

На правах рукописи

СОЛОВЬЕВ Юрий Владимирович

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАДИОЛО-  
КАТОРОВ СВЕРВЫСОКИХ ЧАСТОТ

специальность - 05. 27. 06. «Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2005

Работа выполнена в ЗАО «Светлана-Электронприбор»

Научный руководитель: доктор химических наук, доцент  
Александров Сергей Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор химических наук, профессор  
Мальгин Анатолий Алексеевич  
Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт (ТУ)

кандидат технических наук, доцент  
Семенов Николай Николаевич  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»

Ведущая организация: Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе РАН

Защита состоится «15» июня 2005 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212. 229. 02 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, химический корпус, аудитория 51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному выше адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212. 229. 02

Автореферат разослан \_\_\_\_ мая 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212. 229. 02., д. ф.-м.-н. профессор

Саморуков Б. Е.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Достигнутые к настоящему времени малые размеры полупроводниковых элементов и возможность их совмещения с линиями передач сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала сделали актуальной разработку защитных устройств (ЗУ) радиолокационных станций миллиметрового диапазона длин волн в гибридно-интегральном исполнении.

Основными материалами, которые применяются для изготовления полупроводниковой элементной базы ЗУ, являются кремний и арсенид галлия. Электрофизические параметры этих материалов (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon > 10$  и тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta < 5 \cdot 10^{-3}$ ), при современном уровне технологии изготовления СВЧ полупроводниковых приборов обеспечивает реализацию ЗУ для работы в миллиметровом диапазоне длин волн.

Особый интерес представляет применение эпитаксиальных тонкобазных ( $h \leq 2$  мкм) р-і-п структур на основе арсенида галлия. Благодаря преимуществам арсенида галлия по электрофизическим параметрам, таким как высокая подвижность основных носителей заряда, резкий концентрационный р-п переход, реализация малых значений емкости и дифференциального сопротивления, возможно изготовление р-і-п диода, имеющего лучшие СВЧ характеристики по сравнению с кремниевыми диодами.

Для работы полупроводниковых ЗУ при большом уровне входной импульсной и средней мощностей в качестве входных и выходных каскадов необходимо применять многодиодные конструкции. Однако, при создании мощных устройств для работы в коротковолновой области миллиметрового диапазона ( $\lambda_{\text{ср.}} = 3$  мм), необходимость монтажа в СВЧ тракт большого количества полупроводниковых дискретных диодов представляет серьезную техническую проблему

Одним из возможных решений проблемы является применение монолитных ограничителей, особенно изготовленных на основе арсенида галлия. В этом случае, помимо простоты монтажа в СВЧ тракт, можно обеспечить более эффективное рассеяние средней мощности и высокое быстродействие, по сравнению с дискретными приборами.

**Целью настоящей работы является:**

Разработка технологии изготовления р-і-п диодов и монокристаллических ограничителей новой конструкции на основе эпитаксиальных структур арсенида галлия, в качестве элементной базы для защитных устройств миллиметрового диапазона длин волн.

Для достижения поставленной цели потребовалось:

- разработать новые структурно-конструктивные варианты р-і-п диода и монокристаллического ограничителя на основе арсенида галлия с электрофизическими параметрами, отвечающим требованиям работы в миллиметровом диапазоне длин волн.

- исследовать различные технологические варианты изготовления р-і-п диода и монокристаллического ограничителя на основе эпитаксиальных структур арсенида галлия, для обеспечения требуемых электрофизических параметров.

- на основе полученных результатов разработать технологию и изготовить планарные р-і-п диоды и монокристаллические ограничители для ЗУ миллиметрового диапазона длин волн.

#### **Научная новизна:**

1. Предложена и реализована методика проектирования ограничительного планарного р-і-п диода и монокристаллического ограничителя на основе арсенида галлия. Выполнен расчет основных электрофизических параметров этих приборов для ЗУ в частотных диапазонах  $f=20-40$  ГГц ( $\lambda_{\text{ср.}}=8$  мм) и  $f=75-110$  ГГц ( $\lambda_{\text{ср.}}=3$  мм). Найдены расчетом параметры приборов (последовательное сопротивление, барьерная емкость при нулевом смещении), обеспечивающие малые (менее 1Дб) потери СВЧ сигнала в волноводе. Методика подтверждена экспериментально.

2. Показана возможность применения несплавного омического контакта Cr/Au при изготовлении р-і-п диода и монокристаллического ограничителя на основе арсенида галлия. Получены новые сведения о влиянии электрофизических параметров эпитаксиальных слоев арсенида галлия р-типа проводимости на удельное сопротивление и адгезионные свойства несплавного омического контакта Cr/Au – Au<sub>галльван.</sub> Установлено, что несплавной омический контакт Cr/Au - Au<sub>галльван.</sub> к эпитаксиальным слоям арсенида галлия р-типа проводимости с уровнем легирования ( $N_a=2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>), обеспечивает надежную адгезию и имеет малые значения удельного контактного сопротивления  $\rho=(2-4) \cdot 10^{-6}$  Ом\*см<sup>2</sup>.

3. Выявлены тенденции изменения СВЧ характеристик монокристаллического ограничителя в диапазоне частот  $f=75-110$  ГГц ( $\lambda_{\text{ср.}}=3$  мм), при изменении геометрических характеристик полуизолирующей подложки арсенида галлия. На основании полученных резуль-

татов разработана конструкция монолитного ограничителя, обеспечивающая минимальные потери в заданном частотном диапазоне.

4. Разработана новая методика неразрушающего контроля последовательного сопротивления диодных цепочек в технологическом маршруте изготовления монолитного ограничителя с замкнутым балочным выводом.

#### **Практическая значимость работы заключается в следующем:**

Разработан технологический маршрут изготовления планарного ограничительно-го р-і-п диода балочного типа на основе арсенида галлия для работы в частотном диапазоне  $f=20-40$  ГГц ( $\lambda_{\text{ср.}}=8$  мм). Разработанная технология внедрена в серийное производство.

Впервые в РФ разработана конструкция и технологический маршрут изготовления монолитного диодного ограничителя на основе арсенида галлия для работы в частотном диапазоне  $f=75-110$  ГГц ( $\lambda_{\text{ср.}}=3$  мм). Выпущена опытная партия монолитных ограничителей. Создана проектно-технологическая база для серийного производства монолитных диодных ограничителей.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

В ходе диссертационных исследований получены новые результаты, совокупность которых позволяет сформулировать следующие научные положения, выносимые на защиту.

1. Технологические разработки и решения, обеспечивающие изготовление планарного р-і-п диода и монолитного ограничителя на основе арсенида галлия, найденные на основании результатов расчета электрофизических параметров р-і-п диода и монолитного ограничителя на низком уровне мощности (НУМ) СВЧ сигнала и определения параметров работы приборов на низкой частоте.
2. Закономерности формирования и свойства несплавного омического контакта Сг/Аи для р-і-п диода и монолитного ограничителя на основе арсенида галлия. Применение металлизации Сг/Аи к сильнолегированным эпитаксиальным слоям арсенида галлия р+-типа проводимости позволяет реализовать омический контакт, который отличается высокой воспроизводимостью электрофизических параметров (более 90% по площади пластины), надежной адгезией и обеспечивает малые значения удельного сопротивления металл-полупроводник  $\rho_c=(2-4) \cdot 10^{-6}$  Ом\*см<sup>2</sup>.

3. Технологические решения, относящиеся к изготовлению планарного р-і-п диода с балочными выводами на основе арсенида галлия, обеспечивающая потери пропускания СВЧ сигнала в режиме НУМ в пределах 0.6-0.75 дБ и ограничение в режиме высокого уровня мощности (ВУМ) до 12 дБ. Это позволяет использовать данный элемент в качестве ограничителя мощности в частотном диапазоне 20- 40 ГГц
4. Разработанная и впервые реализованная в РФ конструкция и технология изготовления планарного многодиодного ограничителя на основе арсенида галлия, обеспечивающая работу при импульсных мощностях 50-100 Вт, характеризующаяся потерями на пропускание СВЧ сигнала в режиме НУМ 0.7-0.9 дБ и ограничением в режиме ВУМ 16-18 дБ в диапазоне 92-94 ГГц, что отвечает требованиям работы в качестве ограничительного выходного каскада в составе ЗУ в 3 миллиметровом диапазоне длин волн.

#### **Апробация работы.**

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Всероссийской ярмарке электронных устройств и оборудования (Нижний Новгород 2002); Научно-технической конференции молодых специалистов (г. Саратов 2004); и XII международной научно-технической конференции «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки» (г. Санкт-Петербург, февраль 2005).

По результатам диссертационной работы опубликовано 5 работ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 3 частей, 5 приложений, выводов и списка литературы. Материал изложен на 151 странице текста, содержит 16 таблиц и 55 рисунков. В список литературы включены 68 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определен объект исследования, сформулирована цель работы, задачи, которые необходимо решить исходя из цели работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации носит обзорный характер. Проведен анализ публикаций, касающийся разработки и создания, планарных р-і-п диодов и монокристаллических ограничителей на основе арсенида галлия. Определены основные требования, предъявляемые к выбору эпитаксиальной структуры и металлизации для формирования омических контактов. Рассмотрены методы роста эпитаксиальных р-і-п структур с высокой концентрацией основных носителей заряда в приконтактных слоях. Приведен обзор различных металлизационных систем, которые применяются для создания омических контактов к приконтактным эпитаксиальным слоям арсенида галлия р<sup>+</sup> - и п<sup>+</sup> - типа проводимости. Приведены основные характеристики созданных за рубежом р-і-п диодов и монокристаллических ограничителей. Результаты анализа сведений, относящихся к технологии изготовления р-і-п диодов и монокристаллических многодиодных ограничителей на основе арсенида галлия, свидетельствуют об ограниченности имеющейся информации, что вероятнее всего, обусловлено сложностью изготовления данных полупроводниковых приборов для работы в миллиметровом диапазоне длин волн.

Таким образом, для реализации элементной базы ЗУ на основе арсенида галлия требуется проведение комплексного исследования технологических вариантов изготовления различными экспериментальными методами с целью обеспечения требуемых электрофизических параметров работы приборов в миллиметровом диапазоне длин волн.

**Во второй главе** представлены результаты расчета электрофизических параметров р-і-п диода в режиме НУМ с целью определения последовательного сопротивления

омических контактов и приконтактных слоев, барьерной емкости при нулевом смещении и индуктивности прибора, которые отвечают потерям СВЧ сигнала в волноводе менее 1 дБ.

Показано, что для работы в частотном диапазоне  $f=20-40$  ГГц ( $\lambda_{cp.}=8$  мм), прибор должен иметь следующие значения электрофизических характеристик:

- сопротивление эпитаксиальных слоев и омических контактов:  $R_s < 5$  Ом;
- сопротивление р-п перехода в режиме НУМ:  $R_j > 1000$  Ом;
- емкость при нулевом смещении:  $C^{(0)} < 0.03$  пФ;
- индуктивность:  $L \leq 0.2$  нГн;

На основании проведенного расчета, были определены топологические размеры основных элементов конструкции планарного балочного р-і-п диода.

В миллиметровом диапазоне длин волн основные потери в ЗУ при прохождении СВЧ сигнала связаны с наличием больших значений последовательного сопротивления и барьерной емкости ограничительного элемента.

Существенный вклад в последовательное сопротивление р-і-п диода вносят контактные сопротивления металлизации к р<sup>+</sup>-, п<sup>+</sup>- эпитаксиальным слоям. Основной проблемой в технологии изготовления СВЧ полупроводниковых приборов на основе арсенида галлия является трудность получения низкоомного контакта к эпитаксиальным слоям р-типа проводимости. Одним из возможных путей решения проблемы минимизации данного параметра является использование эпитаксиальных приконтактных слоев с высоким уровнем легирования.

С этой целью было проведено исследование электрофизических параметров омических контактов Cr/Au и AuBe-Au к эпитаксиальным слоям р-типа проводимости с различным уровнем легирования основными носителями заряда ( $N_a = 5 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>). Определение параметров омических контактов проводилось методом «длинной линии».

Установлено, что несплавной омический контакт Cr/Au к эпитаксиальным слоям с уровнем легирования ( $N_a = 2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>), имеет достаточно малые значения удельного контактного сопротивления ( $\rho_c = (2-4) \cdot 10^{-6}$  Ом\*см<sup>2</sup>), коррелирующие с электрофизическими параметрами контакта AuBe-Au ( $\rho_c = (1-3) \cdot 10^{-6}$  Ом\*см<sup>2</sup>). Отличительной особенностью несплавного омического контакта Cr/Au является надежная адгезия металлизации к эпитаксиальному слою в отличие от контакта AuBe-Au



В качестве омического контакта к n+- эпитаксиальному слою арсенида галлия использовалась металлизация AuGe-Ni-Au. Удельное контактное сопротивление AuGe-Ni-Au – n+-GaAs ( $N_d=5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) составляет  $\rho_c=(1-3) \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$ .

При разработке технологического маршрута изготовления p-i-n диода (рис.1) установлено, что, увеличивая толщину защитного диэлектрического слоя можно добиться уменьшения барьерной емкости прибора за счет снижения паразитной емкости металлизации.

Измерения параметров p-i-n диода на низкой частоте показали, что арсенидгаллиевый p-i-n диод балочного типа с толщиной базы  $h=1 \text{ мкм}$  имеет:

- дифференциальное сопротивление  $R_d=3.5-4 \text{ Ом}$  ( $I_{пр.} = 10 \text{ мА}$ );
- барьерную емкость при нулевом смещении  $C^{(0)}=0.018-0.023 \text{ пФ}$ ;

Полученные экспериментальные значения основных электрофизических характеристик отвечают требованиям работы p-i-n диода в частотном диапазоне  $f=20-40 \text{ ГГц}$  ( $\lambda_{ср.}=8 \text{ мм}$ ).

Измерения СВЧ параметров разработанного p-i-n диода в режиме НУМ показали, что экспериментальные образцы имеют потери СВЧ сигнала  $0.6 - 0.8 \text{ дБ}$  и обеспечивают ограничение СВЧ сигнала в режиме ВУМ  $12 \text{ дБ}$ .

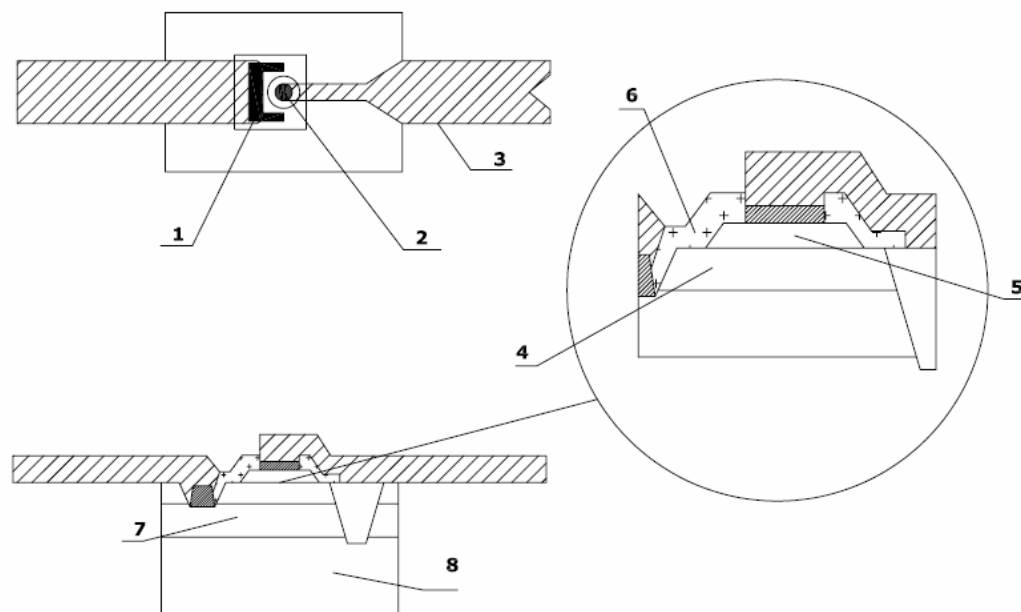


Рис.1 Планарный p-i-n диод балочного типа на основе арсенида галлия

- 1 – омический контакт к  $n^+$ -GaAs; 2 – омический контакт к  $p^+$ -GaAs;  
3 – балочный вывод; 4 – эпитаксиальный слой  $n(i)$ -GaAs;  
5 – эпитаксиальный слой  $p^+$ -GaAs; 6 – диэлектрическая защита  $SiO_2$ ;  
7 – эпитаксиальный слой  $n^+$ -GaAs; 8 – полуизолирующая подложка GaAs

**В третьей главе** рассматриваются вопросы, связанные с конструктивными особенностями и технологией изготовления монолитного диодного ограничителя на основе арсенида галлия. Основное внимание уделено технологии изготовления диодных цепочек и формированию пьедестала в активной области прибора.

Представлены результаты расчета основных электрофизических параметров монолитного диодного ограничителя в режиме НУМ в частотном диапазоне  $f=75-110$  ГГц ( $\lambda=3$  мм) с целью определения последовательного сопротивления, барьерной емкости и индуктивности прибора, которые отвечают минимальным значениям потерь СВЧ сигнала (менее 1 дБ) в волноводе.

Минимальным значениям потерь пропускания СВЧ сигнала в данном частотном диапазоне отвечает ограничитель, который имеет следующие электрофизические параметры:

- сопротивление эпитаксиальных слоев и контактной металлизации ограничителя:  $R_{\text{посл.}} < 15$  Ом;
- емкость ограничителя при нулевом смещении:  $C^{(0)} \leq 0.002$  пФ
- индуктивность металлизации:  $L \approx 0.2$  нГн;

Технологический маршрут изготовления ограничителя предусматривал реализацию планарной конструкции на эпитаксиальных структурах арсенида галлия. Внешний вид монолитного ограничителя представлен на рис. 2.

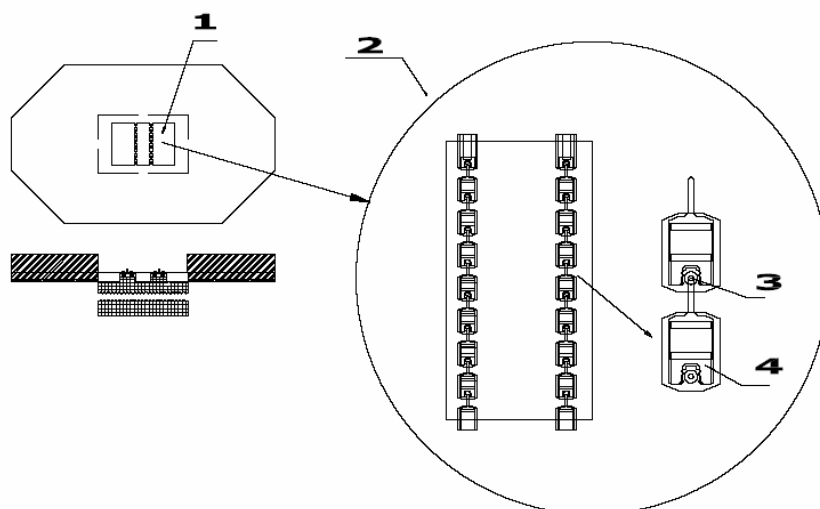


Рис. 2 Монолитный ограничитель на основе арсенида галлия

- 1 – внешний вид монолитного ограничителя; 2 – диодные цепочки ограничителя;  
 3 – омический контакт к приконтактному слою  $p^+$ -типа проводимости; 4 – омический контакт к приконтактному слою  $n^+$ -типа проводимости

В процессе разработки технологического цикла изготовления особое внимание уделялось выполнению следующих технологических операций:

- жидкостное травление эпитаксиальных структур при создании воздушных мостов диодов в ограничителе;
- формирование пьедестала кристалла ограничителя;

В отличие от изготовления дискретных балочных  $p$ - $i$ - $n$  диодов, при формировании воздушных мостов диодов в ограничителе, необходимо учитывать наличие замкнутого металлического балочного вывода. Наличие замкнутого балочного контура приводит к неконтролируемому анизотропному травлению, из-за неравномерного доступа травителя к поверхности. Проведенные серии экспериментов по формированию воздушных мостов показали, что скорость травления эпитаксиальных слоев различна в активной области ограничителя. Для обеспечения необходимых условий равномерного травления в активной области ограничителя была проведена корректировка конструкции диодных цепочек ограничителя. Цель корректировки заключалась в создании балочных выводов у периферийных диодов, которые замыкались на балочный вывод ограничителя. Контроль травления проводился по пробивным напряжениям между точечными зондами на поверхности эпитаксиальных слоев. Проведенные серии экспериментов показали, что при данной корректировке конструкции ограничителя достигается-

ся равномерное травление полупроводникового материала в процессе формирования воздушных мостов в активной области прибора.

Пьедестал кристаллов ограничителя в технологическом цикле изготовления формируется жидкостным травлением. При проведении данного технологического процесса необходимо учитывать ряд требований:

- пьедестал кристалла должна иметь определенные размеры, соответствующие размерам волноводного окна ЗУ (2.4 x 2.1 мм);

- толщина пьедестала должна обеспечивать механическую прочность прибора;

К толщине кристалла предъявляются противоречивые требования: с одной стороны - обеспечение механической прочности ограничителя, с другой - обеспечение минимальной паразитной емкости подложки.

Для обеспечения механической прочности пьедестала толщина полуизолирующей подложки арсенида галлия выбиралась в пределах 110-120 мкм. Утоньшение стандартной эпитаксиальной структуры арсенида галлия ( $h=300$  мкм) проводилось химико-динамическим полированием. Формирование пьедестала осуществлялось с использованием травителя на основе серной кислоты.

Однако, при исследовании экспериментальных образцов ограничителей в заданном рабочем диапазоне частот ( $f=75-110$  ГГц) наблюдался высокий уровень потерь пропускания СВЧ сигнала ( $L_{\text{проп.}} > 12-14$  дБ). При этом кристаллы ограничителя имели требуемые значения основных электрофизических параметров на НЧ.

В ходе выполнения работы были изготовлены кристаллы ограничителя с различной толщиной пьедестала. Было установлено, что минимальный уровень потерь ( $< 1$  дБ) достигается у кристаллов ограничителя с толщиной пьедестала  $h=35-40$  мкм и минимальным заполнением полуизолирующей подложки в волноводном окне (полосы пьедестала). При этом они имели необходимую механическую прочность, которая позволяла провести монтаж кристаллов в ЗУ с высоким процентом годных ( $\approx 80$  %).

Экспериментальные образцы кристаллов монолитного ограничителя по результатам метрического контроля на НЧ уровне имели следующие электрофизические параметры:

- дифференциальное сопротивление диодной цепочки:  $R_d=31-33$  Ом ( $I_{\text{пр.}} = 10$  мА);

- емкость диодной цепочки при нулевом смещении:  $C^{(0)}=0.0021-0.0028$  пФ;

Экспериментальные образцы имели потери в режиме НУМ 0.7-0.9 дБ, что хорошо согласуется с расчетными значениями рабочих частот прибора ( $L_{\text{расч.}} < 1$  дБ при  $f=92-94$  ГГц).

Монолитные диодные решетки на основе арсенида галлия, используемые в качестве ограничителей мощности, обеспечивают работоспособность при импульсных мощностях 50– 100 Вт, с величиной вносимого затухания в режиме ВУМ на уровне 16 – 18 дБ.

### **Основные результаты работы:**

1. На основе аналитического обзора литературы показано, что для изготовления полупроводниковой элементной базы на основе арсенида галлия необходимы эпитаксиальные структуры с высоким уровнем легирования приконтактных слоев. Это позволяет обеспечить минимальные значения контактных сопротивлений и тем самым уменьшить вклад последних в полное последовательное сопротивление прибора.

2. С применением прикладных пакетов программ проведен расчет и анализ основных характеристик полупроводниковой структуры и прибора в режиме НУМ СВЧ сигнала. На основании полученных данных определены топологические размеры основных элементов р-і-п диода и, в конечном итоге, разработана топология балочного р-і-п диода на основе GaAs.

3. На основании экспериментальных измерений параметров омических контактов к приконтактным эпитаксиальным слоям арсенида галлия р<sup>+</sup>- и п<sup>+</sup>- типа проводимости выбран несплавной омический контакт Сг/Au для р<sup>+</sup>-арсенида галлия (уровень легирования основными носителями заряда  $N_a = (1-2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) и омический контакт AuGe-Ni-Au для п<sup>+</sup>-GaAs (уровень легирования основными носителями заряда  $N_d = 7 \cdot 10^{18} - 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ); Технология формирования омических контактов Сг/Au и AuGe-Ni-Au обеспечивает высокий выход годных тестовых структур (более 90 %), высокую воспроизводимость и может быть использована в технологическом цикле изготовления р-і-п диода на основе арсенида галлия.

5. Разработанная технология изготовления арсенидгаллиевых балочных р-і-п диодов обеспечивает высокий процент выхода годных приборов по электрофизическим параметрам (более 90% пластины). Анализ работы диодов в режиме НУМ показывает, что потери при прохождении СВЧ сигнала составляют 0.6-0.8 дБ, а ограничение в режиме ВУМ равно 12 дБ. Это позволяет использовать планарные р-і-п диоды на основе арсенида галлия в качестве ограничителей мощности в частотном диапазоне 20- 40 ГГц.

6. С применением компьютерных технологий проектирования разработана конструкция монолитного многодиодного ограничителя на основе эпитаксиальных структур ар-

сенида галлия. Определены основные электрофизические параметры ограничителя для заданного диапазона рабочих частот ( $f=75-110$  ГГц). Разработан технологический маршрут изготовления ограничителя, разработана технология формирования пьедестала с заданной толщиной и необходимой механической прочностью;

7. Монолитный многодиодный ограничитель обеспечивает работоспособность при импульсных мощностях 50 – 100 Вт на ВУМ СВЧ-сигнала. При этом потери СВЧ сигнала в ЗУ в режиме НУМ не превышают 1 дБ, а вносимое затухание в режиме ограничения (ВУМ) составляет 16-18 дБ

Таким образом, разработанный р-і-п диод и монолитный диодный ограничитель на основе арсенида галлия могут служить основой для создания элементной базы монолитных интегральных комплексированных устройств, пригодных для радиоэлектронной аппаратуры радиолокационных станций различных классов.

Дальнейшее развитие тематики, представленной в диссертационной работе, следует вести в следующих направлениях:

- материаловедческом, с целью совершенствования эпитаксиального процесса выращивания структур на основе арсенида галлия и тройной системы In-Ga-As (выращивание контактных слоев р<sup>+</sup> и п<sup>+</sup> с концентрацией основных носителей заряда  $\approx 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ );
- конструкторско-технологическом, с целью разработки монолитных диодных ограничителей для диапазона 90-110 ГГц и увеличению активных элементов (р-і-п диодов) в монолитном интегральном исполнении.

Разработанные приборы прошли апробацию в рамках выполнения ряда опытно-конструкторских работ в ЗАО «Светлана-Электронприбор».

**В приложения** включены расчет электрофизических параметров р-і-п диода и монолитного ограничителя, программа расчета электрофизических параметров омических контактов на основе метода «длинной линии», топология планарного р-і-п диода и монолитного ограничителя, а также технологические маршруты изготовления полупроводниковой элементной базы на основе арсенида галлия для ЗУ миллиметрового диапазона длин волн.

#### **Основные публикации по теме диссертации.**

1. Малеев А. Н., Ковш А. Р., Жуков А. Е., Васильев А. П., Михрин С. С., Кузьменков А. Г., Бедарев Д. А., Задиранов Ю. М., Кулагина М. М., Шерняков Ю. М., Шуленков А.

- С., Быковский В. А., Соловьев Ю. В., Moller С., Леденцов Н. Н., Устинов В. М. Конструкция и технология изготовления вертикально излучающих лазеров с непроводящими эпитаксиальными зеркалами// ФТП.- 2003. - т. 37.-в.10. -с. 1265-1269
2. Волков В. В., Иванова В. П., Кузьмичев Ю. С., Лермонтов С. А., Соловьев Ю. В., Баранов Д. А., Кайдаш А. П., Красовицкий Д. М., Павленко М. В., Петров С. И., Погорельский Ю. В., Соколов И. А., Соколов М. А., Степанов М. В., Чалый В. П. Полевые транзисторы на основе гетероструктур AlGaN/GaN полученные методом аммиачной молекулярно - лучевой эпитаксии.//Письма в ЖТФ.- 2004. - т.30. - в.9. - с.63-67
3. Александров С. Е., Волков В. В., Соловьев Ю. В. Применение несплавного омического контакта Cr/Au в технологии изготовления р-і-п диода на основе арсенида галлия //Тез. докл. XII международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и генерация знаний в образовании и науке». СПб, ГОУ ВПО СПбГПУ. - 2005. - с. 319
4. Александров С. Е., Волков В. В., Иванова В. П., Кириллов А. В., Кузьмичев Ю. С., Смирнов В. А., Соловьев Ю. В. Конструкция и технология изготовления монолитного ограничителя на основе арсенида галлия // Тез. докл. XII международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и генерация знаний в образовании и науке». //СПб, ГОУ ВПО СПбГПУ. - 2005. - с. 320
5. Соловьев Ю. В., Волков В. В., Иванова В. П., Кириллов А. В., Кузьмичев Ю. С., Смирнов В. А. Монолитный рп-диодный ограничитель для миллиметрового диапазона// Петербургская Электроника. – 2005. - в.1 (42). – с. 100-105