

на правах рукописи

Контрош Евгений Владимирович

**Исследование механизмов токопрохождения в многопереходных
фотоэлектрических преобразователях**

Специальность: 1.3.11 Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель:

Андреев Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории Фотоэлектрических преобразователей Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Вывенко Олег Федорович, доктор физико-математических наук, профессор по специальности физика твердого тела, профессор кафедры Электроники твердого тела Физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

Зегря Георгий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий Сектором теоретических основ микроэлектроники Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (СПбГЭТУ),
кафедра Фотоники

Защита состоится _____ 2024 г. в “__” часов на заседании совета 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу:

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автореферат разослан “__” _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 34.01.02

доктор физико-математических наук



Л.М. Сорокин

Актуальность темы:

На сегодняшний день возрастает роль солнечной и лазерной энергетики в космосе. Повышение требований к бортовым системам космических аппаратов (КА) приводит к необходимости создания фотоэнергоустановок (ФЭУ) на основе фотопреобразователей, которые обладают высоким начальным КПД, показывают минимальную предсказуемую деградацию фотоэлектрических характеристик в процессе эксплуатации с учетом радиационной обстановки и обеспечивают снижение мощности менее 20%, после 15 лет эксплуатации, например, на геостационарных спутниковых орбитах. ФЭУ для космических аппаратов должны выдерживать перепады температуры от 100К до 350К в течение всего времени активного существования. Наиболее перспективным путем решения этих задач является создание высокоэффективных ФЭУ нового поколения на основе наногетероструктурных многопереходных фотопреобразователей (МП ФЭП) из полупроводниковых материалов АЗВ5 и концентраторов излучения типа линейных линз Френеля.

Совершенствование параметров МП ФЭП связывают с повышением КПД за счет оптимизации ростовой и постростовой технологии изготовления, а также увеличения количества фотоактивных р-п переходов. В свою очередь, рост числа фотоактивных р-п 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 (ОПЗ) фотоактивных р-п переходов в МП ФЭП. Эти механизмы транспорта отрицательно сказываются на эффективности (КПД) МП ФЭП, особенно при работе в условиях перепадов температур и низких концентраций оптического излучения. Кроме того, важно учитывать влияние на КПД МП ФЭП гетеробарьеров, особенно при снижении рабочих температур.

Важной составной частью структуры МП ФЭП являются соединительные туннельные диоды. В случае преобразования мощного оптического излучения, параметры соединительных туннельных диодов (ТД) будут оказывать значительное влияние на КПД МП ФЭП. Для обеспечения максимального КПД соединительные туннельные диоды должны обладать высокими значениями оптической прозрачности, плотности пикового туннельного тока, превышающей фототок МП ФЭП, и низким дифференциальным сопротивлением для минимизации падения напряжения на ТД.

В процессе эпитаксиального роста монокристаллических многопереходных фотопреобразователей, в соединительных ТД из-за диффузии легирующей примеси, происходит взаимокompенсация донорного и акцепторного профилей легирования с последующей деградацией электрических характеристик. Способами, позволяющими предотвратить деградацию характеристик ТД вследствие диффузии легирующей примеси, являются включение промежуточного нелегированного i – слоя между вырожденными p^{++} и n^{++} -слоями и снижение температуры эпитаксиального роста.

Таким образом важным направлением разработки высокоэффективных МП ФЭП является исследование влияния на КПД МП ФЭП механизмов транспорта носителей заряда в фотоактивных субэлементах и соединительных туннельных диодах.

Цели и основные задачи диссертационной работы:

Целью данной работы является исследование влияния механизмов транспорта носителей заряда в фотоактивных субэлементах и соединительных туннельных диодах на КПД монокристаллических 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

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.

Методы исследования:

Использована методика анализа параметров темновых вольтамперных характеристик МП ФЭП и расчёта потенциальной и реальной эффективности (КПД) преобразования оптического излучения. Данная методика обеспечивает корректное моделирование различных режимов изготовления МП ФЭП и их работы, что позволяет прогнозировать характеристики ФЭП в реальных условиях эксплуатации на основе результатов лабораторных измерений. Будет выполнено теоретическое исследование транспорта носителей заряда в туннельных диодах с использованием модели нелокального межзонного квантового туннелирования и туннельно-ловушечной модели.

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^2 до 100 mA/cm^2 ведёт к снижению фактора заполнения нагрузочной ВАХ и КПД InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей.

2. Впервые предложена новая конструкция соединительного ТД на основе гетероструктуры $n^{++}\text{GaAs}/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с промежуточным нелегированным $i\text{-GaAs}$ слоем, перспективная для реализации высокоэффективных многопереходных фотопреобразователей.

3. Впервые установлено, что плотность пикового тока туннельного p-i-n диода, созданного на основе гетероструктуры $n^{++}\text{GaAs}/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, возрастает при увеличении толщины i-слоя, имеет максимум, а затем снижается из-за роста толщины потенциального барьера, через который туннелируют носители заряда.

4. Впервые показано, что включение тонкого наноразмерного нелегированного $i\text{-GaAs}$ слоя между вырожденными $n^{++}\text{GaAs}$ и $p^{++}\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 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_p .

Научная и практическая значимость диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Результаты проведённых исследований позволяют прогнозировать характеристики InGaP/Ga(In)As/Ge фотопреобразователей в температурном диапазоне 100-350К, приближенных к реальным условиям эксплуатации в космическом пространстве.

2. Предложен новый тип термостабильного соединительного туннельного диода с промежуточным *i*-слоем, перспективный для реализации высокоэффективных многопереходных фотопреобразователей.
3. На основе проведённого моделирования механизмов транспорта GaAs/AlGaAs *p-i-n* соединительных ТД для монокристаллических многопереходных фотопреобразователей установлено, что включение тонкого (≤ 4 nm) *i*-слоя позволяет увеличить плотность пикового туннельного тока диода.
4. Полученные в данной работе результаты позволяют оптимизировать технологии изготовления чипов монокристаллических многопереходных фотопреобразователей с большим КПД и кратностью концентрации преобразуемого оптического излучения.

Достоверность полученных результатов:

Достоверность полученных результатов обусловлена применением современных экспериментальных методов, сопоставлением экспериментальных данных с расчётными данными, а также сравнением с результатами, полученными из различных литературных источников. Описываемые в работе результаты опубликованы в реферируемых научных журналах и были представлены на российских и международных конференциях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. 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/cm² до 100 mA/cm² ведёт к снижению фактора заполнения нагрузочной ВАХ и КПД InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей.
2. 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.
3. Включение тонкого наноразмерного нелегированного *i*-GaAs слоя между вырожденными $n^{++}\text{GaAs}$ и $p^{++}\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 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_p .

Апробация результатов работы:

Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Российская конференция «Физико- химические проблемы возобновляемой энергетики» (Санкт-Петербург, 2013), XI Российская конференция «Физика полупроводников» (Санкт-Петербург, 2013), Международная конференция «CPV-10» (Альбукерке, США, 2014), Научно-техническая конференция «Инновации Северо-Запада» (Санкт-Петербург, 2014), Международная конференция «WCPEC- 6» (Киото, Япония, 2014), XVI Всероссийская молодежная конференция «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике» (Санкт-Петербург, 2014), III всероссийская научная конференция «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики» (Чебоксары, 2015), XVII Всероссийская молодежная конференция «Физика полупроводников и наноструктур,

полупроводниковой опто- и наноэлектронике» (Санкт-Петербург, 2015), XIX Всероссийская молодежная конференция «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике» (Санкт-Петербург, 2017), XV Международная конференция по концентраторной фотовольтаике (CPV-15, Фес, Марокко, 2019), Международная конференция Физика.СПб/2020 (Санкт-Петербург, 2020), XVI Международная конференция по концентраторной фотовольтаике (CPV-16, Колорадо, США, 2020), XXII Всероссийская молодежная конференция «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике» (Санкт-Петербург, 2020), Международная конференция Физика.СПб/2021 (Санкт-Петербург, 2021), XXV Всероссийская молодежная конференция «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике» (Санкт-Петербург, 2023).

Личный вклад:

Соискатель выполнил математическое моделирование и анализ характеристик и n^{++} -GaAs/(i-GaAs/AlGaAs)/ p^{++} -AlGaAs соединительных туннельных диодов для InGaP/Ga(In)As/Ge фотопреобразователей.

Соискатель принимал активное участие в создании экспериментальных установок измерения фотоэлектрических характеристик многопереходных фотопреобразователей и соединительных туннельных диодов.

Соискателем были проведены экспериментальные исследования ВАХ соединительных туннельных диодов и многопереходных фотопреобразователей солнечного ($AM0$, 1367W/m^2) и лазерного излучения (809 nm , $\leq 90\text{ W/cm}^2$) в широком температурном диапазоне 100-350К.

Выполнен анализ и интерпретация экспериментальных данных, полученных на установках измерения спектральных, темновых и световых ВАХ с использованием импульсного имитатора солнечного излучения спектрального состава $AM0$, 1367 W/m^2 .

Соискатель принимал участие в апробации работ на конференциях, семинарах и подготовке результатов исследований к публикациям. Постановка задач и целей работы осуществлялась совместно с научным руководителем.

Структура и объём диссертации:

Диссертационная работа состоит из введения, 2 глав, заключения и библиографического списка. Общий объём диссертации составляет 117 страниц, включая 61 рисунок.

Содержание работы:

Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обосновывается актуальность научного исследования, достоверность полученных результатов, указываются научная новизна и практическая значимость работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения о структуре, объёме диссертации и её апробации.

Глава 1 посвящена исследованию фотоэлектрических характеристик многопереходных фотопреобразователей (МП ФЭП). В **п. 1.1** проведён литературный анализ современного состояния наземной и космической концентраторной фотоэнергетики. Определены общие мировые тенденции для увеличения эффективности МП ФЭП. В **п. 1.2** проведено расчётное и экспериментальное исследование влияния механизмов токопрохождения в трёхпереходных InGaP/GaAs/Ge ФЭП на КПД.

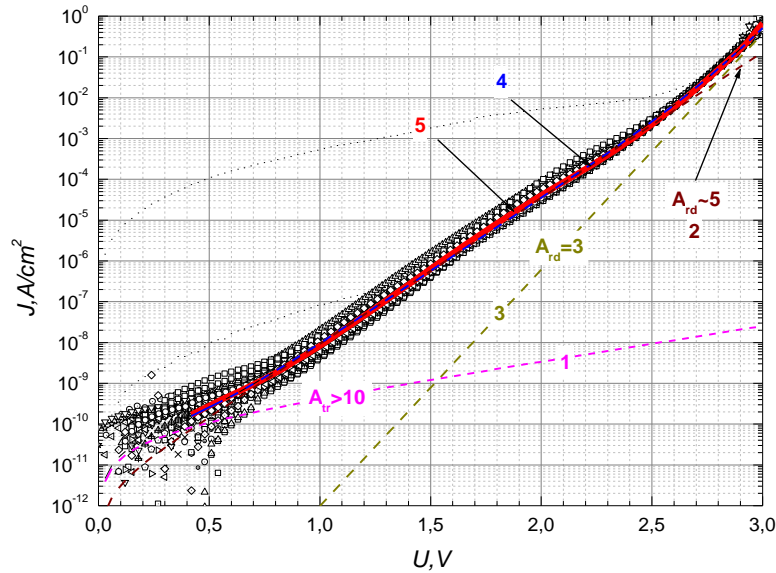
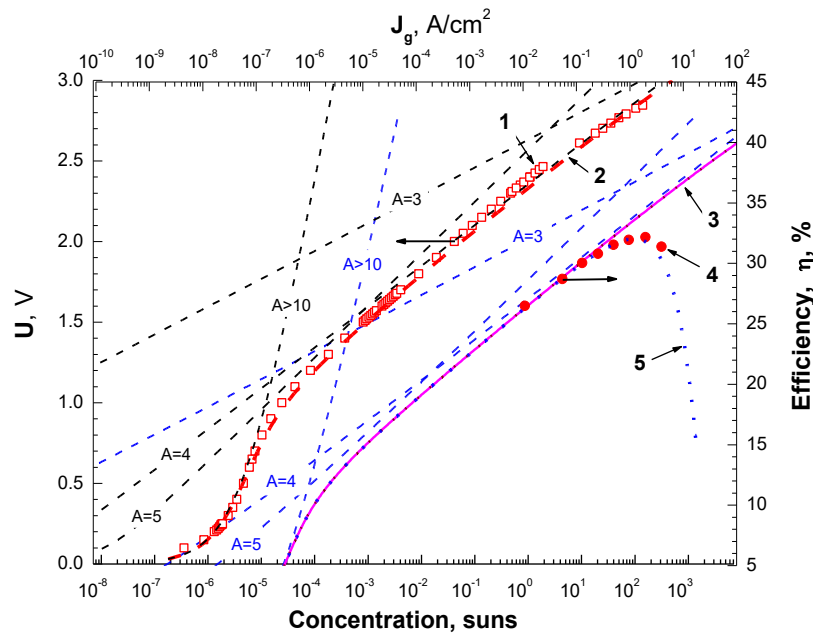


Рисунок 1 - Экспериментальные и расчётные темновые ВАХ трёхпереходных *InGaP/GaAs/Ge* ФЭП; 1 - туннельно – ловушечный, (Есаки): $A > 10$, $J_{tr} = 6.3 \cdot 10^{-11}$ А/см²; 2 – рекомбинационный, (Саа-Нойс-Шокли): $A \sim 5$, $J_{rd} = 2.4 \cdot 10^{-12}$ А/см²; 3 – диффузионный, (Шокли) $A = 3$, $J_d = 1.6 \cdot 10^{-18}$ А/см²; 4 – расчёт, 5 – средняя ВАХ.



**Рисунок 2 - Экспериментальные и расчётные характеристики *InGaP/GaAs/Ge* ФЭП (T=300K): $J - V$ характеристики, 1 – эксперимент, 2 – расчёт; $\eta - C(J_g)$ характеристики, 3, 5 – расчёт ($R_s = 0$, $R_s = 0.075$ Ohm·см²), 4 – эксперимент, (AM1.5, 100 mW/cm²).
Сегменты: $A > 10$, $J_{0(A>10)} = 6.0 \cdot 10^{-8}$ А/см²; $A = 5$, $J_{0(A=5)} = 1.5 \cdot 10^{-10}$ А/см²; $A = 4$, $J_{0(A=4)} = 7 \cdot 10^{-12}$ А/см²; $A = 3$, $J_{0(A=3)} = 5 \cdot 10^{-18}$ А/см².**

На основе проведённых исследований, показано (см. рис. 1), что прямые темновые ВАХ наиболее эффективных монокристаллических *InGaP/GaAs/Ge* ФЭП включают в себя три экспоненциальные компоненты, соответствующие трём механизмам токопрохождения: туннельно – ловушечному (Есаки): $A > 10$; смешанным рекомбинационному (Саа-Нойс-Шокли) и диффузионному, (Шокли): $A \sim 5$ и диффузионному, (Шокли) $A = 3$.

На основе анализа параметров экспериментальных темновых характеристик плотность прямого тока-напряжение $J-U$, согласно методике, описанной в работах [1-3], рассчитана зависимость солнечной концентрации (или плотность фототока) от КПД, $\eta - C(\propto J_g)$ (рис.2). Согласно данной зависимости установлены диапазоны плотности фототока, где наблюдается влияние механизмов транспорта носителей заряда на КПД.

В п. 1.3 представлены экспериментальные исследования темновых и световых ВАХ монолитных $InGaP/GaAs/Ge$ ФЭП (рис.3а), которые позволили расчётным и экспериментальным путём определить доминирующий механизм транспорта, отвечающий за «S» образную форму прямых темновых и световых ВАХ.

GaAs- n	(Si)	3×10^{18}	[500 нм]
$Al_{0.52}In_{0.48}P$ -n	(Si)	1×10^{18}	[30 нм]
$Ga_{0.51}In_{0.49}P$ -n	(Si)	2×10^{18}	[50 нм]
$Ga_{0.51}In_{0.49}P$ -p	(Zn)	1×10^{17}	[0,4 мкм]
$Ga_{0.51}In_{0.49}P$ -p	(Zn)	2×10^{18}	[100 нм]
$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ -p ⁺⁺	(C)	2×10^{20}	[15 нм]
GaAs-n ⁺⁺	(Si)	7×10^{18}	[15 нм]
$Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ -n	(Si)	3×10^{18}	[30 нм]
$Ga_{0.99}In_{0.01}As$ -n	(Si)	2×10^{18}	[90 нм]
$Ga_{0.99}In_{0.01}As$ -p	(Zn)	2×10^{17}	[2.8 мкм]
$Ga_{0.51}In_{0.49}P$ -p	(Zn)	2×10^{18}	[100 нм]
$(Al_{0.2}Ga_{0.8})_{0.5}In_{0.5}P$ -p	(Zn)	2×10^{18}	[30 нм]
$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ -p ⁺⁺	(C)	2×10^{20}	[30 нм]
GaAs-n ⁺⁺	(Si)	7×10^{18}	[30 нм]
$(Al_{0.2}Ga_{0.8})_{0.5}In_{0.5}P$ -n	(Si)	4×10^{18}	[100 нм]
$Ga_{0.99}In_{0.01}As$ -n	(Si)	2×10^{18}	[2 мкм]
$Ga_{0.51}In_{0.49}P$ -n	(Si)	1×10^{18}	[100 нм]
Ge - n	2×10^{18}	500 нм	
Ge - p	2×10^{18}	175 мкм	

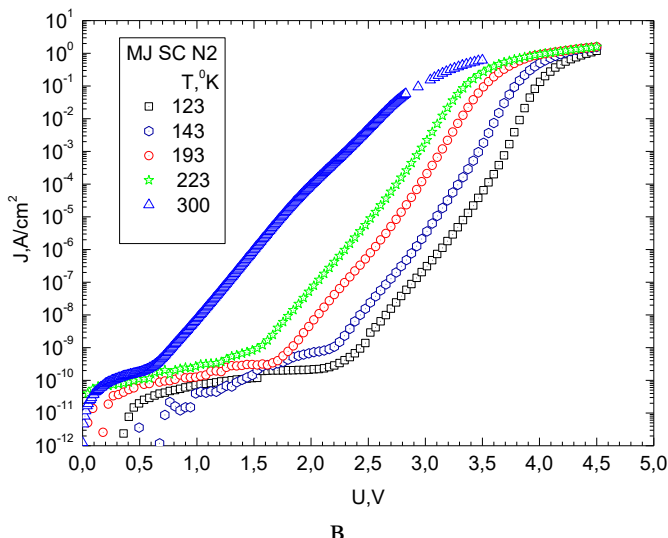
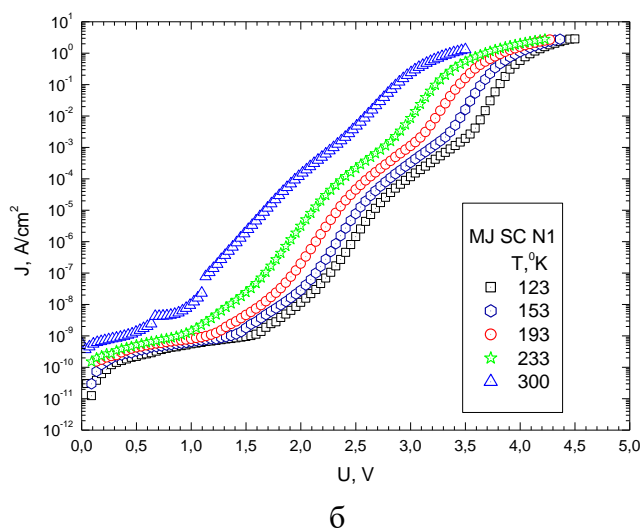


Рисунок 3 – Структурная схема трёхпереходного $InGaP/Ga(In)As/Ge$ ФЭП с указанием уровней легирования и толщин эпитаксиальных слоёв(а); Экспериментальные прямые темновые ВАХ трёхпереходных $InGaP/Ga(In)As/Ge$ ФЭП N1 (б) и N2 (в), измеренные в температурном диапазоне от 123 до 300К.

На основе проведённых исследований, отобраны два характерных МП ФЭП №1 и №2 с различной формой темновых (рис. 3б, в; рис. 4а, б) и световых ВАХ (рис.5, рис.6). На рис. 3б показано, что для ФЭП №1 темновые ВАХ в диапазоне прямого напряжения смещения от 2.5 V, плотности темновых токов от 0.1 mA/cm² до 100 mA/cm² имеют значительный изгиб (S-образная форма ВАХ). Изменение формы ВАХ наиболее характерно проявляется при температурах ниже 200К. При этом, на ВАХ, представленных на рис. 3в,

данный эффект не наблюдается.

Из темновых характеристик (рис.3, рис. 4) были определены предэкспоненциальные множители J_{0i} и диодные коэффициенты A_i , соответствующие различным механизмам токопрохождения в фотоактивных переходах, а также последовательное сопротивление структуры- R_s . Установлено, что для ФЭП №1 и №2 в указанном диапазоне токов и напряжений при температуре до 200 К доминирует комбинация туннельно-ловушечного и рекомбинационного механизмов транспорта.

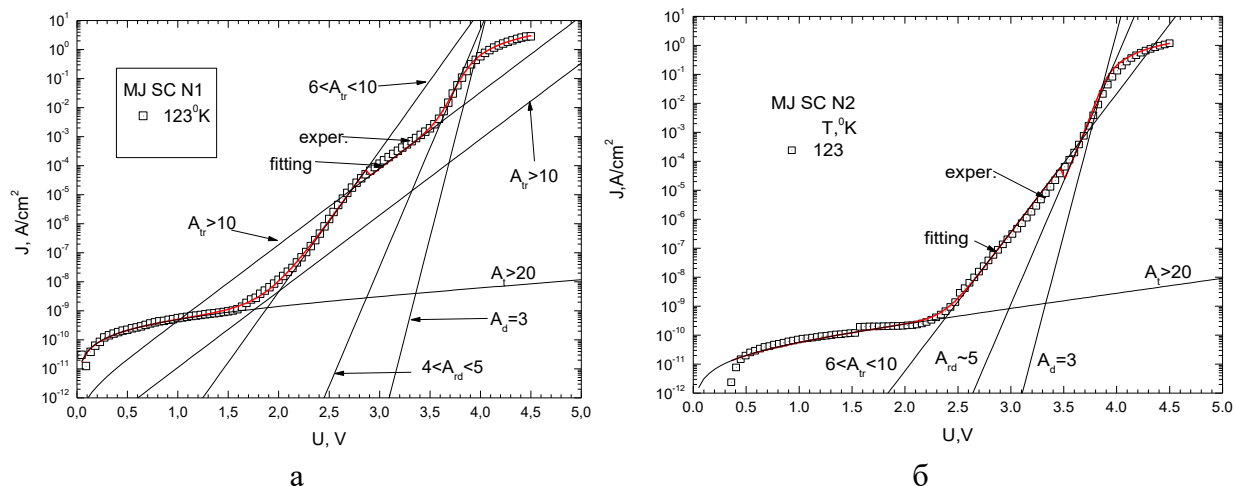


Рисунок 4 - Экспериментальные и расчётные ВАХ трёхпереходных *InGaP/Ga(In)As/Ge* ФЭП рассчитанные по шести экспоненциальной модели N1 (а) и четырёх экспоненциальной модели N2 (б) при температуре 123К.

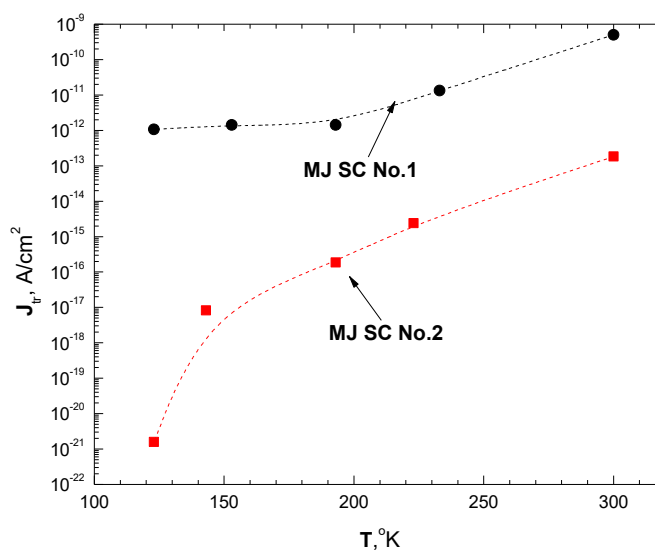


Рисунок 5 - Значения токов насыщения экспоненциальной компоненты соответствующей смешанным туннельно-ловушечному и рекомбинационному механизмам транспорта преобладающей при плотности тока генерации $1 \cdot 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ (A_0) в диапазоне температуры от 123 до 300К.

Однако, согласно значениям диодных коэффициентов, которые составили $A > 10$ для ФЭП №1 и $6 < A < 10$ для ФЭП №2 для ФЭП №1 преобладает туннельно-ловушечный механизм транспорта, а для ФЭП №2 рекомбинационный. Это подтверждается в том числе и температурными зависимостями токов насыщения для данных компонент плотности темнового тока. Видно, что ток насыщения туннельно-ловушечной компоненты ВАХ для ФЭП №1 слабо зависит от температуры и по величине на несколько порядков выше, в

отличие от ФЭП №2. В диапазоне от 100К до 200К наблюдается отсутствие температурной зависимости плотности тока насыщения, которая составляет 10^{-12} А/см². В то время, как для ФЭП №2 ток насыщения в данной области плотности темного тока ниже по значению на четыре порядка и с ростом температуры растёт на пять порядков от $1.59 \cdot 10^{-21}$ А/см² до $1.86 \cdot 10^{-16}$ А/см², что, с учётом значения диодного коэффициента подчёркивает его рекомбинационную природу. Усиление влияния туннельно-ловушечного механизма токопрохождения может быть обусловлено влиянием как механизмов транспорта в соединительных туннельных диодах, так и влиянием встречных потенциальных барьеров, формируемых слоями широкозонного окна (FSF) и тыльного потенциального барьера (BSF).

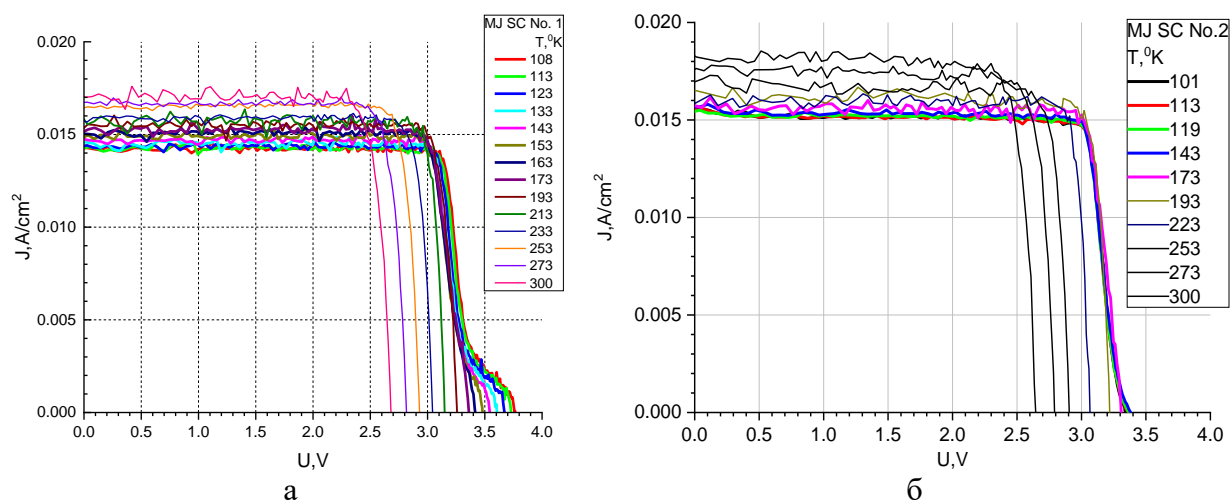


Рисунок 6 - Световые ВАХ трехпереходных *InGaP/Ga(In)As/Ge* ФЭП №.1 (а) и №.2 (б) в температурном диапазоне 100-300К.

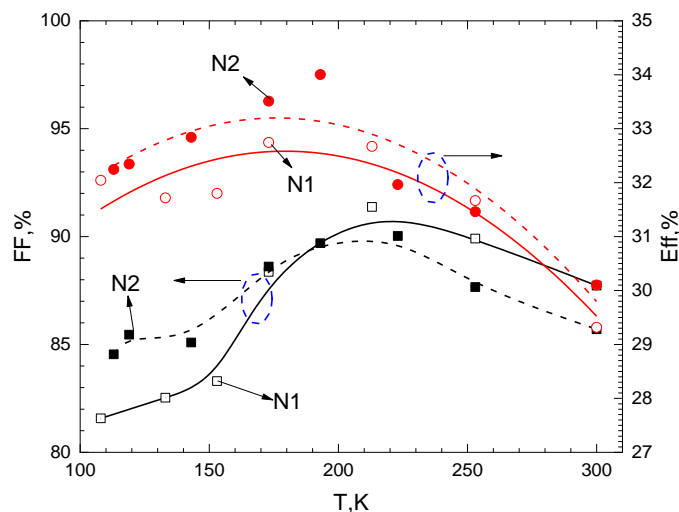


Рисунок 7 - Зависимости FF и КПД трехпереходных *InGaP/Ga(In)As/Ge* ФЭП №.1 и №.2 в температурном диапазоне 100-300К

Согласно измеренным нагрузочным ВАХ (AM0, 1367 W/m^2) для ФЭП №1 (рис. 6а) со значительным доминированием туннельно-ловушечной компоненты в диапазоне плотности тока от 0.1 mA/cm^2 до 100 mA/cm^2 наблюдается S-образная форма характеристики вблизи напряжения холостого хода. В то время, как ВАХ ФЭП №2 (рис. 6б) не имеют подобного эффекта при низких температурах.

Из нагрузочных ВАХ были рассчитаны температурные зависимости FF и КПД, представленные на рис 7. Как видно из зависимостей S-образность ВАХ ведёт к существенному снижению величины флфактора (ФФ) и КПД. При температурах ниже 200К для образца №2 наблюдается меньшее падение флфактора и большие значения КПД. При температуре 200К и интенсивности излучения 1367W/m^2 максимальное КПД МП ФЭП №2 составляет 34%, в то время как для ФЭП №1 ~33%.

Таким образом, согласно проведённым исследованиям выявлена S-образная форма прямых темновых и световых ВАХ InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей при температурах ниже 200 К. Изменение формы ВАХ обусловлено влиянием туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда. Доминирование туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда в диапазоне плотности темновых токов от 1 mA/cm^2 до 100 mA/cm^2 ведёт к снижению фактора заполнения нагрузочной ВАХ и КПД InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей.

На основе экспериментальных исследований фотоэлектрических характеристик МП ФЭП представленных в данной главе, опубликованы следующие работы: [1А], [2А], [3А], [4А], [5А].

Глава 2 посвящена исследованию механизмов транспорта в соединительных GaAs/AlGaAs туннельных диодах. В п.2.1 представлены результаты экспериментального исследования влияния $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ BSF и FSF слоёв на ВАХ GaAs:Si/GaAs:Be туннельных диодов, необходимых для соединения фотоактивных субэлементов МП ФЭП. Структуры (рис. 8) туннельных диодов были выращены с использованием молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Было выращено два типа структур ТД (В и С; таблица №1), отличавшихся общей толщиной активной $n^{++}\text{GaAs:Si}/p^{++}\text{GaAs:Be}$ области и уровнем легирования $n^{++}\text{GaAs:Si}$ области. Конструкция экспериментальных структур ТД имитировала соединительные элементы многопереходного ФЭП с прилегающими $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ BSF и FSF слоями.

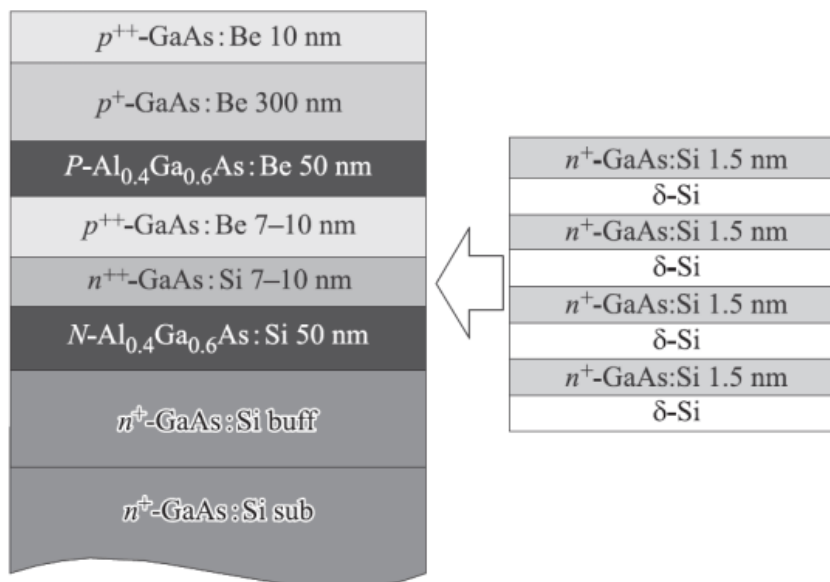


Рисунок 8 - Структурный вид выращенных GaAs:Si/GaAs:Be ТД

Таблица №1 Технологические параметры структур GaAs:Si/GaAs:Be ТД

Структура	$T_s, ^\circ\text{C}$	$n^{++}\text{GaAs:Si}, \text{cm}^{-3}$	$p^{++}\text{GaAs:Si}, \text{cm}^{-3}$	d, mm	$J_p, \text{A/cm}^2$	U_p, V
В	400	$1.2 \cdot 10^{19}$	$5 \cdot 10^{19}$	20	3	0.42
С	400	$>1.2 \cdot 10^{19}$	$5 \cdot 10^{19}$	13	513	1.13

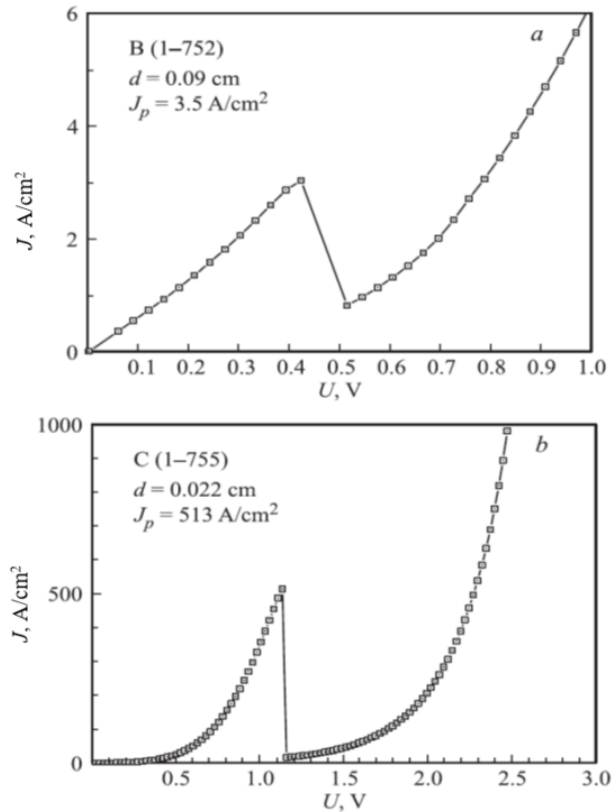


Рисунок 9 - ВАХ туннельных диодов В (а) и С (б). ВАХ измерены на мезаструктурах с различными диаметрами контакта d .

В результате пиковое значение тока в образце С с большим уровнем легирования составило $J_p = 513 \text{ A/cm}^2$ (рис. 9, б) при отношении пик–долина ~ 25 . При этом нужно отметить, что достигнутое в образце В значение пикового тока ТД $J_p = 3 \text{ A/cm}^2$ (рис. 9, а) также превышает уровень, необходимый для использования ТД в структурах многопереходных ФЭП при 200-кратном концентрировании солнечного излучения.

Наблюдаемая нелинейность начального хода ВАХ в указанных структурах ТД вызвана влиянием недостаточно легированного барьера $p\text{-AlGaAs}$, толщиной 50 нм, имитирующего тыльный BSF барьерный слой следующего каскада ФЭП, который заключен в гетероструктуре ТД между вырожденными слоями активной области ТД ($p^{++}\text{-GaAs}$) и контактного слоя $p^+\text{-GaAs}$. Данную нелинейность можно исключить увеличением в несколько раз концентрации примеси Ве в широкозонном барьерном слое $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As:Ве}$ изотипного гетероперехода $p^{++}\text{-}p\text{-}p^+$.

В п. 2.2 представлены результаты численного (рис. 10, кривая 1 и 2) и экспериментального (рис. 13) исследования характеристик соединительных туннельных $p\text{-}i\text{-}n$ диодов на основе $n^{++}\text{GaAs:Si}/i\text{-(GaAs/AlGaAs)}/p^{++}\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As:Ве}$ гетероструктуры без BSF и FSF слоёв. Используя численное моделирование, установлено, что зависимость плотности пикового тока туннельного $p\text{-}i\text{-}n$ диода от толщины i -слоя является немонотонной (рис. 10, кривая 2). Плотность пикового тока сначала возрастает, достигает максимума, а затем снижается из-за увеличения толщины потенциального барьера, через который туннелируют носители заряда. Выявлены факторы, влияющие на величину туннельного тока при изменении толщины i -слоя. Для рассмотренных модельных $p\text{-}i\text{-}n$ структур определена оптимальная толщина i -слоя, при которой плотность пикового тока достигает 280 A/cm^2 .

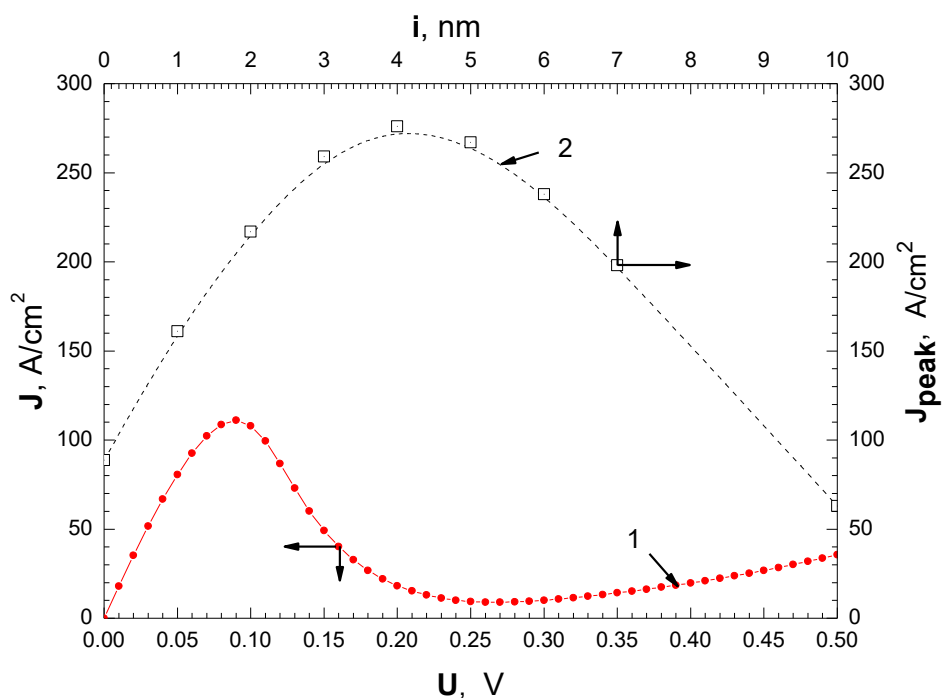


Рисунок 10 - Вольт-амперная характеристика соединительного ТД (таблица 1) при нулевой толщине i – слоя (кривая 1) и зависимость величины пикового туннельного тока от толщины i – слоя для той же структуры ТД (кривая 2).

С использованием результатов расчётов и метода МПЭ выращено два типа $n^{++}GaAs/i-(GaAs/AlGaAs)/p^{++}Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ структур туннельных диодов, дизайн которых представлен на рис. 11.

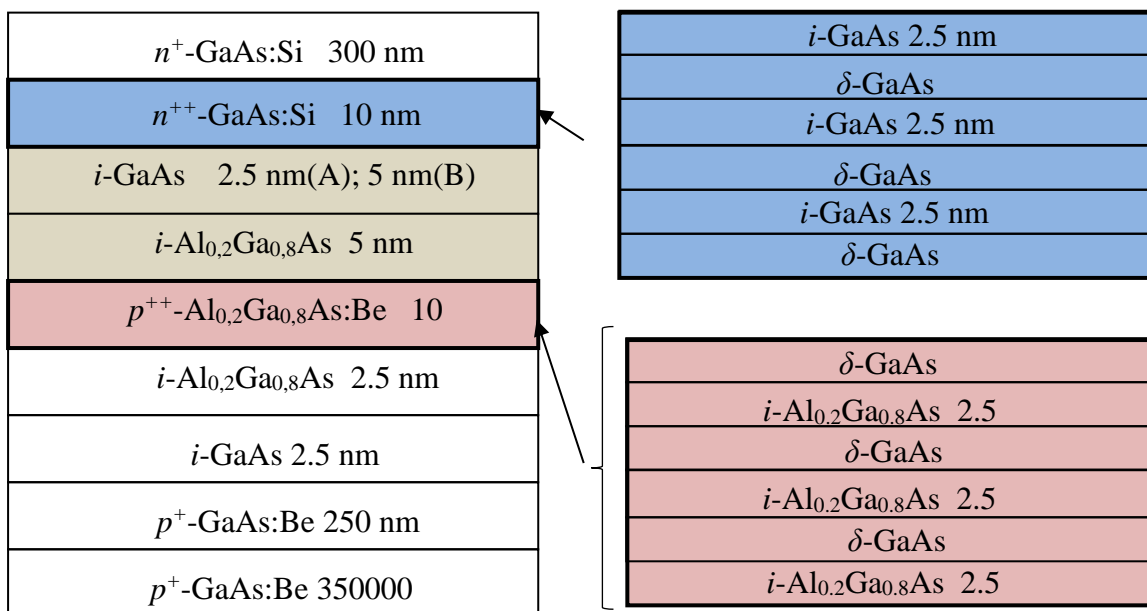


Рисунок 11 - Дизайн структуры с толщиной i -GaAs слоя 2,5nm (структура А) и с толщиной i -GaAs слоя 5nm (структура В) в активной р-і-п области ТД.

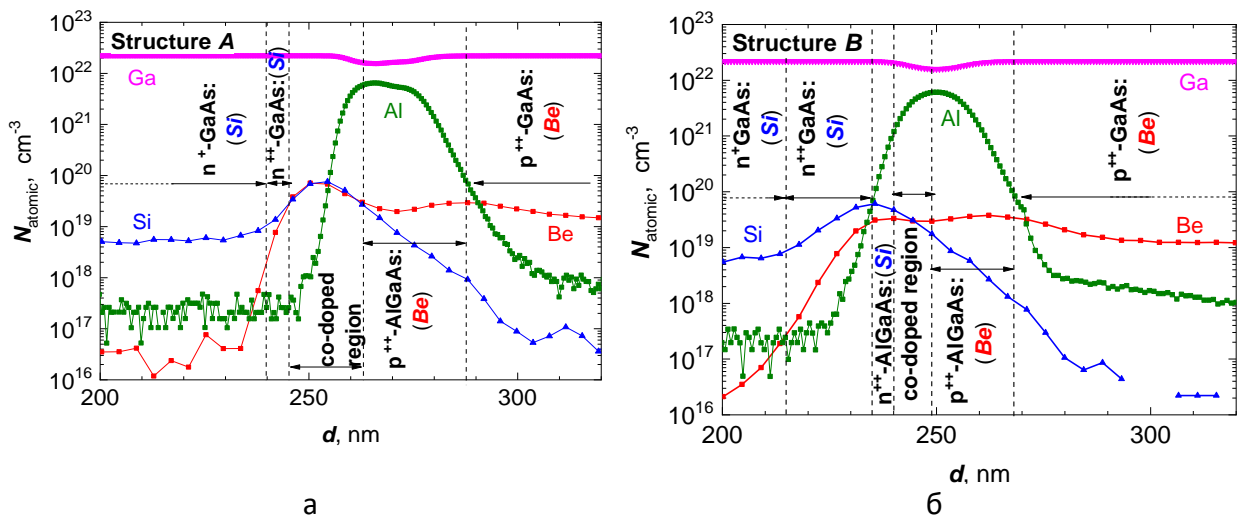


Рисунок 12 - ВИМС структуры А - (а), В – (б)

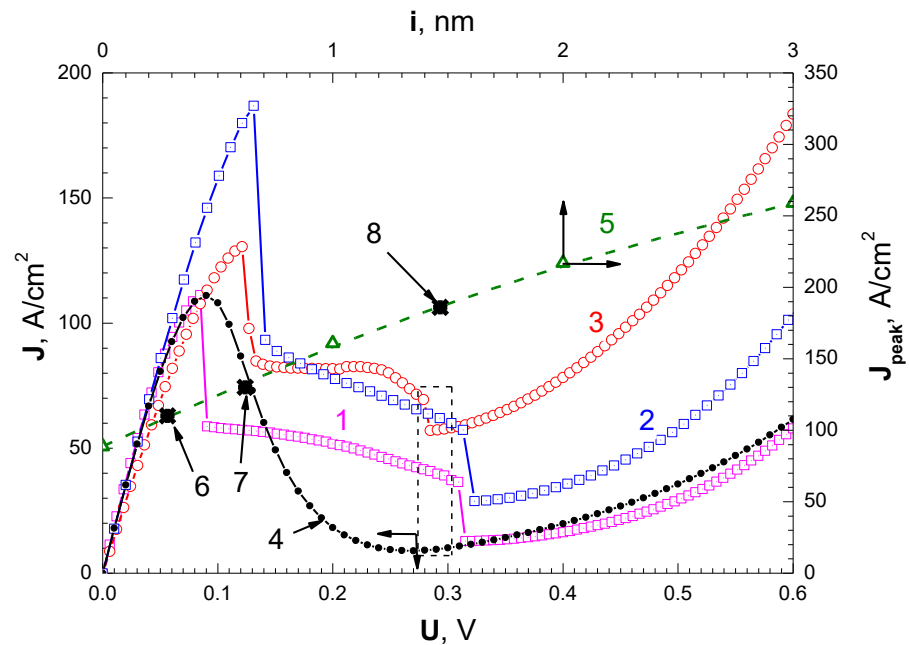


Рисунок 13 - Кривые 1, 2, 3 - экспериментальные ВАХ ТД с диаметром мезы 225 μm для исследованных структур: структура А - кривая 1 с усреднёнными, 2 с максимальными значениями плотности пикового туннельного тока; структура В - кривая 3 с усреднёнными значениями плотности пикового туннельного тока; кривая 4 - расчётная ВАХ ТД (Таблица №1) при толщине $i \sim 0,3\text{nm}$; кривая 5 – расчётная зависимость величин плотности пикового туннельного тока J_{peak} от толщины i – слоя; где точки 6, 7 и 8 – экспериментальные значения J_{peak} для структур А и В.

Согласно измеренным концентрационным профилям легирующих атомов в структурах А и В наблюдается диффузия примеси Ве в i -слой и далее к границе p - n перехода (рис. 12). Из рисунка 12 следует, что диффузия Ве в структуре А способствовала уменьшению вырождения n^{++} -GaAs слоя из-за перекомпенсации донорной и акцепторной примесей. При этом толщина слоя n^{++} -GaAs в структуре А не компенсированного примесью Ве составляет $\sim 5\text{ nm}$ при изменении концентрации атомов Si от $1 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ до $3 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$, а в структуре В $\sim 20\text{ nm}$ с изменением концентрации от $9 \cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ до $6 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$. Диффузия атомов Ве привела к формированию между вырожденными n^{++} и p^{++} - слоями

компенсированных, “квазинейтральных” областей. На рисунке 12 (а, b) данная область обозначена как “co-doped region”. Для структуры А данная область имеет несколько большую толщину ~ 25 nm и включает в себя два слоя GaAs:(Si, Be) и AlGaAs:(Si, Be) (Рис. 12а). Для структуры В данная область состоит только из AlGaAs:(Si, Be) слоя с толщиной ≤ 10 nm (Рис. 12b).

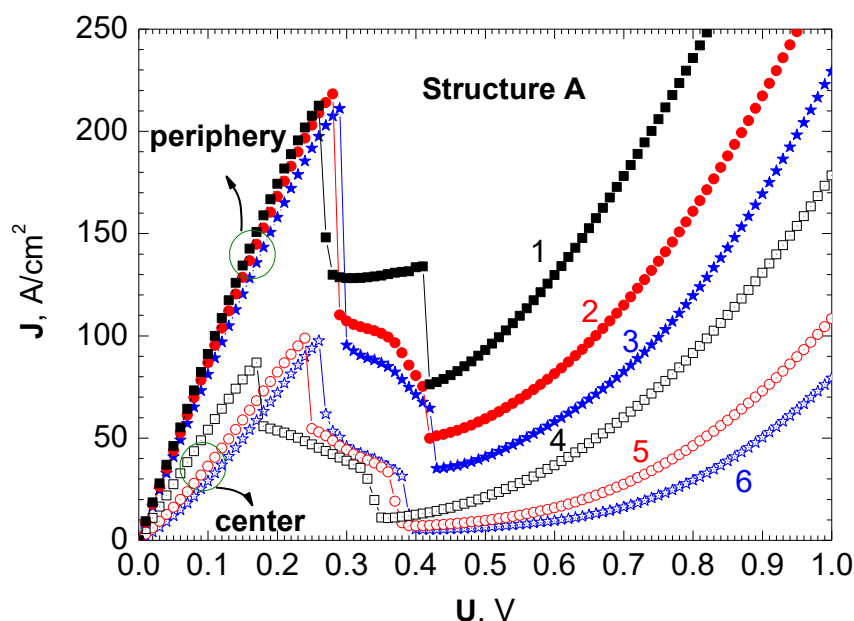


Рисунок 14 - Прямые ВАХ образцов ТД структура А, (периферия – кривые: 1 – 353 К, 2 – 223 К, 3 – 123 К); (центр – кривые: 4 – 353 К, 5 – 223 К, 6 – 123 К)

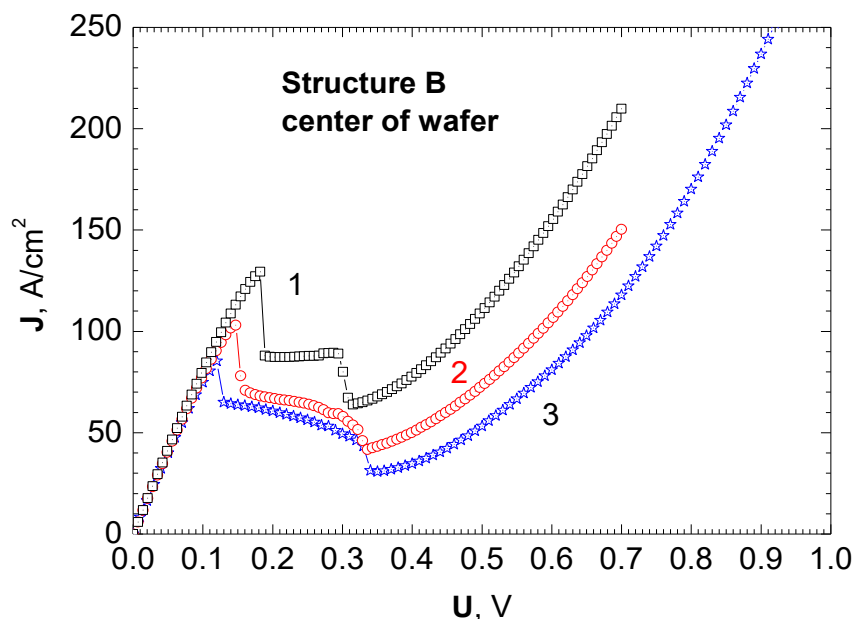


Рисунок 15 - Прямые ВАХ образцов ТД структура В (кривые 1 – 353 К, 2 – 223 К, 3 – 123 К).

На рисунке 13 представлены ВАХ ТД из центра эпитаксиальной пластины структуры А (кривая 1) и структуры В (кривая 3), а также ВАХ ТД структуры А с максимальным значением плотности пикового туннельного тока (кривая 2). Видно, что экспериментальные ВАХ достаточно хорошо согласуются с ВАХ для модельной структуры (кривая 4), а среднестатистические значения плотности пикового тока хорошо ложатся на кривую расчётной зависимости J_{peak} от толщины i -слоя (точки 6, 7 и 8 на кривой 5). При

этом, средняя эффективная толщина i -слоя для структуры А оказывается близкой к нулю, а для структуры В составляет $\sim 0.6\text{nm}$. В то же время для диодов, расположенных на периферии эпитаксиальной пластины структуры А, «эффективная» толщина i -слоя равна 1.5nm , что также коррелирует с емкостными измерениями.

Выполнены измерения ВАХ ТД в широком температурном диапазоне 100-400К. Для исследования ВАХ ТД, были отобраны образцы ТД из центральной и периферийной частей эпитаксиальных пластин структур А и В. ВАХ отобранных образцов измеренные в диапазоне температур (100 – 400) К представлены на рисунке 14 (Структура А) и 15 (структура В). Показано что на ВАХ $n^+-\text{GaAs}/n^{++}-\text{GaAs}/(i-\text{GaAs}/\text{AlGaAs})/p^{++}-\text{AlGaAs}$ соединительных туннельных диодов с наличием значительной области (на толщине $\geq 10\text{nm}$) перекомпенсации донорного и акцепторного профилей легирования атомами Si и Be, образованной в результате температурной диффузии примеси, при температурах ниже 200К при прямом напряжении смещения до U_{peak} присутствует область нелинейной (квазиэкспоненциальной) зависимости тока от напряжения. Данный участок ВАХ ТД определяется двумя механизмами транспорта, межзонного квантового туннелирования и туннельно-ловушечным. Оба механизма дают вклад в величину пиковой плотности туннельного тока. Для структуры А туннельно-ловушечный механизм транспорта может являться доминирующим из-за высокой степени перекрытия донорных и акцепторных примесей в центральной области $p^{++}-n^{++}$ туннельного перехода. Туннельно-ловушечный механизм транспорта обусловлен наличием локализованных примесных состояний (ловушек) в запрещённой зоне полупроводника. В этом случае электрон в процессе туннелирования захватывается ловушкой и далее туннелирует в разрешённые состояния валентной зоны. Понижение температуры способствует активному вымораживанию носителей заряда на ловушках, и для преодоления локализованных примесных состояний необходима подача дополнительного напряжения смещения, что приводит к экспоненциальной зависимости ВАХ при прямом напряжении смещения до U_{peak} .

Из экспериментальных ВАХ и выражения (1) [6] рассчитывался нормированный температурный коэффициент пикового значения плотности туннельного тока:

$$\Delta J_p = \frac{J_p^{Tj} - J_p^{TRT}}{J_p^{TRT}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где ΔJ_p – температурный коэффициент, J_p^{Tj} – плотность пикового туннельного тока при фиксируемой температуре, и J_p^{TRT} – плотность пикового туннельного тока при комнатной температуре - 300 К. Положительная величина ΔJ_p характеризует рост, а отрицательная падение J_p относительно его значения при комнатной температуре.

Зависимости J_p и ΔJ_p для структур А и В представлены на рисунке 16а. Согласно полученным результатам установлено, что при нагреве до 400 К для ТД структуры А наблюдается плавное снижение J_p в то время, как для структуры В характерен линейный рост J_p . Для образцов ТД структуры А, изменение значения J_p составляет 7%, а для образцов ТД структуры В – 42%. Такая зависимость J_p от температуры для структуры А связана с тем что температурная диффузия преимущественно акцепторной примеси Be из $p^{++}-\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-(\delta\text{Be})$ слоя в $n^{++}-\text{GaAs}-(\delta\text{Si})/i-(\text{GaAs}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As})$ область способствовала снижению степени вырождения $n^{++}-\text{GaAs}-(\delta\text{Si})$ слоя ТД за счёт формирования перекомпенсированной Si и Be области. Линейный рост J_p с температурой для структуры В обусловлен меньшей толщиной «эффективного» i – слоя, меньшей глубиной диффузии примеси Be в $n^{++}-\text{GaAs}$ область и соответственно большим уровнем её вырождения.

Из экспериментальных ВАХ ТД при разных температурах было рассчитано дифференциальное сопротивление, отвечающее за паразитные потери при падении напряжения на ТД в многопереходных ФЭП, (Рис.16б). Лучшая температурная стабильность R_d наблюдается для образцов ТД структуры В (рис 16б, кривая 3). Во всём

температурном диапазоне величина R_d для образцов ТД структуры В изменяется от 0.58 до 0.42 $\text{mOhm}\cdot\text{cm}^2$. Для структуры А при нагреве от 100 до 400 К, R_d образцов ТД из центральной части меняется от 1.59 до 0.67 $\text{mOhm}\cdot\text{cm}^2$ и от 0.58 до 0.34 $\text{mOhm}\cdot\text{cm}^2$ для периферийной части.

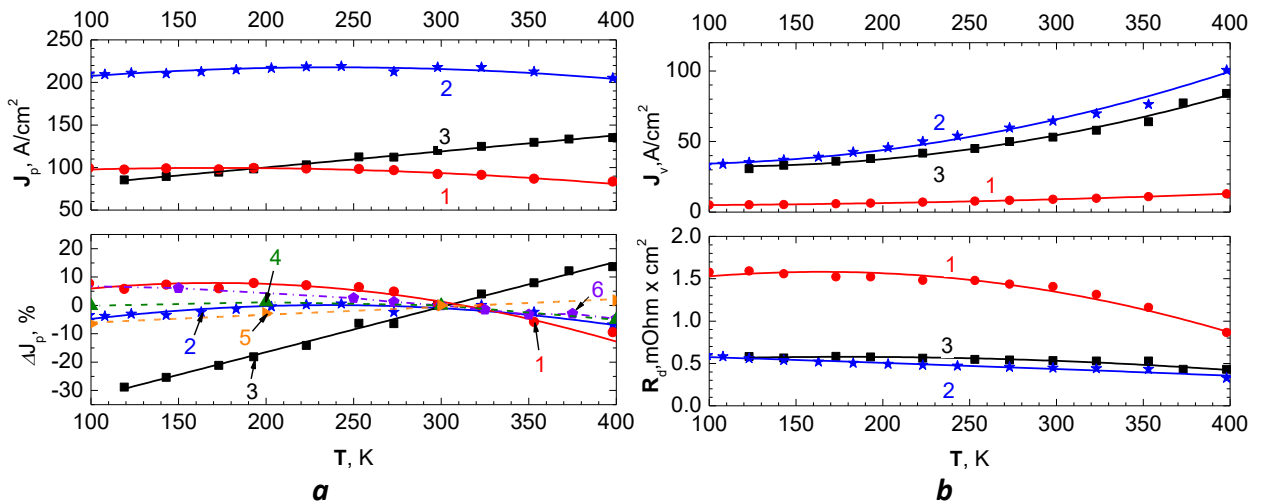


Рисунок 16 - Зависимости от температуры: (а) J_p и ΔJ_p : структура А (кривая 1 – центр, кривая 2 – периферия); структура В (кривая 3); расчётная характеристика ТД структуры А (кривая 4); расчётная характеристика ТД структуры В (кривая 5) AlGaAs/GaAs двух барьерный резонансный туннельный диод (кривая 6) [7]; (б) плотности тока долины – J_v и дифференциального сопротивления ТД – R_d , структура А (кривая 1– центр, кривая 2 – периферия) и структура В (кривая 3).

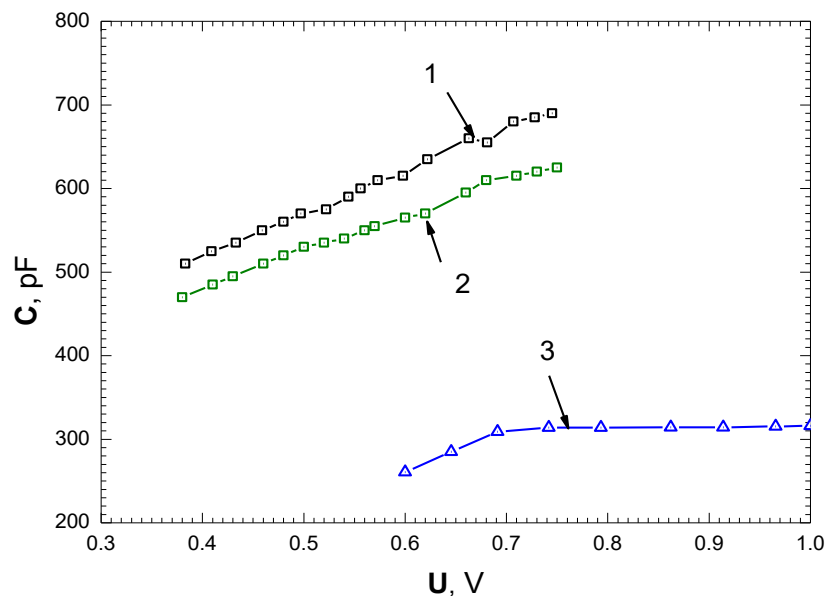


Рисунок 17 - Вольт-фарадные характеристики трёх образцов ТД с плотностью пикового тока: 111А/см² (кривая 1, структура А), 131А/см² (кривая 2, структура В), 190А/см² (кривая 3, структура А).

С целью оценки идентичности на эпитаксиальной пластине области объёмного заряда (ООЗ) р-і-п ТД, вклад в величину которой вносит толщина i - слоя, были проведены измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) исследуемых ТД (рис. 17). Для этого согласно проведённым измерениям ВАХ были отобраны ТД, соответствующие средним

значениям пиковой плотности туннельного тока обеих структур, а также образец с периферии структуры А с максимальным значением плотности туннельного тока $\sim 200 \text{ А/см}^2$. При этом для пластины В средняя емкость ТД оказывается заметно меньше емкости диодов на пластине А, что можно объяснить большей шириной ООЗ. С другой стороны, вольт-емкостные измерения показали почти двукратное снижение емкости ТД на периферии эпитаксиальной пластины структуры А, что позволяет ожидать наличие в этих диодах заметного влияния «эффективного» i – слоя.

Представлены результаты исследований ТД на основе $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ (Структура С, рис. 18а) и $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ (Структура D, рис.18б) структуры с наличием барьерных слоёв: $n\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}:\text{Si}$ толщиной 50nm и уровнем легирования $N_d = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (FSF слой) и $p\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}:\text{Si}$ толщиной 50nm и уровнем легирования $N_a = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (BSF слой). Вырожденные слои GaAs n^{++} -типа δ – легированы Si, а слои $p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ легированы атомами С. Уровни легирования n^{++} и p^{++} -слоёв в структурах составляли, соответственно, $\geq 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $\sim 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Рост сильно легированных областей для обеих структур осуществлялся в идентичных режимах при температуре подложки $\sim 535\text{-}550^\circ\text{C}$. По сравнению со структурой С, в структуру D добавлен нелегированный i -слой GaAs толщиной $\sim 7\text{nm}$. Величина i -слоя была выбрана с учётом влияния температурной диффузии примеси Si при последующем росте структуры МП ФЭП. После завершения эпитаксиального роста и извлечению образцов, отдельные фрагменты выращенных гетероструктур были подвергнуты отжигу в камере МПЭ для имитации процесса роста реальных МП ФЭП.

$p^+ \text{- GaAs}:(\text{C}), 50 \text{ nm}$	$2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
$p^+\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}:(\text{C}), 50 \text{ nm}$	$1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
$p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C}), 10 \text{ nm}$	$1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$
$n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si}), 10 \text{ nm}$	$\geq 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
$n^+ \text{- Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}:(\delta\text{Si}), 50 \text{ nm}$	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

а

$p^+ \text{- GaAs}:(\text{C}), 50 \text{ nm}$	$2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
$p^+\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}:(\text{C}), 50 \text{ nm}$	$1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
$p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C}), 10 \text{ nm}$	$1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$
$i\text{-GaAs}, 7 \text{ nm}$	$\geq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$
$n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si}), 10 \text{ nm}$	$\geq 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
$n^+ \text{- Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}:(\delta\text{Si}), 50 \text{ nm}$	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

б

Рисунок 18 - Структурный вид выращенных $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ ТД структуры С (а) и $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ ТД структуры D (б).

Для структур С и D непосредственно на пластине были выполнены измерения ВАХ образцов ТД с диаметром мезы $225 \mu\text{m}$, расположенных в различных местах пластины. На рисунке 19 представлены измеренные ВАХ ТД с диаметром мезы $225 \mu\text{m}$ для исследуемых структур С и D с максимальными значениями J_p . Можно заметить, что ВАХ ТД структуры С в значительной степени соответствует обращённому диоду, что может быть связано со слабым уровнем вырождения $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})$ области. На ВАХ не наблюдается участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, поскольку величина J_p , соответствующего межзонному квантовому туннелированию, при прямом напряжении смещения сопоставима с величиной плотности тока долины (J_v), которая согласно ВАХ

образцов структуры В составляет $\sim 0.1 \text{ A/cm}^2$. На ВАХ диодов структуры С, в диапазоне напряжений от 0 до 50 мВ присутствует квазилинейный участок, соответствующий межзонному квантовому туннелированию с величиной $J_p \sim 0.1 \text{ A/cm}^2$.

В структуре D благодаря наличию нелегированного i-GaAs нанослоя между вырожденными областями наблюдается типичная ВАХ ТД с межзонным квантовым туннелированием. Максимальное значение J_p для структуры D составляло $\sim 1.0 \text{ A/cm}^2$. Невысокие значения J_p , по сравнению с результатами, приведёнными для $\text{n}^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/\text{p}^{++}\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}:(\text{Be})$ структур, обусловлены более низким уровнем легирования $\text{n}^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})$ слоя.

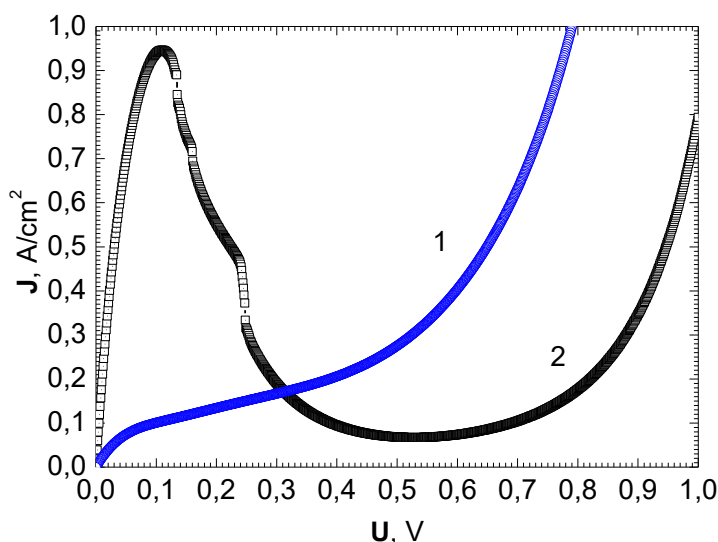


Рисунок 19 - Прямые вольтамперные характеристики $\text{n}^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/\text{p}^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ ТД структуры С (кривая 1) и $\text{n}^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/\text{i-GaAs}/\text{p}^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ ТД структуры D (кривая 2).

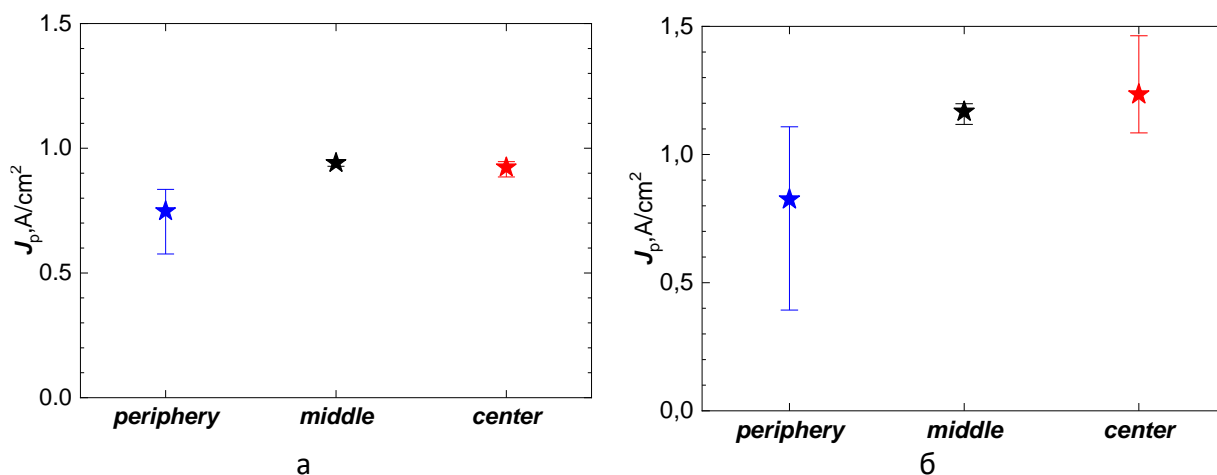


Рисунок 20 - Пиковые значения плотности туннельного тока J_p ТД структуры D относительно положения на пластине, где (а) без отжига и (б) с отжигом.

На рисунке 20 представлены значения J_p для образцов ТД структуры D и их положения на пластине, где (а) соответствует диодам без отжига, а (б) – диодам, подвергнутым отжигу при температуре 580°C в течение 2 часов в камере установки МПЭ. Проведённый отжиг соответствует режиму роста последующих фотоактивных слоёв монокристаллических МП ФЭП. Видно, что максимальная величина J_p ТД для структуры В без

отжига составляет $\sim 1.0\text{A}/\text{cm}^2$, а с отжигом $\sim 1.5\text{A}/\text{cm}^2$. Кроме того, после проведения отжига возрос разброс значений J_p для образцов по всей площади пластины, что может быть обусловлено неравномерностью диффузии примеси Si из-за наличия градиента температуры по пластине в процессе отжига.

Таким образом, на основе сравнения экспериментальных ВАХ $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ и $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ структур, можно заключить, что включение слоя $i\text{-GaAs}$ ($\geq 5 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$) с толщиной 7 nm между вырожденными $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})$ (10 nm) и $p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ (10 nm) областями обеспечило наличие туннельной характеристики, даже при относительно невысоком уровне легирования $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})$ слоя. При дополнительном температурном отжиге при 580°C в течение 2 часов, соответствующему режиму выращивания реальных структур монолитных МП ФЭП, в структуре $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ ТД наблюдается рост максимального значения J_p на 30%. Структура $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ ТД обеспечивает хорошую стабильность ВАХ, по сравнению со структурой $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/p^{++}\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}:(\text{Be})$.

В п. 2.3 представлено исследование влияния ВАХ ТД на фотоэлектрические характеристики лазерных двухпереходных AlGaAs/GaAs ФЭП в температурном диапазоне 100-300K. Структура отдельных составных элементов двухпереходного ФЭП выращивалась методом МПЭ. Структура однопереходных фотопреобразователей включала в себя: $n\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ – тыльный потенциальный барьер, $n\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}$ слои толщиной 0.5/1 μm , 0.7 μm $p\text{-GaAs}$ эмиттер с градиентным легированием, $p\text{-Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ широкозонное окно толщиной 2 μm . На выращенной эпитаксиальной пластине с использованием фотолитографии были сформированы чипы ФЭП диаметром 300 μm . Диапазон спектральной чувствительности выращенных однопереходных ФЭП составлял 810-860nm.

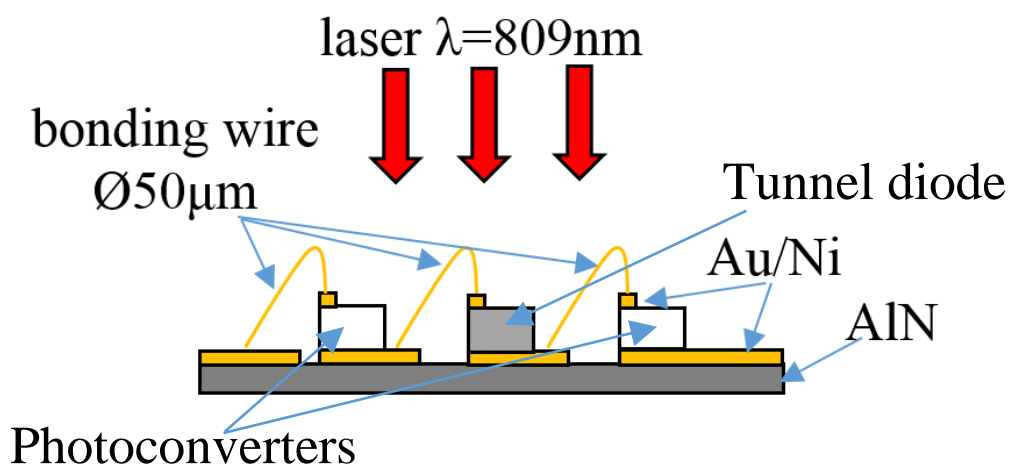


Рис. 21 Схема ввода оптического излучения в планарную сборку из двух фотопреобразователей со встречно включённым туннельным диодом

В качестве соединительных элементов использовались $n^{++}\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}/i\text{-AlGaAs}/p^{++}\text{-AlGaAs}$ гетеропереходные ТД полученные с использованием МПЭ двух типов структур А и В (см. рис. 11), представленные в п. 2.2. На эпитаксиальной пластине А был отобран образец ТД структуры А с нелинейным участком туннельной компоненты ВАХ ($T=300\text{K}$), в то время как туннельная компонента ВАХ ТД структуры В имела абсолютно линейную зависимость с низким удельным сопротивлением $0.8\text{mOhm}\times\text{cm}^2$. На основе выращенных и отобранных AlGaAs/GaAs p-i-n ФЭП и соединительных $n^{++}\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}/i\text{-AlGaAs}/p^{++}\text{-AlGaAs}$ ТД структуры А и В были созданы двухпереходные ФЭП (рис. 21). Формирование двухпереходных ФЭП производилось не монолитно, а с использованием планарной электрической коммутации выращенных однопереходных AlGaAs/GaAs p-i-n

ФЭП и n^{++} -GaAs/i-GaAs/i-AlGaAs/p $^{++}$ -AlGaAs ТД, с целью оценки влияния нелинейности ВАХ ТД на КПД МП ФЭП. Один тип двухпереходных ФЭП содержал в себе встречно включённый соединительный ТД структуры А, другой тип двухпереходных ФЭП содержал соединительный ТД структуры В.

Согласно анализу экспериментальных и расчётных фотоэлектрических характеристик (рис.22) двухпереходного ФЭП с соединительным ТД структуры А, наблюдается снижение FF на $\sim 17\%$ и КПД на 24% при преобразовании лазерного излучения с плотностью мощности $<90\text{W}/\text{cm}^2$ на длине волны 809nm. При $T = 103\text{K}$ FF и КПД для ФЭП с ТД типа А составили 71.2% и 42.4%, а для ФЭП с ТД типа В 87.5% и 58.2% соответственно.

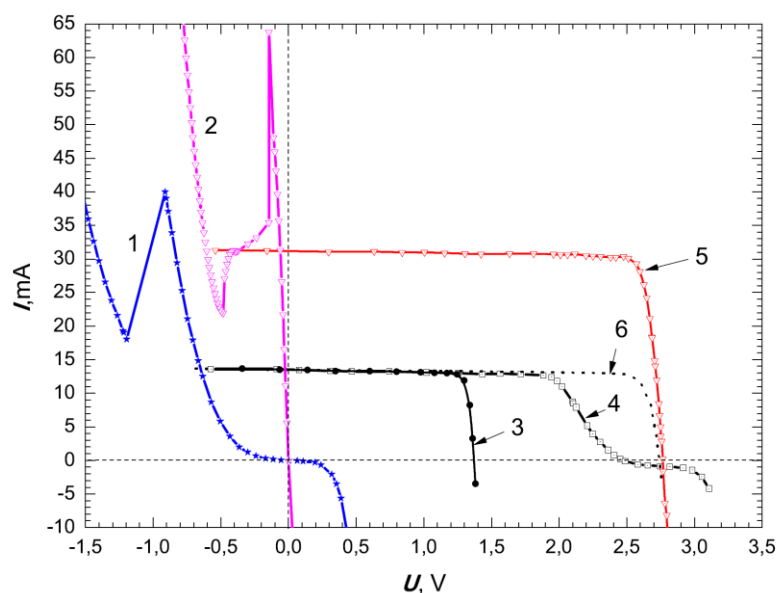


Рис.22 Световые ВАХ при возбуждении лазерным излучением с плотностью мощности $<90\text{W}/\text{cm}^2$ на длине волны 809nm при 103K, ВАХ туннельных диодов для структуры А – (кривая 1) и структуры В – (кривая 2); однопереходных ФЭП – (кривая 3); двухкаскадных ФЭП с ТД типа А (кривая 4) и ФЭП с ТД типа В (кривая 5), двухкаскадные ФЭП (А) без учёта влияния ТД (кривая 6).

В **заклучении** диссертации представлены основные результаты проведенного исследования:

1. Выявлена S-образная форма прямых темновых и световых ВАХ InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей при температурах ниже 200 K. Изменение формы ВАХ обусловлено влиянием туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда. Доминирование туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда в диапазоне плотности темновых токов J_g от $1\text{ mA}/\text{cm}^2$ до $100\text{ mA}/\text{cm}^2$ ведёт к снижению фактора заполнения нагрузочной ВАХ и КПД InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей.
2. Согласно измеренным нагрузочным ВАХ исследованных GaInP/GaInAs/Ge ФЭП с меньшим влиянием туннельно-ловушечного механизма транспорта при спектре AM0 и интенсивности $0.1367\text{W}/\text{cm}^2$ при температуре $\sim 200\text{K}$ достигнуто КПД $\sim 34\%$.
3. Выращены структуры соединительных AlGaAs:Si/n $^{++}$ -GaAs:Si/p $^{++}$ -GaAs:Be/p-AlGaAs:Be ТД с наличием прилегающих BSF и FSF слоёв имитирующих широкозонное окно и тыльный потенциальный барьер МП ФЭП. Достигнутый уровень пикового значения плотности туннельного тока $J_p=513\text{A}/\text{cm}^2$ позволяет использовать полученный ТД для соединения каскадов в структурах многопереходных солнечных элементов. Наблюдающаяся нелинейность начального хода ВАХ объясняется влиянием потенциального барьера в изотипном p $^{++}$ -p $^{+}$ -гетеропереходе, ограничивающим

- активную область ТД, вследствие неоптимального легирования ($N_A \leq 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) твердого раствора $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$.
4. Выполнено численное и экспериментальное исследование характеристик соединительных туннельных $p-i-n$ диодов на основе $n^{++}\text{GaAs}:\text{Si}/i-(\text{GaAs}/\text{AlGaAs})/p^{++}\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}:\text{Be}$ гетероструктуры без BSF и FSF слоёв.
 5. Используя численное моделирование, установлено, что зависимость плотности пикового тока туннельного $p-i-n$ диода от толщины i -слоя является немонотонной. Плотность пикового тока сначала возрастает, достигает максимума, а затем снижается из-за увеличения толщины потенциального барьера, через который туннелируют носители заряда. Выявлены факторы, влияющие на величину туннельного тока при изменении толщины i -слоя. Для рассмотренных модельных $p-i-n$ структур определена оптимальная толщина i -слоя, при которой плотность пикового тока достигает 280 A/cm^2 .
 6. Выращены $n^{++}\text{GaAs}/i-(\text{GaAs}/\text{AlGaAs})/p^{++}\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ туннельные диоды со значениями плотности пикового тока $\geq 200 \text{ A/cm}^2$. Получено достаточно хорошее согласование между расчётными и экспериментальными ВАХ туннельных диодов.
 7. В температурном диапазоне (100–400) К выполнены исследования прямых вольт-амперных характеристик $n^{++}\text{-GaAs}-(\delta\text{Si})/i-(\text{GaAs}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As})/p^{++}\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-(\delta\text{Be})$ соединительных ТД двух типов структур, полученных методом МВЕ. Структура типа А содержала в себе перекомпенсированный «эффективный» i -слой толщиной $\leq 25 \text{ nm}$, образованный взаимодиффузией Si и Be при температуре эпитаксиального роста $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Структура типа В имела «эффективный» i -слой толщиной $\leq 10 \text{ nm}$ образованный аналогичным образом при температуре роста $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Согласно полученным результатам установлено, что при нагреве до 400 К для ТД структуры А наблюдается плавное снижение J_p , в то время, как для структуры В характерен линейный рост J_p . Для образцов ТД структуры А, изменение значения J_p составляет 7%, а для образцов ТД структуры В – 42%. Такая зависимость J_p от температуры для структуры А связана с тем что температурная диффузия преимущественно акцепторной примеси Be из $n^{++}\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-(\delta\text{Be})$ слоя в $n^{++}\text{-GaAs}-(\delta\text{Si})/i-(\text{GaAs}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As})$ область способствовала снижению степени вырождения $n^{++}\text{-GaAs}-(\delta\text{Si})$ слоя ТД за счёт формирования перекомпенсированной Si и Be области. Линейный рост J_p с температурой для структуры В обусловлен меньшей толщиной «эффективного» i -слоя, меньшей глубиной диффузии примеси Be в $n^{++}\text{-GaAs}$ область и соответственно большим вырождением.
 8. Максимальные значения плотности пикового туннельного тока - $J_p \sim 220 \text{ A/cm}^2$ были получены для структуры А и $\sim 150 \text{ A/cm}^2$ для структуры В при $T = 300 \text{ K}$. Это может быть обусловлено как толщиной «эффективного» i -слоя, так и уровнем локализованных примесных состояний, инициирующих резонансное туннелирование. Учёт вклада резонансного туннелирования в соединительных ТД может быть перспективным для создания высокоэффективных многопереходных фотоэлектрических преобразователей мощного лазерного излучения.
 9. На основе анализа измеренных ВАХ установлено, что в температурном диапазоне от 100 до 400 К образцы ТД структуры А имеют значения дифференциального сопротивления $R_d = (0.58 - 0.34) \text{ mOhm} \times \text{cm}^2$ и $(0.58 - 0.42) \text{ mOhm} \times \text{cm}^2$ для структуры В.
 10. Показано что на ВАХ $n^{++}\text{-GaAs}/n^{++}\text{-GaAs}/(i\text{-GaAs}/\text{AlGaAs})/p^{++}\text{-AlGaAs}$ соединительных туннельных диодов с наличием значительной области (на толщине $\geq 10 \text{ nm}$) перекомпенсации донорного и акцепторного профилей легирования атомами Si и Be, образованной в результате температурной диффузии примеси, при температурах ниже 200К при прямом напряжении смещения до U_{peak} присутствует область нелинейной (квазиэкспоненциальной) зависимости тока от напряжения.
 11. При разработке многопереходных фотоэлектрических преобразователей мощного оптического излучения необходимо учитывать температурную диффузию примеси в высоколегированных слоях соединительных ТД. Препятствием к паразитной диффузии

- примеси может служить включение между высоколегированными слоями ТД нелегированного i - слоя с толщиной до 10 nm, а также снижение температуры эпитаксиального роста до 450 °С.
12. Выращены $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ и $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ структуры ТД с наличием барьерных слоёв: $n\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}:\text{Si}$ толщиной 50nm и уровнем легирования $N_d = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (FSF слой) и $p\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}:\text{Si}$ толщиной 50nm и уровнем легирования $N_a = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (BSF слой). Согласно форме зависимости ВАХ $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ ТД в диапазоне от 0 до 100 mV не наблюдается нелинейности. Т.о. определён оптимальный уровень легирования BSF и FSF слоёв многопереходных фотопреобразователей, обеспечивающий отсутствие влияния встречных широкозонных слоёв на транспорт носителей заряда. Согласно измеренным ВАХ ТД видно, что включение $i\text{-GaAs}$ ($\geq 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) с толщиной 7 nm между вырожденными $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})$ (10 nm) и $p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ (10 nm) областями способствовало росту плотности J_p на порядок. Полученные результаты качественно согласуются с результатами моделирования транспорта носителей заряда в $p\text{-}i\text{-}n$ ТД.
 13. Согласно результатам по дополнительному температурному воздействию на эпитаксиальную пластину структуры $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$, при температуре 580°С в течение 2 часов, что соответствует режиму роста последующих фотоактивных слоёв монокристаллических многопереходных фотопреобразователей, наблюдается рост максимального значения J_p на пластине на 30% от 1 A/cm² до 1.5 A/cm².
 14. Экспериментально показано влияние на световую ВАХ двухкаскадного ФЭП наличия нелинейности на прямой ветви ВАХ $n^{++}\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}/i\text{-AlGaAs}/p^{++}\text{-AlGaAs}$ туннельного диода. Анализ световых ВАХ двухкаскадных ФЭП и ТД показал, что применение $n^{++}\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}/i\text{-AlGaAs}/p^{++}\text{-AlGaAs}$ соединительных ТД, полученных при более низкой температуре роста (450°С) в структуре двухпереходных ФЭП обеспечивает более низкоомное соединение однопереходных $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ $p\text{-}i\text{-}n$ ФЭП в структуре каскадного ФЭП.
 15. При преобразовании лазерного излучения с плотностью мощности $\leq 90 \text{ W/cm}^2$ на длине волны 809nm двухкаскадным ФЭП на основе $p\text{-}i\text{-}n \text{ AlGaAs}/\text{GaAs}$ ФЭП и $n^{++}\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}/i\text{-AlGaAs}/p^{++}\text{-AlGaAs}$ ТД получены значения флфактора – 0.88 и КПД до 60% при температуре 103К.

Список используемой литературы:

- [1] Vitaly S. Kalinovsky, Evgeny V. Kontrosh, Pavel A. Dmitriev, Pavel V. Pokrovsky, Alexander V. Chekalin, and Viacheslav M. Andreev, “Current flow and efficiencies of concentrator InGaP/GaAs/Ge solar cells at temperatures below 300K”, AIP Conference Proceedings 1616, 8 (2014); <https://doi.org/10.1063/1.4897017>.
- [2] Vitaly S. Kalinovsky, Elena A. Grebenshchikova, Pavel A. Dmitriev, Natalia D. Il'inskaya, Evgeny V. Kontrosh, Alexandra V. Malevskaya, Anna A. Usikova, and Viacheslav M. Andreev, “Photoelectric characteristics of InGaP/Ga(In)As/Ge solar cells fabricated with a single-stage wet chemical etching separation process”, AIP Conference Proceedings 1616, 326 (2014); <https://doi.org/10.1063/1.4897088>.
- [3] E V Kontrosh, A V Malevskaya, N M Lebedeva, V S Kalinovskiy and V M Andreev, “Investigation of InGaP/Ga(In)As/Ge solar cells characteristics in the temperature range of 300 - 80 K”, Journal of Physics: Conference Series, Volume 690, 17th Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics (RYCPS 2015) 23–27 November 2015, St. Petersburg, Russia.
- [4] A.B. Cristóbal López et al., “Next Generation of Photovoltaics”, (Springer Series in Optical Sciences 165, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012), DOI 10.1007/978-3-642-23369-2 2.

- [5] K. A. Bertness, D. J. Friedman and J. M. Olson, "Tunnel junction interconnects in GaAs-based multijunction solar cells," Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC), Waikoloa, HI, 1994, pp. 1859-1862 vol.2.
- [6] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd edition, (John Wiley and Sons, New York, 1981), p. 255.
- [7] Esaki L. Phys. Rev. 109. 603 (1957).

Публикации автора:

По результатам диссертации опубликовано 15 работ (7 опубликованы в журналах, 8 в трудах конференций).

- [1A] Andreev, V.M., Grebenshchikova, E., Dmitriev, P.A., Ilinskaya, N.D., Kalinovskiy, V.S., Kontrosh, E.V., Malevskaya, A.V., & Usikova, A.A. (2014). Effect of postgrowth techniques on the characteristics of triple-junction InGaP/Ga(In)As/Ge solar cells. *Semiconductors*, 48, 1217-1221.
- [2A] Vitaly S. Kalinovskiy, Elena A. Grebenshchikova, Pavel A. Dmitriev, Natalia D. Il'inskaya, Evgeny V. Kontrosh, Alexandra V. Malevskaya, Anna A. Usikova, and Viacheslav M. Andreev, "Photoelectric characteristics of InGaP/Ga(In)As/Ge solar cells fabricated with a single-stage wet chemical etching separation process", *AIP Conference Proceedings* 1616, 326 (2014); <https://doi.org/10.1063/1.4897088>.
- [3A] Kalinovskii, V.S.; Kontrosh, E.V.; Grebenshchikova, E.A.; Andreev, V.M., Mesa Architecture and Efficiency of InGaP/Ga(In)As/Ge Solar Cells. *Tech. Phys.*, v.67, 3, 2022, p. 234 – 241, <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784221070057>
- [4A] E V Kontrosh, A V Malevskaya, N M Lebedeva, V S Kalinovskiy and V M Andreev, "Investigation of InGaP/Ga(In)As/Ge solar cells characteristics in the temperature range of 300 - 80 K", *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 690, 17th Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics (RYCPS 2015) 23–27 November 2015, St. Petersburg, Russia.
- [5A] Vitaly S. Kalinovskiy, Evgeny V. Kontrosh, Pavel A. Dmitriev, Pavel V. Pokrovskiy, Alexander V. Chekalin, and Viacheslav M. Andreev, "Current flow and efficiencies of concentrator InGaP/GaAs/Ge solar cells at temperatures below 300K", *AIP Conference Proceedings* 1616, 8 (2014); <https://doi.org/10.1063/1.4897017>.
- [6A] Klimko, G.V., Komissarova, T.A., Sorokin, S.V., Kontrosh, E.V., Lebedeva, N., Usikova, A.A., Il'inskaya, N.D., Kalinovskii, V.S., & Ivanov, S. (2015). MBE-grown GaAs:Si/GaAs:Be tunnel diodes for multijunction solar cells. *Technical Physics Letters*, 41, 905-908.
- [7A] Kalinovskii, V.S., Kontrosh, E.V., Klimko, G.V. et al. Development and Study of the p-i-n GaAs/AlGaAs Tunnel Diodes for Multijunction Converters of High-Power Laser Radiation. *Semiconductors* 54, 355–361 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1063782620030112>
- [8A] Evgeny V. Kontrosh, Vladimir V. Lebedev, Vitaliy S. Kalinovskiy, Grigory V. Klimko, and Viacheslav M. Andreev, "Influence of adjacent isotope layers on the characteristics of n⁺⁺-GaAs/i-GaAs/i-AlGaAs/p⁺⁺-AlGaAs tunnel diodes", *AIP Conference Proceedings* 2298, 020004 (2020) <https://doi.org/10.1063/5.0032144>
- [9A] Kontrosh, E.V., Lebedev, V.V., Klimko, G.V., Kalinovskii, V.S., & Andreev, V.M. (2020). Investigation of characteristics of GaAs/AlGaAs p-i-n connecting tunnel diodes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1697
- [10A] Kontrosh, E.V., Klimko, G.V., Kalinovskii, V.S., Yuferev, V.S., Vaulin, N.V., & Ya Ber, B. (2021). Current—voltage characteristics of connecting tunnel diodes at temperature heating up to 80°C. *Journal of Physics: Conference Series*, 2103.
- [11A] Kontrosh E. V., Kalinovskii V. S., Klimko G. V., Ber B. Ya., Prudchenko K. K., Tolkachev I. A., Kazantsev D. Yu., Temperature characterization of GaAs/AlGaAs connecting tunnel diodes, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 16 (4) (2023) 30–41. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16403>

- [12A] В.С. Калиновский, Н.А. Малеев, Е. В. Контрош, И.А. Толкачев, В.М. Устинов и др. Туннельные диоды $n^{++}\text{GaAs}:(\delta\text{Si})/p^{++}\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ для соединительных элементов многопереходных лазерных фотопреобразователей, Письма в ЖТФ, 2024, том 50, вып. 7, с. 39-42
- [13A] Kalinovskii, VS; Kontrosh,EV; Klimko,GV; Tabarov,TS; Ivanov,SV; Andreev,VM, The Effect of Charge Transport Mechanisms on the Efficiency of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ Photodiodes. Tech. Phys. Lett., v.44, 11, 2018, p. 1013 - 1016
<http://dx.doi.org/10.1134/S1063785018110214>
- [14A] Kalinovskiy,VS; Kontrosh,EV; Gusev,GA; Sumarokov,AN; Klimko,GV; Ivanov,SV; Yuferev,VS; Tabarov,TS; Andreev,VM, Study of PV characteristics of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ photodiodes. J. Phys.: Conf. Ser., v.993, 1, В книге (сборнике): 19TH RUSSIAN YOUTH CONFERENCE ON PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND NANOSTRUCTURES, OPTO- AND NANOELECTRONICS, 2018, ArtNo: #01202919th Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics; St.Petersburg, Russian Federation; 27 November to 1 December 2017, <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/993/1/012029>
- [15A] Kontrosh, E.V., Kalinovskii, V.S., Klimko, G.V., Vaulin, N.V., & Ya Ber, B. (2021). Characteristics of double-cascade photodiodes based on p-i-n $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ diodes connected by $n^{++}\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}/i\text{-AlGaAs}/p^{++}\text{-AlGaAs}$ tunnel diodes. Journal of Physics: Conference Series, 1851.