Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

Отделение твердотельной электроники

Лаборатория прикладной математики и математической физики

Толкачев Иван Андреевич

Тема: Теоретическое исследование и моделирование каскадных (многопереходных) наногетероструктурных фотоприемников и фотопреобразователей оптического излучения

Научный доклад

Код и направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Шифр и наименование научной специальности:

01.04.10 Физика полупроводников

Санкт-Петербург

Научный руководитель:

Юферев Валентин Степанович

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории прикладной математики и математической физики ФТИ им А.Ф.Иоффе

Юферев В.С.

Рецензенты:

Родин Павел Борисович

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории мощных полупроводниковых приборов ФТИ им А.Ф.Иоффе

Содержание

Актуальность темы4
Научная новизна4
Теоретическое и прикладное значение5
Объект, предмет, цель и задачи исследования5
Теоретическая база и методология исследованияб
Структура работыб
Основные результаты исследованияб
Заключение27
Положения, выносимые на защиту29
Апробация результатов исследования
Дополнительный список публикаций автора31
Список литературы

Актуальность темы

В современных условиях развития микро и нано электронных устройствах, а также источников питания, оптоэлектронных систем, радиофотонике, радиоизотопных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), атмосферных оптических линиях связи (АОЛС), активных фазированных антенных решетках (АФАР) особую актуальность приобретает совершенствование элементной базы информационно-энергетических комплексов. Важной составляющей которых являются фотопреобразователи (ФП), используемые в указанных областях в широком диапазоне мощностей. Особую значимость приобретают монолитные, то есть реализованные в одном кристалле, многопереходные (каскадные) ФП лазерного излучения большой мощности, работающие фотовольтаическом режиме. Данные устройства не требуют дополнительного В электрического питания и способны обеспечить существенное увеличение преобразуемой мощности на единицу объёма, высокое быстродействие и достижение предельного КПД при преобразовании мощных импульсных лазерных сигналов в диапазоне частот до нескольких ГГц.

Однако реализация указанных преимуществ многопереходных ФП возможна только при условии обеспечения в рабочем режиме согласования фототоков и напряжений в каскадах (переходах), а также тщательного подбора структурных, геометрических, оптофизических и фотоэлектрических параметров. Несовершенство существующих методов расчёта и проектирования монолитных многопереходных ФП, отсутствие комплексных исследований их характеристик в условиях реальных нагрузок и необходимость разработки новых подходов к оптимизации параметров делают данную проблему актуальной для научного исследования.

Решение указанных проблем имеет важное значение для развития радиофотонных технологий и создания нового поколения высокоэффективных радиолокационных систем, что определяет актуальность выбранной темы диссертационного исследования.

Научная новизна

Разработаны модели и выполнено численные исследования различного типа одно-, двух- и трехпереходных ФП, облучаемых, как монохроматическим лазерным излучением, так и излучением сложного спектрального состава. Показана неоднозначность преобразования лазерного излучения в электрический ток многопереходными монолитными *p-n* ФП. Показано, что роль туннельных диодов, которые являются неотъемлемой частью многопереходных *p-i-n* ФП, существенно снижается при переходе от стационарного лазерного излучения к импульсному, поскольку происходит замещение туннельных токов токами смещения.

Теоретическое и прикладное значение

Получена численная модель однопереходного *p-n* ФП, которая рассчитывает нагрузочную вольт-амперную характеристику (ВАХ) и сопутствующие ей параметры для субнановатного диапазона мощности излучения радиоизотопного источника. На основе этого был экспериментально получен электрический источник питания со сверхдлительным сроком службы, который может применятся в различных областях, например, медицине, наноэлектронике, работы в экстремальных условиях, включая агрессивные среды атомной и химической промышленности для питания слаботочных приборов.

Построена математическая модель двухпереходного *p-n* ФП, которая позволила продемонстрировать наличие двух нагрузочных характеристик, их связь с туннельным диодом и исследовать зависимость этих характеристик от параметров структуры ФП.

Проанализирована роль встречно включённого туннельного диода в многопереходных *p-i-n* фотопреобразователях, работающих в импульсном режиме работы. Показана возможность практически упростить технологический процесс изготовления многопереходных ФП.

Теоретически показана возможность увеличения напряжения на внешней нагрузке многопереходных *p-i-n* ФП от времени, что важно для работы и использовании многопереходных *p-i-n* ФП при воздействии мощными субнаносекундными лазерными импульсами.

Объект, предмет, цель и задачи исследования

Объектом исследования являются наногетероструктурные фотоприёмники и фотопреобразователи оптического излучения на основе гетеропереходных структур AlGaAs/GaAs.

Предметом исследования являются темновые, световые ВАХ и импульсные характеристики многопереходных наногетероструктурных *p-n* и *p-i-n* фотоприемников и фотопреобразователей в субнаносекундном диапазоне.

Целью работы является численное исследование различных типов многопереходных фотопреобразователей (ФП) информационно-энергетических сигналов.

Для реализации поставленной цели в работе были определены и последовательно рассмотрены следующие исследовательские задачи:

Численное моделирование одно-, двух, трех-переходных $\Phi\Pi$ при облучении, как монохроматическим постоянным лазерным излучением, так и излучением сложного спектрального состава. А также функционирование в импульсном режиме работы указанных *p-i-n* $\Phi\Pi$. Исследовано влияние туннельного диода в многопереходных *p-i-n* $\Phi\Pi$.

Теоретическая база и методология исследования

В рамках диссертационного исследования методологическая база построена на основе численного моделирования физических процессов. Решаются диффузионнодрейфовые уравнения, уравнения Пуассона, учитывается рекомбинация Шокли-Рида-Холла, излучательная рекомбинация, а также выражения паразитной и внешней электрической цепи. Процессы перепоглощения фотонов в рамках данной работы не рассматривались. Для проведения численного моделирования был использован специализированный коммерческий программный продукт, обладающий необходимыми функциональными возможностями для реализации поставленных исследовательских задач. Отметим, что рассматривался процесс межзонного туннелирования, который учитывался посредством введения дополнительного рекомбинационного члена в диффузионно-дрейфовых уравнениях, используя нелокальную модель.

Структура работы

Работа состоит из введения, трех глав и списка литературы.

Основные результаты исследования

В ведении приводится обзор литературы, описание актуальности темы диссертации, в том числе постановка цели и задач.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в области преобразования лазерного излучения с помощью монолитных многопереходных фотопреобразователей (МФП). Данные устройства представляют собой структуру, состоящую из эпитаксиально выращенных фотоактивных слоев с одним *p*-*n*-переходом (субэлементом), расположенных

друг над другом и соединенных последовательно посредством встречно включенных туннельных диодов (ТД) [1-2].

Ключевым преимуществом МФП является возможность кратно увеличить по сравнению с однопереходными фотопреобразователями выходное напряжение при сохранении высокой эффективности преобразования оптической мощности в электрическую. В частности, для нормально работающего МФП величина напряжения холостого хода практически равна сумме напряжений холостого хода всех входящих в его состав однопереходных фотопреобразователей.

Благодаря своим уникальным характеристикам область применения МФП постоянно расширяется и включает [3-5]:

- оптические системы беспроводной передачи энергии
- системы передачи информационных сигналов
- различные радиофотонные устройства
- биомедицинские приложения

В современной научной литературе представлены результаты как численных, так и экспериментальных исследований МФП, содержащих от 2 до 20 *p*-*n*-переходов (см., например, [1,6-8]), при этом обосновывается перспективность развития МФП с числом переходов до 100 [1].

Однако моделирование МФП представляет собой сложную вычислительную задачу. Использование систем TCAD часто сталкивается с проблемами сходимости, что обусловлено необходимостью численного решения уравнений переноса носителей заряда как в соединительных туннельных диодах, так и в субэлементах. Эти задачи являются разномасштабными и требуют использования сеток с ячейками, размеры которых могут различаться на несколько порядков [9].

Особую сложность представляет тот факт, что туннельные диоды обладают *N*-образной вольт-амперной характеристикой и имеют два устойчивых равновесных состояния. Одно из них соответствует процессу туннелирования носителей заряда через барьер ТД, а второе – инжекции носителей заряда через этот барьер в результате его понижения. Это приводит к возможности существования нескольких режимов протекания тока в МФП и, соответственно, можно ожидать нескольких нагрузочных характеристик.

При этом максимальное число возможных вариантов преобразования излучения в электрический ток может достигать 2M, где M – количество туннельных диодов в структуре. Лишь в одном из этих вариантов режим протекания тока соответствует туннельной ветви ВАХ во всех ТД, в то время как в остальных случаях, как минимум в

одном ТД, ток будет соответствовать диффузионной ветви ВАХ, что приводит к существенному снижению эффективности преобразования.

На практике обычно реализуется режим туннелирования, что, возможно, объясняет недостаточное внимание к данному вопросу в научной литературе. Существующие методы моделирования МФП с числом ТД более одного часто сталкиваются с вычислительными трудностями, что связано с многозначностью режимов функционирования МФП. В подобных случаях ТД обычно заменяются омической связью, что позволяет моделировать лишь первый режим, исключая остальные возможные решения из рассмотрения.

Однако ситуация кардинально меняется, когда МФП предполагается использовать в системах радиофотоники [4] для преобразования мощных лазерных импульсов наносекундного диапазона. Следует ожидать, что на протекание тока в МФП оказывают влияние емкостные эффекты. Согласно имеющейся информации, применительно к МФП эта сторона проблемы до сих пор в литературе не рассматривалась. Можно лишь упомянуть работу, посвященную отклику на возбуждение коротким лазерным импульсом отдельного фотодетектора, к которому приложено обратное смещение [10].

Поэтому целью настоящей работы является численное исследование одно-, двух- и трёхпереходных фотопреобразователей при облучении монохроматическим постоянным лазерным излучением, а также функционирование ФП в импульсном режиме работы. Кроме того, численное исследование особенностей преобразования субнаносекундных лазерных импульсов в электрический ток многопереходными ФП, подключёнными к нагрузке 50 Ohms.

Первая глава посвящена математическому численному моделированию однопереходного фотопреобразователя для радиоизотопного источника.

В рамках настоящего диссертационного исследования процесс создания модели каскадных (многопереходных) фотопреобразователей был инициирован с разработки базовой модели для одиночного p-n *Al_xGa_{1-x}As/GaAs* ФП. Данная модель была специально адаптирована под спектр радиолюминесцентного источника оптического излучения нановатной мощности.

В качестве основы для разработки модели был выбран минералоподобный кристалл ксенотима состава *YPO4:Eu/(²³⁸Pu)*, который обладает своим уникальным спектром представленным на рисунке 1.



Рис. 1. Спектр радиолюминесцентного источника оптического излучения минералоподобного кристалла ксенотима состава *YPO4:Eu/(²³⁸Pu)*.

Выбор данного материала обусловлен его периодом полураспада, который составляет порядка 87 лет. Если объединить фотоприемник и такой радиолюминесцентный источник, то возможно получить долговременный радиоизотопный фотоэлектрический генератор энергии. Их обычно называют радиоизотопные источники энергии (РИЭ). В них энергия радиоактивного распада изотопов преобразуется в электрическую энергию. На данный момент такие генераторы активно разрабатываются и усовершенствуются [11-14].

Построение модели для одиночного p-n фотопреобразователя стало фундаментальным этапом в разработке более сложных каскадных структур, поскольку позволило: исследовать основные физические процессы преобразования энергии; определить оптимальные параметры работы элемента; выявить ключевые факторы, влияющие на эффективность преобразования; сформировать методологическую базу для дальнейшего масштабирования модели на многопереходные структуры

Структура такого фотопреобразователя, которая представлена на рисунке 2а, содержит *p-n* переход, широкозонное окно, буферные и барьерные слои. Длины волн были выбраны исходя из максимумов спектра радиолюминесцентного источника $YPO4:Eu/(^{238}Pu)$ [15]. Такая структура также была получена экспериментально с помощью молекулярно пучковой эпитаксии (МПЭ). Для данной структуры с помощью Keithley проводилось измерение вольт-амперной характеристики. Сравнение нагрузочных BAX (рисунок 2b) показало неплохое совпадение экспериментальной с теоретической кривой, которая слишком быстро приближается к нулю с ростом напряжения.

1) p -GaAs, $4 \cdot 10^{18}$ cm ⁻³ , h= 0.3 μ m
2) p -Al _{0.8} Ga _{0.2} As, 7·10 ¹⁷ cm ⁻³ , h= 0.035 μ m
3) <i>p</i> -GaAs, $7 \cdot 10^{17}$ cm ⁻³ , h= 0.1 µm
4) <i>n</i> -GaAs, $1 \cdot 10^{17}$ cm ⁻³ , h= 3 µm
5) <i>n</i> - Al _{0.2} Ga _{0.8} As, $3 \cdot 10^{18}$ cm ⁻³ , h= 0.05 µm
6) <i>n</i> -GaAs, $5 \cdot 10^{18}$ cm ⁻³ , h= 0.2 µm
7) <i>n</i> -GaAs, $2 \cdot 10^{18}$ cm ⁻³ , h= 350 µm



a)

Рис. 2. *а*) Структура однопереходного ФП под спектр радиоизотопного источника оптического излучения нановатной мощности; *b*) Сравнение нагрузочных ВАХ ФП: 1 – эксперимент; 2 - расчет.

b)

В результате проведенного исследования была продемонстрирована техническая возможность применения гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ в качестве фотопреобразователей для разработки безопасных и долговечных радиоизотопных фотоэлектрических генераторов энергии. В качестве люминесцентного источника излучения в данных устройствах используется *YPO4:Eu/(²³⁸Pu)*.

В результате моделирования фотопреобразователя на основе гетероструктуры *Al_xGa_{1-x}As/GaAs* при облучении источником оптического излучения мощностью 1 nW со спектральным составом, идентичным характеристикам радиоизотопного источника, был получен коэффициент полезного действия, составивший 1,38%.

Полученное значение демонстрирует высокую степень соответствия с экспериментально установленным показателем эффективности, равным 1,4%, что подтверждает корректность разработанной математической модели и достоверность проведенных теоретических расчетов.

При этом следует подчеркнуть, что эффективность системы имеет потенциал к увеличению при возрастании оптической мощности люминесцентных источников излучения на основе *YPO4:Eu/(²³⁸Pu)*.

Таким образом, начальным этапом исследования стало создание модели, которая легла в основу разработки более сложных многопереходных фотопреобразователей.

В рамках данного исследования опубликовано три работы [1а-3а].

Во второй главе рассматривались двухпереходные фотопреобразователи в стационарном режиме работы.

В первой части второй главы было выполнено исследование на основе численного моделирования двухпереходного монолитного фотопреобразователя лазерного излучения с целью сравнительного анализа двух расчетных моделей. Моделирование МФП с количеством туннельных диодов (ТД) более двух представляет собой значительную сложность из-за плохой сходимости итерационных процессов и необходимости значительного увеличения объёма используемой вычислительной памяти. Принимая аналитического исследования BO внимание сложность монолитного многопереходного фотопреобразователя (МФП), в рамках настоящего исследования было принято решение сфокусироваться на моделировании базовой двухпереходной *р-п* структуры, реализованной на основе полупроводникового материала GaAs. Детальные параметры исследуемой структуры представлены в таблице 1. Следует отметить, что выбор конкретных значений параметров был обусловлен необходимостью демонстрации особенностей процесса преобразования лазерного излучения в электрический ток при использовании полной модели фотопреобразователя.

Материал	N_D , cm ⁻³	N_A , cm ⁻³	Толщина, μт
<i>p</i> -GaAs	-	$2 \cdot 10^{18}$	0.2
n-GaAs	$5 \cdot 10^{17}$	-	0.42
n ⁺⁺ -GaAs	$2 \cdot 10^{19}$	-	0.025
p^{++} -GaAs	-	$6 \cdot 10^{19}$	0.025
<i>p</i> -GaAs	-	$2 \cdot 10^{18}$	0.4
n-GaAs	$5 \cdot 10^{17}$	-	1.926

Таблица 1. Структура двухпереходного *р-п* фотопреобразователя

При определении геометрических параметров субэлементов был использован критерий равенства количества поглощённых фотонов в каждом субэлементе. Однако следует отметить, что данное условие не обеспечивает согласованность токовых характеристик субэлементов ввиду существенного различия их толщин.

В рамках моделирования были заданы следующие параметры: коэффициент поглощения составил 10⁴ cm⁻¹, а интенсивность падающего излучения – 30 W/cm². Данные значения были подобраны таким образом, чтобы обеспечить меньший ток, текущий через ФП по сравнению с пиковым током туннельного диода.

При проведении расчётов были учтены механизмы рекомбинации Шокли-Рида и излучательная рекомбинация. Процессы повторного поглощения фотонов в рамках данной модели не рассматривались.

В ходе исследования осуществлялось сопоставление результатов, полученных при использовании полной модели с туннельным диодом (ТД), и упрощенной, где туннельный диод был заменен омическим контактом. В результате проведенного анализа было установлено, что при идентичных параметрах задачи полная модель демонстрирует два решения, обусловленные различными режимами работы туннельного диода, так как они обладают *N*-образной вольт-амперной характеристикой: туннельным и инжекционным. Первое соответствует обычной нагрузочной характеристике фотопреобразователя. Второе обладает тремя напряжениями холостого хода, поскольку сначала ток опускается до нуля в области аналогичной напряжению холостого хода однопереходного ФП, а затем в области больше 2 V фототок возрастает практически до своего первоначального положения и спадает в области холостого хода обычного для двухпереходных *p-n* ФП.

Дополнительно было выявлено различие в характеристиках исследуемых моделей: применение упрощенной модели приводит к получению заниженных значений тока короткого замыкания по сравнению с результатами, полученными при использовании туннельного решения полной модели.

При моделировании учитывался процесса межзонного туннелирования, который был математически формализован посредством включения дополнительного рекомбинационного члена в систему диффузионно-дрейфовых уравнений. При этом был применен подход, основанный на использовании нелокальной модели туннелирования [9].

Подача излучения осуществлялась через *p*-область структуры. В целях упрощения исследуемой задачи первоначально из рассмотрения были исключены широкозонные окна и тыльные барьеры.

Результаты моделирования нагрузочных характеристик фотопреобразователя представлены на рисунке 3. Анализ полученных данных подтвердил наличие двух решений в рамках полной модели. Первое решение (кривая 1) соответствует стандартному режиму протекания тока посредством туннелирования через барьер туннельного диода. При этом были получены следующие характеристики: плотность тока короткого замыкания $J_{sc} = 7.26 \text{ A/cm}^2$, напряжение холостого хода $U_{oc} = 2.15 \text{ V}$, эффективность преобразования составила 42%.

Второе решение (кривая 2) характеризуется несколько большей плотностью тока короткого замыкания $J_{sc} = 7.71$ A/cm². При напряжении $U_i = 1.08$ V ток обращается в ноль,

после чего с увеличением напряжения быстро возрастает до значения 6.4 A/cm² и далее остаётся практически постоянным.



Рис. 3. Нагрузочные кривые для двух решений в рамках полной модели МФП (1) и (2) и упрощённой модели (3).

Из рисунка 3 видно, что при напряжении свыше 2 V снова наблюдается совпадение плотностей тока. Данный факт свидетельствует о том, что при $U_{oc} > 2$ V второе решение установить не удается, хотя возможно его для данного диапазона напряжений и не существует, и итерационный процесс сходится к первому решению. В результате для второго случая фиксируется значение U_i = 1.08 V, при этом ожидаемого увеличения напряжения холостого хода не наблюдается. В рамках упрощенной модели значение тока короткого замыкания оказывается сниженным приблизительно на 30% по сравнению с двумя решениями полной модели. Указанное явление обусловлено заменой туннельного диода электрической связью, что приводит к трансформации границы субэлемент-ТД в омический контакт и, как следствие, возникновению поверхностной рекомбинации на данной границе. Примечательно, что включение в каждый субэлемент широкозонного окна и тыльного барьера позволит минимизировать или полностью устранить описанный эффект в рамках упрощенной модели, что будет показано во второй части данной главы. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что добавление указанных слоев в первую очередь способствует улучшению соответствия между реальной структурой и упрощенной повышает эффективность моделью, нежели непосредственно фотопреобразователя. В контексте реальной структуры достаточно использования одного окна и одного тыльного барьера для верхнего и нижнего субэлемента.

Проведенные исследования демонстрируют, что *N*-образная вольт-амперная характеристика туннельного диода обусловливает возможность реализации двух режимов работы в двухпереходном фотоэлектрическом преобразователе. Важно отметить, что возникновение данных режимов не коррелирует с превышением фототоком пикового значения тока туннельного диода. Первый режим характеризуется взаимодействием с туннельной ветвью ВАХ ТД, тогда как второй режим обусловлен диффузионной ветвью, формирующейся вследствие инжекции энергичных носителей заряда через барьер туннельного диода при прямом смещении, превышающем напряжение долины ВАХ ТД.

Анализ зонных диаграмм, представленных на рисунке 4 и рассчитанных для полной и упрощенной моделей при нулевом внешнем напряжении, демонстрирует следующие закономерности. Облучение фотопреобразователя приводит к перераспределению потенциала по его толщине, что вызывает смещение каждого *p-n* перехода либо в прямом, либо в обратном направлении. При этом характер смещений различается в зависимости от рассматриваемого решения.



Рис. 4. Зонные диаграммы при нулевом внешнем напряжении для полной модели (рис. a, b, c) и упрощенной модели (рис. d). (a) – первое решение, (b) - второе решение и (c) –

решение без излучения. Кривые: (1) – дно зоны проводимости, (2) и (3) – квазиуровни Ферми для электронов и дырок, (4) – потолок валентной зоны.

Для первого решения полной модели с излучением и без него (рисунки 4a и 4c) наблюдается следующее распределение смещений: на туннельном диоде формируется небольшое положительное смещение, соответствующее туннельной ветви вольт-амперной характеристики, в то время как *p-n* переходы первого и второго субэлемента смещаются в положительном и отрицательном направлениях соответственно. Данное явление обусловлено ранее упомянутым рассогласованием токов в субэлементах.

Во втором решении (рисунки 4b и 4c) отмечается иная картина: первый субэлемент практически не испытывает смещения, тогда как на туннельном диоде и втором субэлементе формируется положительное напряжение величиной 1.15 V, сопоставимое с напряжением однопереходного фотопреобразователя. Это объясняет, почему во втором режиме напряжение холостого хода двухпереходного ФП не превышает напряжение однопереходного ФП: возрастание напряжения, приложенного к фотопреобразователю, влечет за собой уменьшение положительного смещения туннельного диода и, как следствие, снижение инжекции носителей заряда. Данное высказывание в следующей части данной главы окажется не верным.

В упрощенной модели (рисунок 4d) наблюдается противоположная картина: p-n переход первого субэлемента смещается в отрицательном направлении, а второго – в положительном. Данный факт свидетельствует о различном характере рассогласования токов между субэлементами в обеих моделях, несмотря на реализацию аналогичного режима протекания тока через барьер туннельного диода.

Дополнительную иллюстрацию различий между решениями полной модели представляют распределения электронного и дырочного тока по толщине структуры, показанные на рисунке 5 при нулевом напряжении.



Рис. 5. Распределение плотности токов электронов (1, 1) и дырок (2, 2) по толщине структуры в туннельном (сплошные кривые) и инжекционном (пунктирные кривые) режимах протекании тока через ТД.

Из анализа рисунка 5 видно, что в условиях туннельного режима протекания тока в туннельном диоде происходит полная рекомбинация электронов и дырок, что приводит к практически нулевым значениям электронного и дырочного токов. В отличие от этого, в инжекционном режиме подобное явление не наблюдается. Кроме того, приложение положительного напряжения ко второму субэлементу вызывает значительное ослабление внутреннего электрического поля. Это приводит к существенному снижению дырочного тока, который в некоторых случаях даже начинает течь в обратном направлении. В результате величина полного тока остаётся близкой к значению тока однопереходного фотопреобразователя при половинной мощности падающего излучения.

В завершение можно отметить следующий важный момент:

 Вышеизложенные выводы имеют все основания быть экстраполированными на многопереходные монолитные фотопреобразователи (МФП) с большим количеством *p-n* переходов.

Данное наблюдение подчёркивает потенциал использования фотопреобразователей в качестве источников энергии для генерации электрических сигналов. Результаты данной работы опубликованы в статье [4а].

Во второй части второй главы произведено математическое моделирование двухпереходного фотопреобразователя из первой части данной главы с добавлением широкозонного окна, тыльного потенциального барьера, а также ловушками в области ТД.

В предыдущей части данной главы, посвящённой проблеме неединственности преобразования лазерного излучения в электрический ток в многослойных монолитных фотопреобразователях было выявлено то, что кроме известной нагрузочной характеристики, связанной с туннелированием носителей заряда через барьер ТД, существует дополнительная нагрузочная характеристика. Эта характеристика обусловлена инжекцией носителей заряда через барьер ТД вследствие его значительного снижения.

В этой части работы рассматривается двухпереходный фотопреобразователь, структура которого более приближена к реальной. Она включает в себя широкозонное окно, тыльный барьер и ловушки в области туннельного диода.

Основные параметры структуры фотопреобразователя представлены в таблице 2.

Эффективные массы электронов и дырок для процесса туннелирования были близки к стандартным значениям, что ограничивало пиковую плотность тока туннельного диода до уровня 32 A/cm². Концентрация ловушек N_{trap} варьировалась, при этом их энергия составляла 0.4 eV относительно уровней зоны проводимости и валентной зоны (E_C или E_V).

Таблица 2. Структура двухпереходного *p-n* фотопреобразователя с широкозонным окном и тыльным потенциальным барьером

Материал	N_D , cm ⁻³	N_A , cm ⁻³	Толщина, μт
$p-Al_xGa_{1-x}As, x=0.3$	-	$2 \cdot 10^{19}$	0.04
<i>p</i> -GaAs	-	$2 \cdot 10^{18}$	0.2
n-GaAs	$5 \cdot 10^{17}$	-	0.42
n ⁺⁺ -GaAs	$2 \cdot 10^{19}$	-	0.025
p^{++} -GaAs	-	6.10^{19}	0.025
<i>p</i> -GaAs	-	$2 \cdot 10^{18}$	0.4
n-GaAs	$5 \cdot 10^{17}$	-	1.926
$n-Al_xGa_{1-x}As, x=0.3$	$3 \cdot 10^{18}$	-	0.025
n-GaAs	$3 \cdot 10^{18}$	_	0.05

Излучение подавалось с левой стороны, и количество поглощённых фотонов в каждом субэлементе оставалось одинаковым. На рисунке 6 представлены нагрузочные кривые при интенсивности излучения 100 W/cm² (при условии, что ток меньше пикового тока туннельного диода) и различных концентрациях ловушек.

Даже несмотря на усложнение структуры по сравнению с исследованием в предыдущем разделе, во всех случаях наблюдаются два различных решения. Первое решение, представленное кривой 1, не зависит от наличия ловушек, в то время как второе решение существенно зависит от их концентрации.

Ток короткого замыкания J_{sc} во втором решении несколько превышает значение первого решения, однако напряжение холостого хода U_{oc} значительно меньше. Следует отметить, что U_{oc} увеличивается с ростом концентрации ловушек N_{trap} , однако это сопровождается снижением формфактора. В результате эффективность преобразования остаётся существенно ниже, чем в первом решении.

Примечательно, что вблизи напряжения холостого хода первого решения (кривая 1) второе решение вновь проявляется и полностью совпадает с первым. Однако максимальное значение тока во втором решении значительно ниже J_{sc} первого решения, что приводит к снижению эффективности преобразования на данном участке. Следует подчеркнуть, что в исходном состоянии (при отсутствии излучения и приложенного напряжения) контактные разности потенциалов на *p-n* переходах составляли 1.35 V для обоих субэлементах и 1.9 V для туннельного диода.



Рис. 6. Нагрузочные кривые для разных решений (режимов работы ФД). (1) - первое решение, (2)-(5)- второе решение при различных концентрациях ловушек $N_{trap} = 0$ (2), 10^{14} (3), 10^{15} (4), 10^{16} cm⁻³(5).

При освещении фотопреобразователя происходит перераспределение потенциала по толщине структуры вследствие рассогласования токов, вызванного различием в толщине каскадов.

В режиме короткого замыкания:

• В первом решении первый субэлемент (расположенный ближе к освещаемой поверхности) смещается на +1.05 V в прямом направлении, второй субэлемент — на -1.03 V в обратном, а ТД смещается лишь на 0.02 V, что соответствует туннельной ветви его ВАХ.

• Во втором решении наблюдается значительное смещение ТД в положительном направлении, что приводит к переходу на диффузную ветвь ВАХ.

Важно отметить, что величина смещения незначительно уменьшается (на 3-10%) с увеличением напряжения на ФП до напряжения холостого хода U_{oc}.

При $N_{trap} = 0$ сm⁻³ смещение составляет 1.24 V и практически компенсируется положительным смещением p-n перехода во втором каскаде. Эта компенсация сохраняется при увеличении напряжения на ФП до U_{oc} , что означает [4a], что генерируемые во втором субэлементе носители заряда не вносят вклад в электрический ток. Это объясняет вдвое меньшее значение U_{oc} на рисунке 6 (кривая 1). С увеличением

концентрации ловушек (например, при $N_{trap} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) смещение ТД уменьшается до 0.96 V в режиме короткого замыкания.

Соответственно, зонная диаграмма второго решения приобретает качественное сходство с диаграммой первого решения, что наглядно демонстрируется при сравнении рисунков 7а-7с.



Рис. 7. Зонные диаграммы двухпереходного $\Phi\Pi$ в режиме короткого замыкания. А – первое решение, В и С – второе решение при $N_{trap} = 0$ и $N_{trap} = 10^{15}$ cm⁻³, соответственно.

Причина этого явления поясняется на рисунке 8, где представлены распределения электронного и дырочного тока по толщине структуры для второго решения при $N_{trap} = 10^{15}$ сm⁻³. Видно, что перенос носителей заряда через барьер туннельного диода осуществляется посредством туннелирования (через ловушки) во всем диапазоне приложенных напряжений, при которых сохраняется фотовольтаический режим. При этом на ТД падает значительное напряжение, например, 0.96 V в режиме короткого замыкания и 0.77 V в режиме холостого хода, что объясняет увеличение напряжения U_{oc} с ростом концентрации ловушек, как показано на рисунке 6.

Следует отметить, что при $N_{trap} = 0$ cm⁻³, как было установлено в работе [4a], перенос носителей через барьер осуществляется инжекцией. Особого внимания заслуживает картина переноса носителей заряда в режиме холостого хода, представленная на рисунке 8b. Несмотря на нулевой полный ток, электронные и дырочные токи остаются значительными, их максимальные значения сопоставимы с током короткого замыкания. Эти токи имеют противоположные знаки, что означает движение электронов и дырок в одном направлении к освещаемой поверхности. В то же время в ТД наблюдается резкое падение этих токов до нуля, аналогичное режиму короткого замыкания, показанному на рисунке 8a.



Рис. 8. Распределение плотности электронного (1) и дырочного тока (2) по толщине $\Phi\Pi$ во втором решении при $N_{trap} = 10^{15}$ cm⁻³ в режиме короткого замыкания (A) и холостого хода (B). Кривая 3 – плотность полного тока.

Это явление можно объяснить следующим образом: электроны, движущиеся справа налево, преодолевают *p-n* переход ТД без препятствий и попадают в *n*-область, откуда туннелируют вместе с дырками, подходящими к барьеру с той же стороны. Рекомбинация в данном случае несущественна из-за низкой концентрации носителей в слое объемного заряда и его малой толщины.

Как уже отмечалось, в реальных многопереходных фотопреобразователях (МФП) чаще реализуется режим работы, соответствующий первому решению. Возникает вопрос о методах практической проверки существования нескольких решений, описывающих различные способы преобразования излучения в электрический ток. Для двухпереходного *p-n* фотопреобразователя это можно осуществить следующим образом: при высокой мощности излучения ток превышает пиковый ток ТД, оставляя только второе решение. Теперь резко снижаем интенсивность излучения до уровня, при котором ток становится меньше пикового значения ТД, что позволяет сохранить второе решение и исключить появление первого. Именно таким нестационарным методом были получены нагрузочные кривые 2-5 на рисунке 7, поскольку из-за усложнения структуры ФП стандартные итерационные методы на основе стационарных уравнений оказались неприменимыми. По данной работе опубликована статья [5а].

В третьей главе осуществлено численное моделирование многопереходных *p-i-n* ФП в импульсном режиме работы.

Основное преимущество МФП обусловлено работой ТД: если ток через МФП остаётся ниже пикового тока туннельных диодов, падение напряжения на ТД (или барьере между субэлементами) остаётся незначительным и не влияет на падение напряжения на нагрузке. Однако, если интенсивность лазерного излучения настолько велика, что ток превышает пиковые значения ТД, падения напряжения на границах субэлементов существенно возрастают и могут компенсировать значительную часть падения напряжения на *р-n* переходах МФП.

Настоящая глава посвящена численному исследованию особенностей преобразования субнаносекундных лазерных импульсов в электрический ток многопереходными ФП, подключёнными к нагрузке 50 Ohms. Основное внимание уделено двух- и трёхпереходным структурам с учётом сложностей моделирования, которые описывались во второй главе.

При математическом моделировании рассматривался процесс межзонного туннелирования с введением дополнительного рекомбинационного члена в диффузионнодрейфовые уравнения на основе нелокальной модели [9]. Эффективные массы туннелирования были приняты равными $m_{e_tun} = 0.044$ и $m_{h_tun} = 0.44$. Такие значения были подобраны с целью получения необходимой, дополнительно обговоренной величиной плотности пикового туннельного тока туннельного диода, которая составляла ~ 250 A/cm^2 . Излучение с длиной волны 830 nm вводилось слева через *p*-область.

Параметры структур моделируемых *p-i-n* ФП представлены в таблицах 3 и 4.

Материал	N_D , cm ⁻³	N_A , cm ⁻³	Толщина, μт
p-Al _x Ga _{1-x} As, x=0.3	-	$2 \cdot 10^{19}$	0.04
<i>p</i> -GaAs	-	$2 \cdot 10^{18}$	0.2
<i>n</i> ₀ -GaAs	$1 \cdot 10^{15}$	-	0.368
n-GaAs	$1 \cdot 10^{18}$	-	0.12
n^{++} -GaAs	$2 \cdot 10^{19}$	-	0.02
p^{++} -GaAs	-	$6 \cdot 10^{19}$	0.02
<i>p</i> -GaAs	-	$2 \cdot 10^{18}$	0.4
n ₀ -GaAs	$1 \cdot 10^{15}$	-	0.9
<i>n</i> -GaAs	$1 \cdot 10^{18}$	-	1.93
$n-Al_xGa_{1-x}As, x=0.3$	$3 \cdot 10^{18}$	_	0.2
n-GaAs	6.10^{18}	-	0.25

Таблица 3. Структура двухпереходного *p-i-n* ФП

	<i>n</i> -GaAs	$2 \cdot 10^{18}$	-	0.3
--	----------------	-------------------	---	-----

Структуры включали широкозонное окно, два или три субэлемента, тыльный барьер и буфер. Каждый субэлемент представлял собой *p-i-n* переход для улучшения разделения фотоносителей. Толщины субэлемента определялись условием равенства поглощённых фотонов в каждом слое. Коэффициент поглощения зависел от концентрации легирующей примеси согласно данным [16]. Учитывалась рекомбинация Шокли-Рида и излучательная рекомбинация, процессы перепоглощения фотонов не рассматривались. Длительность лазерного импульса во всех расчётах для данной главы была постоянной и составляла FWHM=140 ps.

Материал	N_D , cm ⁻³	N_A , cm ⁻³	Толщина, μт
p-Al _x Ga _{1-x} As, x=0.3	-	$5 \cdot 10^{19}$	0.3
<i>p</i> -GaAs	-	$1 \cdot 10^{18}$	0.08
n ₀ -GaAs	$1 \cdot 10^{15}$	-	0.25
<i>n</i> -GaAs	$1 \cdot 10^{18}$	-	0.07
n ⁺⁺ -GaAs	$1 \cdot 10^{19}$	-	0.01
p^{++} -GaAs	-	1.10^{19}	0.01
<i>p</i> -GaAs	-	1.10^{18}	0.11
n ₀ -GaAs	$1 \cdot 10^{15}$	-	0.43
<i>n</i> -GaAs	$1 \cdot 10^{18}$	-	0.11
n ⁺⁺ -GaAs	$1 \cdot 10^{19}$	-	0.01
p^{++} -GaAs	-	$1 \cdot 10^{19}$	0.01
<i>p</i> -GaAs	-	$1 \cdot 10^{18}$	0.77
n ₀ -GaAs	$1 \cdot 10^{15}$	-	0.9
n-GaAs	$1 \cdot 10^{18}$	-	0.78
$n-Al_xGa_{1-x}As, x=0.3$	$3 \cdot 10^{18}$	-	0.2
<i>n</i> -GaAs	6.10^{18}	-	0.25
<i>n</i> -GaAs	$2 \cdot 10^{18}$	_	0.3

Таблица 4. Структура трехпереходного *p-i-n* ФП

На рисунке 9а представлены фотоотклики двухпереходного ФП на оптические импульсы, показанные на вставке к этому рисунку.

Обнаружено, что при достижении пиковой плотности оптической мощности свыше 1500 W/cm², максимальное напряжение на нагрузке практически перестает увеличиваться, достигая насыщения. В этот момент электрическое поле в субэлементе теряет способность эффективно разделять носители заряда. Кроме того, наблюдается увеличение длительности отклика, что проявляется в удлинении импульса напряжения.



Рис. 9. *а*) Фотоотклики двухпереходного ФП на лазерные импульсы с пиковой плотностью мощности P_{peak} =1020 (1);1530 (2); 2040W/cm² (3). Соответствующие лазерные импульсы длительностью 140 рs и при длине волны 830 nm показаны на вставке. *b*) Распределения плотности тока смещения (1), тока проводимости (2), туннельного тока (3) и полного тока (4) в области ТД ФП в момент времени 217ps при P_{peak} =1530 W/cm².

Максимальная плотность тока в данной системе достигает 88 А/см², при этом максимальная эффективность преобразования составляет почти 10%. На рисунке 9b представлены распределения различных компонентов плотности тока в области туннельного диода в момент, когда напряжение на нагрузке достигает своего максимального значения в импульсе. Анализ показывает, что ток проводимости практически равен нулю, тогда как ток смещения превышает туннельный ток на 30%. Это свидетельствует о том, что лишь незначительная часть носителей заряда, достигающих туннельного диода, преодолевает барьер посредством туннелирования. Остальные носители не могут преодолеть барьер, что приводит к формированию диполя и снижению поля в туннельном диоде (ТД). В результате возникает ток смещения, который дает основной вклад, является определяющим в протекании тока между смежными субэлементами. Можно предположить, что данный эффект обусловлен незначительным превышением плотности тока над пиковым значением тока ТД. Для подтверждения этой гипотезы были проведены аналогичные расчёты при значительно меньших плотностях оптической мощности, когда ожидалось, что носители заряда будут преимущественно туннелировать через барьер, а ток смещения будет пренебрежимо мал. Результаты этих расчётов представлены на рисунке 10.



Рис. 10. Зависимость плотности тока в области туннельного диода от пиковой мощности лазерного излучения для двухпереходного ФП: 1 – плотность туннельного тока; 2 – плотность тока смещения.

Однако оказалось, что ток смещения значительно превышает туннельный ток во всех случаях. Этот факт можно объяснить следующим образом: для возникновения туннельного тока необходимо смещение квазиуровней Ферми в n- и p-слоях TД, что приводит к появлению разности потенциалов и электрического диполя, поддерживающего ток смещения. Таким образом, для преобразования коротких лазерных импульсов с использованием многопереходных фотопреобразователей (МФП) туннельные диоды не являются критически важными, в отличие от преобразования стационарного излучения. Дополнительно были проведены расчёты для вариантов, представленных на рисунке 10а, с отключённым туннельным эффектом. Оказалось, что полученные кривые зависимости напряжения на нагрузке ФП от времени практически совпадают с ранее полученными с учетом туннельного эффекта. Это позволяет сделать вывод о том, что с точки зрения соотношения цены и качества нецелесообразно стремиться к достижению высокого совершенства туннельных диодов или даже использовать их для соединения смежных субэлементов, ограничиваясь структурами типа np-np.

Для подтверждения данного вывода были проведены расчёты при уменьшении уровнях легирования p- и n-слоёв туннельного диода с сохранением туннельного эффекта. Результаты представлены на рисунке 11а. Анализ показывает, что даже в условиях эффекта, обусловленного исчезновения туннельного определенными значениями концентрации примеси В слоях TД, наблюдается незначительное ухудшение характеристики фотоотклика. Количественно снижение амплитуды в пике зависимости напряжения на ФП от времени падает в пределах 8% от максимального значения.



Рис. 11. Фотоотклики ФП при различной концентрации легирующей примеси в слоях туннельного диода: a) двухпереходного ФП при $P_{peak}=1530 \text{ W/cm}^2$: $1 - N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_A=3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; $2 - N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_A=1.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; $3 - N_D = 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_A=6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; b) трехпереходного ФП при $P_{total}=2040 \text{ W/cm}^2$: $1 - N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_A=1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; $2 - N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; $3 - N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_A=1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; $2 - N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; $3 - N_D = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

В результате, исключение туннельного диода (рис. 11 а кривая 1) приводит лишь к незначительному снижению амплитуды напряжения на нагрузке, в тоже время существенно упрощает технологию изготовления фотопреобразователей (ФП). Аналогичные результаты наблюдаются и для трёхпереходных ФП (рис. 11b). Меньший прирост амплитуды импульса напряжения при переходе от двухпереходного к трёхпереходному ФП объясняется меньшей оптической мощностью, приходящейся на один субэлемент в трёхпереходном устройстве. При этом эффективность преобразования в максимуме импульса напряжения в трёхпереходном ФП оказывается выше и составляет 13–15%.

Как уже было отмечено ранее, моделирование МФП с количеством туннельных диодов (ТД) более двух представляет собой значительную сложность из-за плохой сходимости итерационных процессов и необходимости значительного увеличения объёма используемой вычислительной памяти. Полученные результаты позволяют использовать упрощённые модели для исследования функционирования МФП в импульсном режиме, в которых эффект квантового туннелирования отключён. В рамках данной главы такой подход был применён для численного анализа характеристик шестипереходного фотопреобразователя (ФП).

Структура шестипереходного ФП была аналогична структурам двух- и трёхпереходных ФП. Оптические толщины субэлементов составляли 0.172, 0.208, 0.283, 0.359, 0.565 и 1.427 соответственно. Туннельные диоды продолжали входить в состав ФП, однако их функция ограничивалась увеличением толщины примыкающих субэлементов и изменением слоя объёмного заряда вблизи границы между ними.

На рис. 12а показан фотоотклик шестипереходного ФП при различной пиковой мощности оптического импульса в случае, когда легирование ТД составляло $1 \cdot 10^{18}$ cm⁻³. Обнаружено, что предельное значение пикового напряжения в шестипереходном фотопреобразователе (ФП) лишь незначительно превышает 4 V, что составляет примерно 0.7 V на один субэлемент, тогда как для двух- и трёхпереходных ФП этот показатель был близок к 1 V. Это свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение числа фотоактивных р-п переходов приводит к снижению эффективности работы ФП. Причина данного явления наглядно представлена на рисунке 12b, где изображена зонная диаграмма шестипереходного ФП в момент времени t = 236 ps, когда напряжение достигает максимума.



Рис. 12. *а*) Фотоотклики шестипереходного ФП при разной пиковой мощности лазерного излучения, при легировании в слоях ТД $1 \cdot 10^{18}$ cm⁻³: 1 – 4081 W/cm²; 2 – 8163 W/cm²; 3 – 12244 W/cm²; 4 – 16326 W/cm². *b*) Зонная диаграмма шестипереходного ФП в момент времени t = 236 рѕ при пиковой мощности лазерного излучения 4081 W/cm²: 1 – зона проводимости; 2 – валентная зона.

Видно, что основная часть напряжения приходится на последние три субэлемента. Изменения потенциала в слоях объёмного заряда на границах между субэлементами практически одинаковы, тем не менее смещения *p-i-n* переходов внутри субэлементов значительно различаются. В первых трёх субэлементах они значительно меньше и близки по абсолютной величине к изменениям потенциала вблизи границ субэлементов, что приводит к относительно малому падению напряжения на первых субэлементах. Было высказано предположение, что причина заключается в недостаточной толщине первых субэлементах. Для устранения этой проблемы предложено увеличить их толщину, что потребует уменьшения коэффициента поглощения в этих слоях. В рамках пробного шага первые три субэлемента были заменены с GaAs на AlGaAs. Результаты расчётов не приводятся здесь, однако отметим, что данное предположение оказалось верным, и удалось увеличить амплитуду импульса напряжения почти в полтора раза.

Таким образом, для структур, по крайней мере, двух- и трёхпереходных *p-i-n* ФП, предназначенных для преобразования субнаносекундных мощных лазерных импульсов, можно либо исключить туннельные диоды (ТД), либо значительно ослабить требования к их параметрам, практически не теряя при этом в эффективности.

По данной работе опубликована статья [6а].

Заключение

В рамках работы исследованы и рассчитаны характеристики полупроводниковых одно и многопереходных *p-n* и *p-i-n* фотопреобразователей, работающих в фотовольтаическом режиме. На данный момент пакет позволяет исследовать работу ФП с двумя *p-n* переходами, соединенными встречно включённым ТД, широкозонными окнами, буферными и барьерными слоями, а также разными уровнями ловушек в ТД. Кроме того, возможно моделирование характеристик в импульсном режиме трехпереходных фотопреобразователей с двумя областями квантового туннелирования в ТД. Переходя к исследованию ФП с числом переходов больше трех, необходима замена туннельных диодов на омическую связь для корректной работы всей программы.

В рамках проведённых исследований в первой главе была реализована математическая модель и последующий расчет нагрузочных характеристик *p-n* фотопреобразователя на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs. Экспериментальное исследование проводилось с использованием радиолюминесцентного источника освещения при сверхнизких, пиковаттных уровнях оптического возбуждения. В процессе анализа полученных результатов было обнаружено, что расчетная вольт-амперная

характеристика демонстрирует быстрый спад фототока до нулевых значений при возрастании приложенного напряжения, которое доходит до напряжения холостого хода. Данный эффект предположительно обусловлен совокупностью двух факторов: возможными погрешностями численного расчёта или отличием моделируемой структуры от экспериментально полученной.

Во второй главе рассматривалась стационарная задача расчёта двухпереходных *p-п* фотопреобразователей. Так в первой её части структура фотопреобразователя из предыдущей главы была усложнена добавлением туннельного диода и ещё одного *p-n* перехода, при этом слои широкозонного окна и тыльного барьера для упрощения расчёта были Ha убраны. примере описанного двухпереходного монолитного фотопреобразователя лазерного излучения было выполнено сравнение результатов расчёта полной модели с соединительным туннельным диодом и упрощённой модели, в которой туннельный диод заменяется омической связью. Впервые показано, что для одних и тех же параметров задачи в полной модели возможно существование нескольких решений, основанных на туннельном и инжекционном механизмах протекания тока через туннельные диоды. Показано, что упрощённая модель даёт меньшие значения тока короткого замыкания. Во второй части второй главы была исследована множественность решений монолитного двухпереходного фотопреобразователя лазерного излучения, структура которого была дополнена широкозонным окном и тыльным барьером, а также ловушками в туннельном диоде. Было показано сохранение существования двух решений, одно из которых соответствует туннельной ветви вольт-амперной характеристики ТД, а второе - диффузной. Также было продемонстрировано, что при наличии ловушек перенос носителей заряда через барьер ТД происходит посредством туннелирования в обоих решениях. При этом, во втором решении туннелирование имеет место даже в режиме холостого хода, когда носители заряда движутся в одну сторону. Предложен способ реализации второго решения на практике.

В третьей главе реализовано математическое моделирование многопереходных p-*i*-n ФП в импульсном режиме работы. На примере двух- трех- и шести-переходных была исследована роль туннельных диодов при возбуждении многопереходных p-*i*-n ФП субнаносекундными мощными лазерными импульсами. В ходе исследования установлено принципиальное отличие функционирования многопереходных фотопреобразователей при воздействии импульсного излучения от стационарного режима работы. В частности, выявлено, что туннельные диоды, традиционно выступающие в качестве критически важных элементов конструкции, в условиях импульсного режима теряют свою определяющую роль. Данное обстоятельство обусловлено замещением туннельных токов

токами смещения в структуре фотопреобразователя. Это означает, что данные устройства способны эффективно работать как в конфигурации без туннельных диодов, так и при значительном снижении предъявляемых к ним технических требований, что открывает новые перспективы в области проектирования и оптимизации фотопреобразовательных устройств. Таким образом, для структур, по крайней мере, двух- и трёхпереходных ФП, предназначенных для преобразования субнаносекундных мощных лазерных импульсов, можно либо исключить туннельные диоды (ТД), либо значительно ослабить технологические требования к их параметрам, практически не теряя при этом в эффективности. Что касается шестипереходных ФП, то для обеспечения его эффективной работы в процессе преобразования интенсивных субнаносекундных лазерных импульсов необходимо существенное увеличение толщины первых (фронтальных) трех *p-i-n* переходов, которые слабо участвуют в преобразовании. Этот технический подход реализуется посредством замены исходного материала на другой, обладающий более широкой запрещенной зоной. Такое изменение позволяет достичь оптимальных электрооптических параметров устройства при работе в импульсном режиме, что существенно повышает его эксплуатационные характеристики.

Положения, выносимые на защиту

1. Установлено, что наличие *N*-образной вольт-амперной характеристики туннельного диода обуславливает существование как минимум двух устойчивых режимов работы двухпереходных *p-n* фотопреобразователей в фотовольтаическом режиме: диффузионного и туннельного. Данное явление обусловлено смещением характеристик ТД под воздействием прилегающих фотоактивных субэлементов. В ходе исследования предложен метод практической реализации второго устойчивого режима работы фотопреобразователя. Методика следующие двухпереходного включает последовательные этапы: 1) Воздействие на фотопреобразователь излучением высокой мощности, при котором значение фототока превышает пиковое значение тока ТД, что обеспечивает реализацию исключительно второго устойчивого решения; 2) Резкое снижение интенсивности излучения до уровня, при котором фототок становится меньше пикового значения ТД. Данная процедура позволяет зафиксировать второе устойчивое решение и предотвратить переход к первому устойчивому состоянию.

2. В результате проведенных исследований определено, что в условиях импульсного режима функционирования многопереходных *p-i-n* фотопреобразователей в фотовольтаическом режиме, где доминирующим фактором, определяющим протекание тока через структуру, являются емкостные эффекты, а именно ток смещения, возможно

существенное снижение требований к параметрам туннельных диодов или полное исключение их из конструкции. При этом наблюдается минимальное снижение эффективности преобразования субнаносекундных мощных лазерных импульсов, что открывает новые возможности для оптимизации конструкции фотопреобразовательных устройств с упрощением технологии и снижением их себестоимости.

3. Обнаружено, что реализация эффективной работы монолитных многопереходных фотопреобразователей при преобразовании мощных субнаносекундных лазерных импульсов требует обязательного увеличения толщины фронтальных *p-i-n* переходов. Данное техническое решение достигается путем замены исходного материала на альтернативный с более широкой запрещенной зоной, что обеспечивает оптимальные электрооптические характеристики устройства в условиях импульсного режима работы.

Апробация результатов исследования

[1а] Прудченко К.К., Толкачев И.А., Силантьева Е.А., Контрош Е.В, Исследование характеристик радиоизотопного источника энергии на основе (Y,Eu)PO4 / 238Pu и AlxGa1-xAs/GaAs фотопреобразователя, Международная молодежная конференция ФизикА, СПб., декабрь 2021

[2a] Prudchenko,KK; Tolkachev,IA; Silantieva,EA; Kontrosh,EV. Investigation of the characteristics of a radioisotope source based on a (Y)PO4/(238Pu) self-glowing crystal and an AlxGa(1-x)As/GaAs photovoltaic converter. International Conference PhysicA.SPb/2021 J. Phys.: Conf. Ser., v.2103, 1 (2021).

[3а] Прудченко К.К., Толкачев И.А., Контрош Е.В., Силантьева Е.А., Калиновский В.С. Источник электрической энергии на основе AL_{0.8}GA_{0.2}AS/GAAS фотоэлектрического преобразователя и YPO₄:EU/(²³⁸PU) радиолюминесцентного излучателя. Журнал технической физики. Т. 92. № 12. С. 1875-1880 (2022)

[4a] Юферев В.С., Толкачев И.А., Калиновский В.С. О возможной неединственности преобразования лазерного излучения в электрический ток в многопереходных монолитных фотопреобразователях // Письма в журнал технической физики. т.50, 1, 2024, с. 39 – 42. DOI: <u>https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.01.56925.19674</u>

[5а] Толкачев И. А., Юферев В. С. Проблема неединственности преобразования лазерного излучения в электрический ток в многопереходных монолитных фотопреобразователях //Физика и техника полупроводников. – 2024. – Т. 58. – №. 10. – С. 565-568.

[6а] Толкачев И.А., Юферев В.С. Преобразование субнаносекундных лазерных импульсов в электрический ток многопереходными фотопреобразователями: роль туннельных диодов // Расширенные тезисы на конференции Физика.СПб/2025

[7а] Калиновский В. С., Контрош Е. В., Толкачев И. А., Прудченко К. К., Иванов С. В. Монолитный трехпереходный p–i–n AlGaAs/GaAs фотопреобразователь лазерного излучения //Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50. – №. 22. – С. 35-38.

[8а] Калиновский В.С., Контрош Е.В., Толкачев И.А., Прудченко К.К., Юферев В.С., Иванов С.В. Генерация СВЧ-импульсов монолитными трехпереходными AlGaAs/GaAs p-i-n фотопреобразователями и модулями без обратного смещения//Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51. – №. 9. – С. 27-30.

Дополнительный список публикаций автора

[1д] Устинов В.М., Юферев В.С., Калиновский В.С., Ащеулов Ю.В., Контрош Е.В., Прудченко К.К., Толкачёв И.А., Теруков Е.И., Аболмасов С.Н., Терукова Е.Е. МАКЕТ ЭНЕРГО-ИНФОРМАЦИОННОЙ АВТОНОМНОЙ СТАНЦИИ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ. В сборнике: ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОБЪЕКТАХ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА МИНОБОРОНЫ РОССИИ. сборник докладов круглого стола в рамках научно-деловой программы Международного военно-технического форума «Армия-2022». Санкт-Петербург, С. 227-233 (2022)

[2д] Yuferev Valentin S. et al. Energy–informational hybrid photovoltaic converter of laser radiation //St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. – 2023.
 – Т. 64. – №. 1.2. – С. 47-51.

[3д] Калиновский В.С., Теруков Е.И., Ащеулов Ю.В., Контрош Е.В., Юферев В.С., Прудченко К.К., Чекалин А.В., Терукова Е.Е., Толкачев И.А., Гончаров С.Е., Устинов В.М. Разработка и исследование макета автономной энергоинформационной станции атмосферной оптической линии связи. Письма в журнал технической физики. Т. 49. № 2. С. 21-25 (2023)

[4д] Толкачев И. А., Калиновский В. С., Контрош Е. В., Климко Г. В., Малеев Н. А., Прудченко К. К., Юферев В. С. Наногетероструктурные p-i-n GaAs/AlGaAs соединительные туннельные диоды для многопереходных лазерных фотопреобразователей // РОССИЙСКИЙ ФОРУМ «МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2023» 9-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов 9–14 октября 2023г. С. 283-285

[5д] Калиновский В.С., Теруков Е.И., Контрош Е.В., Прудченко К.К., Толкачев И.А. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНЫМИ АЗВ5/НЈТ- ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ В ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Железногорск, 9–10 окт. 2023 г.) / АО «РЕШЕТНЁВ». Железногорск, 2023. С. 73 – 76.

[6д] Андреев В.М., Калиновский В.С., Контрош Е.В., Малевский Д.А., Прудченко К.К., Толкачев И.А. Исследование деградации параметров субнаносекундного фотоэлектрического модуля при термоциклировании. Письма ЖТФ, т.50, 6, 2024, с. 44 – 46. DOI: <u>https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.06.57307.19793</u>

Список литературы

[1] M.C.A. York, S. Fafard, J. Phys. D: Appl. Phys., 50, 173003 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa60a6

[2] S. Fafard, D.P. Masson, J. Appl. Phys., 130, 160901 (2021). DOI: 10.1063/5/0070860

[3] H. Helmers, C. Armbruster, M. von Ravenstein, D. Derix, C. Schoner, IEEE Trans. Power Electron., "35, 7904 (2020). DOI: 10.1109/TPEL.2020.2967475

[4] [Д.Ф. Зайцев, В.М. Андреев, И.А. Биленко, А.А. Березовский, П.Ю. Владиславский, Ю.Б. Гурфинкель, Л.И. Цветкова, В.С. Калиновский, Н.М. Кондратьев, В.Н. Косолобов, В.Ф. Курочкин, С.О. Слипченко, Н.В. Смирнов, Б.В. Яковлев, Радиотехника, 85 (4), 153 (2021). DOI: 10.18127/j00338486-202104-17

[5] P. Bhatti, Sci. Transl. Med., 7 (287), 287ec75 (2015). DOI: 10.1126/scitransalmed.aab3974

[6] J. Huang, Y. Sun, Y. Zhao, S. Yu, J. Dong, J. Xue, C. Xue, J. Wang, Y. Lu, Y. Ding, J. Semicond., 39 (4), 044003 (2018). DOI: 10.1088/1674-4926/39/9/094006

[7] A. Wang, J. Yin, S. Yu, Y. Sun, Appl. Phys. Lett., 121, 233901 (2022). DOI: 10.1063/5.0109587

[8] S. Fafard, F. Proulx, M.C.A. York, L.S. Richard, P.O. Provost, R. Ares, V. Amez,D.P. Masson, Appl. Phys. Lett., 109, 131107 (2016). DOI: 10.1063/1.4964120

[9] Atlas User's Manual. Device simulation software (Silvaco, 2015).

[10] Parker D. G. et al. High-speed response of a quasi-graded band-gap superlattice p-i-n photodiode //Applied physics letters. – 1986. – T. 49. – №. 15. – C. 939-941.

[11] O.L. Ayodele, K.O. Sanusi, M.T. Kahn, Journal of Engineering, Design and Technology, **17** (1), 172-82 (2019). DOI: https://doi.org/10.1108/JEDT-02-2017-0011

[12] Zhiheng Xu, Yunpeng Liu, Zhengrong Zhang, Wang Chen, Zicheng Yuan, Kai Liu, Xiaobin Tang, Wiley energy research, **42** (4), 1729-37 (2018). DOI: 10.1002/er.3982

[13] А.А. Краснов, С.А. Леготин, Приборы и техника эксперимента, **4**, 5-22 (2020) DOI: 10.31857/S0032816220040151

[14] Zheng-Rong Zhang, Xiao-Bin Tang, Yun-Peng Liu, Zhi-Heng Xu, Zi-Cheng Yuan, Kai Liu, Wang Chen, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 398, 35–41 (2017) DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.03.060</u>

[15] M.V.Zamoryanskaya, E.V.Dementeva, K.N.Orekhova, V.A.Kravets,
A.N.Trofimov, G.A.Gusev, I.Ipatova, B.E.Burakov, Materials Research Bulletin, 142 (111431),
(2021) DOI: 10.1016/j.materresbull.2021.11143

[16] Casey Jr H. C., Sell D. D., Wecht K. W. Concentration dependence of the absorption coefficient for n- and p- type GaAs between 1.3 and 1.6 eV //Journal of Applied Physics. -1975. -T. 46. $-N_{\odot}$. 1. -C. 250-257.