

Влияние γ -облучения на параметры локализованных состояний в монокристаллах p -InSe и n -InSe<Sn>

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

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

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

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2009 г., после переработки 21 января 2010 г.

Установлено, что γ -облучение монокристаллов p -InSe и n -InSe<Sn> (0,2 и 0,4 мол.% Sn) дозой $D_\gamma = 100$ крад приводит к существенному изменению параметров локализованных в запрещенной зоне состояний: к увеличению плотности локализованных вблизи уровня Ферми состояний и их энергетическому уплотнению, уменьшению среднего расстояния прыжков и увеличению концентрации глубоких ловушек, ответственных за прыжковую проводимость. Определены значения концентрации радиационных дефектов в монокристаллах p -InSe ($5,18 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и n -InSe<Sn> ($2,48 \cdot 10^{17} - 2,71 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Встановлено, що γ -опромінення монокристалів p -InSe та n -InSe<Sn> (0,2 та 0,4 мол.% Sn) дозою $D_\gamma = 100$ крад приводить до істотної зміни параметрів локалізованих у забороненій зоні станів: до збільшення щільності локалізованих поблизу рівня Фермі станів і їх енергетичного ущільнення, зменшення середньої відстані стрибків і збільшення концентрації глибоких уловлювачів, які відповідальні за стрибкову провідність. Визначено значення концентрації радіаційних дефектів у монокристалах p -InSe ($5,18 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) та n -InSe<Sn> ($2,48 \cdot 10^{17} - 2,71 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

PACS: 71.20.Nr Полупроводниковые соединения;
72.20.Ee Щель подвижности, прыжковый транспорт;
72.20.Fr Транспорт и подвижность в слабых полях, пьезосопротивление;
72.20.Nt Нелинейные и высокополевые эффекты.

Ключевые слова: монокристаллы p -InSe и n -InSe<Sn>, γ -облучение, перенос заряда, локализация, глубокие ловушки, плотность локализованных состояний, концентрация радиационных дефектов.

Введение

Слоистые монокристаллы InSe, характеризующиеся сильной анизотропией электрических свойств, на протяжении многих лет являются объектом интенсивных исследований [1–5].

В кристаллах со слоистой или цепочечной структурой особенно высока роль таких дефектов, как сильно деформированные и даже разорванные связи, которые склонны к проявлению акцепторных свойств. Наличие таких дефектов приписывается высокая плотность состояний вблизи уровня Ферми [6]. Достаточно высокая концентрация локализованных состояний в запрещенной зоне приближает такие кристаллы по энергетической структуре к аморфным полупроводникам. Ловушки, порожденные разнообразными дефектами в кристаллах, играют основную роль в явлениях переноса

заряда, особенно при низких температурах. Из измерений низкотемпературной проводимости кристалла может быть получена ценная информация о локализованных состояниях.

В работе [5] из низкотемпературных электрических измерений на постоянном токе нами определены параметры локализованных состояний в монокристаллах p -InSe и n -InSe<Sn>. Были 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 ($\Delta E = 0,028 - 0,040 \text{ эВ}$), радиус локализации ($a = 58 \text{ \AA}$) и средние расстояния прыжков ($R_{av} = 99,5 - 130 \text{ \AA}$) в интервале температур 100–200 К. Целью настоящей работы является изучение влияния γ -излучения на параметры локализованных состояний в монокристаллах p -InSe и n -InSe<Sn>.

Экспериментальная часть

Электрические измерения проведены на выращенных методом Бриджмена [4] монокристаллах InSe гексагональной сингонии с параметрами решетки $a = 4,04 \text{ \AA}$; $c = 16,92 \text{ \AA}$. В интервале температур 77–300 К монокристаллы InSe обладают проводимостью p -типа. Легированные компенсирующей примесью олова (0,2 и 0,4 мол.% Sn) монокристаллы InSe обладают электронным типом проводимости.

Геометрия образцов для электрических измерений показана на рис. 1, т.е. постоянное электрическое поле прикладывалось поперек слоев монокристаллов 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.

Облучение образцов проводилось на радиационной химической установке непрерывного действия РХУНД-20000 от источника Co^{60} . Энергия γ -квантов составляла 1,25 МэВ. Доза облучения накапливалась путем последовательных выдержек в одном и том же образце и составляла 50 и 100 крад. Электрические измерения образцов проводились после каждого облучения.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены температурные зависимости темновой омической проводимости монокристаллов

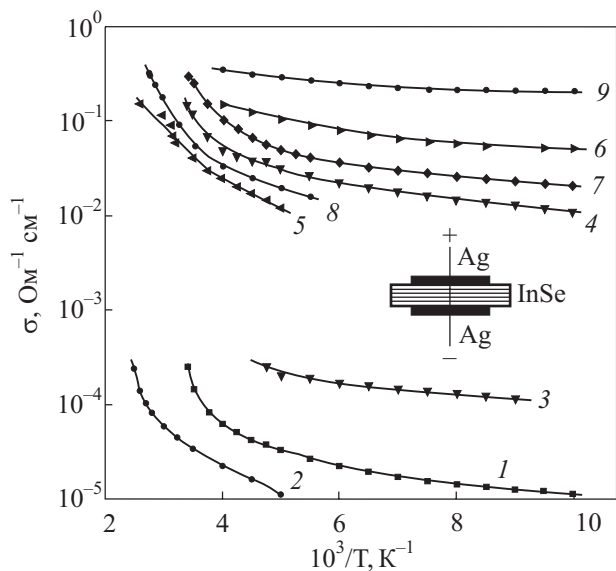


Рис. 1. Температурные зависимости темновой омической проводимости монокристаллов p -InSe (кривые 1–3), n -InSe<0,2 мол.% Sn> (кривые 4–6) и n -InSe<0,4 мол.% Sn> (кривые 7–9) до (1, 4, 7) и после γ -облучения: 50 крад (2, 5, 8) и 100 крад (3, 6, 9). На вставке показана геометрия образцов для электрических измерений.

p -InSe и n -InSe<Sn> до и после γ -облучения дозами 50 и 100 крад. Как видно на рис. 1, во всех трех образцах после облучения дозой 50 крад проводимость уменьшалась, а после γ -облучения дозой $D_\gamma = 100$ крад увеличивалась по отношению к проводимости необлученных образцов во всей температурной области измерения.

Характерной особенностью кривых на рис. 1 является то, что зависимости $\lg \sigma = f(1/T)$ при низких температурах не имеют постоянного наклона; энергия активации проводимости с уменьшением температуры монотонно убывает. Этот экспериментальный факт свидетельствует о том, что в монокристаллах p -InSe и n -InSe<Sn> в области низких температур ($T < 200 \text{ К}$) 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 [7]:

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

$$T_0 = \frac{16}{N_F k a^3}, \quad (2)$$

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

На рис. 2 представлены указанные зависимости $\lg \sigma(T^{-1/4})$ для монокристаллов p -InSe и n -InSe<Sn> до и после γ -облучения дозой 100 крад. Видно, что после облучения γ -квантами наклон зависимостей $\lg \sigma(T^{-1/4})$ уменьшается. Экспериментально найденные значения

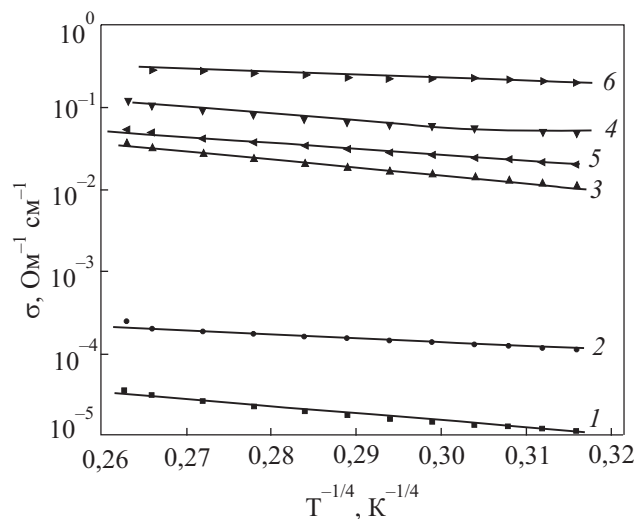


Рис. 2. Зависимости проводимости монокристаллов p -InSe (кривые 1, 2), n -InSe<0,2 мол.% Sn> (кривые 3, 4) и n -InSe<0,4 мол.% Sn> (кривые 5, 6) от $T^{-1/4}$ до (1, 3, 5) и после γ -облучения дозой $D_\gamma = 100$ крад (2, 4, 6).

Таблица. Параметры локализованных состояний в монокристаллах p -InSe и n -InSe<Sn> до и после γ -облучения

Монокристалл	D_γ , крад	T_0 , 10^4 К	N_F , 10^{19} $\text{эВ}^{-1}\cdot\text{см}^{-3}$	R_{av} , Å	ΔE , эВ	N_t , 10^{17} см^{-3}	N_{rad} , 10^{17} см^{-3}
p -InSe	0	5,56	1,72	99,5	0,028	4,82	5,18
	100	2,37	4,03	78,6	0,025	10	
n -InSe< 0,2 мол.% Sn>	0	17,8	0,536	130	0,040	2,14	2,48
	100	7,02	1,36	101,6	0,034	4,62	
n -InSe<0,4 мол.% Sn>	0	7,72	1,24	105,5	0,033	4,09	27,1
	100	0,58	16,4	54	0,019	31,2	

T_0 для трех составов приведены в таблице. Зная значения T_0 , по формуле (2) для монокристаллов p -InSe и n -InSe<Sn> определены плотности состояний N_F вблизи уровня Ферми. Значения N_F до и после γ -облучения кристаллов дозой 100 крад приведены в таблице. При вычислении значений N_F для радиуса локализации было взято значение $a = 58 \text{ \AA}$, полученное в [5] из экспериментальной зависимости плотности тока в InSe от напряженности электрического поля в области низких температур [8]. Полученное нами значение радиуса локализации близко к величине боровского радиуса экситона в InSe, равному 50 \AA [9].

Прыжковая низкотемпературная проводимость моттовского типа поперек слоев монокристаллов InSe наблюдалась и в [9], тогда как при тех же температурах вдоль слоев имела место обычная зонная проводимость. В качестве возможной модели, способной объяснить эти экспериментальные данные и наличие сильной анизотропии слоистых полупроводников, авторы [9] рассматривали слоистый кристалл, содержащий области разупорядочения слоев. Внутри областей разупорядочения во всех направлениях перенос заряда осуществляется по локализованным состояниям. Размер области разупорядочения вдоль оси c кристалла InSe, по оценкам авторов [9], составлял $1500\text{--}3000 \text{ \AA}$ и распространялся по всей площади образца вдоль его слоев. Каждая такая область ответственна за величину проводимости поперек слоев и ее температурную зависимость. С этим, видимо, и связан характер полученной нами температурной зависимости проводимости монокристаллов p -InSe и n -InSe<Sn>.

Из таблицы видно, что как в p -InSe, так и в n -InSe<Sn> плотность состояний после γ -облучения кристаллов дозой 100 крад увеличивается. Наиболее ощутимо N_F увеличивается в результате γ -облучения в n -InSe <0,4 мол.% Sn> (более чем на один порядок).

По формуле

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

определены расстояния прыжков носителей заряда в изученных монокристаллах при различных температурах. При увеличении температуры значения $R(T)$ умень-

шались. Средние расстояния прыжков R_{av} в монокристаллах p -InSe и n -InSe<Sn> в интервале температур $100\text{--}200 \text{ K}$ до и после γ -облучения дозой 100 крад также приведены в таблице. Как в чистых, т.е. специально не легированных, так и легированных оловом монокристаллах InSe после их γ -облучения средние расстояния прыжков уменьшались. В n -InSe<0,4 мол.% Sn> в результате γ -облучения значение R_{av} уменьшалось примерно в два раза и становилось сравнимым со средним расстоянием между центрами локализации носителей заряда.

Знание величин R_{av} и N_F позволило по формуле [6]:

$$\Delta E = \frac{3}{2\pi R_{av}^3 N_F} \quad (4)$$

определить разброс ловушечных состояний вблизи уровня Ферми в исследованных монокристаллах (таблица). Как видно из таблицы, в результате γ -облучения монокристаллов p -InSe и n -InSe<Sn> полоса энергий ΔE сужалась.

Значения концентрации глубоких ловушек, ответственных за прыжковую проводимость в p -InSe и n -InSe<Sn>, определенные по формуле

$$N_t = N_F \Delta E, \quad (5)$$

включены в предпоследний столбец таблицы.

Из табличных данных видно, что γ -облучение образцов p -InSe и n -InSe<Sn> приводит к увеличению концентрации глубоких ловушек в кристаллах. В последнем столбце таблицы приведены значения концентрации радиационных дефектов в образцах p -InSe и n -InSe<Sn>, определенные по разности значений N_t до и после γ -облучения образцов ($N_{rad} = N_t^\gamma - N_t^0$). Наиболее высокая концентрация радиационных дефектов наблюдалась в монокристаллах n -InSe<0,4 мол.% Sn>.

Таким образом, на фоне изначально высокой концентрации локализованных в запрещенной зоне InSe состояний, обусловленных наличием различных дефектов, за счет γ -облучения происходит рождение новых дефектов. Облучение монокристаллов p -InSe и n -InSe<Sn> не только вызывает рождение новых (радиационных) дефектов, но и стимулирует миграцию и перераспределение имеющихся в кристалле дефектов

[10], что и приводит, по-видимому, к сужению ширины энергетического распределения локализованных состояний.

1. З.Д. Ковалюк, И.В. Минтянский, *УФЖ* **26**, 1213 (1981).
2. A. Segura, J.P. Guesdon, J.M. Besson, and A. Chevy, *J. Appl. Phys.* **54**, 876 (1983).
3. G.D. Guseinov, S.N. Mustafaeva, and E.G. Abdullaev, *Phys. Status. Solidi* **A88**, K205 (1985).
4. А.А. Исмаилов, Ш.Г. Гасымов, Т.С. Мамедов, К.Р. Аллахвердиев, *ФТП* **26**, 1994 (1992).
5. С.Н. Мустафаева, М.М. Асадов, А.А. Исмаилов, *ФНТ* **36**, 394 (2010).
6. Б.Т. Коломиец, Т.Н. Мамонтова, А.С. Кочемировский, Л.В. Пивоварова, *Электронные явления в некристаллических полупроводниках. Труды 6-й Международной конференции по аморфным и жидким полупроводникам*, Наука, Ленинград (1976).
7. Н. Мотт, Э. Дэвис, *Электронные процессы в некристаллических веществах*, Мир, Москва (1974).
8. Б.И. Шкловский, *ФТП* **6**, 2335 (1972).
9. Г.Л. Беленький, Н.А. Абдуллаев, В.Н. Зверев, В.Я. Штейншрайбер, *Письма в ЖЭТФ* **47**, 498 (1988).
10. В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов, *Действие излучений на полупроводники*, Наука, Москва (1988).

The effect of γ -irradiation on parameters of localized states in p -InSe and n -InSe<Sn> single crystals

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

It is revealed that the γ -irradiation $D_\gamma = 100$ krad of p -InSe and n -InSe<Sn> (0.2 and 0.4 mol.% Sn) single crystals leads to significant changes of localized states parameters. After the γ -irradiation the density of states near the Fermi level is increased, but their energy spread and the average jump distance are decreased. The concentrations of radiation-induced defects are estimated for p -InSe ($5.18 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) and n -InSe<Sn> ($2.48 \cdot 10^{17} - 2.71 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) single crystals.

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 p -InSe and n -InSe<Sn>, γ -irradiation, charge transport, localization, deep traps, density of localized states.