

©1995 г.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИЛЬНО КОМПЕНСИРОВАННЫХ ПЛЕНОК СУЛЬФИДА СВИНЦА, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ПОМОЩИ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С.П.Зимин, Р.Ф.Зайкина

Ярославский государственный университет,

150000, Ярославль, Россия

(Получена 5 июля 1994 г. Принята к печати 8 ноября 1994 г.)

Исследованы фотоэлектрические параметры пленок сульфида свинца и твердых растворов сульфида свинца — сульфида олова, компенсированных путем облучения электронами.

Перспективным направлением при создании фотоприемных устройств является получение сильно компенсированных полупроводниковых материалов, имеющих флуктуации потенциального рельефа дна зоны проводимости и потолка валентной зоны. Такая модуляция зон реализуется, например, в квазиоднородных пленках твердых растворов с сильной зависимостью ширины запрещенной зоны от состава [1]. Наличие ярко выраженного потенциального рельефа в пленках PbS-SnS [1,2], PbS-CdS [3], PbS-PbO [4] в сочетании с возможностью достижения сильной компенсации за счет введения акцепторной примеси натрия позволяют создавать на их основе охлаждаемые фоторезисторы ИК диапазона, сдвинутые в сторону как меньших, так и больших длин волн относительно 3.7 мкм. В [5] было показано, что получить компенсированные пленки сульфида свинца можно также при помощи облучения материала ионами или высокоэнергетичными электронами. При дозах облучения, которые соответствуют инверсии типа проводимости от дырочного к электронному, концентрация носителей заряда при 77 К может быть уменьшена до уровня $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

В данной работе проведено излучение фотоэлектрических параметров компенсированных путем облучения пленок сульфида свинца и твердых растворов сульфида свинца — сульфида олова с малой мольной долей второго компонента. Исходные пленки PbS(Na) и $\text{Pb}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}\text{S(Na)}$ были выращены авторами [1] методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках (111) BaF_2 . Слой имели p -тип проводимости и концентрацию носителей заряда $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в интер-

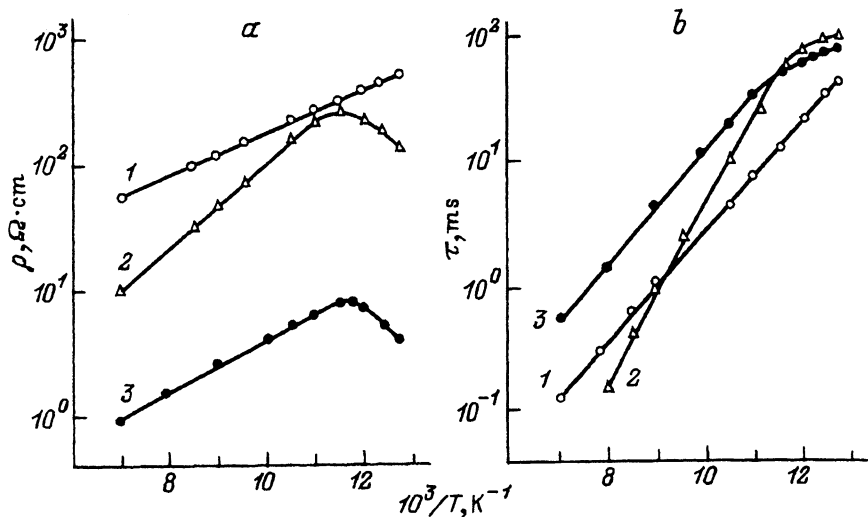


Рис. 1. Температурные зависимости темнового удельного сопротивления (а) и времени релаксации фотопроводимости при импульсной засветке (б) для компенсированных пленок:

1 — $\text{PbS}(\text{Na}, \text{B}^+)$, 2 — $\text{Pb}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}\text{S}(\text{Na}, e^-)$, 3 — $\text{PbS}(\text{Na}, \text{H}^+)$.

вале температур 77–300 К. Таким образом, для облучения использовались пленки сульфида свинца — сульфида олова, в которых эффект сильной компенсации в результате отклонения от оптимальных режимов эпитаксии отсутствовал. Исследования пленок на электронном микроскопе и оже-спектрометре показали, что слои обладали монокристаллической структурой, и распределение основных химических элементов по толщине и по площади образцов с макроскопической точки зрения было однородным. Облучение пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{S}(\text{Na})$ проводилось высокоэнергетичными электронами с энергией 4 МэВ, пленок $\text{PbS}(\text{Na})$ — ионами бора или водорода с энергией 50 кэВ. Дозы облучений для достижения концентраций носителей при 77 К 10^{15} – 10^{16} см^{-3} составляли $(1-2) \cdot 10^{17}$ см^{-2} при облучении электронами и $(1-5) \cdot 10^{15}$ см^{-2} при облучении ионами водорода или бора. Толщина пленок при имплантации ионов не превышала 0.2 мкм, а для остальных случаев была меньше 2.2 мкм.

На рис. 1 показаны типичные температурные зависимости темнового удельного сопротивления (ρ) и времени релаксации фотопроводимости (τ) компенсированных облученных пленок $\text{PbS}(\text{Na}, \text{B}^+)$, $\text{Pb}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}\text{S}(\text{Na}e^-)$, $\text{PbS}(\text{Na}, \text{H}^+)$. Время релаксации τ определялось из анализа релаксационных кривых фотопроводимости при засветке чередующимися световыми импульсами с длиной волны 1.1 мкм в условиях равновесного теплового фона. Как следует из рис. 1, температурные зависимости удельного сопротивления и времени релаксации фотопроводимости при температурах выше 80 К носят активационный характер, типичный для сильно компенсированных полупроводников с профилем дна зоны проводимости и потолка валентной зоны. Отклонение от экспоненциального закона для некоторых образцов при температурах ниже 80 К связано с влиянием теплового фона. Величина энергии

активации E_{ap} , определенная из температурной зависимости удельного сопротивления, находилась для исследуемых образцов в интервале 8–70 мэВ, а энергия активации $E_{ат}$, рассчитанная из зависимости $\tau(T)$, составляла 45–140 мэВ. При этом выполнялось соотношение $E_{ат} > E_{ap}$, характерное для сильно компенсированных полупроводников с модуляцией зон [6]. Максимальные времена релаксации при 77 К составляли доли секунды. Сравнение полученных величин τ , E_{ap} и $E_{ат}$ с аналогичными параметрами для сильно компенсированных необлученных пленок твердых растворов на основе сульфида свинца [1–4] говорит о том, что они соответствуют друг другу. Можно предположить, что в случае облучения электронами пленок $Pb_{1-x}Sn_xS(Na)$ за счет появления радиационных дефектов происходит компенсация материала без существенного изменения рельефа зон. В случае облучения пленок $PbS(Na)$ ионами бора или водорода дополнительно возникает модуляция зон. Флуктуации потенциального рельефа в этом случае сравнимы с флуктуациями в квазиоднородных пленках твердых растворов узкозонных и широкозонных полупроводников. Время релаксации τ в компенсированных пленках $PbS(Na, B^+)$, $PbS(Na, H^+)$ на 2–3 порядка превышает время релаксации в исходных необлученных слоях. В уникальных случаях для сильно компенсированных пленок, сформированных при имплантации ионов бора, энергия активации $E_{ap} = 90–180$ мэВ [5], что значительно превосходит аналогичный параметр для сильно компенсированных пленок с микрофлуктуациями состава.

На рис. 2 приведена типичная для исследуемых пленок релаксационная кривая фотопроводимости при 77 К после однократной засветки 5-секундным световым импульсом с длиной волны 1.1 мкм. При этом в результате засветки проводимость увеличивалась в 1.3–5.5 раза, а затем экспоненциально (рис. 2, b) уменьшалась до некоторого постоянного значения σ_1 , превосходящего начальный уровень темновой проводимости σ_0 . Кратность остаточной проводимости равнялась 1.1–2.8, времена процесса долговременной релаксации τ_1 составляли 10–100 с. Наблюдался эффект температурного гашения остаточной

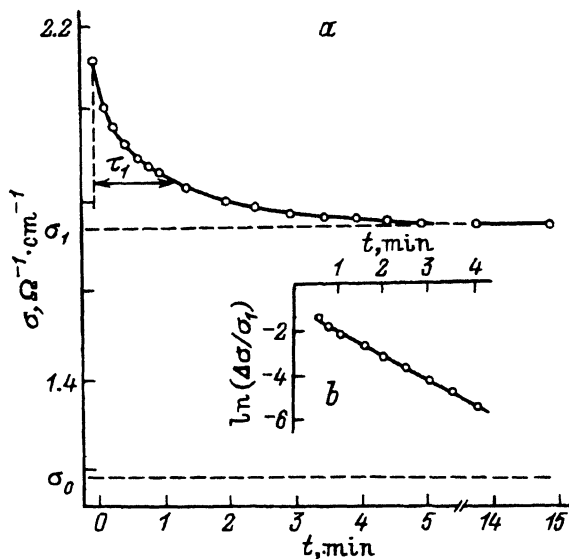


Рис. 2. Типичная кривая релаксации фотопроводимости после однократной засветки компенсированных облученный пленок на примере образца $PbS(Na, B^+)$ при 77 К.

проводимости, когда увеличение температуры до 250–300 К приводило к восстановлению первоначального значения проводимости σ_0 . Аналогичные результаты были характерны для процессов долговременной релаксации фотопроводимости при засветке одиночным импульсом для сильно компенсированных пленок $Pb_{1-x}Cd_xS(Na)$, $Pb_{1-x}Sn_xS(Na)$, $PbS_{1-x}O_x(Na)$ [7]. Проведение высокотемпературного отжига в вакууме при температуре 500 К в течение 2 ч не привело к существенному изменению электрофизических и фотоэлектрических параметров сильно компенсированных облученных образцов. Незначительный уход параметров был связан с частичным отжигом радиационных дефектов и сдвигом материала в сторону дырочной проводимости.

Таким образом, результаты данной работы свидетельствуют о том, что сильно компенсированные пленки, полученные при помощи радиационных воздействий, обладают такими же фотоэлектрическими параметрами, что и сильно компенсированные пленки твердых растворов узкозонных и широкозонных полупроводников с микрофлуктуациями состава. При облучении легкими и тяжелыми частицами можно привести слой квазиоднородных твердых растворов в состояние с сильной компенсацией, если это не удалось в процессе эпитаксии. Достоинства радиационной обработки заключаются также в том, что в процессе облучения электронами или имплантации ионов можно сформировать эффективный рельеф зон в чистом сульфиде свинца.

Авторы благодарны И.А. Дрозду за предоставленные для облучения пленки сульфида свинца и внимание к данной проблеме.

Список литературы

- [1] О.В. Горшкова, И.А. Дрозд, В.И. Стафеев. ФТП, **26**, 510 (1992).
- [2] Л.Г. Бакуева, И.Б. Захарова, В.И. Ильин, С.Ф. Мусихин. ФТП, **22**, 1896 (1988).
- [3] С.П. Зимин, Е.Л. Корегина, Л.В. Бочкарева. ФТП, **27**, 185 (1993).
- [4] Л.В. Бочкарева, О.В. Горшкова, И.А. Дрозд, С.П. Зимин, Е.Л. Корегина. Тез. докл. 3 Всес. конф. «Материаловедение талькогенидных полупроводников» (Черновцы, 1991) с. 195.
- [5] Р.Ф. Зайкина, С.П. Зимин, Ш.Ш. Сарсембинов, Л.В. Бочкарева. ФТП. **28** (1994).
- [6] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, **10**, 209 (1976).
- [7] С.П. Зимин, Е.Л. Корегина, Л.В. Бочкарева, И.А. Дрозд. Матер. 4 конф. по физике и технологии тонких пленок (Ивано-Франковск, 1993) с. 98.

Редактор В.В. Чалдышев

Photoelectrical properties of highly compensated lead sulphide films produced by means of radiation technologies

S.P. Zimin, B.F. Zaikina

Yaroslavl State University, 150000 Yaroslavl, Russia