Р.С., Наджафов А.И., Тагиев Т.Б., Газанфаров М.Р.* Особенности механизма токопрохождения в кристаллах TlInSe. // Электронная обработка материалов, 2010. № 4. С. 120-125.
5. *Сардарлы Р.М., Самедов О.А., Абдуллаев А.П. и др.* Электропроводимость  $\gamma$ -облученных кристаллов TlGaTe<sub>2</sub> // Известия НАНА. Сер. Физ.-мат. и техн. Наук, 2009. № 2. С. 25-31.
6. *Ламперт М.А., Марк П.* Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 416 с.
7. *Сардарлы Р.М., Самедов О.А., Абдуллаев А.П., Салманов Ф.Т., Алекперов О.З., Гусейнов Э.К., Алыева Н.А.* Суперионная проводимость, эффекты переключения и памяти в кристаллах TlInSe<sub>2</sub> и TlInTe<sub>2</sub> //ФТП, 2011. Т.45. В. 11. С. 1441-1445.