

ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ПЛЕНКАХ PbSe ПРИ ОБЛУЧЕНИИ α -ЧАСТИЦАМИ

Фреик Д. М., Салий Я. П., Межиловская Л. И., Собкович Р. И.,
Школьный А. К., Огородник Я. В.

Исследовалась дозовая зависимость концентрации носителей заряда n (Φ), индуцированных внедрением α -частиц в моно- и поликристаллические пленки PbSe n - и p -типа проводимости. При облучении образцов проявляется обычная для первичных дефектов линейная зависимость концентрации носителей заряда от потока излучения. В этом предположении проведено разделение концентраций и подвижностей электронов и дырок. Показано, что преобладающими радиационными дефектами являются междоузельные атомы свинца $[Pb_i]^{2+}$.

Введение. Обработка полупроводников частицами высокой энергии является перспективным методом модификации свойств материала [1]. Так, установлено, что радиационное облучение кристаллов на основе соединений группы $A^{IV}B^{VI}$ приводит к существенным изменениям их электрических параметров [2-4]. При облучении протонами с энергией 200-450 кэВ кристаллов $Pb_{0.76}Sn_{0.24}Te$ p -типа наблюдали уменьшение концентрации носителей, а для образцов с исходной концентрацией 10^{17} $см^{-3}$ при дозе $5 \cdot 10^{13}$ $см^{-2}$ — изменение типа проводимости [2]. Исследованию электрофизических и рекомбинационных свойств монокристаллов n - и p - $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (Se) ($x=0.096-0.17$), облученных при $T=300$ К электронами (~ 2 МэВ) интегральными потоками до $\sim 10^{18}$ $см^{-2}$, посвящена работа [3]. Облученные кристаллы $Pb_{1-x}Sn_xTe$ независимо от типа исходной проводимости являются электронными ($n_{min}=10^{17}$ $см^{-3}$ при 77 К). Для кристаллов $Pb_{1-y}Sn_ySe$ наблюдается уменьшение концентрации дырок со скоростью $\Delta p/\Delta\Phi=2$ $см^{-1}$. В работе [4] изучены гальваномагнитные свойства монокристаллов $Pb_{1-x}Sn_xSe$ ($0 \leq x \leq 0.06$) n - и p -типа, облученных быстрыми электронами ($E=2.2$ МэВ, $\Phi \leq 1.6 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$). Обнаружены увеличение концентрации носителей ($\Delta n/\Delta\Phi=2.8$ $см^{-1}$) в образцах n -типа и инверсия знака проводимости в образцах p -типа.

Целью данной работы является изучение изменения электрических свойств и структурных характеристик пленок PbSe при облучении α -частицами.

1. Получение образцов и методика эксперимента

Объектом исследований выбраны пленки PbSe n - и p -типа толщиной ~ 3 мкм, полученные из паровой фазы методом горячей стенки на подложках (111) BaF_2 и полиимидной ленте типа ПМ-1 [5]. Согласно данным рентгеновской двухкristальной спектрометрии и топографии [6], пленки представляли собой монокристаллические блоки размером $7-12$ мм и мозаичностью до $1.5'$, ориентированные плоскостью (111) параллельно поверхности подложки — в первом случае, поликристалл с размером зерен $0.01-0.1$ мкм — во втором. Концентрация и подвижность основных носителей при 300 К составляли $(0.12-2.53) \times 10^{18}$ $см^{-3}$, $1070-1320$ $см^2/V \cdot с$ и $9.4 \cdot 10^{18}$ $см^{-2}$, 72 $см^2/V \cdot с$ соответственно на BaF_2 и ПМ-1 (табл. 1). Период элементарной ячейки монокристаллических пленок определяли методом Бонда с точностью $\Delta a = \pm 0.001 \text{ \AA}$.

Таблица 1

Параметры исследуемых пленок

№ образца	Концентрация носителей $n \cdot 10^{18}$, см^{-3}	Подвижность носителей, μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Период элементарной ячейки a , Å	Структурное совершенство
До облучения				
1	9.40 (p)	72	6.123	Поликристалл
2	1.52 (p)	1280	6.123	
3	2.53 (p)	1320	6.123	
4	0.120 (p)	1070	6.123	
После облучения*				
1	9.77 (n)	47	5.910	Поликристалл
2	0.91 (p)	1070	5.960	
3	1.25 (p)	680	5.970	
4	0.190 (p)	1130	5.940	

Примечание. * После облучения дозой, см^{-2} : 1, 2, 4 — $5.5 \cdot 10^{12}$, 3 — $3.5 \cdot 10^{12}$.

Образцы облучались нефокусированным потоком α -частиц с энергией 5 МэВ от источника ^{238}Pu на карусельной установке в вакууме при комнатной температуре. Плотность потока частиц составляла $5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, а дозы облучения доводились до значений $6.7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

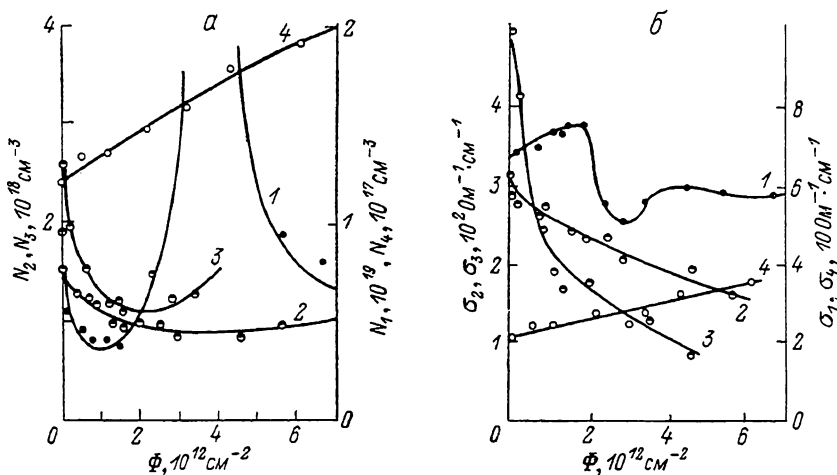


Рис. 1. Изменение концентрации носителей Холла N (а) и удельной электропроводности σ (б) пленок PbSe при α -облучении.

$T=300 \text{ К}$. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 1.

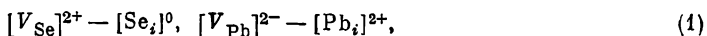
Электрические параметры пленок измерялись в постоянных электрических и магнитных полях компенсационным методом как до, так и после определенной дозы облучения.

2. Экспериментальные результаты и теоретические предпосылки

На рис. 1 представлены экспериментальные данные по изменению концентрации носителей заряда и удельной электропроводности от дозы α -частиц. Общими закономерностями при увеличении интегрального потока являются уменьшение концентрации носителей, инверсия знака проводимости с p - на n -тип при $\Phi \approx 3.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и дальнейший рост концентрации электронов для поликристаллических пленок с первоначально дырочной проводимостью

(рис. 1, а, 1), уменьшение концентрации дырок для монокристаллических образцов (рис. 1, а, 2, 3); удельная электропроводность имеет тенденцию к уменьшению (рис. 1, б). Для пленок с первоначально электронной проводимостью концентрация носителей при облучении растет (рис. 1, а, 4). Таким образом, α -облучение обуславливает донорное действие, как при электронной и протонной обработках [2-4]. Средняя скорость изменения концентрации носителей заряда составляет $(2.7 \div 7.8) \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ (определенная для области преобладания носителей одного типа), что значительно превышает аналогичный параметр электронного облучения и практически совпадает для протонного облучения [2-4].

Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены интенсивным дефектообразованием при радиационной обработке α -частицами. Придерживаясь модели Пратта—Парада [7], можно предположить, что облучение обуславливает дефекты как донорного, так и акцепторного характера в виде стабильных пар Френкеля



где $[V_{\text{Se}}]^{2+}$, $[\text{Pb}_i]^{2+}$, $[\text{Se}_i]^0$ — двухзарядные и практически нейтральный доноры, а $[V_{\text{Pb}}]^{2-}$ — двухзарядный акцептор. Даже в предположении равенства концентраций простых дефектов в подрешетках металла и халькогена основную роль играют дефекты донорного типа — междоузельные атомы свинца $[\text{Pb}_i]^{2+}$ и вакансии селена $[V_{\text{Se}}]^{2+}$. Наблюдаемое уменьшение периода элементарной ячейки пленок PbSe при облучении (табл. 1) указывает на преимущественное образование междоузельных атомов свинца. При отсутствии взаимодействий этих дефектов с дефектами других типов их количество будет увеличиваться линейно с ростом дозы [1].

3. Обработка результатов эксперимента и их обсуждение

Из предложенной модели образования радиационных дефектов следует, что во всей переходной области в первоначально дырочном образце носители обоих знаков — электроны и дырки — дают вклад в явления переноса. В слабом магнитном поле для двух типов носителей имеют место известные соотношения:

$$\begin{aligned} \sigma &= e\mu_p(p + bn), \\ R_x &= \frac{p - nb^2}{e(p + nb)^2}, \\ n_p &= n_i^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $b = \mu_n/\mu_p$, $n_i = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ — собственная концентрация при комнатной температуре. Для аппроксимации экспериментальных значений R_x использовали зависимости $n = A + B\Phi$ и $bn/n_i = 1 + C [1/(D - E) - 1/(\Phi - E)]$. Коэффициенты аппроксимации A, B, C, D, E для различных пленок приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Параметры аппроксимации для функций, описывающие изменение концентрации и отношения подвижностей носителей заряда в пленках PbSe при облучении α -частицами

№ образца	$A, 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$B, 10^3 \text{ см}^{-1}$	$C, 10^{-11} \text{ см}^{-2}$	$D, 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$E, 10^{11} \text{ см}^{-2}$
1	0.0894	7.8	2.1	37.78	-27.92
2	0.4065	2.75	80.02	230.70	-321.2
3	0.2709	6.25	296.2	89.62	-536.6
4	9.804	5.78	-45.54	-73.53	-21.54

На рис. 2 представлены зависимости n , p , μ_p , μ_n , полученные в результате расчета для моно- и поликристаллических пленок. Видно, что для поликристаллических образцов и выбранных доз облучения преобладающей является концентрация электронов, с чем и связана инверсия знака типа проводимости (рис. 1, а, 1). Величина b при максимальной дозе α -частиц равна ~ 0.5 для поликристалла, ~ 12 и 0.6 для монокристалла p - и n -типа соответственно. Необходимо отметить, что для поликристаллических пленок наблюдаются значительный рост подвижности и уменьшение концентрации дырок с дозой

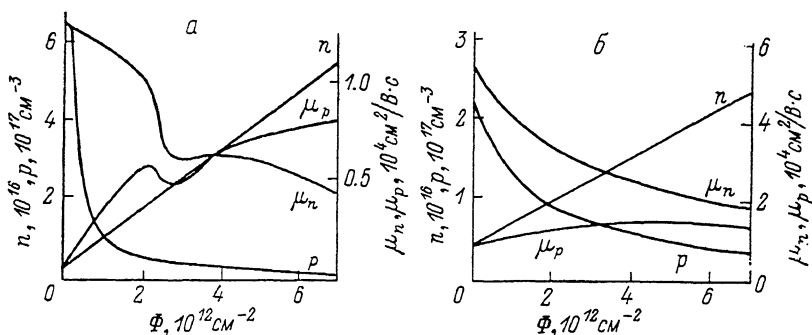


Рис. 2. Изменение расчетных кинетических параметров поли- (а, образец 1) и монокристаллических (б, образец 2) пленок PbSe от дозы α -частиц.

n , p и μ_n , μ_p — концентрации и подвижности электронов и дырок соответственно.

(рис. 2, а). Такое поведение можно объяснить тем, что барьеры на границах зерен, образованные вследствие геттерирования радиационных дефектов, препятствуют передвижению малоподвижных носителей заряда, что соответственно увеличивает долю более подвижных.

В заключение авторы благодарят Н. Л. Дмитрука за ценные предложения при постановке задач исследований, а также В. И. Фистуля и В. П. Зломанова за обсуждение результатов эксперимента.

Список литературы

- [1] Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках. М., 1969. 312 с.
- [2] Wang C. C., Tao T. F., Sunier T. W. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 9. P. 3981—3987.
- [3] Брудный В. Н., Войцеховский А. В., Кривов М. А., Лилленко Ю. В., Петров А. С., Потапов А. И. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 8. С. 1495—1498.
- [4] Зломанов В. П., Ладыгин Е. А., Пырагов Б. П., Скипетров Е. П. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 1. С. 53—57.
- [5] Фрейк Д. М., Павлюк М. Ф., Чобанюк В. М., Перкатюк И. И. // Неорг. матер. 1985. Т. 21. В. 4. С. 573—577.
- [6] Фрейк Д. М., Галушак М. А., Межиловская Л. И. Физика и технология полупроводниковых пленок. Львов, 1988. 152 с.
- [7] Parada N. J., Pratt G. W. // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 22. N 5. P. 180—182.

Ивано-Франковский
государственный педагогический институт
им. В. С. Стефаника

Получена 13.12.1988
Принята к печати 2.02.1989