

## Отзыв

на автореферат диссертации Евгения Владимировича Контрош по теме **«Исследование механизмов токопрохождения в многопереходных фотоэлектрических преобразователях»**, представленной к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников»

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью увеличения КПД монокристаллических многопереходных фотопреобразователей (МП ФЭП) как солнечного, так и монохроматического излучений. Это возможно за счёт увеличения количества фотоактивных субэлементов составляющих структуру монокристаллического фотопреобразователя. В свою очередь, рост числа фотоактивных p-n переходов в МП ФЭП ведёт к естественному снижению величины общего фототока и, как следствие, к усилению влияния на КПД «рекомбинационного» и «туннельно-ловушечного» (избыточного) механизмов токопрохождения в области пространственного заряда фотоактивных p-n переходов МП ФЭП. Кроме того, увеличение числа субэлементов МП ФЭП требует увеличения числа фотопассивных наноразмерных соединительных туннельных диодов и сопутствующих им слоёв, которые оказывают отрицательное влияние на механизмы транспорта носителей заряда в структуре ФЭП и на КПД в целом. В связи с чем исследования, проводимые в диссертации, являются востребованными и актуальными.

Диссертационная работа Контрош Е.В. посвящена исследованию фотоэлектрических характеристик концентраторных наногетероструктурных многопереходных фотопреобразователей и соединительных туннельных диодов. В работе впервые показано, что наличие S-образной формы прямых темновых и световых ВАХ InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей при температурах ниже 200 К обусловлено влиянием туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда. Предложен новый тип термостабильного соединительного туннельного диода с промежуточным i-слоем, перспективный для реализации высокоэффективных многопереходных фотопреобразователей. На основе проведённого моделирования механизмов транспорта GaAs/AlGaAs p-i-n соединительных ТД для монокристаллических многопереходных фотопреобразователей установлено, что включение тонкого ( $\leq 4$  нм) i-слоя позволяет увеличить плотность пикового туннельного тока диода.

**Целью** данной работы является исследование влияния механизмов транспорта носителей заряда в фотоактивных субэлементах и соединительных туннельных диодах на КПД монолитных многопереходных фотопреобразователей.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование вида и структуры темновой характеристики плотность тока - напряжение трёхпереходных InGaP/Ga(In)As/Ge фотопреобразователей. Выявление доминирующих механизмов транспорта носителей заряда в температурном 4 диапазоне от 100К до 350К. Определение токов «насыщения»  $J_{0i}$ ; и диодных коэффициентов  $A_i$ , механизмов транспорта носителей заряда в фотоактивных p-n переходах и соединительных туннельных диодах.

2. Нахождение связи рассчитанных параметров с характеристикой КПД - плотность фотогенерируемого тока.

3. Выполнение математического моделирования структуры и характеристик соединительных туннельных диодов.

4. Исследование экспериментальных вольт-амперных и вольт-емкостных характеристик туннельных диодов.

5. Оценка влияния формы ВАХ соединительных туннельных диодов на фотоэлектрические параметры многопереходных фотопреобразователей.

**Научная новизна работы:**

1. Впервые показано, что наличие S-образной формы прямых темновых и световых ВАХ InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей при температурах ниже 200 К обусловлено влиянием туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда. Доминирование туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда при плотности темновых токов от 1 mA/cm<sup>2</sup> до 100 mA/cm<sup>2</sup> ведёт к снижению фактора заполнения нагрузочной ВАХ и КПД InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей.

2. Впервые предложена новая конструкция соединительного ТД на основе гетероструктуры n<sup>++</sup>GaAs/i-GaAs/p<sup>++</sup>Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с промежуточным нелегированным i-GaAs слоем, перспективная для реализации высокоэффективных многопереходных фотопреобразователей.

3. Впервые установлено, что плотность пикового тока туннельного p-i-n диода, созданного на основе гетероструктуры n<sup>++</sup>GaAs/i-GaAs/p<sup>++</sup>Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, возрастает при увеличении толщины i-слоя, имеет максимум, а затем снижается из-за роста толщины потенциального барьера, через который туннелируют носители заряда.

4. Впервые показано, что включение тонкого наноразмерного нелегированного i-GaAs слоя между вырожденными n<sup>++</sup>GaAs и p<sup>++</sup>Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-</sub>

xAs областями соединительных туннельных диодов обеспечивает температурную стабильность вольтамперных характеристик соединительных элементов. При температурном отжиге, соответствующему режиму выращивания реальных структур монокристаллических многопереходных фотопреобразователей, в структуре  $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}$  -  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$  туннельных диодов наблюдается рост максимального значения  $J_r$ .

**Практическая значимость** диссертации заключается в следующем.

Результаты исследований прогнозируют характеристики  $\text{InGaP}/\text{Ga}(\text{In})\text{As}/\text{Ge}$  фотопреобразователей в диапазоне температур 100-350К, аналогичном условиям космической эксплуатации. Предложен новый термостабильный туннельный диод с  $i$ -слоем, перспективный для высокоэффективных многопереходных фотопреобразователей. Моделирование  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$   $p$ - $i$ - $n$  соединительных диодов показало, что включение тонкого  $i$ -слоя ( $\leq 4$  nm) увеличивает плотность пикового туннельного тока. Результаты помогут оптимизировать технологии изготовления чипов многопереходных фотопреобразователей с высоким КПД и кратностью концентрации света.

По материалам диссертации опубликовано 15 научных работ в реферируемых научных журналах и сделано 15 докладов на международных и отечественных научных конференциях.

Результаты, полученные Контрош Е.В., являются новыми в научном плане и имеющими практическую значимость. Содержание диссертации достаточно полно освещено в публикациях автора.

Автореферат диссертации изложен доступным для понимания языком, аргументация положений ясна и убедительна. Отмечая несомненные достоинства работы, следует отметить ряд недостатков в автореферате:

- в автореферате не явно выражены объект и предмет исследования;
- недостаток связи между задачами 1 и 3, в следствии которого не совсем ясно, как результаты математического моделирования и определения параметров будут использованы для анализа экспериментальных данных.

Тем не менее, отмеченные замечания не снижают значимости научных результатов, полученных автором в данной работе.

Вывод: судя по автореферату, диссертационная работа Контрош Е.В. «Исследование механизмов токопрохождения в многопереходных фотоэлектрических преобразователях» отвечает всем требованиям положения ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН о порядке присуждения учёной степени, предъявляемым к диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, и может быть представлена к защите на учёном

совете 34.01.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по специальности физика полупроводников (1.3.11)».

Отзыв составила

к.т.н., ведущий специалист  
ОЭЗ ППТ Алабуга

М.Е. Баркова

Специалист, к.б.н.

Н. В. Жилияков

С отзывом и выводами согласен

Руководитель проекта, к.т.н.

Р.Р. Хажibeков