

**СТИМУЛИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ
I и II типа $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAsSbP}$**

Кириленко Я.Д. (Университет ИТМО), Ружевич М.С. (Университет ИТМО)

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Мынбаев К.Д. (Университет ИТМО)

Введение.

Светодиодные структуры, излучающие в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн (2-6 мкм), широко используются для решения задач газоанализа в промышленности, в медицинской диагностике и экологическом мониторинге [1,2]. Многие газы имеют полосы поглощения в этом диапазоне, что позволяет выделять целевые газы из смеси и с точностью определять их концентрацию.

Светодиоды, спектр излучения которых находится в среднем ИК диапазоне, часто изготавливаются на основе гетероструктур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAsSbP}$, выращиваемых на подложке InAs . Доля сурьмы y в активной области $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ данной структуры определяет длину волны в максимуме спектра излучения — увеличение y влечет за собой смещение максимума спектра в длинноволновую область. Увеличение y одновременно ведёт к росту разрывов энергетических зон на гетерогранице, а также к возможному изменению химического состава широкозонного барьерного слоя из InAsSbP [3]. Как следствие, по мере увеличения y возможно изменение типа гетероперехода $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAsSbP}$ с I-го (т.н. «вложенный» гетеропереход) на II-ой («ступенчатый» гетеропереход) и появление дополнительных каналов рекомбинации, в том числе, т.н. «интерфейсных» [4].

Основная часть.

В настоящей работе сообщается о результатах исследования электролюминесценции (ЭЛ) гетероструктур $n\text{-InAs}/n\text{-InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/p\text{-InAsSbP}$ в диапазоне составов $y=0.07\text{--}0.16$. Гетероструктуры были выращены методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС). ЭЛ возбуждалась в импульсном режиме с частотой 1 кГц и длительностью импульса 2 мкс, регистрировалась фотоприемниками на основе InSb или HgCdTe , и исследовалась в диапазоне температур 4.2–300 К.

Как было установлено, для ГС с мольной долей InSb $y \leq 0.11$ в активной области при низких температурах ($T < 100$ К) создавались условия для возникновения стимулированного излучения. При этом в зависимости от величины y в активном слое и химического состава барьерного слоя излучение определялось либо межзонной рекомбинацией в активной области, либо интерфейсной рекомбинацией на гетерогранице $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAsSbP}$. Так, для гетероструктур I-го типа доминировала межзонная рекомбинация в $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. Для гетероструктур с большим содержанием InSb в активной области наблюдалось существенное отличие энергии квантов стимулированного излучения от ширины запрещенной зоны активной области. Было высказано предположение о том, что в данном случае гетеропереход $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAsSbP}$ имел II-ой тип из-за индуцированного рассогласованием параметров кристаллической решетки барьерного и активного слоев изменения химического состава барьерного слоя (имеется ввиду смещение параметра кристаллической решетки последнего в сторону величин, соответствующих псевдоморфному росту на слое $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ заданного состава [3]). Косвенным подтверждением этому послужили результаты исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) гетероструктур, которые показали существенное увеличение отсечки низкотемпературных ($T < 150$ К) ВАХ в прямой ветви структур с предполагаемым II-ым типом относительно структур с I-ым. Для точного определения типа гетероперехода были проведены измерения химического состава барьерных слоев структур с использованием электронного микроскопа FEI Quanta 200 с приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии EDAX. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 5 кВ при нормальном и скользящем (45°) падении возбуждающего электронного пучка. По результатам измерений было зафиксировано изменение химического состава барьерного слоя InAsSbP в сравнении с расчетными (и задаваемыми при росте) значениями в сторону увеличения содержания Sb и уменьшения содержания As при

постоянном содержания фосфора по мере увеличения y в активной области. Расчеты зонной диаграммы гетероструктур, проведенные по полученным уточненным данным, подтвердили формирование гетерограницы $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{InAsSbP}$ II-го типа. При повышении температуры в данных гетероструктурах наблюдалась смена основного канала излучательной рекомбинации с интерфейсного на межзонный в активной области, который наблюдался для гетероструктур I-го типа во всем исследованном интервале температур 4.2–300 К.

Выводы.

На основании анализа вольт-амперных характеристик и спектров электролюминесценции гетероструктур $\text{InAs}/\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAsSbP}$, а также определения химического состава барьерного слоя в этих гетероструктурах установлена возможность формирования гетероперехода II-го типа на границе $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{InAsSbP}$. Стимулированная электролюминесценция из таких гетероструктур при низких температурах определяется интерфейсными переходами с туннелированием носителей из узких потенциальных ям, образующихся по обе стороны гетероперехода. В данной конфигурации длина волны излучения из гетероструктур оказывается весьма чувствительной к уровню инжекции и может быть подстроена незначительным изменением тока накачки, что может быть полезно при создании источников излучения для газоанализаторов с возможностью перестройки длины волны и селективного анализа газовой смеси.

Список использованных источников:

1. Hodgkinson J., Tatam R.P. Optical gas sensing: A review // *Measurement Science and Technology*. Institute of Physics Publishing, 2013. Vol. 24, № 1.
2. Mikhailova M. et al. Optoelectronic sensors on GaSb- and InAs-based heterostructures for ecological monitoring and medical diagnostics // *Optical Sensing Technology and Applications*. SPIE, 2007. Vol. 6585. P. 658526.
3. Романов В.В., Иванов Э.В., Моисеев К.Д. Узкозонные гетероструктуры $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{InAsSbP}$ ($y = 0.09\text{--}0.16$) для спектрального диапазона 4–6 μm , полученные методом МОГФЭ // *Физика твердого тела*. 2019. Т. 61, в. 10, с. 1746–1753.
4. Семакова А.А., Ружевич М.С., Романов В.В., Баженов Н.Л., Мынбаев К.Д., Моисеев К.Д. Стимулированное излучение в гетероструктурах $\text{InAs}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ с асимметричным электронным ограничением // *Физика и техника полупроводников*. 2022. Т. 56, в. 9, с. 876–881.