

УДК 621.315.592

© 1990

РЕЛАКСАЦИЯ И НАКОПЛЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ PbSe ПРИ α -ОБЛУЧЕНИИ

Д. М. Фреик, А. Г. Миколайчук, Я. В. Огородник
Я. П. Салий, А. Д. Фреик

Исследовано влияние облучения α -частицами с энергией ~ 5 МэВ интегральными дозами до $\Phi = 2 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ на изменение структурных характеристик пленок халькогенидов свинца. На дозовых зависимостях структурных параметров эпитаксиальных слоев выявлены две области: до доз $1 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$ (малые дозы) и $> 2 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$ (большие дозы). Если в области малых доз характерно улучшение параметров реальной структуры, то в области больших доз наблюдается значительный рост микронапряжений, мозаичности, плотности дислокаций, а также диспергирование слоя. Экспериментальные результаты объясняются конкурирующим влиянием при облучении процессов релаксации неравновесности и накопления радиационных дефектов.

1. В работах [1-4] представлены результаты по ионной имплантации, облучении электронами и протонами кристаллов и пленок $A^{IV}B^{VI}$. Нами [5, 6] ранее исследовано также влияние α -частиц на электрические свойства пленок халькогенидов свинца. Установлено, что облучение кристаллов $Pb_{0.76}Sn_{0.24}Te$ p -типа протонами ($E = 200 \div 400$ кэВ) [2], $Pb_{1-x}Sn_xTe(Se)$ ($x = 0.096 \div 0.17$) n - и p -типа электронами ($E = 2$ МэВ) [3], $Pb_{1-x}Sn_xSe$ ($x = 0 \div 0.6$) n - и p -типа электронами ($E = 2.2$ МэВ) [4] обуславливает увеличение концентрации электронов со скоростью $\Delta n / \Delta \Phi = 2 \div 2.8$ см $^{-1}$. При α -облучении подтверждено также донорное действие со значительной скоростью изменения концентрации носителей заряда $(2.7 \div 7.8) \cdot 10^3$ см $^{-1}$ [5]. Экспериментальные результаты объясняются моделью дефектообразования Пратта—Парада [7].

Однако в литературе отсутствуют какие-либо данные по влиянию различных доз облучения высокоэнергетическими частицами на изменение структурных характеристик пленок халькогенидов свинца. Такие исследования представляют интерес, поскольку пока нет достаточно убедительных доказательств для обоснования механизмов перестройки дефектов.

2. Образцы для исследований выращивали методом горячей стенки на сколах (111) BaF_2 [8]. Скорость роста слоев ~ 3 нм/с, их толщина 2—5 мкм. Структурные параметры (размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) L_1 и L_2 в направлении дифракционного вектора и по нормали к нему, неоднородность $\epsilon = \langle \Delta d / d \rangle$ межплоскостных расстояний, угловая разориентация β_n) определяли анализом дифракционного уширения кривых рентгеновского отражения (111) и (222), полученных на двухкристальном спектрометре со схемой ($n, -n$) при съемке ω -кривых (поворот образца вокруг оси гониометра при неподвижном счетчике) и $\theta - 2\theta$ -сканировании (подвижный образец и вращение счетчика) [9]. Оценка плотности дислокаций образующих субграниц ρ_L и внутри блоков ρ_s проводилась согласно [9]. Период элементарной ячейки определяли методом Бонда, а электрические параметры слоев измеряли потенциометрически в постоянных электрических и магнитных полях.

Исследуемые образцы облучались последовательно α -частицами с энергией 5 МэВ в вакууме при комнатной температуре на карусельной установке с источниками Pu^{239} интенсивностью $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ до интегральных потоков $\Phi = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

3. Исходные образцы представляли собой мозаику из монокристаллических блоков размерами 7–12 мм и угловой разориентацией до $6.6'$, ориентированных плоскостью (111) параллельно поверхности подложки. Концентрация и подвижность основных носителей заряда при 300 К составляли $(0.12 \div 2.53) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $1070 \div 280 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно. На дозовых зависимостях структурных параметров эпитаксиальных слоев PbSe (рис. 1, 2) четко выделяются две области: до доз $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (малые

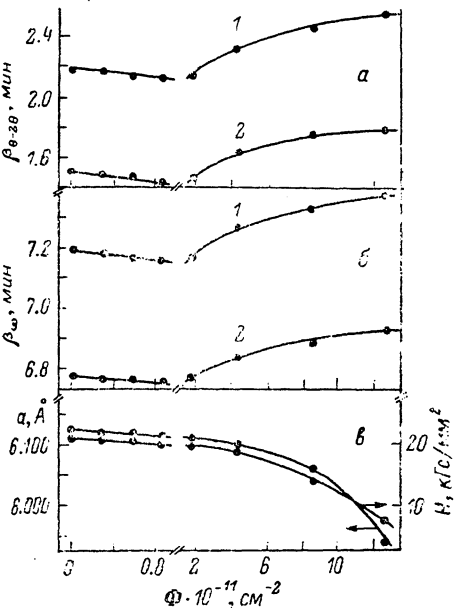


Рис. 1. Зависимость уширения $\theta-2\theta$ - и ω -дифракционных кривых для $\theta-2\theta$ (а) и ω (б)-сканирования при регистрации двух порядков отражения (111) (1) и (222) (2) параметра элементарной ячейки a и микротвердости H (в) эпитаксиальных слоев PbSe от дозы облучения α -частицами.

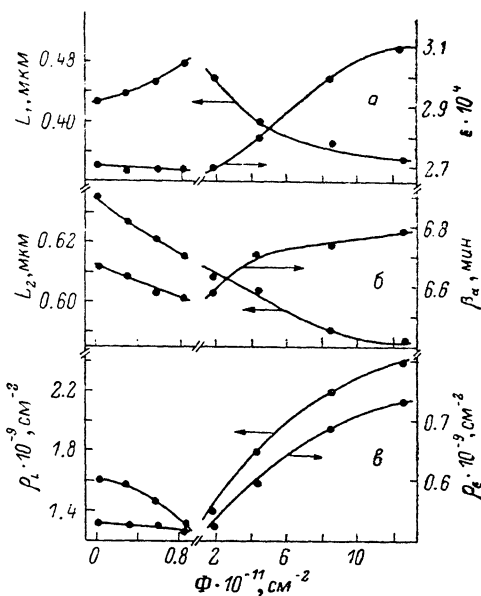


Рис. 2. Зависимость ОКР L_1 , неоднородности межплоскостных расстояний β_α (а), ОКР L_2 , угловой разориентации β_α (б), плотности дислокаций образующих субграней ρ_L и внутри блоков ρ_α (в) эпитаксиальных слоев PbSe от дозы облучения α -частицами.

дозы) и $> 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (большие дозы). Если в области малых доз характерно некоторое уменьшение ширины β дифракционных кривых обоих порядков отражения для $\theta-2\theta$ - и ω -сканирования, то большие дозы обуславливают их значительное уширение (рис. 1, а, б). Этому соответствует на начальных этапах облучения уменьшение величины микронапряжений ϵ , мозаичности β_α и плотности дислокаций ρ (рис. 2).

Более значительно уменьшается плотность дислокаций на границах блоков ρ_L , чем в их объеме ρ_α (рис. 2, в). ОКР в направлении к плоскости слоя L_1 увеличивается (рис. 2, а, 1). Большие дозы облучения α -частицами приводят к значительным росту микронапряжений ϵ , мозаичности β_α , плотности дислокаций ρ , а также диспергированию слоя — уменьшению ОКР как в плоскости слоя L_2 , так и по нормали к нему L_1 (рис. 2). Период элементарной ячейки a , микротвердость на всем протяжении облучения имеют тенденцию к уменьшению (рис. 1, в).

4. Полученные экспериментальные результаты объясняются конкурирующим влиянием при облучении процессов релаксации неравновесности и накопления радиационных дефектов. В «плохих» образцах, которыми являются исследуемые эпитаксиальные слои PbSe, где исходные плотности дефектов и отклонения от равновесия велики, облучение на начальном

этапе приводит к упорядочению и улучшению свойств материала [10]. Это проявляется в уменьшении значений ширины дифракционных кривых (рис. 1, а, б), величин микронапряжений, мозаичности, плотности дислокаций (рис. 2) при малых дозах α -частиц. Что касается различного характера изменения ОКР в плоскости L_2 (рис. 2, б, 1) и по нормали к нему L_1 (рис. 2, а, 1), то необходимо иметь в виду, что механизм их образования разный: если в первом случае величина ОКР задана размерами автономно возникших зародышей и их последующей коалесценцией, то во втором случае она связана с влиянием образующихся в процессе роста несовершенств [11]. Поэтому на начальных этапах облучения происходит релаксация ростовых несовершенств и увеличение ОКР L_1 (рис. 1, а, 1). Эффект структурного упорядочения проявляется и в увеличении подвижности носителей заряда μ в эпитаксиальных слоях PbSe с различной исходной концентрацией носителей при малых дозах α -частиц (рис. 3). Обращает на себя внимание, что характер эффектов определяется исходным состоянием образцов. Так, более дефектные слои PbSe с большими концентра-

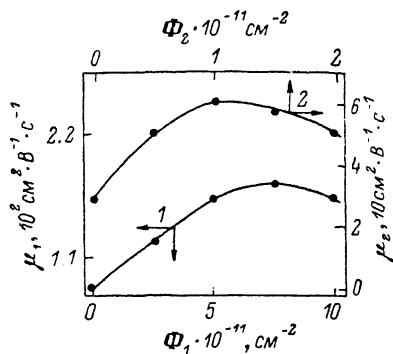


Рис. 3. Изменение подвижности электронов в эпитаксиальных слоях PbSe от дозы облучения α -частицами. Концентрация носителей $n \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$: 1,3 (1), 16 (2).

циями и малыми подвижностями (рис. 3, 2) более чувствительны к облучению и релаксационные процессы упорядочения наступают при меньших дозах α -частиц.

По мере повышения дозы облучения роль релаксационных процессов снижается и начинают преобладать процессы накопления радиационных дефектов, приводящие к разупорядочению и наблюдаемому при $\Phi > 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ухудшению структурных параметров эпитаксиальных слоев (рис. 1, 2). При этом увеличиваются микронапряжение кристаллической решетки, угловая разориентация, плотности дислокаций, а также уменьшаются ОКР.

Следует отметить, что представленные экспериментальные результаты не дают конкретного ответа на механизм залечивания и накопления дефектов. Однако можно достаточно определенно предположить, что в наблюдаемом радиационно-стимулированном упорядочении при малых дозах (рис. 1, 2) главную роль играют распад и гомогенизация крупномасштабных скоплений связанных дефектов на границах зерен в эпитаксиальном PbSe. Дальнейшее значительное отклонение от равновесия в ходе облучения тяжелыми α -частицами и накопление высоких плотностей радиационных дефектов обусловлены образованием пар Френкеля типа «вакансия—междоузельный атом» как в катионной, так и в анионной подрешетках PbSe: $[V_{\text{Se}}]^{2+} - [\text{Se}_i]^0$ и $[V_{\text{Pb}}]^{2-} - [\text{Pb}_i]^{2+}$ [5]. Даже в предположении равенства концентраций простых дефектов в подрешетках металла и халькогена основную роль играют дефекты донорного типа.

Авторы выражают благодарность Л. Н. Дмитруку за постановку задачи исследований, В. И. Фистулю — за интерес к работе и ценные замечания.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Palmetshofer L. // J. Appl. Phys. 1984. V. A34. N 3. P. 139—153.
- [2] Wang C. C., Tao T. F., Sunier I. W. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 9. P. 3981—3987.
- [3] Брудный В. Н., Войцеховский А. В., Кривов М. А., Лиленко Ю. В., Петров А. С., Потапов А. И. // ФТП. 1978. Т. 12. № 8. С. 1495—1498.

- [4] Зломанов В. П., Ладыгин Е. А., Пырегов Б. П., Скиперров Е. П. // ФТП. 1985. Т. 19. № 1. С. 53—57.
- [5] Фреик Д. М., Салий Я. П., Межиловская Л. И., Собкович Р. П., Школьный А. К., Огородник Я. В. // ФТП. 1989. Т. 23. № 6. С. 1015—1018.
- [6] Фреик Д. М., Школьный А. К., Салий Я. П., Остапчук А. П., Межиловская Л. И., Ткачук Р. З. // УФЖ. 1989. Т. 34. № 9. С. 1392—1393.
- [7] Parada N. I. // Phys. Rev. B. 1971. V. 3. N 6. P. 2042—2055.
- [8] Фреик Д. М. // Изв. АН СССР, неорг. матер. 1982. Т. 18. № 8. С. 1237—1247.
- [9] Михайлов И. Ф., Алеввердова О. Г., Фуке М. Я. // Заводская лаборатория. 1980. № 1. С. 27—31.
- [10] Пека Г. П., Токалин О. А. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. 1988. В. 14. С. 1—14.
- [11] Палатник Л. С., Фуке М. Я., Косевич В. М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. М.: Наука, 1972. 320 с.

Ивано-Франковский
государственный институт
им. В. С. Стефаника

Поступило в Редакцию
28 декабря 1989 г.
В окончательной редакции
11 апреля 1990 г.