

ОТЗЫВ

официального оппонента Новикова Сергея Сергеевича на диссертационную работу Конева В.Ю. «Фиксация фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона фронтом модулирующего импульса», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника

Проблема стабилизации фазы СВЧ-колебаний источников является перманентной проблемой при создании радиотехнических систем различного назначения, включая радиолокационные системы на основе фазированных антенных решеток, приемо-передающих систем с когерентной обработкой сигналов. Несмотря на известную проработанность теоретических и прикладных аспектов проблемы, а также разнообразных смежных задач, особенно из области радиотехники, имеется ряд научно-технических вопросов, требующих для своего решения нетрадиционных подходов. Это относится прежде всего к мощным полупроводниковым короткоимпульсным СВЧ генераторам, для которых когерентность радиоимпульсного излучения является важной характеристикой. Традиционные методы, связанные со стабилизацией автоколебаний с помощью внешних высокочастотных резонаторов, применением систем автоподстройки или явлений внешней и взаимной синхронизации усложняют конструкции источников, а инерционность переходных процессов не позволяет использовать такие методы в режиме короткоимпульсной генерации. В диссертационной работе Конева В.Ю. предлагается нетрадиционный метод стабилизации начальной фазы генератора Ганна с помощью фронта модулирующего импульса, проводится теоретическое исследование процессов возбуждения колебаний диода Ганна, выполняются сложные экспериментальные исследования фазовой стабильности наносекундного генератора Ганна трехсантиметрового диапазона. Таким образом, поставленные в диссертации Конева В.Ю. задачи и предпринятые научные исследования являются **актуальными.**

Диссертация содержит 126 страниц текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы.

В диссертационной работе представлены результаты теоретических,

численных и экспериментальных исследований характеристик автогенераторов на диодах Ганна при импульсном возбуждении, направленных на разработку способа стабилизации (фиксации) фазы СВЧ колебаний. В диссертации поставлены и решаются следующие задачи: – разработка математического аппарата и его численной реализации, позволяющих анализировать влияние профиля легирования и других параметров полупроводниковой структуры диода Ганна, а также параметров эквивалентной схемы резонатора на нестабильность начальной фазы СВЧ колебаний наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона; – экспериментальное исследование указанных генераторов и определение факторов, влияющих на нестабильность фазы СВЧ-колебаний относительно фронта модулирующего импульса, и на нестабильность разности фаз СВЧ колебаний двух импульсных генераторов Ганна, возбуждаемых одним модулятором; – экспериментальное определение возможности сложения СВЧ-колебаний в пространстве.

В основе теоретической модели генератора Ганна лежит упрощенный вариант локально-полевой модели полупроводниковой структуры диода Ганна, дополненный уравнениями эквивалентной схемы резонансной системы. Разработана программа численного расчета исследуемой модели, ее интерфейс позволяет анализировать временные и спектральные характеристики колебаний в импульсном режиме, а также распределение поля и заряда в полупроводниковой структуре. Результаты численных оценок находятся в хорошем соответствии с результатами проведенных экспериментальных исследований, что подтверждает адекватность разработанной теоретической модели.

Экспериментальные исследования проведены на реальном макете мощного наносекундного генератора Ганна трехсантиметрового диапазона с применением различных методов измерения временных и фазовых характеристик: метода временных интервалов, метода регистрации суммарного радиосигнала и суммарного детектированного сигнала, частотного метода. Достоверность измерений фаз СВЧ колебаний гарантирована использованием современного экспериментального оборудования (осциллографов Tektronix 6154C и LeCroy WaveMaster 830Zi) разработанными прецизионными методиками калибровки и

проведения экспериментов, оптимизацией режима запуска развертки осциллографов, применением надежных способов временной развязки генераторов Ганна и модуляторов по каналам импульсного питания генераторов. Успешно проведен также эксперимент по пространственному сложению излучения двух наносекундных генераторов Ганна, демонстрирующий высокую степень когерентности радиоимпульсов.

К числу наиболее важных результатов диссертационной работы Конева В.Ю., удовлетворяющих критерию **научной новизны**, необходимо отнести следующие.

1. На основе локально полевой модели полупроводниковой структуры диода Ганна разработан математический аппарат, с использованием которого впервые проведено исследование процессов установления фазы СВЧ-колебаний мощного наносекундного генератора на диоде Ганна трехсантиметрового диапазона. На основании численного моделирования показана принципиальная возможность управления фазой радиоимпульсов путем задания профиля импульсов питания генераторного диода. Получены численные оценки влияния нестабильности фронта и амплитуды модулирующего импульса на начальную фазу автоколебаний, указывающие на принципиальную возможность фиксации фазы внутриимпульсного заполнения радиоимпульсов генератора с высокой точностью – до единиц пикосекунд. Обнаружено, что исследуемая модель обладает свойством слабой зависимости нестабильности фазы СВЧ-колебаний от длительности фронта модулирующего импульса при заданной (предельной) нестабильности фронта и при условии стабильности высоты импульса; существенно, что эффект фиксации фазы достигается при длительности фронта запускающего импульса, значительно (в десятки раз) превышающей период СВЧ-колебаний. Рецензент согласен с автором диссертации, подчеркивающим принципиальное значение указанных результатов и декларирующего их теоретическую и практическую значимость для техники создания когерентных источников различного применения.

2. Разработаны методы измерения нестабильности начальной фазы или разности фаз СВЧ-колебаний наносекундных генераторов трехсантиметрового диапазона относительно фронта модулирующего импульса; для решения поставленных задач были разработаны и реализованы оригинальные методики настройки всех элементов установки, включая высокочастотные осциллографы и отдельные узлы, такие как детекторы, резонаторы и др. Созданная экспериментальная база может быть использована для изучения или разработки импульсных СВЧ-источников со стабильной фазой на основе генерирующих приборов другого типа.
3. В процессе выполнения экспериментальных исследований получены результаты, находящиеся в хорошем качественном и количественном соответствии с выводами и прогнозами теоретического раздела диссертационной работы. Доказана принципиальная возможность фиксации фазы СВЧ-колебаний мощного наносекундного генератора на диоде Ганна трехсантиметрового диапазона при фронте импульса питания, существенно, превышающем период СВЧ-колебаний; нестабильность фазы относительно фронта модулирующего импульса не превышает 7° при длительности фронта 4.5нс ; предельные значения длительности фронта, при которых эффект фиксации фаз нарушается, достигает 15нс . Показана возможность фиксации разности фаз двух развязанных генераторов Ганна, запускаемых от одного общего модулятора, среднее квадратическое (стандартное) отклонение не превышает 9° . Проведен также эксперимент с пространственным суммированием излучения от двух генераторов Ганна, запускаемых импульсом питания от общего модулятора, получена устойчивая диаграмма поля в дальней зоне при длительности радиоимпульсов порядка 20нс , что подтверждает высокую степень когерентности радиоимпульсов двух источников

Результаты диссертационной работы широко представлены в ведущих профильных, отечественных, рецензируемых журналах («Приборы и техника эксперимента», «Известия вузов. Физика», «Письма в ЖТФ», «ЖТФ»),

неоднократно докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и семинарах, таких как «Сrimico 2013», «TELFOR 2013» и «TELFOR 2015». Список публикаций по теме диссертации состоит из 58 работ.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В диссертационной работе на защиту выставлены четыре Положения. Редакция Положений и итоговых выводов по работе, особенно тех из них, которые опираются на экспериментальные исследования, в целом соответствует содержанию и полученным результатам. Однако некоторые элементы Положений и выводов недостаточно обосновываются в соответствующих разделах; мнение рецензента по данной позиции и другие замечания представлены ниже.

1. В положении 1 утверждается, что «необходимым условием генерации импульсов СВЧ-колебаний со стабильной начальной фазой является наличие профиля легирования с минимумом концентрации доноров вблизи катода». В тексте главы 3 (разделы 2.4.1 и 2.4.2) представлены результаты численных расчетов для двух различных профилей, причем оба профиля имеют минимумы концентрации. Зависимости разброса времени задержки от длительности фронта для обоих вариантов оказываются практически одинаковыми, и автор прямо указывает на это. Расчеты других вариантов, хотя бы косвенно указывающих на необходимость указанного минимума в профиле, не приводятся. В таком случае, каков смысл выбора двух вариантов легирования?

2. Положение 3 содержит две смысловых части, опирающиеся на результаты численного и экспериментального исследования, причем по тексту положения эти части весьма слабо связаны; тем не менее, по умолчанию можно предположить, что речь идет о сопоставлении результатов. В тексте положения введены две цифры «4.5 нс и 15 нс», ограничивающие интервал изменения длительности фронта в эксперименте. Действительно, в экспериментальном разделе 4.1 имеется два кратких утверждения о «согласовании экспериментального результата с численным моделированием» (стр.108) и о «качественном соответствии с результатами численного моделирования» (стр. 113), при этом цифры указанного интервала несколько отличаются от приведенных в положении. Однако в разделе 2.4.2 какое-либо обсуждение численного эксперимента для указанного цифрового

интервала отсутствует. Указанные моменты затрудняют проведение качественной экспертизы результатов

3. В выводах главы 2 (стр. 70) и в итоговом Заключение (стр.120) на основании компьютерного моделирования утверждается, что «для возникновения СВЧ-генерации в наносекундном генераторе на диоде Ганна трехсантиметрового диапазоне не требуются внутренние шумы». Следует сказать, что необходимость исследования влияния шумов непосредственно не причисляется к задачам, решаемым в диссертационной работе. В то же время, в Автореферате, в кратком описании содержания первой главы (стр.9) указывается «на необходимость исследования влияния внутренних и внешних шумов генератора Ганна на установление начальной фазы СВЧ-колебаний». В действительности, прямое обсуждение этого вопроса, как минимум необходимое для включения указанных утверждений в итоговые выводы, в диссертации отсутствует. Применяемые для теоретических исследований уравнения не содержат шумовых источников, то есть описывают детерминированные процессы. Можно, по-видимому, объяснить отсутствие указанного влияния шумов его низким, по отношению к порогу возбуждения, уровнем, но и этот вариант требует предметного обсуждения.

4. При обсуждении в главе 2 по результатам численного исследования вопроса ударного возбуждения колебаний в схеме с резонансным контуром (стр.66) и далее в выводах к главе (стр. 70) говорится, что эти колебания «обнаруживаются только на нагрузке», тогда как «в цепи диода Ганна отсутствуют». Создается впечатление, что диод Ганна либо не входит в колебательную цепь генератора, либо законы Кирхгофа стали несправедливыми.

Ряд замечаний связан с качеством содержания разделов диссертационной работы.

5. Так, в разделе 1.1 главы «Аналитический обзор» приводятся устаревшие в методическом плане элементарные сведения о возбуждении колебаний. Заявленное названием раздела модельное описание фазового шума отсутствует. Пояснение связи стабильности частоты с добротностью колебательной системы (раздел 1.2.1) сопровождается элементарными уравнениями баланса амплитуд и фаз и лишено конструктивности. Обсуждение режимов синхронизации в разделах 1.2.3, 1.2.4

нельзя назвать аналитическим, так как в тексте нет анализа состояния вопроса, отсутствует мотивированная критика возможных технических решений или схем в пользу выбранного направления. Библиографический список разделов 1.1 и 1.2 явно недостаточен, при этом из 25 источников 15 опубликованы до 1990 года или являются хрестоматийными учебными пособиями. В этом плане, неуместной является фраза на стр. 27 диссертации о «главных недостатках вышеперечисленных работ». Аналогичное впечатление оставляют: предложение на стр. 33 о «современных технологиях» со ссылкой на учебное пособие 1988 года, а также предложение из итоговых выводов к главе на стр. 44 – «...адекватной теории шумов генератора Ганна не существует» со ссылкой на монографию 1975 года.

Раздел 1.3, называемый «Об эффекте Ганна», представляет некоторый набор сведений, лишенных необходимой для выполняемой работы направленности. В разделе 1.4 не сформулирована цель обсуждения режимов работы генераторов Ганна, не затрагиваются важные вопросы электронной перестройки частоты переходных режимов.

В связи с перечисленными замечаниями, итоговые выводы по главе «Аналитический обзор» следует признать слабо обоснованными.

6. В разделе 2.1 главы 2 излишне подробно воспроизводится известная процедура вывода аналитического уравнения локально-полевой модели полупроводниковой структуры Ганна, используемого в численной модели.

7. Описание метода фазового детектора (раздел 3.2.2) и метода регистрации суммарного радиосигнала (раздел 3.2.4) сопровождается весьма пространными элементарными тригонометрическими преобразованиями.

8. В рамках численной модели разработан подробный и, видимо, полезный интерфейс (рис.2.7 и рис.2.9), однако его возможности и работа с ним не описываются. Экспериментальный раздел диссертации (глава 4) неудачно структурирован, а его части, связанные с формулировками основных результатов диссертации, лишены констатирующей четкости, что затрудняет экспертизу работы.

9. В описании экспериментов с двумя генераторами на диодах Ганна не указывается расстройка частот генераторов; не обсуждается также вопрос о

степени необходимой идентичности амплитудных и частотных характеристик генераторов.

10. Имеются технические погрешности. Например, отсутствуют схемы, на которые в тексте даются ссылки под номерами: рис.3.6, рис.3.13 и 3.20. В разделе 3.1 схема на рис.3.2 не описана; здесь же на рис.3.3 приведена конструкция СВЧ-блока исследуемых генераторов, ее происхождение или авторство не указано, назначение ее элементов, перечисленных в подрисуночной подписи, не поясняется.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, выполненной на достаточно высоком научно-техническом уровне. По актуальности, новизне полученных результатов, их научной и практической значимости диссертационная работа «Фиксация фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна трехсантиметрового диапазона фронтом модулирующего импульса» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Конев Владимир Юрьевич заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Доцент кафедры радиоэлектроники
Томского государственного университета
кандидат физ.-мат. наук



С.С. Новиков

"25" ноября 2015 г.

Подпись Новикова С.С. удостоверено

