

## ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.315.592

В.А. ТИМОФЕЕВ<sup>1</sup>, А.И. НИКИФОРОВ<sup>1,2</sup>, А.П. КОХАНЕНКО<sup>2</sup>, А.Р. ТУКТАМЫШЕВ<sup>1</sup>, В.И. МАШАНОВ<sup>1</sup>,  
И.Д. ЛОШКАРЕВ<sup>1</sup>, В.А. НОВИКОВ<sup>2</sup>

**РОСТ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК SiSn С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ Sn  
ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ИК-ОБЛАСТИ\***

Проведены исследования роста соединений SiSn с содержанием Sn от 10 до 35 %. Изучена морфология и структура поверхности слоев SiSn, а также установлена кинетическая диаграмма морфологического состояния пленок SiSn в диапазоне температур 150–450 °С. При росте пленок SiSn от 150 до 300 °С наблюдались осцилляции зеркального рефлекса. Впервые выращены многослойные периодические структуры SiSn/Si с псевдоморфными монокристаллическими слоями SiSn с содержанием Sn от 10 до 25 %. Выявлены сверхструктуры с(8×4) и (5×1) при росте Si на слое SiSn и определены условия формирования желаемой структуры поверхности Si путем контроля температуры роста. Из кривых дифракционного отражения определен параметр решетки, состав SiSn и период в многослойной периодической структуре, которые с высокой точностью соответствуют заданным значениям.

*Ключевые слова:* дифракция, осцилляция, гетероструктура, монокристаллический слой, сверхструктура, параметр решетки, кривая качания, прямозонность, фотоника.

**Введение**

Большие усилия сконцентрированы в настоящее время на соединениях GeSiSn. С добавлением Sn становится возможной реализация множества устройств в фотонике и оптоэлектронике ближнего и среднего инфракрасного диапазона, основанных на Si [1, 2]. На сегодняшний день на базе материалов GeSiSn созданы образцы фотоприемников [3], светодиодов [4], резонаторов [5], а также лазеров с оптической накачкой. Лазерная генерация в структуре, содержащей слой GeSn, была продемонстрирована в работе [6]. Длина волны излучения охватывает диапазон 2–2.3 мкм и связана с прямыми переходами в GeSn [6, 7], что больше длин волн, используемых в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). Один из методов получить прямозонный материал, соответствующий диапазону ВОЛС, есть введение Sn в Si. Поскольку прямой переход для серого олова имеет отрицательное значение (–0.4 эВ), сплав SiSn должен стать прямозонным для достаточно большого содержания Sn. Вычисления электронной структуры показали, что введение Sn в решетку Si уменьшает величину прямого перехода намного быстрее, чем непрямого [8]. Расчеты, предложенные для вычисления зонной структуры SiSn, предсказывают различное содержание Sn, при котором достигается прямозонность. Вычисления в рамках приближения виртуального кристалла предсказывали, что переход происходит при содержании Sn около 55 % [9], в то время как простой метод аппроксимации, используя линейную интерполяцию между значениями ширины запрещенной зоны Si и  $\alpha$ -Sn, дает прямые переходы для содержания Sn больше 90 % [10]. В работе [11] авторы сообщают, что прямой переход в SiSn можно ожидать при содержании Sn в диапазоне от 20 до 35 %. Причем для согласования параметров решетки выбирается буферный слой GeSn, содержащий Sn от 2 до 12 % и имеющий параметр решетки от 5.67 до 6.45 Å.

Большинство первых результатов по росту слоев SiSn касались аморфных пленок, однако были работы и по псевдоморфным пленкам SiSn [12]. Аморфные пленки получали методами магнетронного распыления [13], ВЧ-распыления [14], химического осаждения из газовой фазы [15], одновременного электронно-лучевого испарения Si и испарения Sn из ячейки Кнудсена [16]. Кристаллические тонкие пленки были выращены сочетанием ионной имплантации и твердофазной эпитаксии [17]. Ранние исследования показали, что достаточно сложно получить пленки SiSn с высокой концентрацией атомов Sn, замещающих атомы в решетке Si. Главным образом это связано с тем, что Sn имеет очень низкую равновесную растворимость в кристаллическом Si порядка 0.1 %, а также вызвано большой разницей параметров решеток Sn и Si. Серое олово имеет параметр решетки 6.489 Å, а у Si параметр решетки равен 5.431 Å, что приводит к несоответствию ре-

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ: 16-32-50020 мол\_нр, 16-32-60005 мол\_а\_дк, 16-29-03292 офи\_м и РНФ: 16-12-00023.