

УДК 621.382.323

Электроннографические исследования поверхности гетероструктур PbSnTe-PbTe, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией

А. И. Дирочка, А. С. Кононов, П. С. Серебрянников, Н. А. Сулейманов
Государственное унитарное предприятие «НПО «Орион» — ГНЦ РФ, Москва, Россия

Изучены структурные, электрические и оптические свойства пленочных гетеропереходов $p\text{PbSnTe-nPbTe}$, полученных конденсацией молекулярных пучков в вакууме $\sim 10^{-6}$ мм рт. ст. Установлено, что в зависимости от условия получения пленок (T_n , d) наблюдаемые диффузные полосы на электронограммах по интенсивности разные. Интенсивность диффузных полос, наблюдаемых на электронограммах, также зависит от температуры съемки (T_c). Найдена корреляция между интенсивностью диффузных полос, наблюдаемых на электронограммах, и фоточувствительностью гетеропереходов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te-PbTe}$ ($x = 0,2$).

Важными исходными параметрами материала для получения высокочувствительных ИК-фотоприемников являются как электрофизические параметры (концентрация основных носителей заряда и их подвижность, время жизни неосновных носителей заряда), так и структурное совершенство (минимальная плотность дислокаций). Для p - n -перехода необходимы оптимальные концентрации носителей в соответствующих областях и большое время жизни. Последнее, как правило, лимитируется присутствием ловушек, которые связывают со структурным совершенством выращенного слоя (наличие дислокаций, малый размер кристаллитов). Особенно это важно для фотоприемников, работающих в спектральном диапазоне 8–12 мкм.

Значительное снижение стоимости получения слоев PbSnTe, PbTe и гетеропереходов на их основе позволяет применять метод молекулярно-лучевой эпитаксии при использовании диэлектрических подложек, отличающихся электрической стойкостью и механической прочностью, например на слюде. Применение аналитических средств контроля, основанных на дифракционных эффектах, позволяет проводить процессы эпитаксии с контролем параметров. Один из этих методов — метод электронографии.

В данной работе изучены структурные свойства пленочных гетероструктур $p\text{PbSnTe-nPbTe}$, полученных по методике [1, 2].

Эпитаксиальный рост теллурида свинца-олова на слюде происходит путем многопозиционного зарождения параллельных и антипараллельных (двойников) треугольных частиц, имеющих ориентацию (111) [112] PbTe || (001) [010] слюды (рис. 1, 2).



Рис. 1. Электронограмма от гетероструктуры $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te-PbTe}$ на слюде



Рис. 2. Платиново-угольная реплика

Все исследуемые образцы в изученном интервале толщин 0,1–5 мкм дают точечную картину. Характерной особенностью электронограмм, снятых на отражение, является присутствие на них диффузных полос. Эффекты диффузного когерентного рассеяния довольно часто встречаются на электронограммах от монокристаллов и монокристаллических пленок. Эти эффекты связаны с рассеянием на искажениях решетки, которые могут быть как динамическими, обу-

словленными тепловыми колебаниями атомов кристаллической решетки, так и статическими, обусловленными различного рода несовершенствами (упорядоченные дефекты, выделение второй фазы).

Первая причина имеет общий характер, поэтому эффекты теплового диффузного рассеяния неизбежно присутствуют на всех электронограммах; они могут проявляться в усилении фона, уменьшении интенсивности брегговских рефлексов.

Для выяснения природы диффузных полос изучались их конфигурация и интенсивность в зависимости от ориентации пленки относительно первичного пучка электронов при вращении образца вокруг оси, перпендикулярной к его поверхности, в интервале углов $0-180^\circ$. Геометрия сеток существенно меняется при переходе от одной рациональной кристаллографической оси к другой.

Диффузные полосы наблюдались и на микроэлектронограммах от монокристаллов целого ряда веществ (GaAs, CdTe, Ge и др.) [3, 4], обладающих характерными особенностями, позволяющими отличать их от других видов диффузного рассеяния: сетки полос на электронограммах могут быть описаны как пересечение сферой Эвальда ряда параллельных стенок интенсивности, проходящих через узлы обратной решетки, лежащие на сфере отражения; стенки интенсивности перпендикулярны направлениям атомных цепочек ближайших соседей, характерных для кристаллов данной структуры; интенсивность диффузных полос возрастает с увеличением температуры нагрева образца во время съемки; интенсивность наблюдаемых на электронограммах диффузных полос больше от пленок, выращенных при больших температурах роста.

В работе [5] показано, что причиной возникновения подобных эффектов является тепловое диффузное рассеяние электронов на низкочастотных акустических фононах. Диффузные полосы появляются на электронограммах, в структурах которых имеются линейные или зигзагообразные цепочки атомов с сильной связью, способные колебаться как целое. Здесь фононы с волновым вектором, перпендикулярным направлению цепочек, имеют низкую частоту.

В кристаллах PbTe и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ химическая связь носит ионно-ковалентный характер. Атомные цепочки, содержащие ближайших соседей Pb-Te, располагаются по осям $\langle 100 \rangle$, следовательно, волновые векторы фононов с низкой частотой лежат в плоскостях $\{100\}$, перпендикулярных этим осям. Стенки диффузной интенсивности в обратной решетке также расположе-

ны по плоскостям $\{100\}$, что и наблюдается на электронограммах.

В нашем случае нельзя полностью исключить вторую причину образования диффузного рассеяния — статические искажения при выделении второй фазы. Упорядоченные дефекты и выделение в виде направленных цепочек из нескольких атомов могут привести к образованию стенок диффузной интенсивности в обратной решетке и не будут обладать всем комплексом особенностей, характерных для теплового рассеяния [5]. Это касается ориентационной зависимости геометрии картин. На электроно-микроскопических изображениях, снятых в слабых пучках и в диффузной области между брегговскими рефлексамии, не удалось зафиксировать характерных деталей дифракционного контраста типа упорядоченных выделений. Наличие таких выделений могло быть причиной возникновения в обратной решетке стенок диффузной интенсивности по $\{100\}$. Замещение атома Pb атомом Sn, имеющим меньший радиус, также вносит незначительный вклад в искажение решетки, так что диффузные картины PbTe и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ идентичны.

С практической точки зрения важно, что когерентное диффузное рассеяние отражает степень упорядоченности структуры кристалла. Фотоэлектрические характеристики гетероструктур $pPbSnTe-nPbTe$, полученных на подложках из слюды, приведены в таблице.

$T_{п}$, °C	Характеристика электронограммы	d , мкм	Механизм протекания тока, β	$R_{фл}$, Ом·см ²	λ_{max} , мкм
30—40	Слабая	0,5	Сложн., $\beta = 3$	500	3
380—400	Сильная	0,5	Генер.-реком., $\beta = 2$	300	5,5
380—400	Диффузные полосы с кучки линиями	2,4	Генер.-реком. в ОПЗ, $\beta = 2$	1,5	8,5

Из таблицы видно, что гетероструктуры $pPb_{1-x}Sn_xTe-nPbTe$, полученные на основе более толстых пленок при температуре 380—400 °C, имели длинноволновую область чувствительности 8,5 мкм. При этом на электронограммах наряду с диффузными сетками наблюдаются кучки линии.

Из той же таблицы видно, что разница сдвигов fotocувствительности по длине волны для гетероструктур, выращенных при низких температурах подложки, объясняется, по-видимому, дефектностью структуры и сдвигом Мосса-Бурштейна, а также процессом взаимной диффузии на границе PbSnTe-PbTe при осаждении пленки PbTe.

Л и т е р а т у р а

1. Семилетов С. А., Сулейманов Н. А., Ракова Е. В., Желудев С. И., Нуриев И. Р.//Микроэлектроника, 1979. Т. 8. В. 5.
2. Britov A. D., Dirochka A. I., Serebrennikov P. S., Suleimanov N. A., Kononov A. S., Suprun I. P.//Proc. of SPIE, 2000. V. 4340.

3. Honjo G., Kodera S., Kitamura N.//J. Phys. Soc. Japan, 1964. V. 19. № 3. P. 351.
4. Narayanan G. H., Copley S. M.//Phys. status solidi (a), 1974. V. 23. № 1. P. 123.
5. Swaminathan V., Narayanan G. H., Copley S. M.//J. Appl. Phys., 1975. V. 46. № 9. P. 3716.

Electron diffraction study of PbSnTe-PbTe heterostructures grown by MBE

A. I. Dirochka, A. S. Kononov, P. S. Serebrennikov, N. A. Suleimanov
ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

In the work are studied structural, electrical and optical properties of film heterojunctions $p\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}-n\text{PbTe}$ obtained by condensation of molecular beams in vacuum $\sim 10^{-6}$ mm mercury pressure. It is determined that diffusion fringes intensity on diffraction patterns are different depending on thickness of films (d) and temperature of films growing (T_g). The intensity of diffusion fringes also depends on survey temperature (T_s). The correlation between intensity of diffusion fringes on electron diffraction patterns and photosensitivity of heterojunctions $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}-\text{PbTe}$ is found.