

Перенос заряда по локализованным состояниям в монокристаллах InSe и InSe<Sn>

С.Н. Мустафаева¹, М.М. Асадов², А.А. Исмаилов¹

¹Институт физики НАН Азербайджана, пр. Г. Джавида, 33, г. Баку, AZ1143, Азербайджан
E-mail: solmust@gmail.com

²Институт химических проблем НАН Азербайджана, пр. Г. Джавида, 29, г. Баку, AZ1143, Азербайджан
E-mail: mirasadov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 7 мая 2009 г., после переработки 6 января 2010 г.

Установлено, что при температурах $T < 200$ К в легированных и нелегированных оловом (0,2 и 0,4 ат.% Sn) монокристаллах InSe поперек их естественных слоев в постоянном электрическом поле существует прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка. Оценены плотность состояний вблизи уровня Ферми ($N_F = 5,36 \cdot 10^{18} - 1,72 \cdot 10^{19} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$), их энергетический разброс ($\Delta E = 0,028 - 0,040$ эВ), радиус локализации ($a = 58 \text{ \AA}$) и средние расстояния прыжков ($R_{av} = 99,5 - 130 \text{ \AA}$) в интервале температур 100–200 К.

Встановлено, що при температурах $T < 200$ К в нелегованих та легованих оловом (0,2 та 0,4 ат.% Sn) монокристаллах InSe поперек їхніх природних шарів у постійному електричному полі має місце стрибова провідність зі змінною довжиною стрибка. Оцінено щільність станів поблизу рівня Фермі ($N_F = 5,36 \cdot 10^{18} - 1,72 \cdot 10^{19} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$), їх енергетичний розкид ($\Delta E = 0,028 - 0,040$ eV), радіус локалізації ($a = 58 \text{ \AA}$) та середні відстані стрибків ($R_{av} = 99,5 - 130 \text{ \AA}$) в інтервалі температур 100–200 К.

PACS: 71.20.Nr Полупроводниковые соединения;
72.20.Ee Подвижность границ; транспорт дырок;
72.20.Fr Низкополевой транспорт и подвижность; пьезосопротивление;
72.20.Ht Высокополевые и нелинейные эффекты.

Ключевые слова: монокристалл, перенос заряда, локализация, глубокие ловушки, плотность локализованных состояний.

Введение

Моноселенид индия (InSe) — представитель слоистых монокристаллов группы $A^{III}B^{VI}$, которые характеризуются сильными ковалентными связями внутри слоев и слабыми межслоевыми связями типа Ван-дер-Ваальса. Известно, что InSe кристаллизуется в двух сингониях: ромбоэдрической и гексагональной [1]. Характерной особенностью InSe является сильная анизотропия электропроводности, которая возрастает при понижении температуры, достигая значения 10^4 при $T < 100$ К [2]. Анализ работ по исследованию электрических свойств InSe показал, что в основном эти кристаллы изучались в режиме токов, ограниченного пространственным зарядом. Другими словами, исследования проводились в условиях, при которых определяющую роль в процессе переноса заряда играли инжектированные из контакта носители. При этом значительное

внимание уделялось процессам переноса заряда по разрешенной зоне InSe. То есть, несмотря на то, что электрические свойства InSe, как чистого (специально нелегированного), так и легированного атомами олова, довольно подробно изучены [2–4], однако сведения о механизме их низкотемпературной проводимости отсутствуют. Изучение процессов переноса заряда при низких температурах позволяет получить ценную информацию о локализованных в запрещенной зоне состояниях. При низких температурах основную роль в явлениях переноса заряда в полупроводниках играют ловушки, порожденные разнообразными дефектами в кристаллах. В кристаллах со слоистой структурой особенно высока роль таких дефектов, как сильно деформированные и даже разорванные связи, которые склонны к проявлению акцепторных свойств. Наличие таких дефектов приписывается высокой плотности локализованных состояний вблизи уровня Ферми.

В силу этого целью настоящей работы явилось исследование процессов переноса заряда в слоистых монокристаллах InSe и InSe<Sn> в постоянном электрическом поле в области низких температур, установление механизма низкотемпературной проводимости и определение основных параметров локализованных в запрещенной зоне состояний.

Экспериментальная часть

Электрические измерения проведены на выращенных методом Бриджмена [4] монокристаллах InSe гексагональной сингонии с параметрами решетки $a = 4,04 \text{ \AA}$ и $c = 16,92 \text{ \AA}$. В интервале температур 77–300 К монокристаллы InSe обладали дырочным типом проводимости. Легированные оловом (0,2 и 0,4 ат.% Sn) монокристаллы InSe имели электронный тип проводимости.

Поскольку атомы олова являются компенсирующей примесью для p -InSe, то легирование последнего должно приводить к компенсации дырок. Изменение типа проводимости при введении 0,2 и 0,4 ат.% Sn говорит о том, что в InSe происходит перекомпенсация дырок.

В [4] приведены значения подвижности носителей заряда в p -InSe ($\mu_p = 85 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), n -InSe <0,2 ат.% Sn> ($\mu_n = 600 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) и n -InSe <0,4 ат.% Sn> ($\mu_n = 250 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) при комнатной температуре.

Рассчитанная концентрация равновесных носителей заряда в этих кристаллах при комнатной температуре составляет $p_0 = 1,84 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $n_0 = 1,56 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $n_0 = 7,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Геометрия образцов для электрических измерений показана на вставке к рис. 1, постоянное электрическое поле прикладывалось поперек естественных слоев монокристалла InSe. В качестве контактного материала использована серебряная паста. Толщина изученных монокристаллов составляла 300 мкм, а подконтактная площадь — $2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. Электрические измерения проведены в температурном диапазоне 100–293 К.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены температурные зависимости омической проводимости монокристаллов InSe и InSe<Sn>. Как видно на рис. 1, легирование монокристаллов оловом приводило к существенному увеличению их электропроводности (примерно на три порядка). На рис. 2 показаны зависимости проводимости изученных монокристаллов InSe от процентного содержания олова в них при 200 и 293 К.

Характерной особенностью кривых 1–3 на рис. 1 является то, что зависимости $\lg \sigma = f(1/T)$ не имеют постоянного наклона в полулогарифмическом масштабе; энергия активации проводимости при уменьшении температуры монотонно убывает. Этот экспериментальный факт свидетельствует о том, что в монокристаллах InSe в области низких температур ($T < 200 \text{ К}$)

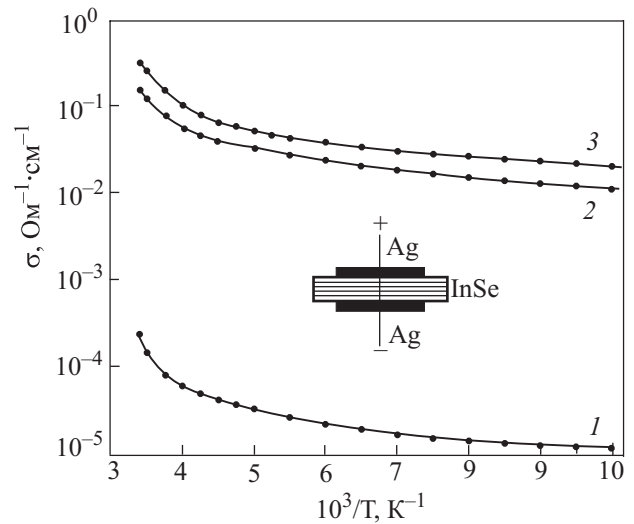


Рис. 1. Температурные зависимости темновой омической проводимости монокристаллов p -InSe (1), n -InSe<0,2 ат.% Sn> (2) и n -InSe<0,4 ат.% Sn> (3). На вставке показана геометрия образцов для электрических измерений.

имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по состояниям, лежащим в узкой полосе энергий ΔE вблизи уровня Ферми. При таком типе проводимости зависимость $\lg \sigma = f(T^{-1/4})$ должна представлять собой прямую с наклоном T_0 [5]:

$$\sigma \sim \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \right], \tag{1}$$

$$T_0 = \frac{16}{N_F k a^3}, \tag{2}$$

где N_F — плотность состояний в окрестности уровня Ферми; k — постоянная Больцмана; a — радиус локализации.

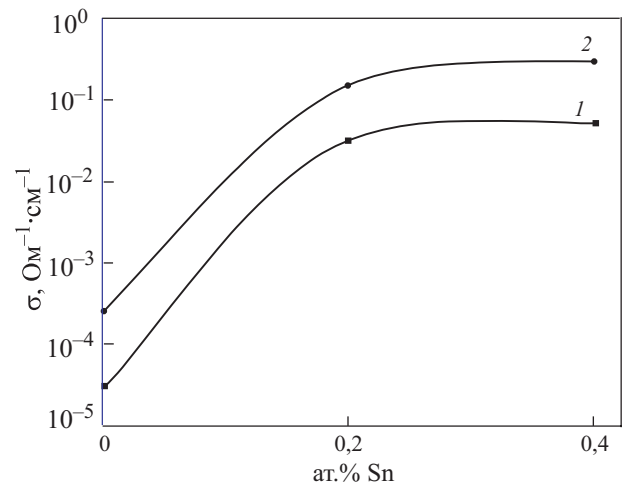


Рис. 2. Зависимость проводимости монокристаллов InSe от процентного содержания олова в них при различных температурах T , К: 200 (1); 293 (2).

На рис. 3 представлены зависимости $\lg \sigma(T^{-1/4})$ для монокристаллов p -InSe и n -InSe<Sn>. Экспериментально найденные значения T_0 для трех составов приведены в таблице.

Таблица. Параметры локализованных состояний в монокристаллах InSe и InSe<Sn>, полученные из низкотемпературных электрических измерений на постоянном токе

Кристалл	T_0, K	$N_F, \text{эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$	$R_m, \text{Å}$	$\Delta E, \text{эВ}$	$N_s, \text{см}^{-3}$
p -InSe	$5,56 \cdot 10^4$	$1,72 \cdot 10^{19}$	99,5	0,028	$4,82 \cdot 10^{17}$
n -InSe<0,2 ат.% Sn>	$1,78 \cdot 10^5$	$5,36 \cdot 10^{18}$	130	0,040	$2,14 \cdot 10^{17}$
n -InSe<0,4 ат.% Sn>	$7,72 \cdot 10^4$	$1,24 \cdot 10^{19}$	105,5	0,033	$4,09 \cdot 10^{17}$

Чтобы определить радиус локализации в монокристалле InSe, нами исследована также зависимость плотности тока J от напряженности электрического поля F в области низких температур. Нас интересовала высокополевая ветвь зависимости $J(F)$. В случае сильного электрического поля перепад потенциальной энергии носителя заряда на длине прыжка составляет eFR (R — расстояние прыжка) и становится сравнимым с необходимой энергией активации прыжков. Это означает, что заряды могут двигаться в направлении поля, не поглощая при этом фононы; напротив, при каждом перескоке происходит испускание фононов. Последнее приводит к независимости проводимости от температуры в сильных электрических полях. Для высокополевой зависимости плотности тока в области низких температур в работе [6] была предложена следующая формула:

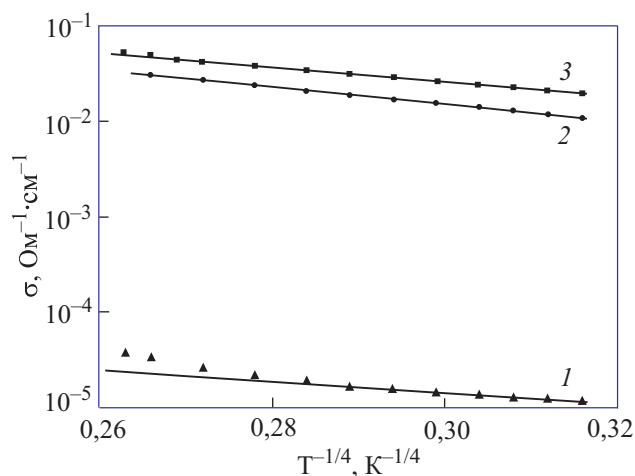


Рис. 3. Низкотемпературная проводимость монокристаллов p -InSe (1), n -InSe<0,2 ат.% Sn> (2) и n -InSe<0,4 ат.% Sn> (3) в зависимости от $T^{-1/4}$.

$$J \sim \exp \left[- \left(\frac{F_0}{F} \right)^{1/4} \right], \quad (3)$$

$$F_0 \approx \frac{kT_0}{ea}. \quad (4)$$

Здесь имеются в виду электрические поля, при которых эмиссия носителей заряда из локализованных состояний в разрешенную зону исключена, т.е. проводимость осуществляется все еще по локализованным в запрещенной зоне состояниям.

На рис. 4 приведена зависимость $\lg J = f(F^{-1/4})$ в монокристалле InSe при 100 К. Наклон приведенной зависимости составлял $F_0 = 8,3 \cdot 10^6$ В/см. По формулам (2) и (4) оценены плотность состояний вблизи уровня Ферми $N_F = 1,72 \cdot 10^{19}$ эВ $^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ и радиус локализации $a = 58$ Å в монокристалле InSe. Следует отметить, что значение радиуса локализации в монокристалле InSe несколько превышает значения a , полученные экспериментально для других представителей кристаллов группы A^{III}B^{VI}: GaSe ($a = 34$ Å [7]) и TIS ($a = 33$ Å [8]). Аналогичным путем были рассчитаны значения N_F для легированных оловом монокристаллов InSe, которые приведены в таблице.

По формуле

$$R(T) = \frac{3}{8} a \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \quad (5)$$

определены расстояния прыжков носителей заряда в изученных монокристаллах при различных температурах. При увеличении температуры значения $R(T)$ уменьшались. Средние расстояния прыжков в монокристаллах InSe и InSe<Sn> в интервале температур 100–200 К также приведены в таблице. Как видно из таблицы, средние расстояния прыжков в чистых и легированных оловом монокристаллах InSe несколько

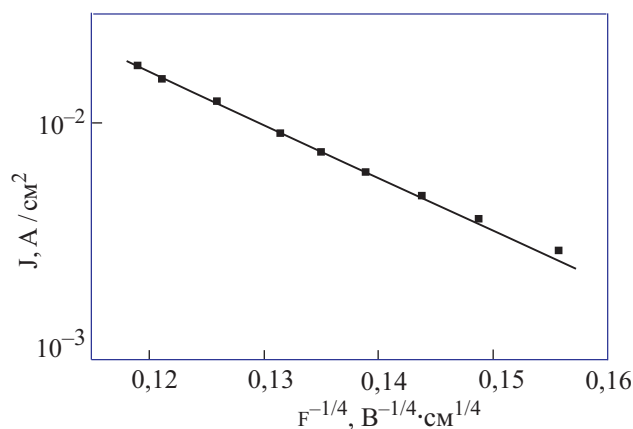


Рис. 4. Высокополевая плотность тока в монокристалле InSe в зависимости от $F^{-1/4}$ при $T = 100$ К.

превышают среднее расстояние между центрами локализации носителей заряда.

По формуле

$$\Delta E = \frac{3}{2\pi R^3 N_F}, \quad (6)$$

приведенной в [5], определен разброс ловушечных состояний вблизи уровня Ферми в исследованных монокристаллах (табл.).

Значения концентрации глубоких ловушек, ответственных за прыжковую проводимость в InSe, определенные по формуле

$$N_t = N_F \Delta E, \quad (7)$$

включены в последний столбец таблицы.

Сопоставление параметров легированных оловом монокристаллов InSe показывает, что увеличение процентного содержания Sn от 0,2 до 0,4 ат.% приводит к увеличению плотности локализованных вблизи уровня Ферми состояний и концентрации глубоких ловушек, а также к уменьшению среднего расстояния прыжков в кристаллах.

Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные результаты показали, что при температурах $T < 200$ К в чистых и легированных оловом монокристаллах InSe существует прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка. Оценены основные параметры локализованных в запрещенной зоне InSe и InSe<Sn> состояний.

1. *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ*, Справочник. Наука, Москва (1978).
2. З.Д. Ковалюк, И.В. Минтянский, *УФЖ* **26**, 1213 (1981).

3. G.D. Guseinov, S.N. Mustafaeva, and E.G. Abdullaev, *Phys. Status Solidi* **88**, K205 (1985).
4. А.А. Исмаилов, Ш.Г. Гасымов, Т.С. Мамедов, К.Р. Аллахвердиев, *ФТП* **26**, 1994 (1992).
5. Н. Мотт, Э. Дэвис, *Электронные процессы в некристаллических веществах*, Мир, Москва (1974).
6. Б.И. Шкловский, *ФТП* **6**, 2335 (1972).
7. С.Н. Мустафаева, *Неорган. материалы* **30**, 619 (1994).
8. С.Н. Мустафаева, М.М. Асадов, А.А. Исмаилов, *ФТТ* **50**, 1958 (2008).

Charge transfer over localized states in InSe and InSe<Sn> single crystals

S.N. Mustafaeva, M.M. Asadov, and A.A. Ismailov

It is found that InSe and InSe<Sn> (0.2 and 0.4 at.% Sn) single crystals exhibit a variable range hopping conduction along the normal to their natural layers at temperatures $T < 200$ K in a dc electric field. Estimations are made for the density of states near the Fermi level ($N_F = 5.36 \cdot 10^{18} - 1.72 \cdot 10^{19} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$) and their energy spread ($\Delta E = 0.028 - 0.040 \text{ eV}$), the localization radius ($a = 58 \text{ \AA}$), the average jump distance ($R_{av} = 99.5 - 130 \text{ \AA}$) at temperatures ranged from 100 to 200 K.

PACS: 71.20.Nr Semiconductor compounds;
72.20.Ee Mobility edges; hopping transport;
72.20.Fr Low-field transport and mobility; piezoresistance;
72.20.Ht High-field and nonlinear effects.

Keywords: single crystals, charge transport, localization, deep traps, density of localized states.