

УДК 621.315.592

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ДИСПРОЗИЕМ НА ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В КРИСТАЛЛАХ МОНОСЕЛЕНИДА ИНДИЯ****Р.М.РЗАЕВ***Бакинский Государственный Университет**r.rzayev@aseu.az*

*Исследованы зависимости подвижности носителей тока от исходного темнового удельного сопротивления ( $\rho_{TO}$ ) и уровня легирования атомами диспрозия ( $N_{Dy}$ ), а также влияние  $\rho_{TO}$  и  $N_{Dy}$  на температурную зависимость подвижности носителей тока в кристаллах моноселенида индия.*

*Показано, что полученные при этом экспериментальные результаты можно объяснить на основе частичной неупорядоченности изучаемого материала и немонотонной зависимостью степени неупорядоченности его от уровня легирования диспрозием.*

**Ключевые слова:** легирование, подвижность носителей тока, неупорядоченность, темновая проводимость, дрейфовый барьер.

Монокристаллы селенида индия (InSe) обладают не только интересными научными и многообещающими практическими свойствами, но не редко проявляют и противоречивые, а также довольно «загадочные», с точки зрения теории кристаллических полупроводников, результаты. К числу таких результатов можно отнести также данные о подвижности носителей тока в этом материале. С первых дней открытия InSe, прежде всего, начались исследования его электрических свойств, в частности, зависимости коэффициента Холла (или концентрации носителей тока), электропроводности и подвижности носителей тока, но в большинстве случаев полученные в различных работах значения для этих физических параметров, а также других параметров (ширины запрещенной зоны, энергетической глубины залегания примесных уровней), оцененных по их экспериментальным значениям, оказались разноречивыми. Особенно значительно (иногда на несколько порядков) отличались значения подвижности носителей тока ( $\mu$ ) в образцах, срезанных даже из различных

частей одного и того же слитка. Оказалось, что найденные в различных образцах, а также в различных работах значения  $\mu$  при 77К составляют  $10^{-1} \div 2 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , однако причина этого расхождения до сих пор не выяснена, хотя она необходима для расширения возможностей практического применения кристаллов моноселенида индия и важна для развития физики слоистых соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$ , к которым относится  $\text{InSe}$ , а также представляет значительный интерес для физики частично-неупорядоченных кристаллических полупроводников вообще.

В ранних работах [1-3] показано, что путем легирования кристаллов моноселенида индия атомами редкоземельного элемента диспрозия ( $\text{Dy}$ ) с небольшим содержанием ( $N_{\text{Dy}} \leq 10^{-1}$  ат.%), степень неупорядоченности их меняется в зависимости от  $N_{\text{Dy}}$ . Этот вывод хорошо оправдывает себя при изучении фотоэлектрических свойств монокристаллов  $\text{InSe}$  и полученные при этом результаты удовлетворительно объясняются в рамках двухбарьерной энергетической модели частично-неупорядоченного полупроводника, в свободных энергетических зонах которого из-за хаотической флуктуации потенциала существуют рекомбинационные (РБ) и дрейфовые барьеры (ДБ) [4]. Причем РБ в основном определяют ход рекомбинационных процессов неравновесных носителей тока в исследуемом образце и в кристаллах моноселенида индия ситуация, связанная с ними более-менее ясна. Что касается ДБ они, главным образом, влияют на явление переноса носителей тока и, прежде всего, определяют величину их подвижности. В кристаллах моноселенида индия и в том числе, в других подобных (слоистых) полупроводниках (не только в слоистых кристаллах соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$ , но и в слоистых полупроводниках вообще) этот вопрос почти не исследован.

В представленной работе с целью выяснения механизма влияния дрейфовых барьеров на подвижность носителей тока ( $\mu$ ) в кристаллах моноселенида индия экспериментально исследовано влияние легирования диспрозием на величину и температурную зависимость  $\mu$  в этом материале.

Исследуемые образцы скалывались из чистых (специально не легированных) и легированных атомами  $\text{Dy}$  при различных содержаниях введенной примеси ( $N_{\text{Dy}} \approx 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$  и  $10^{-1}$  ат.%) монокристаллических слитков селенида индия. Обе группы монокристаллов выращивались методом медленного охлаждения при постоянном градиенте температуры вдоль слитка по описанному в [5] режиму и имели  $n$ -тип проводимости.

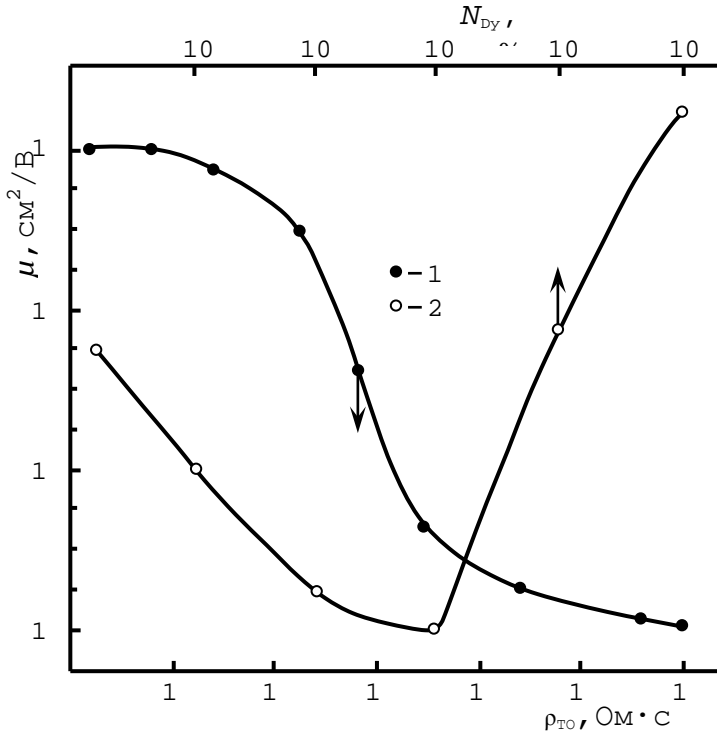
Образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда длиной  $6 \div 8$  мм вдоль слоев. Ширина их вдоль слоев составляла  $\sim 2 \div 4$  мм, а толщина в направлении, перпендикулярном слоям (вдоль оси «С») была не

больше 0.35 мм. Токовые контакты на торцах образца создавались путем припаивания металлического индия, или же нанесением серебряной пасты на открытом воздухе, в зависимости от температурных условий проведенных измерений. Подвижность носителей тока ( $\mu$ ) при различных температурах (в диапазоне 77÷400 К) оценена на основе соответствующих экспериментальных значений удельной темновой проводимости ( $\sigma_T$ ) и коэффициента Холла ( $R_x$ ), которые измерялись традиционным трехзондовым методом [6]. При этом была обеспечена однородность напряженности магнитного поля используемого электромагнита вплоть до 6 эрстед.

При измерениях ток протекал между торцовыми контактами – вдоль слоев, а магнитное поле было направлено перпендикулярно слоям. При  $T \leq 300$  К температура исследуемых образцов менялась путем изменения расстояния образца от поверхности жидкого азота в криостате, а при  $T > 300$  К при помощи специальной микроэлектронной печи.

Экспериментально измерены  $\sigma_T$  или  $\rho_T$  (удельное темновое сопротивление) образцов и коэффициент Холла (или концентрация основных носителей тока - электронов  $n = \frac{1}{eR_x}$ ) при различных температурах, а подвижность носителей тока оценивалась по выражению  $\mu = \sigma_T \cdot R_x$ .

В результате проведенных измерений установлено, что чистых кристаллах значение подвижностей носителей тока n-InSe при высоких температурах ( $T \geq 250$ К) для различных образцов отличаются незначительно и составляют  $\sim (100 \div 200)$  см<sup>2</sup>/В·с, однако с понижением температуры до 77 К величины  $\mu$ , для образцов с различным исходным темновым удельным сопротивлением ( $\rho_{T0}$  при 77 К) расходятся и, при 77 К для различных образцов меняется в пределах 1÷1000 см<sup>2</sup>/В·с (рис.1, кр.1). В кристаллах n-InSe<Dy> при высоких температурах значения  $\mu$  не зависят от  $N_{Dy}$  и почти совпадают со значением  $\mu$ , имеющее место в чистых кристаллах. Однако при низких температурах в этих кристаллах величины  $\mu$  для различных образцов также отличаются. Причем с понижением температуры, это расхождение увеличивается. При 77 К значение подвижности носителей тока в кристаллах с различным  $N_{Dy}$  меняется в пределах  $0.1 \div 1.1 \cdot 10^3$  см<sup>2</sup>/В·с. Зависимость  $\mu(N_{Dy})$  имеет немонотонный характер и при  $N_{Dy} = 10^{-3}$  ат.% проходит через минимум (при 77 К в кристаллах с  $N_{Dy} = 10^{-3}$  ат.% значение  $\mu$  не превышает  $\sim 1$  см<sup>2</sup>/В·с (рис.1, кр.2)).



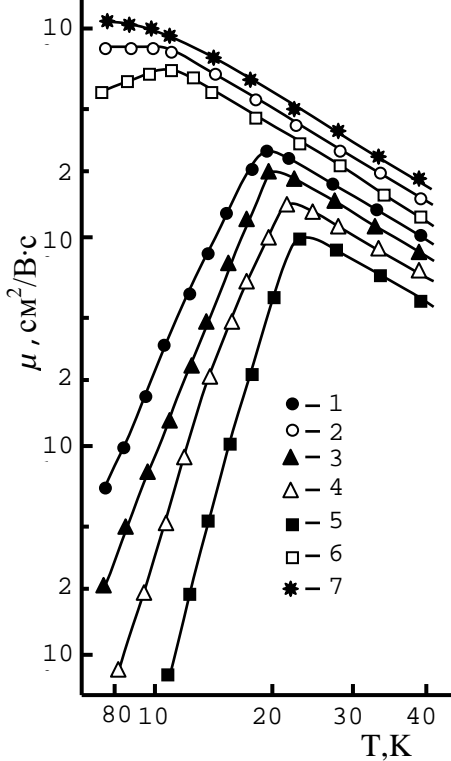
**Рис.1.** Зависимость величины подвижности основных носителей тока (электронов) в n-InSe от значения исходного темного удельного сопротивления (кривая 1) и от содержания введенной примеси в n-InSe<Dy> (кривая 2).

В зависимости от уровня легирования помимо величины  $\mu$ , меняется также ход кривых зависимости  $\mu(T)$  (рис.2). Влияние легирования на кривые зависимости  $\mu(T)$  проявляется лишь в области низких температур, где наблюдается рост подвижности носителей тока ( $\mu$ ) с температурой. В образцах с  $N_{Dy}=10^{-5}$  ат.% в области низких температур зависимость  $\mu(T)$  становится еще резче, чем имеющее место в самых высокоомных чистых кристаллах (в кристаллах с  $\rho_{T0} \approx 6 \cdot 10^6 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$ ). С дальнейшим ростом  $N_{Dy}$ , сначала (до  $N_{Dy}=10^{-3}$  ат.%) показатель степени зависимости  $\mu \sim T^k$  увеличивается почти до  $6 \div 8$ , а далее уменьшается и при  $N_{Dy}=10^{-1}$  ат.% приблизительно равняется нулю, а значение подвижности носителей тока превышает значение  $\mu$ , имеющее место в чистых образцах с наименьшим  $\rho_{T0}$  (с  $\rho_{T0} \approx 2 \cdot 10^2 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$ ).

В области высоких температур (при  $T > (220 \div 250) \text{ K}$ ) для различных образцов в зависимости от значения  $N_{Dy}$  с повышением температуры в кристаллах n-InSe<Dy> также, как и в чистых кристаллах n-InSe, с ростом  $T$  значение  $\mu$  уменьшается. Зависимость  $\mu(T)$  приблизительно под-

чиняется закону  $\mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$  и кривые зависимости  $\mu(T)$  расположены слишком близко.

С изменением уровня легирования также немонотонно меняется значение температуры ( $T_M$ ), при которой зависимость  $\mu(T)$  проходит через экстремум.



**Рис.2.** Температурная зависимость подвижности основных носителей тока (электронов) в кристаллах n-InSe (кривые 1 и 2) и n-InSe<Dy> (кривые 3-7).  
 $\rho_{TO}$ , Ом·см: 1 -  $2 \cdot 10^2$ ; 2 -  $6 \cdot 10^6$   
 $N_{Dy}$ , ат. %: 1,2 - 0; 3 -  $10^{-5}$ ; 4 -  $10^{-4}$ ; 5 -  $10^{-3}$ ; 6 -  $10^{-2}$ ; 7 -  $10^{-1}$

При обсуждении полученных экспериментальных результатов, прежде всего, следует отметить, что зависимость  $\mu(T)$  при температурах  $T > T_M$  по всем своим признакам в обеих группах кристаллов подчиняются зависимости  $\mu(T)$ , когда доминирует рассеяние носителей тока на акустических колебаниях решетки [7]. Однако в области  $T < T_M$  как в чистых, так и в легированных Dy кристаллах обнаруженная зависимость  $\mu(T)$  не объясняется в рамках существующих теоретических представлений о температурной зависимости подвижности носителей тока в кристаллических полупроводниках [3]. Дело в том, что по вышеупомянутым

теоретическим представлениям в области низких температур подвижность носителей тока либо должна быть независимой от  $T$  (когда доминирует рассеяние на нейтральных примесных атомах), либо должна увеличиваться с температурой по закону  $\mu \sim T^{\frac{3}{2}}$  (при доминировании рассеяния носителей на ионах примесей). Однако, в рассмотренных нами условиях, в обеих группах кристаллов в области низких температур  $\mu$  увеличивается по степенному закону  $\mu \sim T^k$ , где в зависимости от значения  $\rho_{TO}$  (в чистых кристаллах) и  $N_{Dy}$  (в легированных кристаллах) показатель степени зависимости  $\mu(T)$ , т.е. значение  $k$  - меняется в пределах от нуля до  $\sim 6 \div 7$ . С другой стороны, при доминировании рассеяния на нейтральных атомах или ионах примесей, с ростом  $N_{Dy}$  - величина подвижности носителей тока должна уменьшаться [3]. В отличие от чего, в рассмотренных нами условиях в кристаллах  $n - InSe < Dy >$  с повышением уровня легирования (содержания введенной примеси) подвижность носителей тока меняется немонотонно: сначала уменьшается, а далее (при более высоких уровнях легирования) увеличивается.

Эти признаки свидетельствуют о том, что при рассмотренных нами условиях в кристаллах  $n - InSe < Dy >$  в области низких температур зависимости  $\mu(T)$  и  $\mu(N_{Dy})$  обусловлены другими факторами, а не рассеянием носителей тока на нейтральных примесях или же ионах примесей. В частности, предполагается, что при участии создания электрического тока носители тока не подвергаются рассеянию на каких-то точечных дефектах, а им приходится преодолевать какие-то энергетические барьеры. Следуя ранним работам [4-7], посвященным влиянию легирования лантаноидами на электронные явления в кристаллах  $InSe$ , предполагаем, что из-за частичной неупорядоченности в свободных энергетических зонах этого полупроводника существуют дрейфовые барьеры хаотического характера. В зависимости от размеров и количества этих барьеров в области низких температур (когда энергетическая высота этих барьеров ( $\Delta\varepsilon_d$ ) сравнима или больше, чем величина  $kT$  (термического потенциала)) будет отличаться значение темнового удельного сопротивления для различных образцов и измеряемая подвижность носителей тока ( $\mu$ ) будет отличаться от истинной дрейфовой подвижности ( $\mu_d$ ). При этом между  $\mu$  и  $\mu_d$  будет иметь место соотношение [8]:

$$\mu = \mu_d \exp\left(-\frac{(\Delta\varepsilon_d)^2}{2k^2T^2}\right),$$

где  $k$  - постоянная Больцмана, а  $T$  - температура исследуемого образца.

Поэтому с повышением температуры в высокоомных чистых кри-

сталлах *InSe* в области низких температур ( $kT \leq \Delta\varepsilon_d$ ) значение  $\mu$  будет увеличиваться активационно (резко чем  $\mu \sim T^{\frac{3}{2}}$ ) с энергией активации  $\Delta\varepsilon_i = \Delta\varepsilon_d$ . Естественно, что при описанных выше условиях внешним показателем величины  $\Delta\varepsilon_d$  будет величина  $\rho_{TO}$ . В частности, в образцах с более высоким  $\rho_{TO}$ , будет больше и  $\Delta\varepsilon_d$ . Последняя, в свою очередь, будет приводить к увеличению показателя степени ( $k$ ) в зависимости  $\mu \sim T_e^k$  с повышением значения  $\rho_{TO}$ , а величина самой  $\mu$  - при этом будет уменьшаться с  $\rho_{TO}$ .

Как и авторами [4-7], нами также предполагается, что в кристаллах  $n - InSe < Du >$  сначала (при  $N_{Dy} \leq 10^{-3}$  ат.%) введенные ионы *Du* скапливаются вокруг исходных макроскопических дефектов, а затем увеличивают их размеры. Соответственно, увеличивается величина  $\Delta\varepsilon_d$ . Далее (при  $N_{Dy} > 10^{-3}$  ат.%) введенные ионы *Du* начинают распределяться по всему объему образца и с ростом  $N_{Dy}$ , наконец, обеспечивается квазиупорядоченное состояние кристалла и зависимость  $\mu(T)$  подчиняется закономерностям теоретических представлений для квазиупорядоченных кристаллических полупроводников [9]. Таким же немонотонным образом меняются значения  $\rho_{TO}$ ,  $\mu$  и  $k$ . В частности, с ростом  $N_{Dy}$  - сначала (до  $N_{Dy} = 10^{-3}$  ат.%)  $\rho_{TO}$  и  $k$  увеличиваются,  $\mu$  - уменьшается, а далее (при  $N_{Dy} > 10^{-3}$  ат.%) наоборот, с ростом  $N_{Dy}$ ,  $\rho_{TO}$  и  $k$  - уменьшаются, а  $\mu$  - увеличивается.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сказать, что специфическое влияние легирования атомами *Du* на величину и температурную зависимость подвижности носителей тока в кристаллах моноселенида индия, главным образом, обусловлено частичной неупорядоченностью этого материала и наличием в его свободной энергетической зоне хаотических дрейфовых барьеров.

С ростом уровня легирования степень неупорядоченности образца сначала увеличивается, а далее уменьшаясь, почти исчезает. В результате чего, также немонотонно меняется влияние дрейфовых барьеров на подвижность носителей тока в кристаллах моноселенида индия, легированных атомами диспрозия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф., Рзаев Р.М. Влияние электрического поля на кинетику фотопроводимости монокристаллов  $n - InSe$  // Неорганические материалы, 2012, т.48, №8, с.892-896.
2. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф., Рзаев Р.М., Амирова С.И. К вопросу о механизме индуцированной примесной фотопроводимости в кристаллах моноселенидов  $A^{III}B^{VI}$

- со слоистой структурой // Bakı Universitetinin Xəbərləri, 2011, № 3, s.122-132
3. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф., Рзаев Р.М., Эйвазова Г.Х. К вопросу о фотопроводимости, перспективных для солнечной энергетики монокристаллов InSe:Dy. // Проблемы энергетики. 2001, №1, с.66-72.
  4. Шейнкман М.К., Шик А.Я. Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках. //ФТП, 1976, т.10, в.2, с.209-232
  5. Гусейнов А.М., Садыхов Т.И. Получение легированных редкоземельными элементами монокристаллов селенида индия. // В сб. Электрофизические свойства полупроводников и плазмы газового разряда. Баку: АГУ, 1989, с.42-44.
  6. Ковтанюк Н.Ф., Концевой Ю.А. Измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1970, 429с.

## İNDİUM MONOSELENİDİ KRİSTALLARINDA DİSPROZİUMLA AŞQARLANMANIN YÜKDAŞIYICILARININ YÜRÜKLÜYÜNƏ TƏSİRİ

R.M.RZAYEV

### XÜLASƏ

İndium monoselenidi kristallarında yükdaşıyıcıların yürüklüyünün ( $\mu$ ) ilkin qaranlıq xüsusi müqavimətdən ( $\rho_{TO}$ ), disprozium atomları ilə aşqarlanma səviyyəsindən ( $N_{Dy}$ ) asılılığı, eləcə də  $\rho_{TO}$  və  $N_{Dy}$  -nün  $\mu$ -nün temperatur asılılığına təsiri tədqiq edilmişdir.

Göstərilmişdir ki, alınmış təcrübi nəticələri tədqiq olunan materialların qismən nizamsızlığı və qismən nizamsızlıq dərəcəsinin disproziumla aşqarlanma səviyyəsindən qeyri-monoton asılılığı ilə izah olunur.

**Açar sözlər:** aşqarlama, yükdaşıyıcıların yürüklüyü, nizamsızlıq, qaranlıq keçiricilik, dreyf çəpəri

## INFLUENCE OF ALLOYING WITH DYSPROSIUM ON MOBILITY OF THE CURRENT CARRIERS IN INDIUM MONOSELENIDE CRYSTALS

R.M.RZAYEV

### SUMMARY

Dependences of mobility of the current carriers on initial specific dark resistance ( $\rho_{Do}$ ), a level of alloying with dysprosium atoms ( $N_{Dy}$ ), as well as the influence of  $\rho_{Do}$  and  $N_{Dy}$  on temperature dependence of mobility of the current carriers in indium monoselenide crystals have been investigated.

It is shown that the experimental results received herein can be explained on the basis of partial disorder of the studied material and non-monotonic dependence of its disorder degree on the alloying level with dysprosium.

**Keywords:** alloying, mobility of the current carriers, disorder, dark conductivity, drift barrier.

*Принято в редакцию: 20.06.2012 г.*

*Подписано к печати: 12.12.2012 г.*