

Физика и техника полупроводников. - 2006. - Т.40, №2. — С.177-179.

## **Механизм кинетики электрофизических свойств поликристаллических пленок р-PbSe при облучении $\alpha$ -частицами**

*Я.П. Салий*

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

*(Получена ... марта 2005 г. Принята к печати ... август 2005 г.)*

Исследовалось влияние  $\alpha$ -облучения при низких энергиях (5.5 МэВ) на электрические свойства поликристаллических пленок р-PbSe. Обнаружено, что концентрация и подвижность носителей заряда уменьшается в результате облучения. Линейная зависимость  $\rho$  и  $\mu^{-1}$  от  $\Phi^{1/2}$  объясняется исходя из допущения, что межузельные атомы обеих подрешеток захватываются собственными протяженными дефектами — дислокациями, межзеренными границами.

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 р-PbSe при  $\alpha$ -облучении.

В предлагаемой работе изучено влияние облучения  $\alpha$  - частицами энергией 5.5 МэВ потоками до  $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  на электрофизические параметры (концентрацию  $\rho$  и подвижность  $\mu$  носителей тока) поликристаллических пленок р-типа проводимости. Образцы р-PbSe являлись пленками толщиной  $\sim 3$  мкм, осажденными в вакууме на сколах (111)  $\text{BaF}_2$  методом горячей стенки. Согласно данным рентгеновской двухкристальной спектрометрии и топографии пленки были поликристаллическими с

размером зерен 0.01 - 1 мкм и мозаичностью до 2'. Концентрация и подвижность носителей тока пленок составляли  $p \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $\mu \approx 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  соответственно при  $T=77 \text{ К}$ . Измерения электрических параметров выполняли при температурах 77 и 300 К. Образцы облучались изотропным потоком  $\alpha$ -частиц низкой энергии 5.5 МэВ (источник  $\text{Pu}^{238}$ ), величина потока определялась временем облучения по известной плотности потока  $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [4].

Экспериментальные потоковые зависимости концентрации и подвижности носителей тока образцов при  $T = 77 \text{ К}$  показаны на рисунке а и б соответственно. Концентрация носителей тока нелинейно уменьшается, проявляется примесная проводимость, на что указывает незначительное увеличение концентрации для измерений при комнатной температуре. Из рисунка б видно, что подвижности носителей тока также нелинейно уменьшается при  $T = 77 \text{ К}$ , однако при комнатной температуре изменение подвижности незначительное.

Полученные нелинейные потоковые зависимости концентрации носителей заряда можно объяснить изменением концентрации донорных вакансий селена  $V_{\text{Se}}^{2+}$  и межузельных атомов свинца  $\text{Pb}_i^+$ , акцепторных вакансий свинца  $V_{\text{Pb}}^{2-}$  и нейтральных межузельных атомов селена  $\text{Se}_i^0$  в процессе облучения [1]. Из уравнения электронейтральности получим

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

Данное соотношение свидетельствует о донорном действии облучения, т.е. о уменьшении концентрации дырок, при условии образования пар Френкеля одинаковой концентрации в обеих подрешетках.

Однако, элементарное представлений о том, что образованные при облучении близкие 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:

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

где  $G$  — скорость генерации межузельных атомов,  $\varphi$  — плотность потока  $\alpha$ -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 стационарное состояние с  $dC_i^m/dt = 0$ ,

$$\begin{aligned} dC_i(\Phi)/d\Phi &= G r_t C_t / (r_t C_t + r_v C_v(\Phi)), \\ d\Phi &= \varphi dt, \end{aligned} \quad (3)$$

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:

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

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

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

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

а при условии  $G\Phi \ll q_t C_t$  к виду

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

Таким образом концентрация сохранившихся от рекомбинации радиационных дефектов обеих подрешеток, а следовательно и концентрация носителей тока  $p$ , согласно (1), линейны либо с  $\Phi$  либо с  $\Phi^{1/2}$ . На вставке рисунка а представлена экспериментальная зависимость  $p$  от  $\Phi^{1/2}$ . Из графика видно, что точки в этих координатах хорошо ложатся на прямую линейной зависимости 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 определенные для разных температур для одного образца близки по величине, что соответствует примесной области проводимости.

На рисунке b представлены нелинейные зависимости подвижности носителей тока при  $T = 77K$  от интегрального потока  $\alpha$ -частиц. Уменьшение подвижности связано с рассеянием на возросшем количестве ионизированных дефектов. При комнатной температуре изменение не слишком заметно, так как основное рассеивание осуществляется на акустических фононах.

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

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

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

В силу изложенного выше (5) слагаемое  $A' N_I = A\Phi^{1/2}$ . На вставке рисунка b представлена экспериментальная зависимость  $\mu^{-1}$  от  $\Phi^{1/2}$ . Из графика видно, что точки в этих координатах хорошо ложатся на прямую линейной зависимости 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 о адекватности предлагаемой модели механизма кинетики радиационных дефектов состоящего в захвате подвижных межузельных атомов обеих подрешеток на ненасыщаемых ловушках и проявляющегося как на потоковых зависимостях 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. Фреик, В.В. Прокопив, Я.П. Салий. Неорг. матер., **32**(5), 546 (1996)
- [4] Д.М. Фреик, 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).

Таблица

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  $\Phi^{1/2}$  облучения  $\alpha$ -частицами

Образец №	T, К	$p_0,$ $10^{18} \text{ см}^{-3}$	$k, 10^{11} \text{ см}^{-2}$	B, $10^{-5} \text{ В с см}^{-2}$	A, $10^{-11} \text{ В с см}^{-1}$
1	77	$1.26 \pm 0.02$	$2.2 \pm 0.1$	$2.3 \pm 0.1$	$0.74 \pm 0.05$
2		$1.60 \pm 0.04$	$3.5 \pm 0.3$	$2.9 \pm 0.2$	$2.1 \pm 0.3$
1	300	$1.39 \pm 0.03$	$2.4 \pm 0.2$	$68 \pm 3$	$0.6 \pm 2$
2		$1.70 \pm 0.04$	$3.4 \pm 0.3$	$89 \pm 7$	$1.3 \pm 2$

## ПОДПИСИ

к рисунку статьи Салия Я.П. “Механизм кинетики электрофизических свойств поликристаллических пленок p-PbSe при облучении  $\alpha$ -частицами”

Рисунок. Зависимости концентрации (а) и подвижности (b) носителей заряда для пленок p-PbSe от интегрального потока облучения  $\alpha$ -частицами. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице. На вставках представлены графики в логарифмирующих эти зависимости координатах.

## **Kinetic mechanism of electrical properties of p-type PbSe polycrystal films under $\alpha$ -particle bombardment**

Precarpathian National University,  
28400 Ivano-Frankivsk, the Ukraine

**Abstract** Effects of low energy  $\alpha$ -particle bombardment (5.5 MeV) on the dose dependencies of electrical properties of p-type PbSe have been investigated. The carrier density  $p$  decreases and mobilities  $\mu^{-1}$  increases linear over  $\Phi^{1/2}$ ,  $\Phi$  is a dose of  $\alpha$ -particles. This behaviour are explained by a capture of interstitials on linear defects, that is dislocation and grain boundaries.

