

ЛЕГИРОВАНИЕ ИНДИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВ  $Pb_{1-x}Sn_xTe$

А. П. Шотов, О. И. Даварашвили, Е. Т. Чижевский

УДК 621.315.59

Исследовалось легирование индием полупроводниковых слоев  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ , получаемых в процессе жидкостной эпитаксии на подложках  $PbTe$  и  $BaF_2$ .

Выявлены особенности поведения индия как донорной примеси и установлен коэффициент распределения между твердой и жидкой фазами.

В полупроводниках типа  $A_{IV}B_{VI}$  с узкой запрещенной зоной, таких как  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  и  $Pb_{1-x}Sn_xSe$ , обычно тип и концентрации свободных носителей определяется отклонением состава от стехиометрического, то есть зависит от соотношения числа вакансий атомов металла (Pb и Sn) и атомов Te(Se), которые ведут себя как электрически активные дефекты. Избыток атомов металла в кристалле создает проводимость n-типа, избыток атомов халькогена — проводимость p-типа. Тип проводимости и концентрация носителей тока в определенных пределах может регулироваться изменением температур и давления паров компонентов в процессе получения кристалла, либо его последующего отжига.

Большой интерес для этих материалов представляет управление концентрацией и типом проводимости путем легирования донорными и акцепторными примесями. В этом случае необходимые свойства материалов могут быть достигнуты вне зависимости от температуры процесса и давления пара компонентов, что особенно важно при создании p-n и гетероструктур для лазеров и фотоприемников.

В настоящей работе приводятся результаты легирования индием полупроводниковых слоев  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ , получаемых в процессе жидкостной эпитаксии. Как было установлено, индий в  $PbTe$  и твердых растворах на его основе является донорной примесью [1,2]. Использование индия как легирующей примеси при жидкостной эпитаксии является особенно удобным, из-за его малой упругости паров и большой растворимости в расплаве.

Эпитаксиальные слои  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  выращивались из расплава-раствора  $Pb-Sn-PbTe$ , содержащего индия, в открытой системе в протоке очищенного водорода при  $600^{\circ}C$ .

В качестве подложек использовались пластинки  $PbTe$  (с ориентацией [100]), либо изолирующие пластинки  $BaF_2$  (ориентация [111]). На эпитаксиальных слоях, выращенных на подложках  $BaF_2$ , можно было определить не только тип проводимости по термо-э.д.с. (как в случае подложек  $PbTe$ ), но и измерить концентрацию носителей и тип проводимости по эффекту Холла.

Возможность использования  $BaF_2$  в качестве подложки при эпитаксиальном выращивании  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  определяется близостью параметров решетки и коэффициентов теплового расширения [3]. Например, для состава  $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$  и  $BaF_2$  соответствующие величины равны:  $a = 6,43 \text{ \AA}$  и  $6,20 \text{ \AA}$ ;  $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}C^{-1}$  и  $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}C^{-1}$ .

Таблица I

№ образца	Раствор-расплав		Эпитаксиальные слои	
	Атомная доля In	Концентрация In, ат/см <sup>3</sup>	Тип проводимости при 77°K	Концентрация носителей в см <sup>3</sup> при 77°K
1	0,00039	$1,4 \cdot 10^{19}$	p	$5,1 \cdot 10^{17}$
2	0,00072	$2,6 \cdot 10^{19}$	p	$2,1 \cdot 10^{17}$
3	0,00101	$3,6 \cdot 10^{19}$	p	$3,2 \cdot 10^{16}$
4	0,00107	$3,8 \cdot 10^{19}$	n	$2,9 \cdot 10^{16}$
5	0,00180	$6,4 \cdot 10^{19}$	n	$1,2 \cdot 10^{17}$
6	0,00265	$9,4 \cdot 10^{19}$	n	$8,0 \cdot 10^{17}$

Толщина эпитаксиальных слоев, выращенных при охлаждении от  $600$  до  $580^{\circ}$ , обычно была около  $20$  мкм. Нелегированные слои всегда имели проводимость p-типа с концентрацией дырок  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В таблице приведены концентрации носителей в эпитаксиальных слоях  $Pb_{0,82}Sn_{0,18}Te$ , полученных при легировании примесью индия. Содержание индия в расплаве изменялось в пределах  $0,04-0,2 \%$  ат. ( $1,4 \cdot 10^{19} + 9,4 \cdot 10^{19}$  ат. In/см<sup>3</sup>).

С ростом содержания In происходит сначала компенсация вакансий металла, поэтому концентрация дырок уменьшается, а за-

тем при перекомпенсации наблюдается изменение типа проводимости и увеличение концентрации электронов. Донорное поведение атомов In связано с тем, что они образуют растворы замещения и в кристаллической решетке занимают узлы металла (Pb и Sn). Из-за большого атомного радиуса In маловероятно образование растворов внедрения.

Концентрация атомов индия в расплаве примерно на порядок превышает их число в эпитаксиальном слое, что соответствует коэффициенту распределения In между твердой и жидкой фазами (в области компенсации вакансий)  $K \approx 0,1$ .

По нашим оценкам предельная растворимость индия в кристалле составляет  $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При содержании более 2 ат% индий нельзя считать примесью, так как при этом образуется четырехкомпонентный твердый раствор с участием In, т.е. другой полупроводник.

Таким образом, в процессе легирования и компенсации вакансий можно получить снижение концентрации свободных носителей. В данном случае минимальная концентрация свободных носителей была около  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Получение большей компенсации требует регулирования содержания индия в расплаве с высокой точностью. Как показывают оценки, уменьшение содержания индия на 0,1 мг при общем весе расплава 2,5 г и  $K = 0,1$  приводит к возрастанию концентрации дырок на порядок (в области наибольшей компенсации). В этих условиях сказываются также конвективные потоки в расплаве, структура и ориентация подложки.

Поступила в редакцию  
28 ноября 1975 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. А. А. Аверкин, В. И. Кайданов, Р. Б. Мельник. ФТП, 5, 91 (1971).
2. L. R. Tomasetta, C. G. Fonstad. Mat. Res. Bull., 2, 799 (1974).
3. H. Holloway, E. Logothetis, E. Wilkes. J. Appl. Phys., 41, 3543 (1970).