

Механизм кинетики электрофизических свойств поликристаллических пленок p -PbSe при облучении α -частицами

© Я.П. Салий

Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаника,
76000 Ивано-Франковск, Украина

(Получена 25 июня 2005 г. Принята к печати 28 июня 2005 г.)

Исследовалось влияние облучения α -частицами низких энергий (5.5 МэВ) на электрические свойства поликристаллических пленок p -PbSe. Обнаружено, что концентрация (p) и подвижность (μ) носителей заряда уменьшаются в результате облучения. Линейная зависимость p и μ^{-1} от квадратного корня из интегрального потока $\Phi^{1/2}$ объясняется в допущении, что межузельные атомы обеих подрешеток захватываются собственными протяженными дефектами — дислокациями, межзеренными границами.

PACS: 73.50.Dn, 73.61.Le, 61.82.Fk

Радиационная обработка используется для контролируемого изменения электрофизических параметров узкозонных полупроводников, представляющих интерес для оптоэлектроники инфракрасного диапазона спектра [1–3]. Однако к настоящему времени отсутствуют сведения о механизме кинетики электрофизических свойств поликристаллических пленок p -PbSe при α -облучении.

В предлагаемой работе изучено влияние облучения α -частицами с энергией 5.5 МэВ интегральными потоками до $\Phi = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ на электрофизические параметры (концентрацию p и подвижность μ носителей тока) поликристаллических пленок p -типа проводимости. Образцы представляли собой пленки p -PbSe толщиной $\sim 3 \text{ мкм}$, осажденные в вакууме на сколы (111) BaF_2 методом горячей стенки. Согласно данным рентгеновской двухкristальной спектроскопии и топографии, пленки были поликристаллическими с размером зерен 0.01–1 мкм и углом мозаичности до $2'$. Измерения электрических параметров выполняли при температурах $T = 77$ и 300 К. Концентрация и подвижность носителей тока пленок составляли $p \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $\mu \approx 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ соответственно при $T = 77 \text{ К}$. Образцы облучались изотропным потоком α -частиц низкой энергии (5.5 МэВ, источник Pu^{238}), величина потока Φ определялась временем облучения t при известной плотности потока $\varphi = 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [4].

Экспериментальные потоковые зависимости концентрации и подвижности носителей тока образцов при $T = 77 \text{ К}$ показаны на рисунке (a и b соответственно). Концентрация носителей тока нелинейно уменьшается с увеличением Φ , проявляется примесная проводимость, на что указывает незначительное увеличение концентрации, наблюдаемое в измерениях при комнатной температуре. Из рисунка, b видно, что подвижность носителей тока также нелинейно уменьшается при $T = 77 \text{ К}$, однако при комнатной температуре изменение подвижности незначительное.

Полученные нелинейные зависимости концентрации носителей заряда от потока α -частиц можно объяснить изменением концентрации донорных вакансий селена

V_{Se}^{2+} и межузельных атомов свинца Pb_i^+ , акцепторных вакансий свинца V_{Pb}^{2-} и нейтральных межузельных атомов селена Se_i^0 в процессе облучения [1]. Уравнение электронейтральности имеет вид

$$p - n = 2[V_{\text{Pb}}^{2-}] - 2[V_{\text{Se}}^{2+}] - 1[\text{Pb}_i^+] + 0[\text{Se}_i^0]. \quad (1)$$

Данное соотношение свидетельствует о донорном действии облучения, т.е. об уменьшении концентрации дырок, при условии образования пар Френкеля одинаковой концентрации в обеих подрешетках. Однако элементарное представление о том, что образованные при облучении пары Френкеля не взаимодействуют с дефектами других типов, неверно, ибо в этом случае концентрация дефектов должна линейно увеличиваться с потоком облучения.

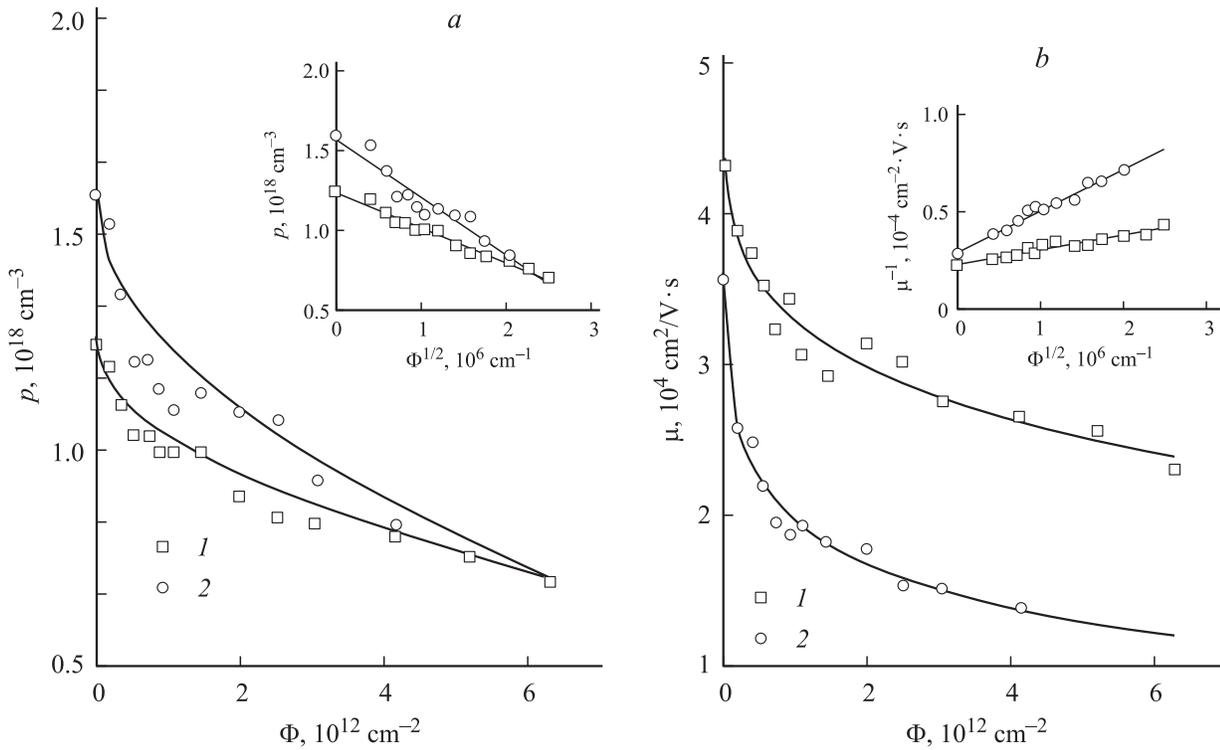
Нелинейное изменение концентрации дефектов с интегральным потоком при облучении полупроводников может происходить по следующим причинам [5]:

- изменение вероятности рекомбинации вакансии (V) и межузельного атома (I) при смещении уровня Ферми;
- взаимодействие V и I с другими дефектами и изменение этого взаимодействия при смещении уровня Ферми;
- изменение устойчивости дефектных комплексов из-за их перезарядки.

Рассмотрим модель, представленную в работе [6]. Для концентраций подвижных межузельных атомов C_i^m и вакансий C_v кинетические уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} dC_i^m/dt &= G\varphi - R(r_t C_t + r_v C_v)C_i^m, \\ dC_v/dt &= G\varphi - Rr_v C_v C_i^m, \end{aligned} \quad (2)$$

где G — скорость генерации межузельных атомов, φ — плотность потока α -частиц, r_t и r_v — радиусы захвата межузельного атома ловушкой и вакансией, C_t — концентрация ненасыщаемых ловушек, коэффициент R пропорционален коэффициенту диффузии подвижного межузельного атома. Если межузельные атомы достаточно подвижны, то быстро устанавливается стационар-



Зависимости концентрации (а) и подвижности (б) носителей заряда при 77 К для пленок p -PbSe от интегрального потока облучения α -частицами. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице. На вставках — те же зависимости в линеаризирующих координатах.

ное состояние с $dC_i^m/dt = 0$,

$$dC_i(\Phi)/d\Phi = Gr_iC_i/[r_iC_i + r_vC_v(\Phi)], \quad (3)$$

$$d\Phi = \varphi dt,$$

где C_i — число захваченных ловушками межузельных атомов. Рассмотрим один тип ловушек, так что $C_i = C_v$. Решив уравнение (3), получим зависимость от интегрального потока концентрации захваченных ловушками атомов:

$$C_i(\Phi) = q_iC_i[(2G\Phi/q_iC_i + 1)^{1/2} - 1], \quad (4)$$

где коэффициент $q_i = r_i/r_v$ учитывает эффективность захвата атома ловушкой по отношению к рекомбинации на вакансии.

При $G\Phi \gg q_iC_i$ решение (4) приводится к виду

$$C_i(\Phi) = (2q_iC_iG)^{1/2} \Phi^{1/2}, \quad (5)$$

а при условии $G\Phi \ll q_iC_i$ к виду

$$C_i(\Phi) = G\Phi. \quad (6)$$

Таким образом, концентрация не участвующих в рекомбинации радиационных дефектов обеих подрешеток, а следовательно, и концентрация носителей тока p , согласно (1), линейно изменяется либо с Φ , либо с $\Phi^{1/2}$. На вставке рисунка, а представлена экспериментальная зависимость p от $\Phi^{1/2}$. Видно, что точки в этих координатах хорошо ложатся на линейную зависимость вида

$$p = p_0 - k\Phi^{1/2}. \quad (7)$$

Коэффициенты p_0 и k , определенные из экспериментальных потоковых зависимостей концентрации носителей заряда для двух температур, приведены в таблице. Из таблицы видно, что коэффициенты для одного образца,

Параметры линейной аппроксимации экспериментальных зависимостей концентрации, $p = p_0 - k\Phi^{1/2}$, и обратной подвижности, $\mu^{-1} = B + A\Phi^{1/2}$, дырок в поликристаллических пленках p -PbSe при азотной и комнатной температурах от квадратного корня интегрального потока $\Phi^{1/2}$ α -частиц

Образец	T , К	p_0 , 10^{18} см^{-3}	k , 10^{11} см^{-2}	B , $10^{-5} \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-2}$	A , $10^{-11} \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-1}$
1	77	1.26 ± 0.02	2.2 ± 0.1	2.3 ± 0.1	0.74 ± 0.05
2		1.60 ± 0.04	3.5 ± 0.3	2.9 ± 0.2	2.1 ± 0.3
1	300	1.39 ± 0.03	2.4 ± 0.2	68 ± 3	0.6 ± 2
2		1.70 ± 0.04	3.4 ± 0.3	89 ± 7	1.3 ± 2

определенные при разных температурах, близки по величине, что соответствует примесной области проводимости.

На рисунке, *b* представлены нелинейные зависимости подвижности носителей тока при $T = 77$ К от интегрального потока α -частиц. Уменьшение подвижности связано с рассеянием на возрастающем при облучении количестве ионизованных дефектов. При комнатной температуре изменения не слишком заметны, так как основное рассеяние осуществляется на акустических фононах.

Зависимости подвижности носителей заряда от концентрации ионизованных дефектов и температуры можно аппроксимировать функцией вида

$$\mu^{-1} = A'/N_I + B, \quad (8)$$

выбранной согласно правилу Матиссена, где первое слагаемое отвечает за рассеяние на ионизованных дефектах, а второе — на акустических фононах. Известно, что $B \propto T^{5/2}$, $A' \propto T^{-3/2}$, N_I — полное число ионизованных примесей, как доноров, так и акцепторов [7,8].

В силу (5) первое слагаемое в (8) $A'N_I = A\Phi^{1/2}$. На вставке рисунка, *b* представлена экспериментальная зависимость μ^{-1} от $\Phi^{1/2}$. Видно, что точки в этих координатах хорошо ложатся на линейную зависимость вида

$$\mu^{-1} = A\Phi^{1/2} + B. \quad (9)$$

Полученные из аппроксимации экспериментальных данных значения коэффициентов *A* и *B* приведены в таблице. Из таблицы видно, что отношение коэффициентов *B* для двух температур действительно равно $\sim (300/77)^{5/2} = 30$, а отношение коэффициентов *A* могло бы быть $\sim (300/77)^{3/2} = 7.7$, однако это скрыто из-за большой погрешности коэффициента *A* при высокой температуре.

Представленные результаты свидетельствуют об адекватности предлагаемой модели механизма кинетики радиационных дефектов, состоящего в захвате подвижных межузельных атомов обеих подрешеток на ненасыщаемых ловушках и проявляющегося в потоковых зависимостях как концентрации, так и подвижности носителей тока.

Список литературы

- [1] Д.М. Заячук, В.А. Шендеровский. УФЖ, **36** (11), 1692 (1991).
- [2] Я.П. Салий, Р.Я. Салий. ФТП, **34** (6), 968 (2000).
- [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] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., Радио и связь, 1981).
- [6] С.П. Козырев, Л.К. Водопьянов. ФТП, **17** (5), 893 (1983).

[7] Д.М. Заячук. ФТП, **31** (2), 217 (1997).

[8] Ф. Блатт. *Физика электронной проводимости в твердых телах* (М., Мир, 1971).

Редактор Л.В. Шаронова

A kinetic mechanism of the electrical properties of the *p*-type PbSe polycrystalline films under the α -particle bombardment

Ya.P. Salii

The Pre-Carpathian National University,
28400 Ivano-Frankivsk, Ukraine