

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ , ИЗГОТОВЛЕННЫХ  
МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ ЭПИТАКСИИ

Г. А. Калужная, К. В. Киселева, Ю. И. Горина,  
В. М. Сальмац, А. Г. Турьянский, А. Д. Бритов

УДК 620.192.3

Методом газовой эпитаксии на подложки  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  р-типа проводимости нанесены эпитаксиальные слои  $PbTe$  п-типа проводимости. Исследованы структурные и электрофизические характеристики полученных гетероструктур и показана возможность создания на их основе инжекционных лазеров.

В настоящее время одной из актуальных задач полупроводниковой электроники является создание гетероструктур на основе узкозонных полупроводников, в том числе, на основе  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ .

В течение последнего года появилось несколько работ /1-3/, в которых описаны характеристики гетероструктур на основе твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ . Авторы этих работ получали эпитаксиальные слои простых и двойных гетероструктур либо вакуумным напылением, либо жидкостной эпитаксией.

Ранее в лаборатории физики полупроводников Физического института им. П. Н. Лебедева была разработана методика газовой эпитаксии в условиях светового нагрева подложки, позволявшая получить совершенные по структурным свойствам эпитаксиальные слои кремния. Проведенные в работе /4/ исследования показали, что предложенный метод свободен от источников генерации структурных дефектов (дефектов упаковки и дислокаций) как на границе раздела, так и в толще эпитаксиального слоя. Это обстоятельство авторы /4/ связали с хорошей очисткой поверхности роста мощным световым потоком и созданием более благоприятных условий для кристаллизации.

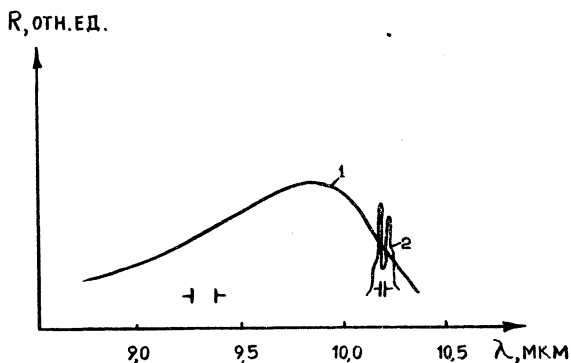
Нам представлялось целесообразным использовать разработанную методику для создания гетероструктур  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  -  $PbTe$ , пригодных для изготовления инжекционных лазеров. Действительно, с учетом результатов /4/ можно было предполагать, что при такой технологии эпитаксиального наращивания на границе перехода не будут возникать дополнительные центры безызлучательной рекомбинации и будут осуществляться благоприятные условия для инжекции носителей в активный слой.

Исходный монокристаллический материал для подложек получали методом кристаллизации из газовой фазы, используя шихту состава с  $x$  от 0,17 до 0,22. Проведенные измерения электрофизических параметров исходного материала  $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te$  показали, что выращенные кристаллы обладают  $p$ -типом проводимости с концентрацией носителей  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Прецизионные измерения параметров кристаллической решетки обнаружили локальный разброс значений от  $6,4420 \pm 0,0006 \text{ \AA}$  до  $6,4210 \pm 0,0006 \text{ \AA}$ , причем наибольший удельный вес имело значение  $6,4310 \pm 0,0006 \text{ \AA}$ . Такой разброс, согласно работе /5/, может соответствовать локальному изменению атомной доли свинца в твердом растворе  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  от 0,87 до 0,71 при наиболее вероятном составе  $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te$ . (При этом мы предполагаем, что концентрация вакансий во всем объеме кристалла постоянна, так как кристаллизация происходила при постоянной температуре).

Для изготовления гетероструктур был использован материал исходного состава  $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ . С целью повышения степени однородности материала и понижения концентрации носителей был проведен длительный гомогенизирующий отжиг в присутствии шихты, обогащенной металлом. В результате этого концентрация дырок понизилась до  $2,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Локальный разброс параметра кристаллической решетки составил от  $6,4394 \pm 0,0006 \text{ \AA}$  до  $6,4383 \pm 0,0006 \text{ \AA}$ , что соответствует изменению атомной доли свинца от 0,84 до 0,83. Материал стал люминесцирующим, спектр его катодолуминесценции при  $T = 95^\circ K$  представлен на рис. 1 (кривая I).

Проведенные в режиме двухкристаллоного спектрометра исследования дифракционных кривых и кривых качания показали, что отжиг приводит к существенному увеличению полуширин дифракционных рефлексов (600) от  $0,9^\circ$  до  $0,15^\circ$  и кривых качания (200) от  $0,2^\circ$  до  $1^\circ$  (см. рис.2). Обнаруженные увеличения полуширин свидетельству-

ют о том, что в процессе отжига происходит значительное изменение степени монокристалличности материала: уменьшается средний размер микроблоков монокристалла (от 3500 Å до 1500 Å) и увеличивается их разориентация относительно друг друга (происходит



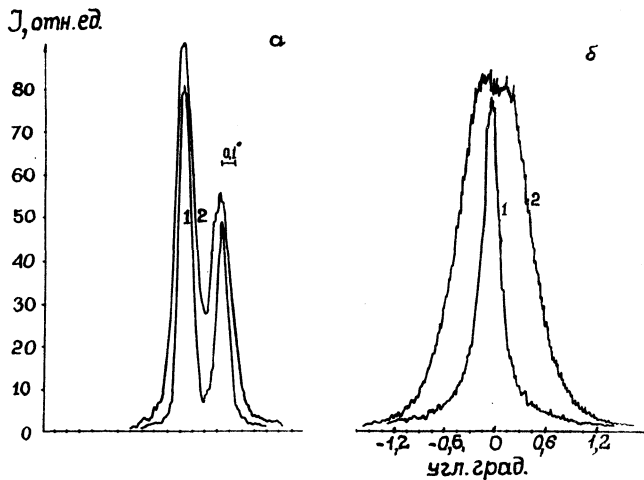
Р и с.1. Спектр катодоллюминесценции при 95°К отожженного образца  $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$  (кривая 1) и вынужденное излучение изготовленного на его основе диода при 77°К (кривая 2)

процесс полигонизации). Однако, этот процесс, по-видимому, сопровождается существенным увеличением микрооднородности самих блоков мозаики, что и обеспечивает появление люминесцентных свойств.

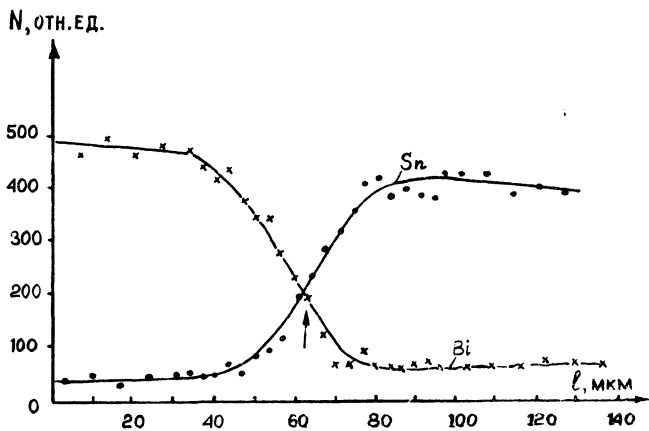
На отожженные подложки состава  $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ , ориентированные по плоскости (100), p-типа проводимости, наращивали из газовой фазы эпитаксиальные слои  $PbTe$ , в которые для получения устойчивого n-типа и предотвращения диффузии p-n перехода вводили висмут во время выращивания.

Выполненные с помощью рентгеновского микрозонда исследования показали, что в процессе эпитаксиального наращивания происходит диффузия олова из подложки в пленку и висмута из пленки в подложку (см. рис.3). Однако, как будет видно из нижеизложенного, при этом не происходит смещения p-n-перехода из узкозонного кристалла.

Параметр решетки эпитаксиальных слоев  $PbTe(Bi)$  оказался равным  $6,4427 \pm 0,0006 \text{ Å}$ , что на 0,06% больше параметра решетки под-



Р и с.2. Дифракционные кривые (а) и кривые качания (б) до и после отжига (кривые 1 и 2 соответственно). (Для удобства сравнения максимумы дифракционных кривых совмещены)



Р и с.3. Концентрационные кривые олова и висмута вблизи технологической границы пленка-подложка (положение границы указано стрелкой)

ложки. Согласно /6/ в гетеропереходах с рассогласованием параметров менее 0,1% обеспечиваются условия, благоприятные для протекания инжекционного тока.

Ранее нами было установлено, что использованный метод дает возможность получить более совершенные, по сравнению с подложкой, гомоэпитаксиальные слои  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  близкого состава. Так, при полуширине дифракционных кривых и кривых качания подложек  $0,12^\circ$  и  $0,75^\circ$  соответствующие величины для слоев были  $0,08^\circ$  и  $0,25^\circ$ . Однако, в выращенных гетероструктурах нами не было обнаружено улучшения структурных характеристик эпитаксиального слоя  $n-PbTe(Vi)$  по сравнению с подложкой. Последнее обстоятельство мы связываем с влиянием легирующей примеси висмута на процесс кристаллизации слоя.

Из выращенных структур  $n-PbTe - p-Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$  были изготовлены излучающие диоды. Вынужденное излучение диодов наблюдалось при  $77^\circ$  с длиной волны, соответствующей узкозонному кристаллу (рис. I, кривая 2).

Спектр излучения располагался на длинноволновом краю спонтанного контура кривой I, полученной при катодоллюминесценции подложки.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный метод газовой эпитаксии со световым нагревом подложки может быть успешно использован для создания лазерных гетероструктур на основе узкозонных полупроводников.

Поступила в редакцию  
10 марта 1976 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. L. R. Tomasetta, C. G. Fonstad. Appl. Phys. Lett., 24, N 11, 567 (1974).
2. S. H. Groves, K. W. Nill, A. J. Strauss. Appl. Phys. Lett., 25, N 6, 331 (1974).
3. L. R. Tomasetta, C. G. Fonstad. Appl. Phys. Lett., 25, N 8, 440 (1974).

4. К. В. Киселева, Г. И. Иванникова, Л. М. Ершова "Электронная промышленность". № 7 91 (1972).
5. R. F. Vis. J. Vac. Sci. a. Technol, 7, N 1, 126 (1970).
6. А. Милнс, Д. Фойхт. Гетеропереходы и переходы метал-полупроводник. М., изд. "Мир", 1975 г.