

Температурные зависимости электрических свойств монокристаллических пленок n -PbSe при облучении α -частицами

© Я.П. Салий, Р.Я. Салий*

Прикарпатский университет,
284000 Ивано-Франковск, Украина

* Киевский государственный университет,
252022 Киев, Украина

(Получена 6 декабря 1999 г. Принята к печати 21 декабря 1999 г.)

Исследовалось влияние α -облучения при низких энергиях (5.5 МэВ) на электрические свойства n -PbSe. Обнаружено, что концентрация носителей заряда увеличивается в результате облучения. Образцы с исходной концентрацией электронов меньше 10^{17} см^{-3} изменяют свои свойства при облучении их α -частицами потоками до 10^{12} см^{-2} . Измерения не были стойкими у образцов с высокими исходными концентрациями электронов при облучении их потоками до $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. У образцов с низкой начальной концентрацией носителей тока подвижность уменьшалась, а у образцов с высокой — не изменялась.

PbSe относится к узкозонным полупроводникам, представляющим интерес для оптоэлектроники инфракрасного диапазона спектра. Радиационная обработка широко используется для контролируемого изменения электрофизических параметров полупроводников [1–3]. Однако к настоящему времени отсутствуют сведения о влиянии α -облучения на температурные зависимости электрических свойств монокристаллических пленок n -PbSe.

В данной работе изучено влияние облучения α -частицами с энергией 5.5 МэВ потоками до $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ на температурные зависимости электрических параметров (концентрации n и подвижности μ носителей тока) монокристаллических пленок n -типа проводимости. Образцы n -PbSe являлись пленками толщиной 12–15 мкм, осажденными в вакууме на сколах (111) BaF₂ методом горячей стенки. Концентрация и подвижность носителей тока монокристаллических пленок составляли $n \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\mu \approx 3 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Измерения электрических параметров выполнялись в температурном диапазоне 77–320 К. Образцы облучались изотропным потоком α -частиц низкой энергии 5.5 МэВ (источник Ru²³⁸), величина потока определялась временем облучения по известной плотности потока $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [4].

Изохронный отжиг проводился в воздухе для образцов с изменяющимися при облучении электрическими параметрами. Время одной стадии отжига составляло 6–10 мин. Температурная зависимость электрических свойств от 77 до 300 К измерялась после каждого периода отжига. Основная стадия отжига происходила в температурном диапазоне 90–140°C, в котором концентрация и подвижность носителей заряда возвращались к начальным величинам. Это, по-видимому, ограничивает применимость α -облучения в производстве надежных термически стабильных приборов. Параметры образцов n -PbSe до и после альфа-облучения приведены в таблице.

Результаты разделены на две группы. Образцы 30, 31 первой группы до облучения имели относительно низкие концентрации носителей тока $1.09 \cdot 10^{17}$ и $0.86 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ соответственно. При достаточно низких

потоках α -частиц $1.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ концентрация увеличивалась в 1.5 раза, подвижность носителей уменьшалась в 3 раза. Вторая группа включает образцы 29, 32 с большими начальными концентрациями электронов $1.46 \cdot 10^{17}$ и $1.79 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Изменения концентрации и подвижности носителей тока практически не наблюдаются даже для потока α -частиц $4.32 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Экспериментальные температурные зависимости концентрации носителей тока образцов первой группы до и после облучения показаны на рисунке. В области низких температур 77–200 К концентрация носителей тока практически не изменяется, проявляется примесная проводимость, а при более высоких температурах слабо возрастает. Облучение приводит к смещению зависимости в сторону более высоких концентраций с последующей стабилизацией на уровне $\sim 1.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Основное изменение концентрации происходит при малых потоках облучения до 10^{11} см^{-2} , дальнейшее увеличение потока не приводит к существенному изменению концентрации.

Полученные температурные зависимости концентрации носителей заряда можно объяснить изменением концентрации донорных уровней N_D^+ в процессе облучения и вкладом собственной проводимости при высоких температурах. Температурная зависимость концентрации $n(T)$ может быть определена из уравнения электронейтральности

$$n(T) = N_D^+ + n_i^2(300) \exp\{-[E_g(T) - E_g(300)]/kT\}/n, \quad (1)$$

где ширина запрещенной зоны

$$E_g(T) = E_g(300) - 0.0004(300 - T) \text{ эВ},$$

$E_g(300) = 0.29 \text{ эВ}$, предэкспоненциальный множитель собственной концентрации носителей заряда считаем слабо зависящим от температуры, $n_i(300) = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрация донорных уровней N_D^+ , определенная из экспериментальных температурных зависимостей концентрации носителей заряда, приведена в таблице. Из

Характеристика исследованных образцов

Образец №	Толщина h , мкм	Поток α -частиц Φ , 10^{11} см^{-2}	Концентрация N_D^+ , 10^{17} см^{-3}	Подгоночные параметры подвижности μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	
				A , $10^{-3} \text{ см}^{-2} \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{3/2}$	B , $10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-5/2}$
30	14	0	1.09 ± 0.04	2 ± 1	0.6 ± 0.1
		1.8	1.65 ± 0.05	13 ± 1	1.2 ± 0.1
31	12	0	0.86 ± 0.04	5 ± 1	0.6 ± 0.1
		10.8	1.51 ± 0.06	40 ± 10	1.3 ± 0.1
29	15	0	1.46 ± 0.13	5 ± 1	0.65 ± 0.05
		43.2	1.73 ± 0.08	5 ± 1	0.65 ± 0.05
32	12	0	1.79 ± 0.05	15 ± 1	0.50 ± 0.05
		37.8	1.80 ± 0.08	18 ± 1	0.50 ± 0.05

таблицы видно, что концентрация донорных уровней в образцах первой группы увеличилась в 2 раза, а в образцах второй — изменилась слабо, причем предельное значение составляет $n \approx 1.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что отвечает закреплению уровня Ферми на уровне дефекта с энергией $E_D^+ = E_{FC} = -0.024 \text{ эВ}$, определенном из соотношения

$$n = N_C \exp(E_{FC}/kT), \quad (2)$$

где $N_C = 8.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $T = 77 \text{ К}$, $E_{FC} = E_F - E_C$.

На рисунке, *b* представлены зависимости подвижности от температуры для образцов с малой начальной концентрацией носителей тока. Во всем температурном интервале после облучения наблюдается уменьшение в 2–3 раза подвижности носителей тока. При низких температурах это уменьшение связано с рассеянием на возросшем количестве ионизованных дефектов, а при высоких — на акустических фонах с изменившимся, по-видимому, вследствие образования дефектов энергетическим спектром фононов, что привело к увеличению эффективного взаимодействия носителей заряда с фононами.

У образцов с высокой начальной концентрацией носителей тока и, соответственно, дефектов величины подвижности не изменяются в процессе облучения.

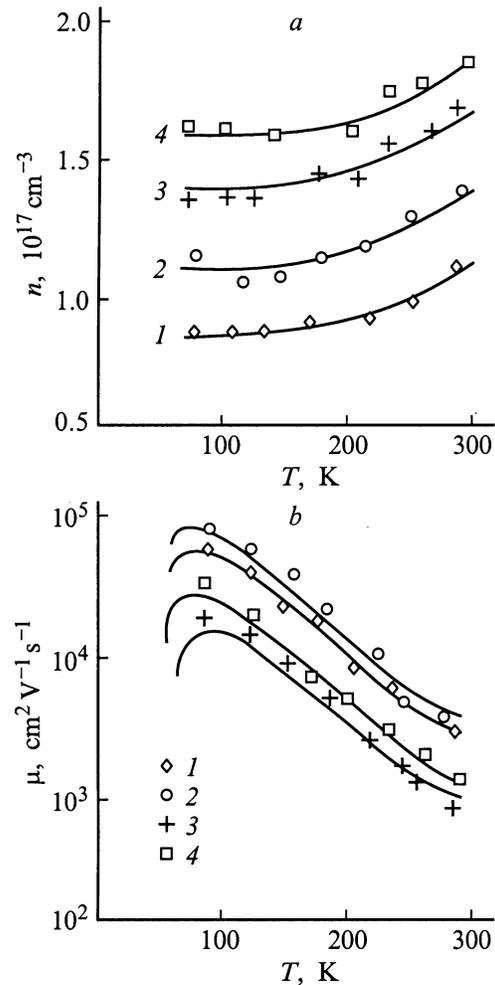
Температурные зависимости подвижности носителей заряда можно аппроксимировать функцией вида

$$\mu = \frac{1}{(A/T^{3/2} + BT^{5/2})}, \quad (3)$$

выбранной согласно правилу Матиссена, где первое слагаемое в знаменателе отвечает за рассеяние на ионизованных дефектах, а второе — на акустических фонах. Известно, что $B \propto E_{ac}^2/C_1$, где E_{ac} — константа деформационного потенциала, C_1 — усредненная скорость распространения акустических колебаний; $A \propto N_I$, N_I — полное число ионизированных примесей как доноров, так и акцепторов [5,6].

Полученные значения коэффициентов A и B приведены в таблице. Из таблицы видно, что для образцов 30 и 31 с низкой начальной концентрацией носителей заряда

коэффициент A при облучении увеличивается в 6–8 раз, а коэффициент B — в 2 раза, для образцов 29 и 32 с высокой начальной концентрацией носителей заряда коэффициенты A и B не изменяются, причем коэффи-



Температурные зависимости концентрации (*a*) и подвижности (*b*) носителей заряда для пленок n -PbSe до облучения (1, 2) и при облучении α -частицами (3, 4); 1, 3 — образец 31; 2, 4 — образец 30.

цент B равен значению для образцов первой группы до облучения. Это свидетельствует о различной природе преобладающих дефектов в обеих группах после облучения. В первой преобладают радиационные дефекты, во второй — собственные. В первой группе образующиеся при облучении межузельные атомы стабилизируются, во второй — рекомбинируют с имеющимися собственными вакансиями. Концентрация собственных дефектов до облучения в первой группе в 2 раза меньше, чем во второй.

На температурную зависимость концентрации носителей заряда влияет изменение концентрации вакансий, а на зависимость подвижности носителей заряда — изменение концентрации межузельных атомов.

Список литературы

- [1] Д.М. Заячук, В.А. Шендеровский. УФЖ, **36** (11), 1692 (1991).
- [2] Я.П. Салий. УФЖ, **43** (8), 968 (1998).
- [3] Д.М. Фрейк, В.В. Прокопив, Я.П. Салий. Неорг. матер., **32** (5), 546 (1996).
- [4] Д.М. Фрейк, А.К. Школьный, Я.П. Салий. УФЖ, **34** (9), 1392 (1989).
- [5] Д.М. Заячук. ФТП, **31** (2), 217 (1997).
- [6] Ф. Блатт. *Физика электронной проводимости в твердых телах* (М., Мир, 1971).

Редактор Т.А. Полянская

Temperature dependencies of electrical properties of *n*-type PbSe single crystal films under α -particle bombardment

Ya.P. Saliy, R.Ya. Saliy*

Precarpathian University,
284000 Ivano-Frankivsk, the Ukraine

* Kiev State University,
252022 Kiev, the Ukraine

Abstract Effects of low energy α -particle bombardment (5.5 MeV) on the temperature dependencies of electrical properties of *n*-type PbSe have been investigated. The carrier density in most cases increased due to the bombardment. Samples with an initial electron density as low as 10^{17} electrons/cm⁻³ changed their properties after an α -particle dose of approximately 10^{12} particles/cm⁻². The change was not steady for samples with higher initial carrier densities. Mobilities of charge carriers decreased in samples that had lower initial density.