

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Контрош Евгения Владимировича на тему:

«Исследование механизмов токопрохождения в многопереходных фотоэлектрических преобразователях»,

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников»

Актуальность. Диссертационная работа посвящена исследованию фотоэлектрических характеристик многопереходных монокристаллических фотопреобразователей (МП ФЭП), обладающих на сегодняшний день наибольшим КПД преобразования падающего солнечного излучения. Тенденция развития данных ФЭП предполагает рост числа фотоактивных p-n переходов, являющихся субэлементами многопереходной структуры. Однако, рост числа субэлементов невозможен без увеличения числа соединительных туннельных диодов (ТД) и сопутствующих им слоёв, которые оказывают значительное влияние на механизмы транспорта носителей заряда в МП ФЭП. Для обеспечения высокой оптической прозрачности и высокой плотности пикового туннельного тока, превышающей плотность фототока ФЭП, слои ТД выращиваются с толщинами в несколько единиц нанометров с уровнем легирования $\geq 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В результате, данный тип элементов при воздействии температурного разогрева подвергается значительной диффузии примеси, что приводит к деградации ВАХ всей структуры ФЭП. Поэтому актуальной задачей, решаемой в данном исследовании, является разработка термостабильных туннельных диодов, обеспечивающих эффективное соединение фотоактивных субэлементов МП ФЭП.

К наиболее значимым **новым научным результатам**, полученным автором, следует отнести:

1. Показано, что S-образная форма прямых темновых и нагрузочных ВАХ InGaP/Ga(In)As/Ge фотопреобразователей, при низких температурах ($\geq 200\text{K}$), и снижение КПД обусловлено влиянием туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда при плотности темновых токов от 1 mA/cm^2 до 100 mA/cm^2 .

2. Впервые, предложено использование $n^{++}\text{GaAs}/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{AlGaAs}$ туннельного диода с промежуточным нелегированным $i\text{-GaAs}$ слоем в качестве соединительного элемента для многопереходных фотопреобразователей.

3. Показано, что плотность пикового тока туннельного p-i-n диода, возрастает при увеличении толщины i-слоя, имеет максимум, а затем снижается из-за роста толщины потенциального барьера, через который туннелируют носители заряда.

4. Показано, что включение наноразмерного i -GaAs слоя между вырожденными областями соединительных GaAs/AlGaAs туннельных диодов обеспечивает при температурном отжиге, соответствующему режиму выращивания реальных структур монокристаллических многопереходных фотопреобразователей, рост максимального значения плотности пикового туннельного тока.

Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. **Во введении** сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность выбранной темы, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы.

Первая глава содержит литературный анализ развития наземной и космической концентраторной фотоэнергетики и способы увеличения эффективности МП ФЭП. Анализ литературы также приводится в каждой главе диссертации по тематике главы. Представлены исследования фотоэлектрических характеристик InGaP/GaAs/Ge ФЭП. Описаны методы исследований и экспериментальные установки. Расчётным и экспериментальным путём выявлен доминирующий механизм транспорта, отвечающий за S-образную форму ВАХ и снижение КПД МП ФЭП. **Во второй главе** представлены результаты теоретического и экспериментального исследования характеристик p - i - n туннельных диодов, на основе GaAs/AlGaAs гетероперехода. С использованием математического моделирования показано, что плотность пикового туннельного тока в p - i - n ТД имеет немонотонный характер зависимости от толщины i -слоя. Приводятся расчётные зависимости, влияющие на величину туннельного тока при изменении толщины i -слоя. Показаны экспериментальные ВАХ, измеренные в температурном диапазоне 100-400К. ВАХ получены на p - i - n структурах GaAs/AlGaAs ТД, выращенных с использованием молекулярно-пучковой эпитаксии. Продемонстрировано хорошее соответствие между математическим моделированием и экспериментальными результатами. Моделированием режима роста МП ФЭП показано, что разработанные соединительные p - i - n ТД обеспечивают температурную стабильность ВАХ при отжиге. **В заключении** перечислены основные результаты диссертации.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты позволят оптимизировать технологии изготовления чипов монокристаллических многопереходных фотопреобразователей с большим КПД и кратностью концентрации преобразуемого оптического излучения.

Достоверность результатов диссертации подтверждается согласованностью теоретических и экспериментальных данных, полученных в диссертации, а также публикацией основных результатов работы в научных изданиях и обсуждением результатов на конференциях.

По изложенному в диссертации материалу имеются следующие **замечания**:

1) Максимальная плотность пикового туннельного тока в расчётах получена при толщине i -слоя равной 4 нм в то время, как в эксперименте с акцепторной примесью «Ве» - 7.5 нм и 10 нм. Желательно пояснить выбранные толщины i -слоя для экспериментальных структур.

2) В тексте диссертации нет пояснения, почему после температурного отжига p - i - n туннельных диодов с акцепторной примесью углерода увеличилась плотность пикового туннельного тока.

3) В тексте диссертации отсутствует рис. 1.12.

Приведенные выше замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки работы.

Заключение

Диссертационная работа Контрош Е.В. соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор – Контрош Евгений Владимирович – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник,
заведующий Сектором теоретических
основ микроэлектроники Физико-
технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
Адрес: 194021, Санкт-Петербург, ул.
Политехническая 26, ФТИ им. А.Ф.
Иоффе
Телефон: 8(812) 292-73-67
E-mail: Zegrya@theory.ioffe.ru

Зегря Георгий Георгиевич

