

На правах рукописи

Конев Владимир Юрьевич

**ФИКСАЦИЯ ФАЗЫ СВЧ-КОЛЕБАНИЙ НАНОСЕКУНДНЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ ГАННА ТРЕХСАНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
ФРОНТОМ МОДУЛИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСА**

01.04.04 – физическая электроника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института сильноточной электроники СО РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник **Климов Алексей Иванович**

Официальные оппоненты:

Гриняев Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра экспериментальной физики

Новиков Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра радиоэлектроники.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск)**

Защита состоится «17» декабря 2015 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 003.031.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники СО РАН по адресу: 634055, Томск, пр. Академический, 2/3, ауд.408

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института сильноточной электроники.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Рыжов Виктор Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Задача стабилизации фазы СВЧ-генераторов является актуальной на протяжении десятилетий. Управление амплитудой и фазой колебаний СВЧ-диапазона используется в системах телевизионного вещания, в радиотехнических устройствах для формирования информационного сигнала, для электронного управления положением радиолуча в пространстве, например, в системах АФАР (активная фазированная антенная решетка), и для решения других задач обеспечения работы электронной аппаратуры [1*,2*]. Улучшение фазовых характеристик источника РЛС, например, позволило бы поднять отношение сигнал/шум всей приемопередающей системы, реализовать режим когерентного накопления сигнала. В частности, полупроводниковые миниатюрные автогенераторы со стабильной фазой могут применяться в качестве источников СВЧ-излучения в приемопередающих модулях АФАР.

Степень разработанности темы исследования. К данному моменту существует несколько способов стабилизации параметров полупроводниковых источников СВЧ-колебаний: 1) использование дополнительного высокодобротного резонатора; 2) синхронизация внешним сигналом; 3) взаимная синхронизация нескольких генераторов; 4) автоподстройка частоты и фазы. К сожалению, эти способы усложняют конструкцию генератора, а также не позволяют фиксировать именно начальную фазу СВЧ-колебаний от импульса к импульсу.

Также известен способ стабилизации фазы импульсных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона крутым фронтом импульса напряжения питания, который был впервые продемонстрирован в 1975 году [3*]. Авторам удалось получить последовательность когерентных радиоимпульсов, генерируемых диодом типа АА703А с импульсной мощностью порядка 20 мВт, расположенном в коаксиальном резонаторе, при подаче на него импульса напряжения с фронтом, равным 150 пс. Несущая частота СВЧ-импульсов равнялась 9.5 ГГц. Таким образом, фронт был порядка периода колебаний.

В [4*] проведено моделирование на аналоговой вычислительной машине с целью объяснения причин привязки начальной фазы СВЧ-колебаний к фронту модулирующего импульса за счет всплеска тока в резонаторе. Но как выяснилось позднее [5*,6*], генераторы Ганна можно синхронизировать при помощи модулирующих импульсов с фронтами значительно длиннее периода колебаний.

В [5*,6*] с помощью этого способа авторы синхронизовали два электродинамически не связанных АДГ (автогенераторы на диоде Ганна), работающих на частоте 9.7 ГГц. Диоды Ганна 3А703 и 3А723 с мощностью 20 мВт, которые использовались в данных работах в качестве нелинейных элементов, возбуждались импульсами напряжения с фронтом порядка 1.5 нс. Стандартное отклонение разности фаз, измеренное двумя способами, не превышало 5°.

Исследуемый способ представляется перспективным с точки зрения простоты конструкции генератора, способного излучать последовательность ко-

герентных радиоимпульсов как от импульса к импульсу, так и в течение длительности импульса.

Цель диссертационной работы. Целью настоящей работы являлось определение наиболее значимых физических процессов в полупроводниковых структурах мощных наносекундных диодов Ганна трехсантиметрового диапазона, обуславливающих наличие механизма фиксации начальной фазы СВЧ-колебаний фронтом модулирующего импульса напряжения.

Задачи диссертационной работы. В соответствии с этим решались следующие задачи:

1. Разработка математического аппарата на основе локально-полевой модели, численное моделирование физических процессов и определение факторов, влияющих на нестабильность начальной фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона.
2. Экспериментальное определение факторов, влияющих на нестабильность фазы СВЧ-колебаний наносекундного генератора трехсантиметрового диапазона на мощном диоде Ганна относительно фронта модулирующего импульса.
3. Экспериментальное определение факторов, влияющих на нестабильность разности фаз СВЧ-колебаний двух наносекундных генераторов трехсантиметрового диапазона на мощных диодах Ганна, возбуждаемых одним модулятором.
4. Экспериментальное определение возможности когерентного сложения в пространстве СВЧ-мощности двух наносекундных генераторов Ганна, возбуждаемых общим модулятором.

Научная новизна.

1. Впервые с использованием разработанного на основе локально-полевой модели полупроводниковой структуры математического аппарата исследовался процесс установления фазы СВЧ-колебаний наносекундного АДГ трехсантиметрового диапазона в процессе их возбуждения. Показано, что начальная фаза СВЧ-колебаний определяется моментом перехода полупроводниковой структуры с выраженной неоднородностью легирования в режим отрицательного дифференциального сопротивления с образованием домена сильного поля. Показано, что нестабильность начальной фазы колебаний определяется нестабильностью фронта и амплитуды модулирующего импульса. Показано, что нестабильность фазы СВЧ-колебаний, обусловленная нестабильностью амплитуды модулирующего импульса, нарастает с удлинением его фронта.
2. Впервые разработаны методы и выполнены измерения нестабильности начальной фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов трехсантиметрового диапазона на мощных диодах Ганна относительно фронта модулирующего импульса.
3. Впервые разработаны методы и выполнены измерения нестабильности разности фаз СВЧ-колебаний двух наносекундных генераторов трехсантиметрового диапазона на мощных диодах Ганна.

4. Впервые выполнены измерения зависимости нестабильности начальной фазы СВЧ-колебаний отдельного генератора, а также разности фаз двух наносекундных генераторов трехсантиметрового диапазона на мощных диодах Ганна от длительности фронта модулирующего импульса. Показано, что с увеличением длительности фронта нестабильность фазы и разности фаз нарастает.

5. Впервые показана возможность когерентного сложения волновых полей двух наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона, возбуждаемых одним источником модулирующих импульсов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Математический аппарат, разработанный на основе локально-полевой модели диода Ганна, может быть использован при анализе импульсных физических процессов в полупроводниковых структурах GaAs.

2. Обнаруженный эффект фиксации фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна моментом перехода полупроводниковой структуры в режим отрицательного дифференциального сопротивления с образованием домена сильного поля может представлять интерес для поиска возможности реализации автогенераторов с фиксированной начальной фазой за счет при условии наличия у них наличия N-образной вольтамперной характеристики и, соответственно, порогового напряжения возбуждения.

3. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований качественной связи нестабильности начальной фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона с нестабильностью фронта и амплитуды модулирующего импульса могут быть использованы при разработке таких генераторов.

4. Результаты по когерентному сложению волновых полей двух наносекундных генераторов Ганна, возбуждаемых общим источником модулирующих импульсов, могут быть использованы при разработке устройств с когерентным сложением волновых полей или мощностей массива таких генераторов, возбуждаемых импульсом напряжения общего модулятора или нескольких синхронизованных модуляторов, которые формируют воспроизводимые модулирующие импульсы.

5. Разработанные методы исследования когерентности СВЧ-излучения двух наносекундных генераторов Ганна с фиксацией фазы импульсом напряжения одного модулятора могут быть использованы при изучении когерентности других генераторов, например, ламп обратной волны, с фиксацией фазы СВЧ-колебаний модулирующим импульсом.

Методология и методы исследования. Для теоретического изучения физических процессов, происходящих при возбуждении полупроводниковой структуры наносекундным импульсом напряжения и установления фазы СВЧ-колебаний, был использован разработанный в процессе исследований математический аппарат, основанный на общеизвестной локально-полевой модели диода Ганна, дополненной уравнениями Кирхгофа для цепи колебательного контура автогенератора. Все численные расчеты проводились в среде Matlab 2014a.

Эксперименты по измерению стандартного отклонения фазы СВЧ-колебаний генератора Ганна относительно фронта модулирующего импульса, а также по измерению стандартного отклонения разности фаз двух генераторов Ганна проводились при помощи метода фазового детектора и метода временных интервалов. В методе временных интервалов использовались два современных осциллографа Tektronix 6154C с рабочей полосой до 15 ГГц и LeCroy WaveMester 830Zi с рабочей полосой до 30 ГГц. Эксперименты по измерению стандартного отклонения разности фаз двух генераторов Ганна выполнялись таким образом, чтобы исключить влияние одного генератора на другой посредством электродинамической связи между ними.

Измерение суммарного волнового поля двух автогенераторов Ганна выполнялось в дальней зоне в безэховой камере, что исключало влияние отражений на итоговый результат. Исследование возможности когерентного суммирования СВЧ-мощности двух электродинамически развязанных, синхронизованных модулирующим импульсом напряжения генераторов Ганна выполнялась посредством измерения диаграммы направленности каждого из генераторов, а также их суммарной диаграммы направленности и сравнения этой диаграммы направленности с суммарной диаграммой направленности образцовых излучателей.

Положения, выносимые на защиту.

1. На основе результатов численного моделирования процессов возбуждения генераторов на диодах Ганна с полупроводниковой структурой из GaAs показано, что необходимым условием генерации импульсов СВЧ-колебаний со стабильной начальной фазой является наличие профиля легирования с минимумом концентрации доноров вблизи катода.
2. В численном моделировании показано, что начальная фаза СВЧ-колебаний наносекундных генераторов на диодах Ганна трехсантиметрового диапазона, полупроводниковая структура которых имеет минимум концентрации доноров вблизи катода, соответствует моменту возникновения режима отрицательного дифференциального сопротивления и образованию домена сильного поля. Эксперименты с генераторами на диодах Ганна типа 3A762 показали возможность фиксации фазы СВЧ-колебаний относительно точки запуска осциллографа на фронте модулирующего импульса. Нестабильность фазы относительно момента запуска осциллографа характеризуется стандартным отклонением 7.2° при длительности фронта модулирующего импульса 4.5 нс.
3. В численном моделировании показано, что независимо от нестабильности фронта модулирующего импульса с увеличением длительности фронта основным фактором, приводящим к росту нестабильности фазы СВЧ-колебаний, является нестабильность амплитуды импульса. В экспериментах при увеличении длительности фронта от 4.5 нс до 15 нс характер СВЧ-генерации изменялся от состояния, характеризуемого регулярной фазовой структурой, до состояния с полным нарушением фиксации фазы.
4. Экспериментально показана возможность фиксации разности фаз фронтом модулирующего импульса двух электродинамически развязанных нано-

секундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона, подключенных параллельно к общему модулятору. Стандартное отклонение разности фаз двух таких генераторов составило 9° в течение всего радиоимпульса длительностью 20 нс, при длительности фронта модулирующего импульса напряжения на СВЧ-блоке каждого генератора 6.5 нс. В дальней зоне наблюдается когерентное сложение полей двух таких генераторов.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается их регулярной воспроизводимостью, наблюдавшейся в процессе исследований, а также соответствием результатов результатам выполненного анализа литературных данных, в частности, результатам работ-прототипов. Достоверность подтверждается, также, качественным соответствием результатов численного моделирования и экспериментов.

Основное содержание диссертационной работы отражено в 10 печатных работах, включая 6 статей в отечественных журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты работы докладывались на международной научной конференции “Современные техника и технологии 2009”, (Томск, Россия), на международной конференции “Научная сессия ТУСУР – 2010”, (Томск, Россия), на “15 Международном симпозиуме по сильноточной электронике 2010”, (ИСЭ СО РАН, Томск, Россия), на международной научной конференции “Актуальные проблемы радиофизики 2012”, (Томск, Россия), на “17 Международном симпозиуме по сильноточной электронике 2012”, (ТПУ, Томск, Россия), на международной научной конференции “2013 23rd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2013)”, (Севастополь), на международной научной конференции “2013 21st Telecommunications Forum (TELFOR)”, (Beograd, Serbia), в сетевом издании «Южно-Сибирский научный вестник».

Кроме того, результаты работы опубликованы в отчетах по грантам РФФИ №12-08-31171_мол-а и №11-08-00041-а, в которых автор диссертации являлся руководителем и исполнителем соответственно.

Личный вклад автора заключается в участии в обсуждении и постановке задач и результатов работы, а также в подготовке их к публикациям, в участии в разработке математического аппарата, необходимого для выполнения компьютерного моделирования, в выполнении расчетов, связанных с компьютерным моделированием, в разработке методик для проведения экспериментов, а также в личном их выполнении. Совместно с Кожевниковым В. Ю. и Климовым А. И. и Козыревым А.В. разрабатывался математический аппарат на основе локально-полевой модели диода Ганна, позволяющий исследовать процесс возбуждения СВЧ-колебаний в наносекундных генераторах Ганна. Совместно с Губановым В.П., Ковальчуком О.Б., Климовым А.И. разрабатывался источник модулирующих импульсов. Совместно с Климовым А.И. выполнялись измерения спектральных характеристик наносекундных генераторов Ганна.

Структура и объём работы Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. В работе приводится

81 рисунок и 3 таблицы. Библиография содержит 58 наименований. Общий объем работы составляет 126 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задач, поставленных перед диссертационной работой, описаны цели исследования, приведены защищаемые положения, научная новизна, показано практическое применение и дана общая характеристика диссертационной работы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору литературы, затрагивающему теорию автогенераторов, теорию эффекта Ганна, а также теорию синхронизации СВЧ-генераторов. В первом параграфе главы представлена краткая теория автогенераторов, мягкого и жесткого режимов возбуждения автогенераторов, перечислены необходимые условия для возникновения колебаний в них. Во втором параграфе перечислены известные способы снижения фазовых шумов автогенераторов. Применительно к АДГ описан способ стабилизации фазы фронтом модулирующего импульса, представлены работы-прототипы. В третьем параграфе описана двухдолинная модель полупроводниковой структуры диода Ганна (ДГ). Описаны необходимые условия возникновения СВЧ-колебаний в диодах Ганна. В четвертом параграфе рассмотрены основные режимы работы генераторов Ганна, образованных включением диода Ганна в схему с резистивной нагрузкой или в схему с колебательным контуром. В заключительном пятом параграфе перечислены известные модели диода Ганна, использующиеся в численных расчетах: локально-полевая модель (ЛП-модель), мощностная модель, двухтемпературная модель. Указаны границы применимости моделей. Показано, что из всех моделей наиболее подходящей является ЛП-модель, как наиболее простая и изученная, удовлетворяющая требуемым условиям поставленных задач.

В конце главы отмечается необходимость исследования влияния внутренних и внешних шумов генераторов Ганна на установление начальной фазы СВЧ-колебаний, показываются трудности, связанные с известными способами стабилизации фазы генераторов Ганна. Формулируются задачи диссертационной работы.

Во второй главе детально описывается локально-полевая модель полупроводниковой структуры диода Ганна, основанная на эффекте междолинного переноса электронов в соединении элементов групп III и V таблицы Менделеева.

Границы применимости модели обуславливаются принятыми в ней допущениями: 1) средняя дрейфовая скорость электронов зависит от мгновенного значения электрического поля; 2) коэффициент диффузии не зависит от приложенного электрического поля. Следует отметить, что первое допущение выполняется не всегда [7*]. В [8*] были определены границы применимости ЛП-модели для полупроводниковых приборов с переносом электронов. Границами применимости ЛП-моделей для арсенида галлия можно считать длину области взаимодействия "...более 0.5 мкм и временной масштаб 1.25 пс...".

Второе допущение, связанное с постоянством коэффициента диффузии, не приводит к каким-либо заметным ограничениям применимости модели [7*].

В рамках ЛП-модели полупроводниковая структура диода Ганна рассматривается как кристалл арсенида галлия (GaAs) электронной проводимости [7*] с двумя омическими контактами на противоположных гранях.

По аналогии с диодами с $p-n$ переходами электроды ДГ с учетом конкретного распределения донорных примесей вдоль структуры называются катодом и анодом. К катоду подключается отрицательный полюс источника напряжения, а к аноду – положительный, хотя генерация колебаний может возникать и при обратной полярности.

К числу основных параметров ДГ относятся следующие:

n_0 – концентрация примесей в активной области структуры;

μ_a – подвижность электронов в слабом электрическом поле (при напряжениях на ДГ существенно меньше порогового);

$L_{ДГ}$ – длина активной области структуры;

$S = \pi d^2 / 4$ – площадь структуры (контакта), где d – диаметр структуры;

$U_{пор}$ – пороговое напряжение;

$I_{пор}$ – пороговый ток;

$R_0 = U_{пор} / I_{пор}$ – сопротивление ДГ в слабом поле;

$C_0 = \epsilon_a S / L_{ДГ}$ – статическая емкость диода, где $\epsilon_a = \epsilon \epsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость GaAs, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф / м – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\epsilon = 12,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость GaAs.

Вольт-амперная характеристика ДГ имеет N -образный вид.

Для более простого, но вполне достаточного, описания процессов [7*] предполагается, что в плоскости поперечного сечения структуры плотность тока и электрическое поле постоянны. При таком допущении уравнения становятся одномерными.

Суть численного моделирования заключалась в решении уравнения:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = D \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - V(E) \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{e}{\epsilon_a} D \frac{\partial n_0}{\partial x} - \frac{e}{\epsilon_a} n_0 V(E) + \frac{I}{\epsilon_a S} \quad (1)$$

для электрического поля $E(x,t)$, вывод которого показан в [7*].

Нелинейные свойства диода в (1) учитываются зависимостью скорости электронов V от электрического поля E : $V = V(E)$.

Уравнение (1) решается в области $0 \leq x \leq L_{ДГ}$ на временной шкале t в необходимых пределах.

В ходе расчетов профили легирования полупроводниковой структуры выбирались двух типов: а) однородный профиль легирования с прямоугольной выемкой (снижением концентрации донорной примеси) со стороны катода, б) профиль легирования с градиентом.

В структуре с однородным профилем легирования начальная флуктуация поля и, следовательно, возникновение домена инициировались вводом выемки со снижением концентрации доноров на 10 % от постоянного уровня концентрации n_0 . Ширина выемки равна 10 мкм, и она расположен на расстоянии 10 мкм от катода. В расчетах принимались следующие значения характери-

стик полупроводника: концентрация донорных примесей $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация донорных примесей в области выемки $0.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Неоднородный профиль легирования представлен на рисунке 1. В этом случае домен инициировался наличием резкого перепада концентрации доноров в прикатодной области.

Во всех случаях диаметр исследованной полупроводниковой структуры составлял 300 мкм, длина равнялась 12.5 мкм, подвижность $\mu_a = 8000 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Коэффициент диффузии считался постоянным, $D = 200 \text{ см}^2 / \text{с}$, и не зависящим от электрического поля, поскольку учет зависимости $D(E)$ не приводит к качественно отличающимся результатам [7*]. Во всех расчетах форма импульса напряжения питания задавалась трапецеидальной. Она изображена на рисунке 2.

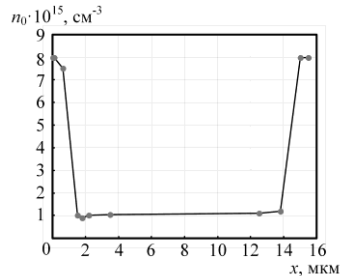


Рисунок 1 – Профиль легирования с градиентом, используемый при моделировании

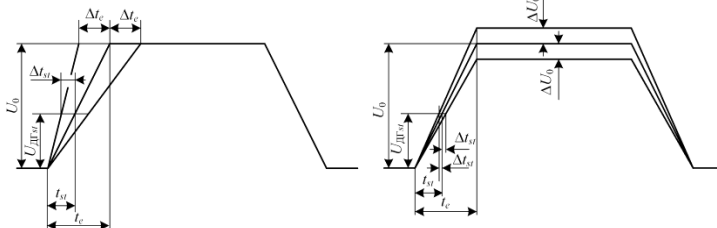


Рисунок 2 – Форма импульса модулирующего напряжения, использованная в расчетах: $U_{дг\text{sr}}$ – напряжение, при котором ДГ начинает генерировать СВЧ-колебания; U_0 – амплитуда модулирующего импульса; ΔU_0 – разброс амплитуды модулирующего импульса; t_{sr} – временная точка на фронте, на которой происходит возникновение СВЧ-колебаний; t_e – длительность фронта; Δt_{sr} – разброс момента старта СВЧ-колебаний; Δt_e – разброс длительности фронта

На первом этапе выполнялось моделирование для простейшей внешней электрической цепи АДГ, включавшей ДГ, источник (модулятор M) импульсного напряжения $U_0(t)$ и ограничительное сопротивление R (нагрузку). Сопротивление нагрузки $R = 1 \text{ Ом}$.

Для учета влияния электрического СВЧ-поля резонатора на процессы в полупроводниковой структуре генераторного диода цепь АДГ дополнялась колебательным контуром (рисунок 3), учитывающим основные особенности электродинамической системы реального АДГ.

В процессе вычислений была выпол-

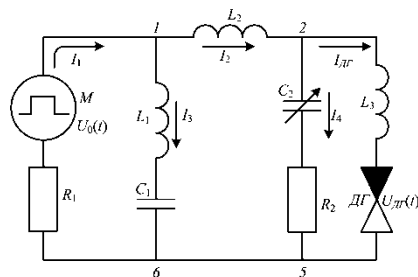


Рисунок 3 – Схема замещения генератора на диоде Ганна с учетом его электродинамической системы

нена некоторая предварительная оптимизация параметров схемы замещения (рисунок 3) с целью получения достаточно выраженных синусоидальных колебаний на нагрузке R_2 с частотой около 10 ГГц.

Резистор R_2 представляет нагрузку колебательного контура и учитывает отбираемую СВЧ-мощность и потери в электродинамической системе. $I_{ДГ}$ – ток через ДГ. В случае однородного профиля полупроводниковой структуры: $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 0.5$ Ом, $L_1 = 0.5$ нГн, $C_1 = 0.5$ пФ, $L_2 = 1.2$ нГн, $C_2 = 1.2$ пФ, $L_3 = 0.5$ нГн. Для профиля с градиентом: $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 0.5$ Ом, $L_1 = 0.5$ нГн, $C_1 = 0.5$ пФ, $L_2 = 1.0$ нГн, $C_2 = 1.0$ пФ, $L_3 = 0.6$ нГн.

В обоих случаях моделирование выполнялось в среде Matlab 2014a.

Основная задача численных экспериментов сводилась к определению влияния нестабильности фронта и амплитуды импульса напряжения питания Δt_e на величину разброса начальной фазы СВЧ-колебаний тока ДГ Δt_{ph} . Фронт импульса модулирующего напряжения изменялся на величину $\Delta t_e = \pm 0.05$ нс относительно среднего значения $t_e = 1$ нс, при этом вычислялся разброс начальной фазы СВЧ-колебаний. Форма СВЧ-колебаний тока ДГ в случае однородного профиля легирования оказалась практически такой же, как и в случае неоднородного профиля как в случае схемы с резистивной нагрузкой, так и в случае схемы с колебательным контуром. При изменении длительности фронта $t_e = 1$ нс на величину $\Delta t_e = \pm 0.05$ нс, в случае однородного профиля, схемы с резистивной нагрузкой начальная фаза колебаний тока имеет разброс $\Delta t_{ph} = \pm 0.016$ нс. В АДГ с колебательным контуром рассчитанные значения отклонения фазы составили $\Delta t_{ph} = \pm 0.023$ нс. Заметными также оказались колебания тока резистора R_2 до момента возникновения СВЧ-колебаний, обусловленных переходом полупроводниковой структуры в режим отрицательного дифференциального сопротивления. Эти колебания в качестве примера показаны на рисунке 4 для случаев $t_e = 0.95$ нс (1), $t_e = 1.0$ нс (2), $t_e = 1.05$ нс (3) в схеме с однородной структурой. Эти колебания вызваны так называемым «ударным возбуждением» колебательного контура фронтом импульса напряжения, которое приводит к возникновению колебаний на нагрузке с малой амплитудой.

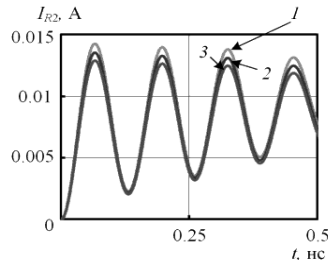


Рисунок 4 – Колебания тока на нагрузке R_2 , вызванные «ударным» возбуждением колебательного контура в АДГ с колебательным контуром: 1 – $t_e = 0.95$ нс, 2 – $t_e = 1$ нс, 3 – $t_e = 1.05$ нс. Профиль легирования однородный

Как видно из рисунка 4, чем выше скорость нарастания напряжения на ДГ, dU/dt , тем амплитуда колебаний, вызванных перепадом напряжения в контуре («ударное» возбуждение контура), больше.

Колебания, вызванные «ударным» возбуждением колебательного контура, обнаруживаются только на нагрузке R_2 (рисунок 3). Ни на графике напряжения, ни на графике тока самого ДГ этих колебаний обнаружено не было, а, значит, они не влияют на установление начальной фазы СВЧ-колебаний.

В схеме АДГ с резистивной нагрузкой выполнялись более детальные расчеты отклонения фазы Δt_{ph} СВЧ-колебаний при фиксированной амплитуде модулирующего импульса $U_0 = 20$ В и вариации длительности его фронта $\Delta t_e = \pm 0.05$ нс. При этом длительность t_e самого фронта изменялась в пределах от 0.5 до 2 нс с шагом 0.5 нс. Зависимости разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta t_e = \pm 0.05$ нс представлены на рисунке 5 и рисунке 6 соответственно.

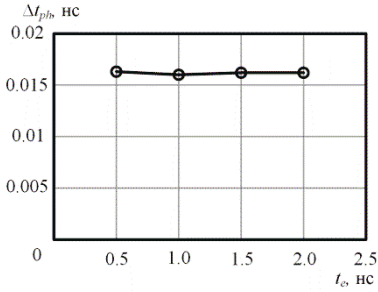


Рисунок 5 – Зависимость разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta t_e = \pm 0.05$ нс ДГ. $U_0 = 20$ В. Профиль легирования однородный.

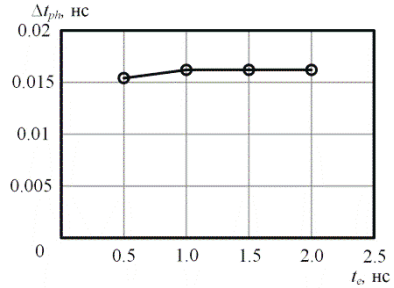


Рисунок 6 – Зависимость разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta t_e = \pm 0.05$ нс ДГ. $U_0 = 20$ В. Профиль легирования неоднородный

Видно, что Δt_{ph} практически не зависит от t_e .

При таком же изменении длительности фронта и $\Delta t_e = 0$ изменялась амплитуда импульса в пределах $U_0 = 20 \text{ В} \pm 1$ В. Зависимости разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta U_0 = \pm 1$ В представлены на рисунках 7 и 8.

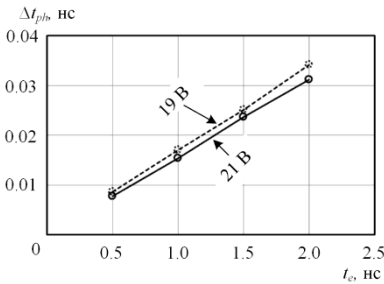


Рисунок 7 – Зависимость разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta U_0 = \pm 1$ В ДГ, $\Delta t_e = 0$. Профиль легирования однородный

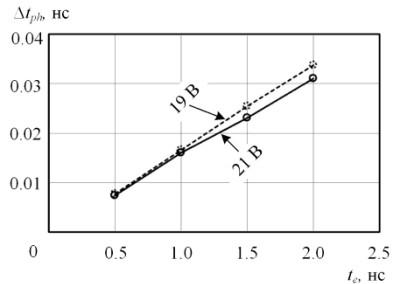


Рисунок 8 – Зависимость разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta U_0 = \pm 1$ В ДГ, $\Delta t_e = 0$. Профиль легирования неоднородный

Видно, что отклонение фазы при $U_0 = 21$ В несколько меньше, чем при $U_0 = 19$ В. Поэтому на графиках изображены 2 линии. Это обусловливается тем обстоятельством, что при увеличении U_0 на 1 В, точка на фронте, в которой возбуждаются СВЧ-колебания U_{st} (рисунок 2) отклоняется меньше, чем в случае уменьшения U_0 на 1 В.

Результаты таких же расчетов для схемы с колебательным контуром представлены на рисунках 9,10,11 и 12.

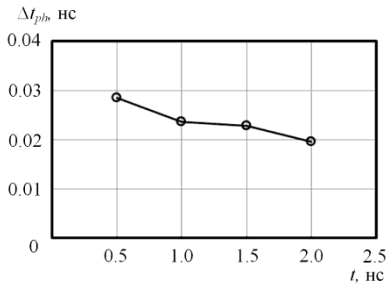


Рисунок 9 – Зависимость разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta t_e = \pm 0.05$ нс. Профиль легирования однородный. $U_0 = 20$ В

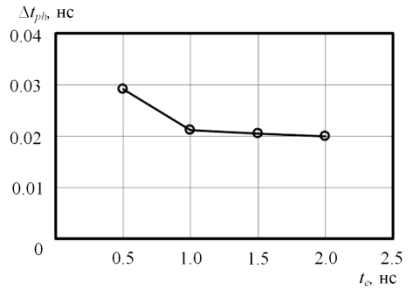


Рисунок 10 – Зависимость разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta t_e = \pm 0.05$ нс. Профиль легирования неоднородный. $U_0 = 20$ В

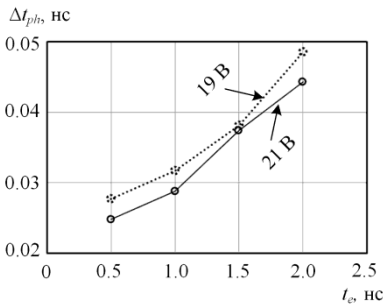


Рисунок 11 – Зависимость разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta U_0 = \pm 1$ В, $\Delta t_e = 0$. Профиль легирования однородный

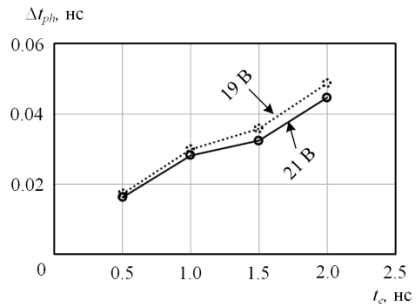


Рисунок 12 – Зависимость разброса фазы от длительности фронта импульса при $\Delta U_0 = \pm 1$ В, $\Delta t_e = 0$. Профиль легирования неоднородный

Видно, что разброс фазы с удлинением фронта модулирующего импульса при его постоянной амплитуде не только не нарастает, а даже несколько спадает. Последнее, по-видимому, может объясняться некоторой зависимостью процесса возбуждения колебаний от длительности фронта. Видно, что, как и в случае схемы с резистивной нагрузкой и по тем же причинам, отклонение фазы при $U_0 = 21$ В несколько меньше, чем при $U_0 = 19$ В. В отличие от схемы с резистивной нагрузкой в данном случае, как показывают расчеты, имеет место дополнительный сдвиг фазы, увеличивающий ее разброс и связанный с некоторым изменением переходного процесса при изменении амплитуды модулирующего импульса.

На основании результатов, полученных в численном моделировании АДГ с колебательным контуром (как и в случае АДГ с резистивной нагрузкой), можно сделать вывод о том, что основным фактором, определяющим рост нестабильности фазы СВЧ-колебаний с ростом длительности фронта моду-

лирующего импульса, является нестабильность его амплитуды. При стабильной амплитуде импульса можно генерировать колебания со стабильной фазой при длительности фронта, существенно превышающей период колебаний. Этот результат может иметь существенное значение при определении характеристик модуляторов для массивов импульсно синхронизованных по фазе генераторов Ганна.

В третьей главе описывается устройство наносекундных АДГ трехсантиметрового диапазона, включая резонаторную камеру и источник модулирующих импульсов напряжения. Представлены методики экспериментов по измерению стандартного отклонения разности фаз $\sigma_{\delta t}$ двух генераторов Ганна, подключенных параллельно к одному источнику модулирующих импульсов посредством полосковых линий, а также стандартного отклонения σ_t фазы одного генератора по отношению к фронту модулирующего импульса.

Измерения стандартного отклонения разности фаз $\sigma_{\delta t}$ двух генераторов Ганна проводились тремя методами: 1) методом временных интервалов, 2) методом фазового детектора, который включает в себя метод суммарного детектированного сигнала и метод суммарного радиосигнала. На рисунках 13–15 представлены схемы экспериментов.

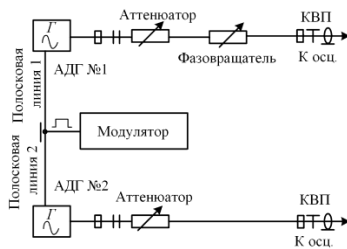


Рисунок 13 – Схема измерений σ_t , $\sigma_{\delta t}$ СВЧ-колебаний двух наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона методом временных интервалов: КВП – коаксиально-волноводный переход



Рисунок 14 – Схема измерений стандартного отклонения разности фаз $\sigma_{\delta t}$ СВЧ-колебаний двух наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона методом измерения амплитуды суммарного детектированного сигнала

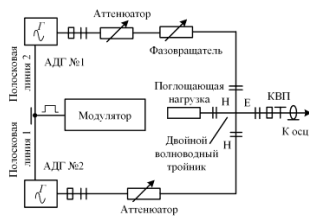


Рисунок 15 – Схема эксперимента по измерению погрешности среднеквадратичного отклонения разности фаз $\sigma_{\delta t}$ СВЧ-колебаний двух генераторов Ганна

Во всех случаях генераторы подключались к модулятору посредством полосковых линий с волновым сопротивлением $\rho \approx 6$ Ом, изготовленных из фольгированного стеклотекстолита, длиной ~ 120 см. Двойное время пробега импульса напряжения и СВЧ-импульса по каждой из линий составляло

~20 нс. Таким способом предотвращалось попадание СВЧ-колебаний из резонатора одного АДГ в резонатор другого АДГ в течение всего радиоимпульса. Кроме того, исключалось влияние ДГ, как нелинейной нагрузки, на модулятор, поскольку в течение 20 нс он оставался нагружен на активное сопротивление полосковых линий. В волноводные линии АДГ устанавливались волноводные аттенюаторы Д5-1, которые позволяли выравнять амплитуду СВЧ-колебаний между собой. Фазовращатель позволял вводить дополнительную фазовую задержку в одном канале относительно другого. Частота генерации обоих АДГ устанавливалась равной 10 ГГц при помощи волноводного полосового фильтра [9*]. Частота следования радиоимпульсов равнялась 5 кГц.

В экспериментах, выполненных по схеме, изображенной на рисунке 13, использовались широкополосные цифровые осциллографы Tektronix TDS6154C с рабочей полосой 15 ГГц и LeCroy WaveMaster 830Zi с рабочей полосой 30 ГГц и частотой дискретизации сигнала 40 Гс / с. Осциллографы запускались на фронте импульса модулирующего напряжения. Измерялась временная задержка между радиосигналами. Набиралась статистика по более, чем 1000 импульсов и вычислялось стандартное отклонение времени задержки $\sigma_{\delta t}$. При исследовании факторов, влияющих на измеряемую величину в методе временных интервалов, было обнаружено, что минимальное значение измеряемого стандартного отклонения фазы СВЧ-колебаний относительно фиксированной точки на фронте модулирующего импульса и разности фаз двух наносекундных генераторов Ганна составляет около 1 пс.

Эксперименты, схемы которых изображены на рисунках 14, 15, выполнялись в режимах, когда усредненное значение разности фаз СВЧ-импульсов генераторов равнялось $\pi/2$. При этом, в первом случае на экране осциллографа Tektronix TDS 5104B наблюдалась удвоенная амплитуда детектированного сигнала, по сравнению со случаем, когда в схеме работал только один АДГ. Во втором случае, амплитуда суммарного радиосигнала, который регистрировался осциллографом Tektronix TDS6154C, в 1.4 раза превышала амплитуду сигнала одного генератора при выключенном втором. В ходе выполнения экспериментов набиралась статистика по более, чем 100 импульсов. Затем, с использованием формул (2) и (3) определялось стандартное отклонение разности фаз двух генераторов $\sigma_{\delta\varphi}$. Для детектированного сигнала:

$$\sigma_{\delta\varphi} = \frac{\sigma_{U_{\Sigma 0i}}}{2U_0}, \quad (2)$$

где $\sigma_{U_{\Sigma 0i}}$ – стандартное отклонение амплитуды суммарного детектированного сигнала; U_0 – амплитуда сигнала одного генератора. Для радиосигнала:

$$\sigma_{\delta\varphi} \approx \sqrt{2} \frac{\sigma_{U_{\Sigma 0i}}}{U_0}, \quad (3)$$

где $\sigma_{U_{\Sigma 0i}}$ – стандартное отклонение амплитуды суммарного радиосигнала; U_0 – амплитуда радиосигнала одного генератора.

Метод фазового детектора, в отличие от метода временных интервалов, исключает влияние временного джиттера осциллографа на измеряемую величину.

Измерение стандартного отклонения фазы σ_i одного генератора по отношению к фронту модулирующего импульса выполнялось методом временных интервалов еще и по схеме, изображенной на рисунке 16. Измерения проводились как в случае, когда в резонаторе располагался один ДГ, так в случае двух диодов, включенных последовательно.

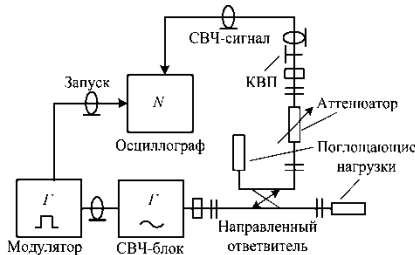


Рисунок 16 – Схема измерения стандартного отклонения времени задержки фазы СВЧ-колебаний генератора Ганна относительно фиксированной точки на фронте импульса напряжения на СВЧ-блоке

По данной схеме эксперименты выполнялись с осциллографом LeCroy WaveMaster 830Zi. Осциллограф запускался фронтом импульса напряжения на СВЧ-блоке. Измерения стандартных отклонений проводились при помощи специальной функции «Delay» математического аппарата осциллографа. Было обнаружено, что на измеряемую величину существенное влияние оказывали настройки осциллографа, такие как: полоса и чувствительность канала запуска.

Также в данной главе описаны процедуры измерения с использованием волноводного полосового перестраиваемого фильтра спектральных характеристик генерируемых СВЧ-импульсов. Измерение несущей частоты имело существенное значение для точной настройки режима генерации. А измерение нестабильности несущей частоты представляло интерес для оценки возможного вклада в нестабильность фазы СВЧ-колебаний.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов, а также методика измерения суммарного волнового поля в дальней зоне двух электродинамически развязанных наносекундных АДГ трехсантиметрового диапазона, возбуждаемых одним модулятором.

На рисунке 17 изображены по 2500 осциллограмм СВЧ-колебаний и модулирующего импульса напряжения, наложенных друг на друга, для случая, когда в резонаторе располагался один диод Ганна и два, включенные последовательно, соответственно. Измерения проводились по схеме, изображенной на рисунке 16. Измерялось стандартное отклонение времени задержки фазы СВЧ-колебаний наносекундного АДГ относительно фиксированной точки на

фронте модулирующего импульса. В случае, когда в СВЧ-блоке размещался один ДГ σ_t составило 2.1 пс, в случае, когда два ДГ $\sigma_t=0.8$ пс. На шкале градусов эти величины составляют 7.6° и 2.9° соответственно. Уменьшенное значение σ_t для двух ДГ по сравнению с одним ДГ, по-видимому, может объясняться тем обстоятельством, что при включении последовательно двух диодов Ганна в резонаторе амплитуда модулирующего импульса возрастает практически в два раза, в то время как абсолютная нестабильность амплитуды, которая может оказывать существенное влияние на нестабильность фазы СВЧ-колебаний (рисунок 2), практически не изменяется.

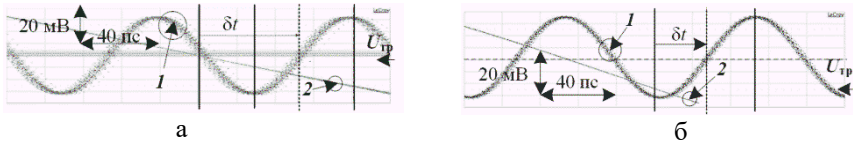


Рисунок 17 – Статистическая выборка из 2500 осциллограмм СВЧ-сигнала наносекундного генератора Ганна (1), а также аналогичная (2500 осциллограмм) выборка модулирующего импульса напряжения (2) в случае одного ДГ (а) и двух ДГ (б) в СВЧ-блоке, включенных последовательно. Рабочая полоса канала модулирующего напряжения – 1 ГГц, рабочая полоса канала СВЧ-колебаний – 13 ГГц, $U_{тр}=513$ мВ

Для определения влияния величины dU/dt на участке фронта модулирующего импульса, предшествующего возбуждению СВЧ-колебаний на значение σ_t был проведен следующий эксперимент [8]. В электрическую схему между модулятором и резонатором впаивались чип-индуктивности номиналом 8.2 нГн и 82 нГн и регистрировалось напряжение на ДГ. Минимальное измеренное значение σ_t в первом случае (когда чип-индуктивность отсутствовала) оказалось равно 2.4 пс, во втором – 14.5 пс, в третьем стабилизация фазы нарушалась. При этом, $dU_1/dt=23.9$ В/нс, $dU_2/dt=12.7$ В/нс, $dU_3/dt=5.5$ В/нс.

На рисунке 18 показаны синхронизированные осциллограммы радиосигналов двух АДГ, подключенных параллельно к одному источнику модулирующих импульсов посредством полосковых линий. Осциллограммы зарегистрированы по схеме, приведенной на рисунке 13.

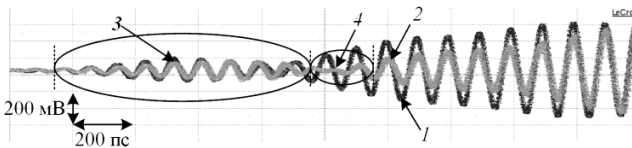


Рисунок 18 – Статистическая выборка из 2500 осциллограмм СВЧ-колебаний АДГ № 1 (1), АДГ №2 (2). 3 – временной интервал радиосигнала, который соответствует «ударному возбуждению» резонаторной камеры, 4 – интервал, который соответствует сбою фазы одного из генераторов

Осциллограммы демонстрируют установление синфазности СВЧ-колебаний при переходе полупроводниковых структур ДГ в режим отрицательного дифференциального сопротивления (домена сильного поля, участок 4).

Результаты измерений $\sigma_{\delta t}$ тремя способами, схемы которых показаны на рисунках 15, 16, 17 оказались приблизительно одинаковыми, $\sigma_{\delta t} \sim 1.6$ пс.

Исследована возможность когерентного сложения волновых полей двух АДГ с длительностью СВЧ-импульса ~ 20 нс, подключенных параллельно к одному источнику модулирующих импульсов посредством полосковых линий. Выполнено сравнение интерференционной картины суммарного волнового поля этих генераторов с суммарным полем двух образцовых когерентных источников СВЧ-излучения, образованных делением мощности стандартного генератора Г4-83. Схемы экспериментов изображены на рисунках 20, 21 соответственно. Измерения выполнялись на частоте 10 ГГц.

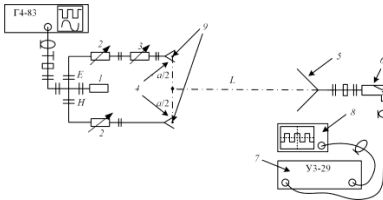


Рисунок 20 – Схема измерения распределения суммарного поля в дальней зоне образцовых источников: 1 – согласованная нагрузка, 2 – аттенюаторы, 3 – фазовращатель, 4 – передающие рупоры, 5 – приемный рупор, 6 – полупроводниковый детектор, 7 – осциллограф

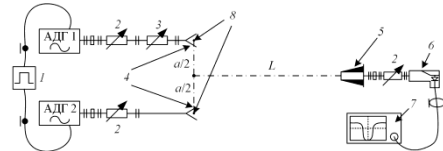


Рисунок 21 – Схема измерения распределения суммарного поля двух АДГ: 1 – модулятор, 2 – аттенюаторы, 3 – фазовращатель, 4 – передающие рупоры, 5 – приемная волноводная антенна, 6 – полупроводниковый детектор, 7 – осциллограф

Результаты измерений представлены на рисунке 22.

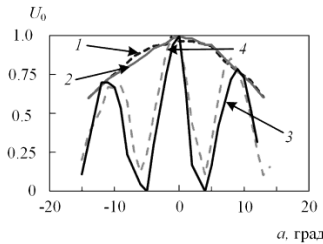


Рисунок 22 – Результат измерения волнового поля каждого рупора в отдельности (1, 2), а также их суммарного поля (3) и двух наносекундных АДГ (4)

Видно, что суммарное волновое поле двух генераторов Ганна, синхронизированных модулирующим импульсом, в дальней зоне представляет собой когерентную картину, близкую к той, которая формируется с помощью генератора стандартных сигналов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. В отличие от предшествующих работ, показано, что для возникновения СВЧ-генерации в наносекундном генераторе на мощном диоде Ганна трехсантиметрового диапазона не требуются внутренние шумы, а начальная фаза колебаний жестко привязана к моменту достижения порогового напряжения, связанного с переходом полупроводниковой структуры ДГ в режим

образования домена сильного поля. Обнаружены колебания, вызванные «ударным» возбуждением резонатора модулирующим импульсом, с амплитудой на порядки меньше амплитуды колебаний, вызванных переходом полупроводниковой структуры в режим отрицательного дифференциального сопротивления. В численном моделировании «ударно» возбуждаемые колебания наблюдаются только на нагрузке, имитирующей выходной волновод, но не на диоде Ганна. Показано, что такие колебания не могут существенно влиять на установление фазы СВЧ-колебаний.

В выполненных экспериментах не удалось обнаружить влияние шумов полупроводниковой структуры, способных повлиять на начальную фазу СВЧ-колебаний.

Полученные экспериментальные результаты находятся в качественном соответствии с изложенными результатами численного моделирования. В частности, в экспериментах показано, что при увеличении длительности фронта модулирующего импульса стандартное отклонение фазы СВЧ-колебаний генератора Ганна относительно фиксированной точки на фронте нарастает вплоть до полного разрушения фазовой картины. В экспериментах с генератором на двух диодах Ганна, включенных последовательно, показана возможность снижения стандартного отклонения фазы СВЧ-колебаний по сравнению со случаем включения одного диода Ганна.

Показана возможность когерентного сложения СВЧ-мощности двух электродинамически независимых наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона, запускаемых от общего источника модулирующих импульсов. Суммарное поле двух таких генераторов в дальней зоне практически совпадает с суммарным полем двух образцовых источников СВЧ-колебаний.

Обнаруженный эффект и результаты измерения нестабильности фазы создают предпосылки для когерентного суммирования СВЧ-мощности генераторов Ганна. Для этого требуется простой механизм синхронизации фазы – импульсом напряжения общего модулятора или нескольких синхронизованных модуляторов, которые формируют воспроизводимый модулирующий импульс без строгого ограничения на длительность его фронта.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. **Губанов, В.П. Наносекундный генератор Ганна трехсантиметрового диапазона [Текст] / В.П. Губанов, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, В.Ю. Конев, В.В. Ростов // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – №5. – С. 95–98.**
2. **Конев, В.Ю. Фазовая синхронизация наносекундных генераторов Ганна [Текст] / В.Ю. Конев, В.П. Губанов, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, В.В. Ростов, К.А. Шарыпов, М.И. Яландин // Приборы и техника эксперимента. –2011. –№ 6. – С. 37–40.**

3. **Конев, В.Ю.** Фиксация фазы наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона [Текст] / В.Ю. Конев, А.И. Климов // Известия вузов. Физика. – 2012. – №8/2. – С. 308–309.
4. **Konev, V.Yu.** Phase Fixation of Nanosecond High-Power Gunn Oscillator [Текст] / V.Yu. Konev, A.I. Klimov, V.P. Gubanov, O.B. Kovalchuk, V.V. Rostov. Phase Fixation of Nanosecond High-Power Gunn Oscillator // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т.55. – №10/3 – Р. 203–204.
5. **Конев, В.Ю.** Эффект стабилизации фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна [Текст] / В.Ю. Конев, В.П. Губанов, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.А. Торхов // Письма в ЖТФ. – 2013. – № 39. – С. 45–51.
6. **Конев, В.Ю.** Стабилизация фазы СВЧ-колебаний наносекундной длительности в генераторе на диоде Ганна [Текст] / В.Ю. Конев, В.П. Губанов, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, вып. 3. – С. 103-109.

Статьи в сборниках статей и трудов конференций

7. **Конев, В.Ю.** Эффект стабилизации фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна. Эксперимент [Текст] / В.Ю. Конев, В.П. Губанов, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук. Эффект стабилизации фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна. Эксперимент // Труды 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Крымико). – 2013. – С. 116–117.
8. **Конев, В.Ю.** Эффект стабилизации фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна. Численное моделирование [Текст] / В.Ю. Конев, А.И. Климов, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.А. Торхов // Труды 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Крымико). – 2013. – С. 114–115.
9. **Kozhevnikov, V.Yu.** Phase stabilization effect in nanosecond microwave Gunn oscillators [Текст] / V.Yu. Kozhevnikov, V.Yu. Konev, A.I. Klimov, V.P. Gubanov, O.B. Kovalchuk, A.V. Kozyrev // 2013 21st Telecommunications Forum (TELFOR). Beograd, Serbia. November 26-28, 2013. P. 697–700.
10. **Rostov V.V.** High Power Nanosecond Microwave Oscillators with Phase Synchronization [Текст] / Elchaninov A.A., Klimov A.I., Konev V.Yu., Romanchenko I.V., Mesyats G.A., Yalandin M.I. // Strong Microwaves and Terahertz Waves: Source and Applications. Proceeding of 8th International Workshop. Nizhny Novgorod–St.-Petersburg, Russia. July 9–16, 2011. P.63–64.

Цитируемая литература:

- 1*. **Rubiola, E.** Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators [Текст] / E. Rubiola. – NY: Cambridge University Press. – 2009. – 114 p.
- 2*. **Ченакин, А.** Фазовые шумы в СВЧ-генераторах. Методы решения проблемы [Текст] / А. Ченакин // Электроника. НТБ. – 2011. – №4. – С. 552-561.

- 3*. **Введенский, Ю.В. Генератор когерентных наносекундных радиоимпульсов** [Текст] / Ю.В. Введенский, А.В. Андриянов, Э.А. Ермилов // ПТЭ. –1975. –№ 1.–С. 114–115.
- 4*. **Андриянов, А.В. Переходные процессы в радиоимпульсных генераторах на диоде Ганна** [Текст] / А.В. Андриянов, Ю.В. Введенский // Известия Вузов СССР: Радиоэлектроника. –1978.–Т. 3, №1.–С. 28-33.
- 5*. **Введенский, Ю.В. Измерение фазовой стабильности радиоимпульсных генераторов на диоде Ганна** [Текст] / Ю.В. Введенский, В.С. Сюваткин // Радиотехника и электроника. – 1981. – №3. – С. 664–665.
- 6*. **Введенский, Ю.В. Исследование фазовой стабильности колебаний в наносекундных генераторах Ганна** [Текст] / Ю.В. Введенский, В.С. Сюваткин, А.А. Хрусталева // Радиотехника и электроника. – 1985. – №10. – С. 2063–2064.
- 7*. **Веселов, Г.И. Микроэлектронные устройства СВЧ: учебное пособие для радиотехнических специальностей ВУЗов** [Текст] / Г.И. Веселов. М.: Высшая школа. – 1988. – 280 с.
- 8*. **Павлов, Г.П. Границы применимости локально-полевых моделей полупроводниковых приборов** [Текст] / Г.П. Павлов // Матем. моделирование. – 1990. – Т. 2, №3. – С. 55–62.
- 9*. **Климов, А.И. Экспериментальные методы в сильноточной электронике: учебное пособие** [Текст] / А.И. Климов // Томск: издательство ТПУ. – 2009. – 228 с.
- 10*.