

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Контрош Евгения Владимировича

«Исследование механизмов токопрохождения в многопереходных фотоэлектрических преобразователях»

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

Актуальность. Важным направлением развития физики и технологии космической солнечной и лазерной энергетики, а также радиофотоники и оптоэлектроники является разработка полупроводниковых фотопреобразователей на основе монокристаллических многопереходных наногетероструктур. Эффективность таких фотопреобразователей во многом определяется механизмами транспорта носителей заряда в фотоактивных субэлементах и наноразмерных оптически неактивных соединительных туннельных диодах. В процессе эпитаксиального роста монокристаллической многопереходной (каскадной) структуры соединительные туннельные диоды подвержены значительному температурному нагреву, что ведёт к деградации ВАХ, снижению плотности пикового туннельного тока, увеличению дифференциального сопротивления соединительных элементов, и в итоге к снижению КПД многопереходных фотопреобразователей. В связи с этим актуальной задачей является развитие новых подходов к созданию термостабильных соединительных элементов для многопереходных фотопреобразователей, обладающих высокими значениями плотностей пикового туннельного тока и низкими значениями дифференциального сопротивления и температурного коэффициента пиковой плотности туннельного тока. Диссертация Е.В. Контрош посвящена решению именно этих вопросов, что и определяет её актуальность и новизну.

К наиболее важным результатам работы, определяющим **научную новизну** и **практическую значимость** проведенных исследований, можно отнести:

1. Показано, что доминирование туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда при плотности темновых токов от 1 до 100 mA/cm^2 ведёт к снижению фактора заполнения нагрузочной ВАХ и КПД InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей.
2. Предложен новый тип термостабильных соединительных туннельных *p-i-n* диодов, перспективных для создания на их основе высокоэффективных многопереходных фотопреобразователей.
3. Показано, что плотность пикового тока туннельного *p-i-n* диода, созданного на основе гетероструктуры $n^{++}\text{GaAs}/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, 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 создание соединительного элемента на базе структуры $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ обеспечивает рост плотности пикового

туннельного тока ТД и стабильность вольтамперных характеристик при температурном отжиге, соответствующем режиму роста структур монокристаллических многопереходных фотопреобразователей.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается непротиворечивостью полученных экспериментальных результатов на разных типах структурах, согласием экспериментальных и теоретически рассчитанных данных, публикацией основных результатов работы в рецензируемых научных изданиях и высокой оценкой результатов работы специалистами при обсуждении на российских и международных научных конференциях.

Практическая значимость полученных результатов определяется возможностью их применения при разработке мощных монокристаллических многопереходных фотопреобразователей как солнечного, так и лазерного излучения.

Диссертация изложена на 117 стр., иллюстрирована 61 рисунком со схемами исследованных структур, графиками с экспериментальными данными и их сравнения с теоретически рассчитанными. Она состоит из введения, двух глав с оригинальными результатами и заключения. В целом работа изложена ясным, достаточно точно передаваемым суть рассматриваемых явлений языком. Вместе с тем, по изложению имеются следующие вопросы и замечания:

1. В диссертации отсутствует отдельная глава, посвященная анализу литературных данных. Современное состояние наземной и космической концентраторной фотоэнергетики и общие мировые тенденции в увеличении эффективности ФЭП достаточно подробно анализируются в первой главе. Вместе с тем, этот анализ ограничен только многопереходными преобразователями на основе полупроводников III-V, и представляется интересным включить в него сравнение эффективности исследованных в работе структур с тандемными кремний-перовскитными преобразователями, для которых недавно сообщалось о ее достижении в 33.9%.
2. Для интерпретации некоторых из полученных результатов автор использует теоретическую модель и алгоритм расчета, описанных в цитируемых работах [27-29]. При этом в диссертации отсутствует достаточно подробное их описание, которое позволило бы читателю оценить чувствительность особенностей расчетных к вариации входных параметров.
3. Одним из неожиданных результатов проведенного исследования является аномальная частотная зависимость емкости исследованных структур, величина которой становится отрицательной при достаточно низких частотах тестирующего сигнала. Для объяснения этой аномалии автор включает в эквивалентную схему индуктивность, величина

которой подбирается эмпирически. Между тем, имеется простая модель, которая объясняет отрицательную емкость, как результат модуляции протекающего тока фазового. Эта модель успешно применялась для объяснения подобного поведения ИК детекторов на основе GaAs (см. Perera, A. G. U., W. Z. Shen, M. Ershov, H. C. Liu, M. Buchanan, и W. J. Schaff. «Negative capacitance of GaAs homojunction far-infrared detectors». *Applied Physics Letters* 74, вып. 21 (1999 г.): 3167–69. бы <https://doi.org/10.1063/1.124169>).

Было бы интересным рассмотреть применимость этой модели для исследованных в диссертации структур.

Сделанные замечания не затрагивают основные положения и выводы диссертации и не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне. Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Заключение

Считаю, что представленная диссертация 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 по специальности физика
твёрдого тела, профессор кафедры
Электроники твёрдого тела
Физического факультета Санкт-
Петербургского государственного
университета

Адрес: Старый Петергоф, ул.
Ульяновская, д. 1, Санкт-Петербург,
198504

Вывенко
Олег Федорович