

ИНЖЕКЦИОННЫЕ ТОКИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ХАЛКОГЕНИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТИПА LnIn_3S_6

Гахраманов Н.Ф.¹, Бархалов Б.Ш.², Нуруллаев Ю.Г.³, Рагимов Р.Ш.⁴
Email: Gahramanov1173@scientifictext.ru

¹Гахраманов Надир Фаррух оглу – доктор физико-математических наук, профессор,
кафедра общей физики и методики преподавания физики,
Бакинский государственный университет, г. Баку;

²Бархалов Бархал Шабан оглу - доктор физико-математических наук, профессор,
лаборатория твердотельной электроники,
Институт физики

Национальная Академия наук Азербайджана, г. Баку,
кафедра физики твердого тела и полупроводников,
Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит,;

³Нуруллаев Юсиф Гушу оглу - доктор физико-математических наук, профессор,
кафедра общей физики и методики преподавания физики,
Бакинский государственный университет, г. Баку,
кафедра физики твердого тела и полупроводников,
Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит;

⁴Рагимов Рагим Шукюр оглу - кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра общей физики и методики преподавания физики,
Бакинский государственный университет, г. Баку,
Республика Азербайджан

Аннотация: в настоящей работе исследованы вольт-амперные характеристики и температурная зависимость электропроводности соединения LnIn_3S_6 . Данные по измерению температурной зависимости электропроводности показывают, что указанное соединение является примесным полупроводником. Примесная проводимость для LnIn_3S_6 наблюдается в интервале температур 300÷500 К, выше этой температуры наступает собственная проводимость. Для определения механизма переноса носителей тока в области сильных электрических полей изучены инжекционные токи в полупроводниках типа LnIn_3S_6 . Исследованиями инжекционных токов в монокристаллах халькогенидов редкоземельных элементов типа LnIn_3S_6 , установлено, что в этих соединениях механизм прохождения тока в области нелинейности ВАХ обусловлен монополярной инжекцией электронов при экспоненциальном распределении ловушечных уровней.

Ключевые слова: дефектные кристаллы, халькогаллаты, халькоиндаты, электронные свойства, редкоземельный элемент, микроэлектроника, инжекционный ток.

INJECTION CURRENTS IN SINGLE CRYSTALS OF CHALCOGENIDES OF RARE EARTH ELEMENTS OF LnIn_3S_6 TYPE

Gahramanov N.F.¹, Barkhalov B.Sh.², Nurullayev Yu.G.³, Rahimov R.Sh.⁴

¹Gahramanov Nadir Farruh oglu- Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
DEPARTMENT OF GENERAL PHYSICS AND METHODS OF TEACHING PHYSICS,
BAKU STATE UNIVERSITY;

²Barkhalov Barkhal Shaban oglu - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
LABORATORY OF SOLID STATE ELECTRONICS,
INSTITUTE OF PHYSICS,

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF AZERBAIJAN, BAKU,
DEPARTMENT OF SOLID STATE AND SEMICONDUCTOR PHYSICS,
SUMGAI STATE UNIVERSITY, SUMGAI;

³Nurullayev Yusif Gushu oglu - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
DEPARTMENT OF GENERAL PHYSICS AND METHODS OF TEACHING PHYSICS,
BAKU STATE UNIVERSITY,

DEPARTMENT OF SOLID STATE AND SEMICONDUCTOR PHYSICS,
SUMGAI STATE UNIVERSITY, SUMGAI

⁴Rahimov Rahim Shukyur oglu – PhD in Physics, Assistant-Professor,
DEPARTMENT OF GENERAL PHYSICS AND METHODS OF TEACHING PHYSICS,
BAKU STATE UNIVERSITY, BAKU,
REPUBLIC OF AZERBAIJAN

Abstract: in the present paper current-voltage characteristics and temperature dependence of electrical conductivity of said compound have been investigated. Data on measurement of temperature dependence of electrical conductivity show that the compound LnIn_3S_6 is an impurity semiconductor. The impurity conductivity

for $LnIn_3S_6$ is observed in the temperature range 300-500 K, above this temperature intrinsic conductivity occurs. To determine the mechanism for transport of current carriers in the strong electric fields, injection currents in semiconductors of the $LnIn_3S_6$ type are studied. Studies of injection currents in single crystals of chalcogenides of rare-earth elements of $LnIn_3S_6$ type have shown that in these compounds the mechanism of current passage in the region of non-linearity of the current-voltage characteristic is due to monopolar injection of electrons with an exponential distribution of trapping levels.

Keywords: defective crystals, chalogallates, chalcoindates, electronic properties, rare-earth element, microelectronics, injection current.

УДК 53.04

Полупроводники типа $A^{III}B^{III}X^{VI}_3$ благодаря специфическими особенностям их кристаллических структур проявили ряд уникальных свойств, что вызвало в дальнейшем большой интерес к расширению круга такого класса материалов и поиска их новых кристаллоструктурных аналогов [1-3]. Одним из кристаллических материалов, входящих в класс соединений $A^{III}B^{III}X^{VI}_3$ типа, обладающим фундаментальными свойствами и вызывающим практический интерес, является соединение $LnIn_3S_6$.

Соединение $LnIn_3S_6$ является высокоомным полупроводником с большой шириной запрещенной зоны. Порядок их удельной электропроводности при комнатной температуре составляет 10^8 - 10^{10} Ом·см. Ширина запрещенной зоны меняется для сульфогаллатов в интервале 1,8÷2,6 эВ, для селенагаллатов - 1,75÷1,9 эВ [4-5].

Изучением электрофизических свойств некоторых сульфоселеноиндатов редкоземельных элементов (РЗЭ) установлено, что их удельное электросопротивление, как и у халькогаллатов РЗЭ, при увеличении температуры уменьшается, т.е. имеет также полупроводниковый характер. Порядок их удельного сопротивления меньше, чем у халькогаллатов РЗЭ и при комнатной температуре равен 10^5 - 10^6 Ом·см. Ширина запрещенной зоны при увеличении атомного номера РЗЭ увеличивается, а при переходе от сульфогаллатов к селеноиндатам соответственно уменьшается от 1,2÷1,8 эВ до 1,6÷1,4 эВ [5-6].

Исследованию термоэлектрических свойств халькогаллатов РЗЭ цериевой подгруппы посвящены работы [1, 5, 7]. Все исследованные образцы обладали дырочной проводимостью. Наиболее перспективными материалами являются соединения, образующиеся в тройных системах с участием лантаноидов индия и серы. Согласно существующим литературным данным [1, 7-8] самым распространенным типом соединения в системе $Ln-In-S$ является $LnInS_3$.

Нами синтезированы кристаллы $LnInS_3$ взаимодействием исходных элементов при температуре 900-950°C и проведено детальное рентгенографическое исследование полученного соединения. Из системы $Ln_2S_3 - In_2S_3$ при стехиометрии $Ln_2S_3 : In_2S_3 = 3:1$ выделен еще один класс соединений типа Ln_3InS_6 , где $Ln - Dy, Ho, Er$ [8-9].

Тиоиндаты цериевой подгруппы характеризуются кристаллической структурой ромбической сингонии [4, 7]. Данные химического анализа показывают, что состав полученных тиоиндатов соответствует формуле $LnIn_3S_6$. В настоящей работе исследованы вольт-амперные характеристики и температурная зависимость электропроводности указанного соединения.

Данные по измерению температурной зависимости электропроводности тиоиндатов РЗЭ типа $LnIn_3S_6$ показывают, что соединения являются примесными полупроводниками. Примесная проводимость для $LnIn_3S_6$ наблюдается в интервале температур 300÷500 К, выше этой температуры наступает собственная проводимость. Термическая ширина запрещенной зоны от тиоиндата лантана до тиоиндата лютетия, вычисленная в области собственной проводимости, изменяется в пределах 1,05÷1,3 эВ.

Для определения механизма переноса носителей тока в области сильных электрических полей нами изучены инжекционные токи в полупроводниках типа $LnIn_3S_6$.

Информацию о наличии и распределении локализованных состояний в запрещенной зоне полупроводников дает изучение инжекционных токов, ограниченных пространственным зарядом. В работе Ламперта [10] было показано, что ВАХ полупроводников с омическими контактами при малых напряжениях подчиняется закону Ома.

$$J = en\mu \frac{U}{L} \quad (1)$$

где U - приложенное к образцу напряжение, n - концентрация, μ - подвижность носителей тока. В полупроводниках имеются равновесные свободные носители заряда, которые определяются всей совокупностью дискретных уровней. При дальнейшем увеличении поля даже при комнатной

температуре омический контакт становится инжектирующим, который является бесконечным резервуаром основных носителей. Увеличение напряженности электрического поля, а следовательно концентрации инжектируемых из омического контакта носителей тока приводит к смещению равновесия между заполненными и незаполненными ловушками.

При определенном значении напряженности электрического поля все ловушки оказываются заполненными, и система заполненных ловушек образует неподвижный и зафиксированный в пространстве объемный заряд. В противоположность этому, пространственный заряд свободных носителей является подвижным и обусловленный ими ток возрастает пропорционально U^2 по закону Чайльда-Ленгмюра [11].

$$J = \frac{10^{-13} \mu \varepsilon U^2}{L^3}, \quad (2)$$

где U - приложенное напряжение, μ - подвижность носителей тока, L - расстояние между электродами и ε - диэлектрическая проницаемость вещества.

На рис. 1 представлены темновые ВАХ структуры $In - Dy In_3S_6 - In$ при различных температурах.

На вольт-амперной характеристике проявляются следующие участки: омический $I \approx U$, "ловушечный" квадратичный $I \approx U^2$ и область резкого роста тока $I \approx U^n$, при этом $n > 2$.

Как видно из рис. 1, в области малых напряжений ВАХ линейны, что указывает на омичность использованных контактов, т.е. ток линейно зависит от напряжения:

$$J = en_0 \mu \frac{U}{L}, \quad (3)$$

где U - напряжение, приложенное к образцу, n_0 - равновесная бестоковая концентрация электронов, μ - подвижность носителей заряда.

Равновесная концентрация носителей тока для омического участка определяется по формуле

$$n_0 = \frac{IL}{e\mu US}. \quad (4)$$

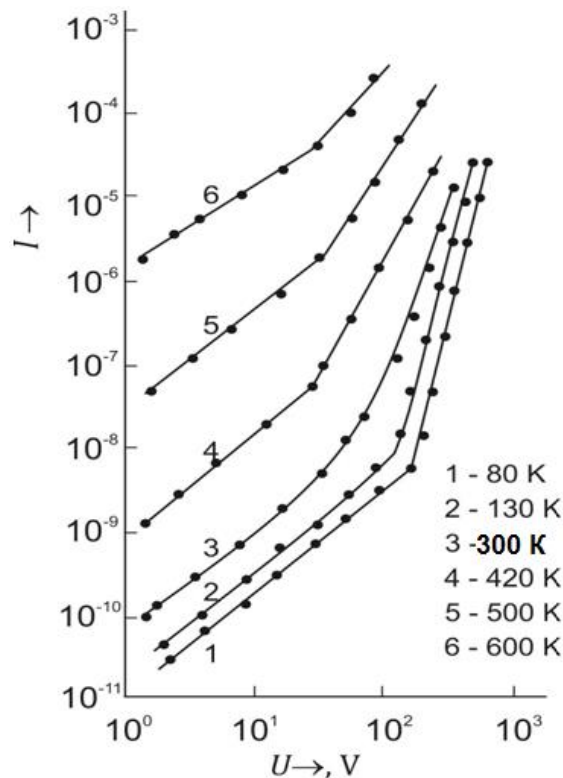


Рис. 1. Темновые ВАХ структуры $In - Dy In_3S_6 - In$

Во всех исследованных образцах равновесная концентрация носителей тока с ростом температуры увеличивается. По-видимому, это связано с термической генерацией свободных носителей тока. После омической области на вольт-амперной характеристике появляется “ловушечный” квадратичный участок, переходящий в область резкого роста тока. Из рис. 1 видно, что с уменьшением температуры степень резкого роста тока увеличивается при постоянстве характеристической температуры. Такая форма ВАХ характерна для случая токов, ограниченных пространственным зарядом при наличии экспоненциально распределенных ловушек [10].

$$n(E) = \frac{N_t}{kT_C} \exp\left(\frac{E}{kT_C}\right), \quad (5)$$

где $n(E)$ – концентрация уровней прилипания в единичном интервале энергии, T_C – характеристическая температура, определяющая распределение локальных центров, E – энергия, измеренная вниз от дна зоны проводимости, N_t – концентрация ловушек.

Доля свободных носителей от полного количества зарядов характеризуется фактором захвата (или степенью заполнения ловушек) θ и определяется следующим образом.

$$\theta = \frac{N_C}{N_t} \exp\left(-\frac{E_p}{kT}\right), \quad (6)$$

где N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, N_t – концентрация ловушек.

Для исследованных образцов мы определили эффективную плотность состояний N_C , подвижность μ и концентрации ловушек N_t по методу Ламперта, описанного в работе [11] и получили следующие значения:

$$N_C = 3,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}, \quad N_t = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}, \quad \mu = 0,36 \cdot 10^{17} \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с} \quad (7)$$

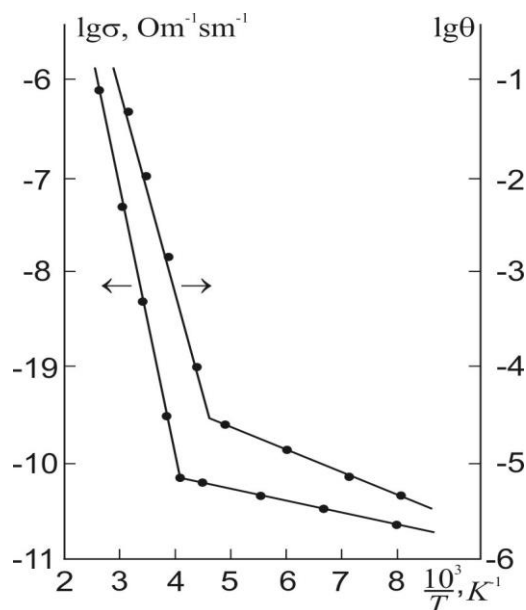


Рис. 2. Температурные зависимости проводимости и фактора захвата θ для монокристаллов $DyIn_3S_6$

На рис. 2 показаны температурные зависимости проводимости и фактора захвата монокристаллов $DyIn_3S_6$. Из зависимости $\theta(T)$ и $\sigma(T)$ для $DyIn_3S_6$, которые обнаруживают по две прямолинейные области, следует наличие двух локальных состояний в $DyIn_3S_6$ с энергиями 0,8; 0,034 и 0,61, 0,04, соответственно. Видно, что найденные значения энергий активации из анализа ВАХ на основании ТОПЗ и из зависимости $\sigma(T)$ не идентичны. Полученные данные свидетельствуют о том, что монокристаллы $DyIn_3S_6$ являются сильно компенсированными полупроводниками.

Для выявления особенностей инжекционных токов в соединениях типа $LnIn_3S_6$ исследованы также вольтамперные характеристики структур $In - DyIn_3S_6 - In$ и $In - NdIn_3S_6 - In$. На рис. 3 (а, б) представлены темновые ВАХ этих структур при различных температурах.

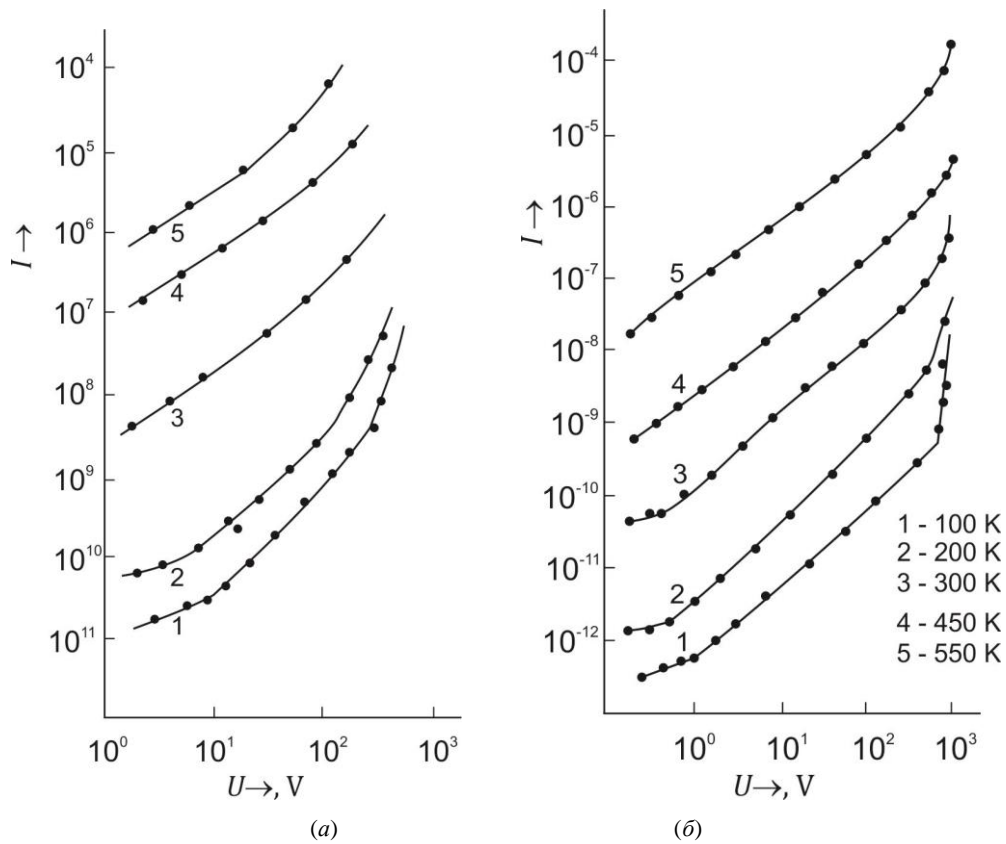


Рис. 3. Темновые ВАХ структур $In - DyIn_3S_6 - In$ (а) и $In - NdIn_3S_6 - In$ (б) при различных температурах

Видно, что при низких напряжениях выполняется закон Ома. Вслед за омическим участком следует квадратичный участок и завершается резким ростом тока. С уменьшением температуры напряжение перехода от квадратичной зависимости к участку резкого роста тока смещается в сторону высоких напряжений и степень резкого роста тока увеличивается.

На рис. 4 представлены температурные зависимости электропроводности кристаллов $DyIn_3S_6$ (кривая 1) и $NdIn_3S_6$ (кривая 2).

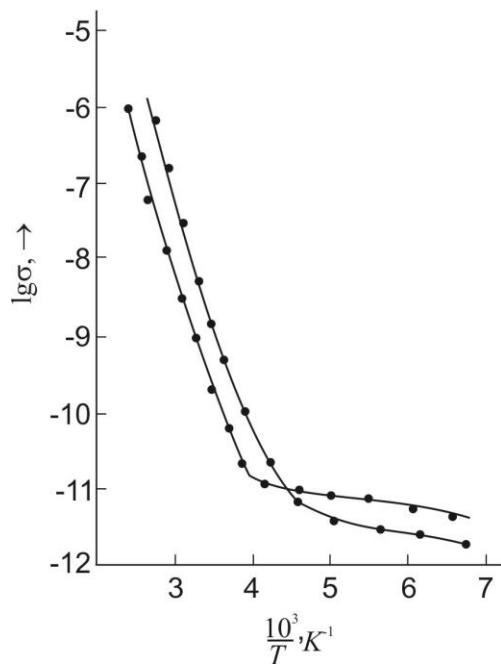


Рис. 4. Температурные зависимости электропроводности кристаллов $DyIn_3S_6$ (кривая 1) и $NdIn_3S_6$ (кривая 2)

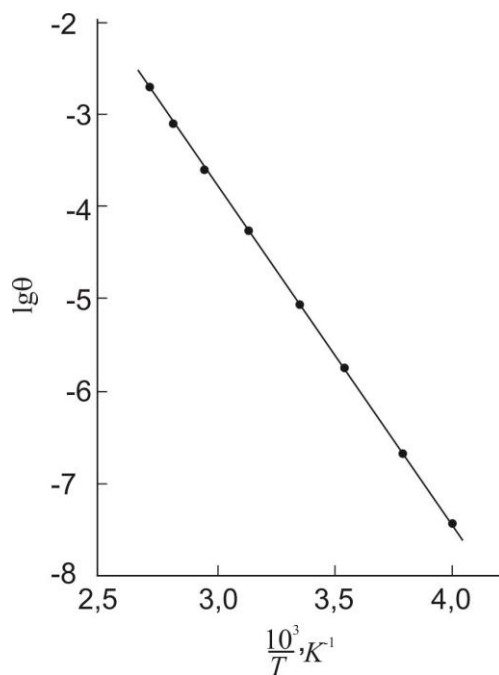


Рис. 5. Температурная зависимость фактора захвата $\theta(T)$ для $DyIn_3S_6$

Видно, что несмотря на отличие численных значений электропроводности в области 200÷400 К, наклон прямых в этой области температур для обоих кристаллов почти один и тот же. Определенная из этих наклонов энергия активации составляет 0,8 эВ. В области температур 150÷250 К электропроводность почти не зависит от температуры. Из наклонов $\sigma(T)$ в области температур 150÷250 К выявлены уровни с энергией 0,06 и 0,08 эВ, для $DyIn_3S_6$ и $NdIn_3S_6$, соответственно. На рис. 5 представлена температурная зависимость фактора захвата $\theta(T)$ для $DyIn_3S_6$. Такая зависимость также была получена и для $NdIn_3S_6$. Концентрация ловушек N_t была оценена по отрезкам, отсекаемым на оси абсцисс в координатах $tg\theta \approx 10^3/T$ и имеет значение $N_t \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$,

Таким образом, установлено, что в соединениях типа $LnIn_3S_6$ механизм прохождения тока в области нелинейности ВАХ обусловлен монополярной инжекцией электронов при экспоненциальном распределении ловушечных уровней.

Список литературы / References

1. Керимова Э.М. Кристаллофизика низкоразмерных халькогенидов. Баку: Элм, 2012. 708 с.
2. Абасова А.З., Мадатов Р.С., Стафеев В.И. Радиационно-стимулированные процессы в халькогенидных структурах. Баку: Элм, 2010. 352 с.
3. Gustinov G.D., Rasulov A.I., Kerimova E.M. On heat conductivity of $A^{III}B^{III}C^{VI}_2$ type semiconductors // Phys.Lett., 1996. V. 22. № 1. P. 562.
4. Мустафаева С.Н., Керимова Э.М. Перенос заряда в $TiFeS_2$, $TiFeSe_2$ // ФТТ, 2000. Т. 42. № 12. С. 2132-2133.
5. Абрикосов Н.Х. и др. Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе. М.: Наука, 2005. 220 с.
6. Рустамов П.Г. Выращивание монокристаллов некоторых сульфидов галлия из газовой фазы // Изв. АН СССР. Неорг. Материалы, 1973. Т. 3. № 3. С. 575-577.
7. Рустамов П.Г., Алиев О.М. Тройные халькогениды редкоземельных элементов, Баку: Элм, 1981. 226 с.
8. Гиваргизов Е.И., Гринберг С.А. Рост кристаллов. М.: Наука, 2002. 225 с.
9. Diczmal M.L. Pawlak L. Magnetic properties of $TlLnS_2$ compounds (Ln-Dy, Tb and Ho) // J. Alloys and Comp., 1995. V. 219. P. 189-192.
10. Ламперт М.А. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 200 с.
11. Гутман Ф., Лайонс Л. Органические полупроводники. М. «Мир», 1970. 698 с.