

ОБРАЗОВАНИЕ И ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ПЛЕНКАХ p -Pb_{0.76}Sn_{0.24}Te ПРИ ПРОТОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Д. М. Фреик, Я. П. Салий, М. А. Рувинский, И. Я. Горичок,
А. Д. Фреик, А. М. Добровольская

Ивано-Франковский педагогический институт им. В. С. Стефаника, 284000, Ивано-Франковск, Украина
(Получена 19.03.1992. Принята к печати 26.06.1992)

Приведены результаты исследования протонного облучения и изохронного отжига пленок p -Pb_{0.76}Sn_{0.24}Te. Из экспериментальных данных определен параметр процесса отжига — энергия активации $E_a = 0.34$ эВ. Показано, что процесс отжига подчиняется кинетике первого порядка. Сделано предположение, что при облучении френкелевские пары, частично рекомбинируя, образуют комплексы дефектов, которые при отжиге диссоциируют, а составляющие дефектов мигрируют до момента их аннигиляции.

1. На основании результатов исследования электрофизических параметров пленок Pb_{1-x}Sn_xTe при $x = 0.24$, облученных протонами [1], определены особенности кинетики отжига радиационных дефектов, сделаны предположения о характере процесса дефектообразования.

Пленки для исследований получались методом вакуумного испарения. Подложками служили свежие сколы кристаллов BaF₂ и CaF₂. Толщина пленок составляла 1—5 мкм. Исходные пленки имели проводимость p -типа и концентрацию носителей заряда $\sim 10^{18}$ см⁻³. Для уменьшения концентрации они изотермически отжигались в парах металла. Облучение проводилось на ускорителе протонов с энергией 200—400 кэВ дозами до 10^{15} см⁻² при 300 К. После облучения пленки отжигались в атмосфере He при 310—450 К в изохронном режиме. Изменение концентрации введенных облучением радиационных дефектов оценивалось на основе измененных при 87 К коэффициента Холла и проводимости.

2. Параметры исходных пленок и результаты облучения приведены в таблице и на рис. 1. Установлено, что при облучении пленок протонами наблюдается уменьшение концентрации носителей, а при определенных дозах — изменение проводимости с p -типа на n -тип. Электрические параметры облученных пленок полностью восстанавливаются при температурах отжига 360—420 К. На основании приведенных в таблице данных, а также зависимостей коэффициента Холла R_H от температуры изохронного отжига определена концентрация доноров N_D в пленках для каждой температуры (рис. 2). При этом исходили из предположения, что во всей переходной области в исходном 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:

$$\sigma = e\mu_p(p + bn),$$

$$R_H = \frac{p - nb^2}{e(p + nb)^2},$$

$$np = n_i^2,$$

(1)

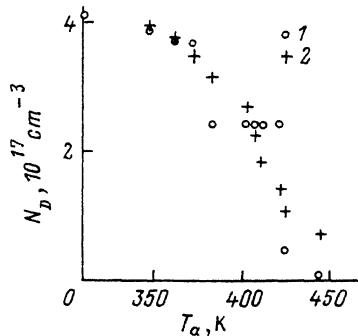
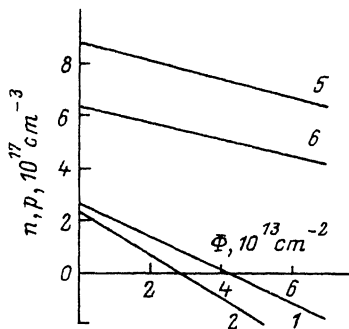


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей заряда в пленках $\text{Pb}_{0.76}\text{Sn}_{0.24}\text{Te}$ от дозы Φ протонов. $T = 87$ К. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

Рис. 2. Зависимость концентрации доноров N_D в облученном протонами образце 2 (см. таблицу) от температуры изотермического отжига T_a . 1 — эксперимент, 2 — расчет по (5). $T = 87$ К.

где $b = \mu_n/\mu_p$, $n_i = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ — собственная концентрация носителей при 87 К. Концентрации доноров N_D и акцепторов N_A связаны между собой условием электронейтральности

$$n - p = N_D - N_A, \quad (2)$$

где $N_A = p_0$ — исходная концентрация дырок в некомпенсированных пленках до облучения.

3. Для объяснения кинетики процессов отжига использовался формализм теории скоростей химических реакций [2]. При этом процесс отжига определялся постоянной энергией активации E_a и порядком реакции γ согласно соотношению

$$dN/dt = -K_0 N^\gamma \exp(-E_a/kT), \quad (3)$$

где $N = N_D$ — концентрация доноров, K_0 — предэкспоненциальный множитель, k — постоянная Больцмана, T — температура отжига. Интегрируя это уравнение для случая мономолекулярного ($\gamma = 1$) механизма процесса отжига, получим

Параметры исследуемых пленок

№ образца	Концентрация носителей (n, p) $\cdot 10^{-17}, \text{ см}^{-3}$	Подвижность $\mu \cdot 10^{-3}, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
До облучения		
1	2.7 (p)	6.2
2	2.4 (p)	2.1
5	8.8 (p)	8.2
6	6.4 (p)	1.9
После облучения*		
1	0.84 (n)	8.0
2	1.8 (n)	3.8
5	7 (p)	6.7
6	4.2 (p)	1.0

Примечание. * Дозы облучения, 10^{13} см^{-2} :
1 — 5.5, 2, 5 — 5, 6 — 7.

Рис. 3. Зависимость расчетной концентрации носителей заряда от концентрации дефектов N_d для пленок Pb_{0.76}Sn_{0.24}Te. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

$$N = N_D^* \exp [-K_0 t \exp (-E_a/kT)], \quad (4)$$

где N_D^* — концентрация доноров в облученных пленках до начала отжига. Неизвестные параметры E_a и K_0 были получены с помощью аппроксимации экспериментальных данных изохронного отжига (рис. 2) функциональной зависимостью (4), преобразованной в итерационную,

$$N_i = N_{i-1} \exp [-K_0 t \exp (-E_a/kT)], \quad (5)$$

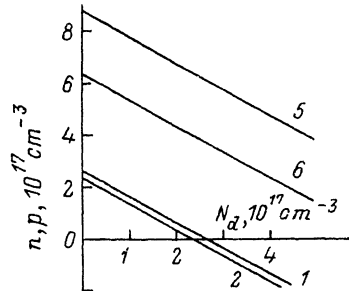
где t — время изохронного отжига. Проведенные расчеты показали, что энергия активации и доминирующий порядок реакции составляют $E_a = 0.34 \pm 0.05$ эВ, $\gamma = 1$ соответственно. Заметим, что попытки аппроксимации экспериментальных результатов бимолекулярным механизмом реакции ($\gamma = 2$) или же суперпозицией двух процессов ($\gamma = 1$ и $\gamma = 2$) не привели к успеху.

4. Анализ полученных результатов позволяет предположить, что основными первичными радиационными дефектами при протонном облучении, определяющими концентрацию электронов в пленках, являются френкелевские пары в подрешетке и металла, и халькогена [3]. При образовании одинакового количества пар Френкеля в обеих подрешетках с учетом их зарядового состояния [3, 4] изменение концентрации носителей определится соотношением

$$\Delta n = 2 [V_{Te}^{2+}] - 2(1-x) [V_{Pb}^{2-}] - 2x [V_{Sn}^{2-}] + 0 [Te_i^0] + (1-x) [Pb_i^+] + x [Sn_i^+]. \quad (6)$$

Зависимости расчетных значений концентрации носителей заряда n ($n = n_0 + \Delta n$, где n_0 — исходные концентрации в пленках после облучения) от концентрации дефектов ($N_d = [V_{Te}^{2+}] = [Te_i^0] = (1-x) [Pb_i^+] + x [Sn_i^+] = (1-x) \times [V_{Pb}^{2-}] + x [V_{Sn}^{2-}]$) представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что характер этих зависимостей полностью совпадает с экспериментальными данными (рис. 1). Средняя скорость изменения концентрации носителей заряда при протонном облучении совпадает со скоростью образования пар Френкеля и составляет $(0.3-0.8) \cdot 10^4$ см⁻¹. Наблюдаемое увеличение подвижности носителей заряда в пленках после облучения (см. таблицу) связано с большей подвижностью электронов, чем дырок, определявших величину подвижности в исходном материале p -типа. Некоторая часть образованных дефектов после облучения рекомбинирует, а другая образует стабильные при комнатной и более высокой температуре вакансионные и междоузельные комплексы. Отжиг приводит к распаду этих комплексов, миграции и взаимному уничтожению вакансий и междоузельных атомов. Все это в целом и обуславливает восстановление электрических параметров пленок.

В заключение авторы благодарят В. И. Фистуля и В. П. Зломанова за интерес к работе, обсуждение ее результатов и ценные замечания.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] G. G. Wang, T. F. Tao, T. W. Sunier. *J. Appl. Phys.*, **45**, 3981 (1974).
- [2] Б. Ф. Ормонт. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников, 528. М. (1982).
- [3] N. I. Parada. *Phys. Rev. B*, **3**, 2042 (1971).
- [4] L. Palmethofer. *Phys. Rev. A*, **30**, 139 (1984).

Редактор Л. В. Шаронова
