

## ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СОСТАВА СЛОЕВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОСТРУКТУР InAs/(InAsSb)/InAsSbP ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Кириленко Я.Д.<sup>1</sup>

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Мынбаев К.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО

[idkirilenko@itmo.ru](mailto:idkirilenko@itmo.ru)

### Введение

Твердые растворы антимонидов, арсенидов и фосфидов индия являются ключевыми материалами для изготовления полупроводниковых фото- и оптоэлектронных приборов, работающих в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн. Такие приборы широко применяются в системах мониторинга окружающей среды, в промышленности и в медицинской диагностике [1–4]. Используя в активном слое полупроводниковых гетероструктур (ГС) твердый раствор  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ , можно охватить спектральный диапазон от 3,4 до 11,0 мкм. Однако увеличение мольной доли InSb  $y$ , необходимое для создания длинноволновых структур, приводит к сильному рассогласованию параметров кристаллических решеток подложки и эпитаксиальных рабочего и барьерного слоев. Рассогласование параметров кристаллической решетки (КР) и особенности осаждения друг на друга материалов с различным химическим составом в методе газовой эпитаксии с использованием металлоорганических соединений (МОГФЭ) могут приводить к специфическим свойствам компонентов (слоев), составляющих ГС, и оказывать влияние на работу оптоэлектронных приборов [5]. Для определения этого влияния свойства ГС  $n\text{-InAs}/(n\text{-InAs}_{1-y}\text{Sb}_y)/p\text{-InAsSbP}$  в диапазоне составов  $y = 0,00\text{--}0,12$  в настоящей работе были исследованы с использованием методов оптического отражения, фотолюминесценции и фотоотражения.

### Основная часть

ГС  $n\text{-InAs}/(n\text{-InAs}_{1-y}\text{Sb}_y)/p\text{-InAsSbP}$  были выращены методом МОГФЭ в горизонтальном реакторе при атмосферном давлении. Исследования оптического отражения проводились при комнатной температуре с использованием спектрометра PerkinElmer Lambda 1050 в ультрафиолетовом и видимом оптических диапазонах (энергия фотона 1,55 – 4,1 эВ). Спектры фотоотражения и фотолюминесценции регистрировались в ИК диапазоне в широком диапазоне температур  $T = 11\text{--}300$  К при помощи установки на основе ИК Фурье-спектрометра Bruker VERTEX 80, оснащенной охлаждаемым фотодетектором из InSb.

Анализ спектров отражения барьерных слоев в сопоставлении с таковыми подложек из InAs показал, что на поверхности барьерного слоя в его составе преобладает InAs вне зависимости от состава рабочего слоя  $n\text{-InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ ; форма спектров оптического отражения эпитаксиальных слоев InAsSbP оказалась существенно искажена, что было обусловлено как низким структурным совершенством поверхности в силу специфики завершения процесса МОГФЭ, так и упругими напряжениями в поверхностном слое, возникающими в результате резкого изменения химического состава [6]. При сравнении спектров фотолюминесценции структур с  $y = 0,00$  и  $y = 0,12$  была зарегистрирована разность в положениях максимумов в широком диапазоне температур  $T = 11\text{--}300$  К (она составила, например, ~110 мэВ при  $T = 11$  К); ширина запрещенной зоны также была проконтролирована с использованием метода фотоотражения, полученные результаты показали хорошее согласие с данными фотолюминесценции. Известно, что в случае наращивания четверного твердого раствора поверх матрицы, содержащей Sb, его

кристаллизация начинается с формирования соединения, обогащенного сурьмой; также имеет место изменение параметра КР четверного твердого раствора, согласованного по параметру КР с подложкой из InAs, до значения, соответствующего псевдоморфному росту на слое заданного состава  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ . В совокупности эти особенности определяют отклонение соотношения мольных долей элементов V группы в составе барьерного слоя относительно значений, задаваемых на этапе роста этого слоя, а именно – рост мольной доли Sb. В свою очередь увеличение концентрации сурьмы смещает край валентной зоны барьерного слоя, что и выражается в уменьшении ширины запрещенной зоны этого слоя и, как следствие, энергии пика люминесценции.

### Выводы

Гетероструктуры  $\text{InAs}/(\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y)/\text{InAsSbP}$  в диапазоне составов  $y = 0,00\text{--}0,12$  были исследованы с использованием оптических методов. Установлено, что действительная ширина запрещенной зоны барьерных слоёв из  $\text{InAsSbP}$  существенно меньше расчетного ее значения; кроме того, поверхность этих слоёв обладает низким структурным совершенством, и, в общем случае, представлена материалом, близким по элементному составу к чистому InAs, что обуславливается особенностями технологического процесса эпитаксиального наращивания слоёв. Известно, что химический состав эпитаксиальных слоев во многом определяется составом и химией поверхности матрицы – присутствие в матрице Sb приводит к увеличению ее концентрации в наращиваемом слое, что, в свою очередь, смещает край валентной зоны вверх. В результате ширина запрещенной зоны эпитаксиального слоя оказывается меньше ожидаемого значения, что влечет за собой формирование гетероперехода II типа.

Конфигурация энергетических зон материалов, образующих гетеропереход II типа, чувствительна к изменениям значения внешнего электрического смещения, что выражается в изменениях длины волны излучения при электролюминесценции. Данная особенность позволяет осуществлять тонкую подстройку длины волны излучения светодиодных структур изменением величины смещения, что может быть полезно при создании источников излучения для газоанализаторов, позволяющих определять содержание нескольких целевых газов в смеси.

### Литература

1. Rangel G. F., de Leon Martínez L. D., Walter L. S., Mizaikoff B. Recent advances and trends in mid-infrared chem/bio sensors, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 180 (2024) 117916.
2. Hlavatsch M., Mizaikoff B. Advanced mid-infrared lightsources above and beyond lasers and their analytical utility, *Analytical Science*. 38 (2022) 1125–1139.
3. Gawron W., Madejczyk P., Martyniuk P., Krishna S. Infrared Barrier Detectors With Metamorphic InAsSb Absorbers on GaAs Substrates, *IEEE Sensors Journal*. 24 (9) (2024) 14151–14158.
4. Fujita H., Yasuda D., Ota S., Geka H., Gomes Camargo E., Ishiki S., Fukunaka T., Kuze N. Hydrofluoroolefins Leakage Detection by Nondispersive Infrared Gas Sensor Using InAsSb Light Emitting Diodes and Photodiodes, *IEEE Sensors Letters*. 7 (9) (2023) 3502004.
5. Романов В.В., Моисеев К.Д. Особенности энергетической структуры эпитаксиального слоя  $\text{InAsSbP}$  при осаждении на поверхность твердого раствора  $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ , *ФТТ*. 65 (10) (2023) 1707–1714.
6. Моисеев К.Д. Романов В.В., Кудрявцев Ю.В. Особенности формирования эпитаксиальных слоев  $\text{InAsSbP}$  на подложке InAs методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, *ФТТ*. 58 (11) (2016) 2203–2207.