

©1994 г.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК СУЛЬФИДА СВИНЦА, ПОДВЕРГНУТЫХ РАДИАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Р.Ф.Зайкина, С.П.Зимин, Ш.Ш.Сарсембинов, Л.В.Бочкарева

Ярославский государственный университет,
150000, Ярославль, Россия

(Получена 14 января 1993 г. Принята к печати 10 мая 1994 г.)

Проведено исследование электрических свойств пленок сульфида свинца с различными легирующими элементами, подвергнутых облучению высокоэнергетичными электронами с энергией 4 МэВ и ионами бора с энергией 50 кэВ. Слои сульфида свинца были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии и содержали примесь натрия или кислорода. Из анализа температурных и дозовых зависимостей концентрации и подвижности носителей заряда вытекает, что присутствие в исходном материале даже небольших количеств легирующей примеси может существенно влиять на электрофизические параметры облученных пленок. Показана перспективность радиационных технологий для получения сильно компенсированных пленок сульфида свинца.

В последнее время для изготовления фотодиодных структур на основе узкозонных полупроводников наряду с традиционными методами широкое распространение получили методы радиационной технологии. Они основаны на использовании ионизирующего излучения или имплантации ионов в качестве эффективного способа легирования за счет введения электрически активных примесей и дефектов [1,2]. При изучении электрофизических свойств узкозонных полупроводников, подвергнутых воздействию ионизирующих излучений, было установлено, что скорость введения радиационных дефектов зависит как от исходного стехиометрического состава материала, так и от сорта легирующей добавки [2-4].

В настоящей работе представлены результаты исследований электрофизических параметров пленок сульфида свинца с различными легирующими элементами, подвергнутых облучению потоками высокоэнергетичных электронов с энергией 4 МэВ и ионов бора с энергией 50 кэВ. Исходные слои сульфида свинца были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках BaF_2 с ориентацией (111) и содержали примеси Na_2S (0.5-2%), PbO (0.5-2%). Некоторые свойства необлученных пленок $\text{PbS}(\text{Na})$, $\text{PbS}(\text{O})$ описаны в работах

[5,6]. Слои имели проводимость p -типа с концентрацией дырок при 77 К ($3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$) см^{-3} . Дополнительные исследования проводились на пленках PbS(O) электронного типа проводимости с концентрацией электронов $n \approx 10^{18} \text{см}^{-3}$. Среди пленок сульфида свинца с кислородом для облучения отбирались образцы, в которых эффект сильной компенсации отсутствовал. Слои имели монокристаллическую структуру, за исключением сульфида свинца с большим содержанием кислорода, когда пленки обладали зернистой структурой с характерным размером зерна сферической формы 0.2-0.5 мкм. Толщина пленок составляла 1.1-1.2 мкм. Облучение электронами и ионами бора проводилось при комнатной температуре потоками $\Phi_e = 10^{16} - 10^{18} \text{см}^{-2}$ и $\Phi_B = 5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{16} \text{см}^{-2}$ соответственно. Постимплантационный отжиг образцов проводился в вакууме при температуре 580 К.

На рис. 1 приведены типичные зависимости коэффициента Холла R_H от температуры для пленок PbS(Na) и PbS(O) после электронного облучения. При значении потока электронов $\Phi_e \approx 3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-2}$ концентрация дырок в пленках PbS(Na) при 77 К уменьшалась до уровня ($10^{15} - 10^{16}$) см^{-3} и изменение коэффициента Холла с температурой носило активационный характер (кривая 1). Проведение вакуумного отжига приводило к увеличению концентрации дырок и коэффициент Холла практически не изменялся в температурном интервале 77-300 К (кривая 2). Аналогичные результаты наблюдались и для облученных электронами пленок PbS(O) (кривая 3), однако при проведении пост-

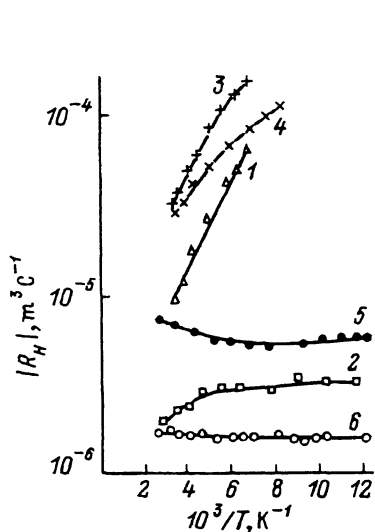


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла для образцов PbS , облученных потоком электронов с дозами $\Phi_e, \text{см}^{-2}$: 1, 2 — $3 \cdot 10^{17}$, 3, 4 — $4.7 \cdot 10^{17}$, 5 — $7 \cdot 10^{17}$, 6 — $8.4 \cdot 10^{17}$. Образцы 3, 4 легированы кислородом, остальные — натрием. Образцы 2 и 4 — после термического отжига.

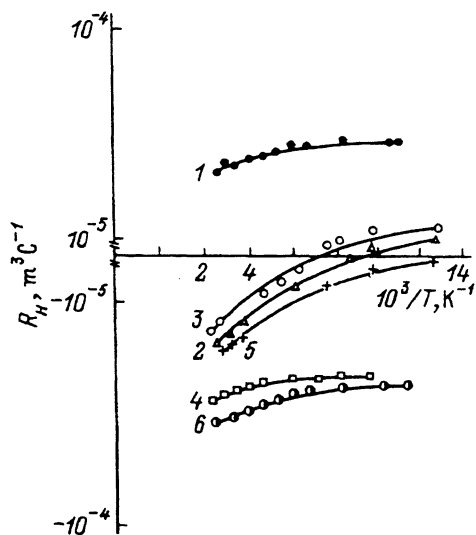


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла для пленок PbS(Na) после облучения ионами бора, $\Phi_B, \text{см}^{-2}$: 1 — 0, 2, 5 — 10^{15} , 6 — 10^{16} . Уровень легирования Na, %: 4, 5 — 1; 2, 3, 6 — 2. Образцы 3 и 5 — после термического отжига.

имплантационного отжига сохранялся активационный характер зависимости $R_H(T)$. Низкие концентрации дырок могут быть объяснены в рамках эффекта компенсации, возникающего при введении радиационных дефектов донорного типа при электронном облучении. Подобные активационные зависимости $R_H(T)$ наблюдались в сильно компенсированных образцах халькогенидов свинца в работах [5,7,8].

Типичные температурные зависимости коэффициента Холла для исследуемых пленок с толщинами более 0.8 мкм после облучения ионами бора на примере слоев $PbS(Na)$ показаны на рис. 2. Как следует из приведенных зависимостей, наблюдается низкотемпературная инверсия знака коэффициента Холла, типичная для неоднородных двухслойных структур [9]. Поскольку глубина проникновения ионов бора меньше толщины пленки, происходит образование инверсного или обедненного поверхностного слоя в пленке p -типа проводимости. Оценка величины концентрации носителей в поверхностном слое в рамках двухслойной модели Петрица показала, что концентрация электронов и дырок при 77 К может достигать $(10^{14} - 10^{16}) \text{ см}^{-3}$. Проведение дополнительных исследований по ионному облучению тонких пленок $PbS(Na)$ с толщиной 0.1 мкм и с исходной концентрацией дырок при азотной температуре $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ свидетельствовало о том, что при флюенсе ионов бора $\Phi_B = 5 \cdot 10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$ пленки $PbS(Na, B^+)$ действительно являлись сильно компенсированными с минимальной концентрацией носителей на уровне 10^{14} см^{-3} . Температурные зависимости коэффициента Холла и электропроводности таких пленок имели активационный характер с энергиями активации (90–180) МэВ. Частичный отжиг радиационных дефектов при 100°C в течение 1 ч приводил к тому, что

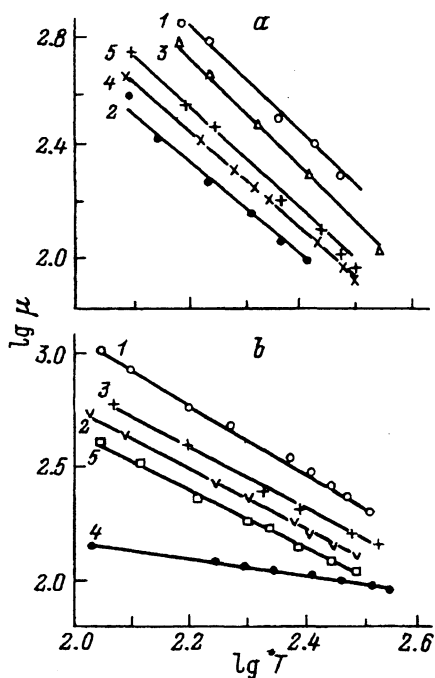


Рис. 3. Температурная зависимость подвижности носителей заряда (в $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) для облученных пленок сульфида свинца. a — облучение пленок $PbS(Na)$ электронами дозами $\Phi_e, \text{ см}^{-2}$: 1,2 — $3 \cdot 10^{17}$, 3 — $4.7 \cdot 10^{17}$, 4,5 — $6.4 \cdot 10^{17}$. Образцы 2, 5 — после отжига; b — облучение пленок $PbS(A)$ ионами бора; тип примеси A и уровень легирования: 1 — Na, 1%; 2 — Na, 1%; 3 — Na, 2%; 4,5 — O, 0.5%. Кривые 1,3,5 — для пленок после отжига.

область доз, при которых наблюдалось явление сильной компенсации, смещалась в сторону больших значений $\Phi_B = (10^{15} - 5 \cdot 10^{16}) \text{ см}^{-2}$.

На рис. 3 показаны температурные зависимости подвижности носителей заряда μ для пленок $\text{PbS}(\text{Na})$, $\text{PbS}(\text{O})$ после облучения электронами и ионами бора. Из рис. 3,а следует, что заметное влияние на величину подвижности носителей оказывает как исходный состав пленок, так и доза электронного облучения. Однако при этом для всех образцов в интервале температур (100–400) К наблюдается степенной закон $\mu \sim T^{-\nu}$ со значениями $\nu \approx 2.0$. Для образцов, подвергнутых облучению ионами бора, степенной закон изменения подвижности с температурой сохранялся, однако показатель степени ν уменьшился и составлял 1.3–1.5 для слоев $\text{PbS}(\text{Na}, \text{B}^+)$ и 0.5 для $\text{PbS}(\text{O}, \text{B}^+)$. Постимплантационный отжиг при 580 К не изменял значений ν для имплантированных бором пленок сульфида свинца с примесью натрия и приводил к увеличению ν до значения 1.3 для имплантированных бором пленок сульфида свинца с примесью кислорода. Меньшие значения показателя степени в температурной зависимости подвижности носителей для образцов после облучения ионами означают, что в этом случае существенный вклад в рассеяние вносит рассеяние на дефектах структуры. В качестве таких дефектов могут выступать ионы имплантированной примеси, структурные дефекты дислокационного типа и т.д. Об этом свидетельствует и анализ концентрационной зависимости подвижности электронов в образцах $\text{PbS}(\text{NaB}^+)$, когда при 77 К для концентраций электронов n больше 10^{18} см^{-3} выполняется соотношение $\mu \sim n^{-4/3}$, что соответствует низкотемпературному рассеянию электронов на ионизованных донорах.

Некоторые дозовые зависимости концентрации и подвижности носителей заряда в пленках сульфида свинца, облученных электронами и ионами бора, приведены на рис. 4 и 5. Вид кривых хорошо согласуется с аналогичными экспериментальными зависимостями, полученными

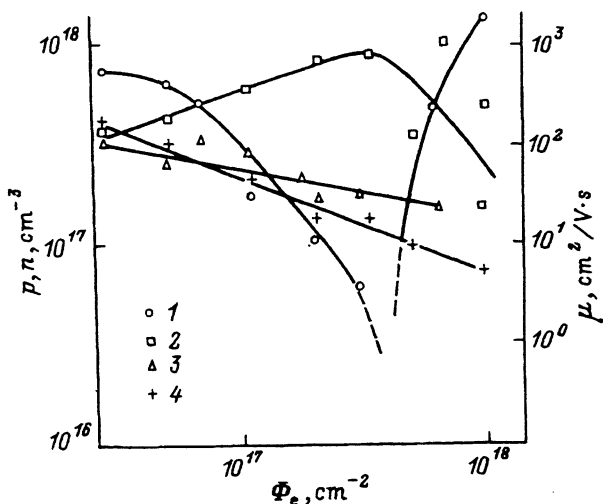


Рис. 4. Дозовые зависимости концентрации (1,2) и подвижности (3,4) носителей заряда при 300 К при электронном облучении: 1,3 — $p\text{-PbS}(\text{Na})$; 2,4 — $n\text{-PbS}(\text{O})$.

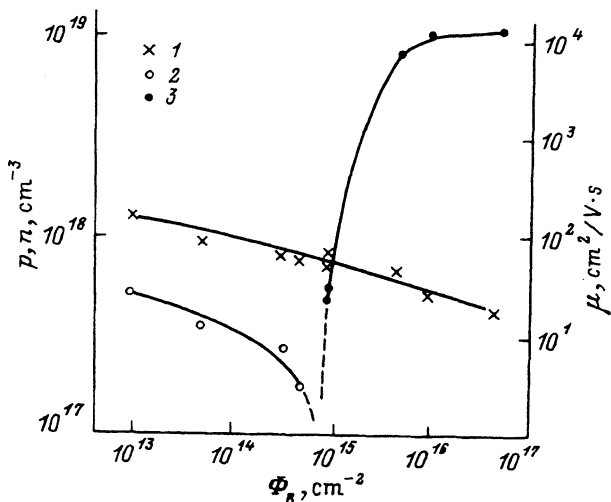


Рис. 5. Дозовые зависимости подвижности (1) и концентрации (2,3) носителей заряда при 300 К в образцах PbS(Na) после бомбардировки ионами бора: 2 — до инверсии, 3 — после инверсии типа проводимости.

для облученных ионами пленок $PbTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ [1], и укладывается в общие представления радиационных изменений электрических свойств узкозонных твердых растворов халькогенидов свинца — уменьшение дырочной проводимости и рост электронной проводимости с увеличением дозы облучения, наблюдаемые независимо от вида воздействующей радиации [1]. В то же время нами обнаружена зависимость скорости радиационных изменений электрических параметров пленок сульфида свинца от исходного состава изучаемых пленок при разных видах облучения. Для слоев разного состава рост электронной проводимости и инверсия наблюдаются при разных дозах электронного и ионного облучений. Насыщения концентрации электронов при больших дозах облучения, наблюдаемого для имплантированных бором образцов сульфида свинца с натрием (рис. 5, кривая 3), в случае электронного облучения обнаружить не удалось даже при сравнительно высоких значениях Φ_e . Более того, при увеличении флюенса электронов $\Phi_e > 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в дозовой зависимости наблюдается сильный разброс экспериментальных данных (рис. 4, кривая 2) и отклонение от линейного характера зависимости. Полученные результаты указывают на то, что скорость введения радиационных дефектов, определяющих наблюдаемые изменения свойств, существенным образом зависит от исходных параметров исследуемых слоев. Присутствие в сульфиде свинца легирующих добавок различного сорта создает разные условия для радиационного дефектообразования, ускоряя или замедляя скорость введения дефектов за счет различных условий протекания рекомбинационных процессов и неодинаковой активности ловушек для точечных дефектов.

Таким образом, проведенные исследования изменения электрических свойств пленок сульфида свинца при электронном и ионном облучениях показали, что присутствие в материале пленки даже малых концентраций легирующих примесей разного сорта может существен-

но влиять на получаемые значения концентрации и подвижности носителей заряда, что имеет практическое значение при решении задачи контролируемого управления свойствами пленок сульфида свинца. Кроме того, показана перспективность радиационных технологий для получения в области низких температур сильно компенсированных пленок узкозонных полупроводников, представляющих интерес при создании фоточувствительных структур.

Авторы выражают большую признательность И.А. Дрозду за предоставленные пленки сульфида свинца и интерес к данной теме.

Список литературы

- [1] L. Palmetshofer. Appl. Phys. A, **34**, 139 (1984).
- [2] G.L. Destefanis. J. Crys. Growth., **86**, 700 (1988).
- [3] E.J. Bryant, D.M. Standte. Rad. Eff., **62**, 69 (1982).
- [4] Р.Ф. Зайкина, И.А. Дрозд, Ш.Ш. Сарсембинов, В.О. Сигле. Физика и химия обраб. материалов, вып. 1, 23 (1990).
- [5] О.В. Горшкова, И.А. Дрозд, В.И. Стафеев. ФТП, **26**, 510 (1992).
- [6] Л.В. Бочкарева, О.В. Горшкова, И.А. Дрозд, С.П. Зимин, Е.Л. Корегина. Тез. докл. III Всес. конф. «Материаловедение галькогенидных полупроводников» (Черновцы, 1991) ч. 1, с. 195.
- [7] А.Н. Вейс, В.И. Кайданов и др. ФТП, **14**, 2349 (1980).
- [8] С.П. Зимин, Е.Л. Корегина, Л.В. Бочкарева. ФТП, **27**, 185 (1993).
- [9] М.М. Кондратенко, А.П. Лавренчук, Б.В. Орлецкий, К.Д. Товстюк, Я.И. Хухлин. Изв. вузов СССР. Физика, вып. 5, 148 (1976).

Редактор Т.А. Полянская
