

На правах рукописи

**Ефанов Михаил Владимирович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХМОЩНЫХ  
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ НАНО-ПИКОСЕКУНДНЫХ  
ГЕНЕРАТОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

Специальность 1.3.13 –электрофизика, электрофизические установки

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН), г. Москва

Научный руководитель **Лебедев Евгений Федорович**  
доктор технических наук, профессор  
главный научный сотрудник ФГБУН ОИВТ РАН

Официальные оппоненты **Воршевский Александр Алексеевич**  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУВО Санкт-петербургский государственный  
морской технический университет  
**Вдовин Владимир Александрович**  
кандидат физико-математических наук  
ФГБУН Институт радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН

Ведущая организация: ФГУП «РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ  
ЦЕНТР – Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики»

Защита состоится 22 декабря 2022 года в \_\_\_\_\_ часов 00 минут на заседании диссертационного совета 99.1.044.02 созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Объединенного института высоких температур РАН по адресу 127412 Москва, Ижорская улица, д.13, экспозал ОИВТ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института высоких температур РАН и на сайте [jiht.ru](http://jiht.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

А.В. Дорофееenko

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы диссертации**

Современное развитие локационной, ускорительной, лазерной, плазменной техники определяется в значительной степени доступным уровнем нано-пикосекундных импульсных источников напряжения. При этом постоянно растут требования к надежности, компактности, стабильности таких генераторов импульсов напряжения. Во многих случаях комбинация параметров, таких как амплитуда, длительность импульса, максимальная частота повторения, временная стабильность определяет прогресс важнейших научно-технических направлений. Достижение гигаваттного уровня мощностей при нано- пикосекундных длительностях импульсов напряжения привели также к созданию сверхмощных сверхширокополосных (СШП) излучателей для различных технических систем, в том числе, для фундаментальных исследований распространения СШП сигналов в атмосфере и ионосфере Земли на большие расстояния.

Вследствие сказанного, исследования и разработки сверхмощных нано- и пикосекундных генераторов импульсов напряжения, изложенные в диссертации, являются актуальными и приоритетными в высоковольтной импульсной технике и находят все более широкое применение в фундаментальной электрофизике и современных технических устройствах.

### **Состояние вопроса**

В современной ускорительной технике, в установках для экспериментов в области фундаментальной физики, физики плазмы, локационной техники, а также во многих других областях науки и техники, широко используются мощные генераторы нано-пикосекундных импульсов напряжения.

Основные рабочие характеристики подобных генераторов определяются возможностями высоковольтных коммутаторов переключать мощности в десятки и сотни мегаватт за единицы и доли наносекунды.

Традиционно в качестве основных мощных быстродействующих ключей высоковольтных генераторов используются газоразрядные тиратроны и разрядники, история возникновения и развития которых насчитывает более ста лет. Фактически это были первые электронные приборы, из которых возникла вся современная электроника. За многие годы было создано множество модификаций газоразрядных ключей, но в их основе неизменными оставались главные физические механизмы генерации проводящей плазмы и, как следствие, все связанные с этим достоинства и недостатки. Главные проблемы: малый ресурс, большая нестабильность по времени переключения, низкие рабочие частоты повторения.

Принципиально новые возможности для создания сверхмощных ключей открыло обнаружение в твердотельных полупроводниках нескольких новых физических механизмов генерации и переноса электронно-дырочной плазмы.

Первый из этих механизмов установил возможность генерации в высоковольтных р-п переходах ударно-ионизационной волной плотной электронно-дырочной плазмы за десятки и сотни пикосекунд [1]. Вторым механизмом определил возможность восстановления обратного напряжения на высоковольтных р-п переходах за время от десятков пикосекунд до нескольких наносекунд [2]. Третий выявленный механизм показал возможность переключения за доли наносекунды GaAs тиристоров с рабочим напряжением в сотни вольт (он получил меньшее практическое распространение) [3].

Волновой ударно-ионизационный механизм генерации плазмы лежит в основе новых ключей, получивших название ФИД ключи [4,5]. Механизм быстрого восстановления р-п перехода создал новый класс размыкающих ключей, получивших название ДДРВ [6] (дрейфовые диоды с резким восстановлением напряжения). Возникло несколько научных групп и коммерческих предприятий, которые развивают оба эти направления ключей. В 1993г. возникло новое направление в идеологии дрейфовых диодов, которое авторы называли SOS диодами [7].

В генераторах, созданных в настоящей работе, используются ФИД и ДДРВ ключи в качестве основных коммутирующих приборов.

### **Цели и задачи исследований**

Генераторы на основе ФИД и ДДРВ ключей имеют уникальные наборы параметров, недостижимые **при** использовании других технологий. Однако, их применение в конкретных технических установках требует адаптации, оптимизации и учета реальных режимов работы нагрузок (ускорителей, лазеров, радаров и т.д.), что определяет, как было указано выше, актуальность, новизну и практическую значимость исследований и разработок специализированных серий генераторов, учитывающих особенности их перспективного применения.

Исследование, разработка и применение подобных генераторов является **главной** целью настоящей работы.

### **Методы исследований**

В работе использовались современные методы исследования и разработки наносекундных импульсных генераторов, включая компьютерное моделирование и оптимизация силовых схем, отдельных блоков и полной конструкции устройств.

Использовались сертифицированные цифровые и стробоскопические осциллографы с полосой до 30 ГГц, а также широкополосные аттенюаторы, волновые ответвители и емкостные делители. Примененные средства обеспечили измерение амплитуды импульсов напряжения с точностью до 0.1%, измерение фронтов нарастания импульсов напряжения с разрешением до 30-40 пс, при пиковой мощности до 1000 МВт.

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

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Определены принципы построения компактных наносекундных генераторов гигаваттной мощности на основе твердотельных ДДРВ и

ФИД ключей и новых электронных схем с индуктивными накопителями энергии выходных каскадов формирования высоковольтных импульсов напряжения. Установлены допустимые рабочие токи и напряжения для силовых ключей и накопительных конденсаторов, обеспечивающих эффективность до 70% при формировании импульсов напряжения амплитудой до 500 кВ.

2. **Исследована** и разработана схема генерации высоковольтных прямоугольных импульсов напряжения с размыкающими ДДРВ ключами и формирующей линией, определяющей длительность импульса напряжения. Исследованы факторы, определяющие нестабильность по амплитуде и по времени выходных импульсов напряжения и разработаны технические решения стабилизации этих параметров. Достигнута и экспериментально измерена амплитудная нестабильность лучше 0.1% от максимальной амплитуды 27 кВ и зарегистрирован джиттер 30 пс RMS при полной задержке 300 нс.
3. Разработана серия генераторов на основе высокочастотных ДДРВ **ключей** с длительностями импульсов от 300 пс до десятков наносекунд, с амплитудой 0.6 – 10 кВ, с частотами следования импульсов от 1 МГц до 15 МГц. Исследованы схемные решения и параметры ДДРВ, влияющие на достижение максимальных частот повторения. Проведена оптимизация параметров схем и силовых ключей для достижения максимальной эффективности. Исследовано умножение амплитуды наносекундных импульсов напряжения на частотах следования до 1 МГц с использованием передающих коаксиальных линий. Измерены тепловые режимы силовых ДДРВ ключей и умножительных линий, создана компактная система охлаждения этих элементов.
4. Проведенные исследования позволили разработать генератор высоковольтных импульсов напряжения на основе нового поколения ДДРВ и ФИД ключей, с фронтом нарастания 30-40 пс и амплитудой

15 кВ, что превосходит на три порядка по амплитуде и на шесть порядков по пиковой мощности мировые аналоги с подобными фронтами. Создана установка и проведена ее калибровка для регистрации рабочих параметров генератора и выполнено исследование нескольких типов ФИД ключей, определяющих пикосекундные выходные фронты.

5. Выполнено исследование временной стабильности пикосекундного высоковольтного генератора с измерением джиттера на частотах повторения от 100 Гц до 10 кГц. Экспериментально зарегистрирован джиттер около 2 пс RMS. Полный размах отклонения задержки составил 9 пс при полной задержке 90 нс.
6. Разработан излучатель СШП сигналов с длительностью полуширины импульса 60 пс на основе генератора пикосекундных импульсов с фронтом около 50 пс и амплитудой около 10 кВ для применения в фундаментальных исследованиях по прохождению электромагнитных импульсов в атмосфере.
7. Проведены модельные полевые эксперименты **на малых расстояниях** с целью выявления необходимых условий постановки прямых экспериментов в атмосфере на километровые расстояния для обеспечения условий минимального влияния земной поверхности.
8. Выполнен прямой эксперимент по прохождению СШП импульсов с полушириной 60 пс в атмосфере Земли. Установлено слабое влияние атмосферы на СШП – сигнал на расстояниях до 10-15 км.

### **Достоверность результатов**

Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением современных сертифицированных приборов для измерения пикосекундных импульсов напряжения, контролем рабочих параметров измерительных приборов, применением векторного анализатора с полосой до 18 ГГц для контроля основных рабочих параметров аттенюаторов, а также

применением методики параллельного измерения параметров импульсов различными аттенюаторами и осциллографами.

### **Научная новизна**

1. Определен новый принцип построения компактных наносекундных генераторов гигаваттной мощности **заклю**чающийся в применении твердотельных ДДРВ и ФИД ключей и новых электронных схем с индуктивными накопителями энергии, направленный на увеличение эффективности генерации высоковольтных импульсов с амплитудой до 500 кВ и уменьшение массогабаритов подобных генераторов. Установлены допустимые рабочие токи и напряжения для силовых ключей и накопительных конденсаторов, обеспечивающих эффективность до 70% при формировании импульсов напряжения амплитудой до 500 кВ.
2. Разработан новый метод построения высокостабильных генераторов высоковольтных прямоугольных импульсов напряжения с размыкающими ДДРВ ключами и формирующей линией в качестве индуктивного накопителя, направленный на увеличение долговременной стабильности амплитудных и временных параметров выходных импульсов генератора. Исследованы факторы, определяющие нестабильность по амплитуде и по времени выходных импульсов напряжения и разработаны технические решения стабилизации этих параметров. Достигнута и экспериментально измерена амплитудная нестабильность лучше 0,1% от максимальной амплитуды 27 кВ и зарегистрирована временная нестабильность выходных импульсов 30 пс RMS при полной задержке 300 нс.
3. Разработан новый метод построения генераторов субнаносекундной длительности с высокой частотой повторения от 1 МГц до 15 МГц на основе высокочастотных ДДРВ, с длительностями импульсов от 300 пс до десятков наносекунд, с амплитудой 0.6 – 10 кВ,



направленный достижение высокой надежности, эффективности и компактности подобных генераторов. Исследованы схемные решения и параметры ДДРВ, позволившие достичь максимальных частот повторения. Проведена оптимизация параметров схем и силовых ключей, что позволило также достичь максимальной эффективности 75%. Исследовано умножение амплитуды наносекундных импульсов напряжения на частотах следования до 1 МГц с использованием передающих коаксиальных линий.

4. Разработан метод построения генераторов высоковольтных пикосекундных импульсов напряжения нового класса мощности на основе ДДРВ и ФИД ключей, направленные на повышение пиковой мощности генерации до 5 МВт в полосе до 10 – 18 ГГц. Эти параметры превосходят на три порядка по амплитуде и на шесть порядков по пиковой мощности мировые аналоги импульсных генераторов с фронтами 30-40 пс. Создана установка и проведена ее калибровка для регистрации рабочих параметров генератора и выполнено исследование нескольких типов ФИД ключей, определяющих пикосекундные выходные фронты.
5. **Проведено** исследование временной стабильности пикосекундного высоковольтного генератора с измерением джиттера на частотах повторения от 100 Гц до 10 кГц. Экспериментально достигнут джиттер около 2 пс RMS. Полный размах отклонения задержки составил 9 пс при полной задержке 90 нс.
6. Проведенные исследования и разработки позволили создать излучатель СШП-сигналов с полушириной длительности импульса 60 пс на основе генератора пикосекундных импульсов с фронтом около 50 пс и амплитудой более 10 кВ для применения в фундаментальных исследованиях по прохождению электромагнитных импульсов в атмосфере Земли.

7. Проведено экспериментальное исследование прохождения СШП-импульсов с фронтом 60 пс через атмосферу Земли на расстояние более 10 км, направленное на верификацию расчетно-теоретических моделей прохождения электромагнитных импульсов с фронтами порядка 50 пс через атмосферу Земли. Установлено слабое влияние атмосферы на СШП-сигнал на расстояниях до 10 – 15 км.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Практическая значимость заключается в создании технологии мощных нано- пикосекундных генераторов импульсов напряжения нового поколения, нашедших применение в ряде прикладных задач современной науки и техники.

Теоретическая значимость работы заключается в возможности верификации расчетно-теоретических моделей по результатам проведенных в работе экспериментов по распространению СШП-сигналов в свободной атмосфере Земли на большие расстояния.

### **Внедрение результатов работы**

Результаты работы использовались в нескольких ускорительных центрах для создания высокостабильных систем отклонения траектории движения электронных пучков [8,9].

Пикосекундные генераторы используются в широкополосных подземных радарх и экспериментальных лабораторных установках по изучению электромагнитной совместимости [10].

Генераторы наносекундных импульсов напряжения гигаваттной пиковой мощности использовались для накачки лабораторных газовых лазеров и в экспериментах по низкотемпературной плазме [11,12].

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на следующих рабочих совещаниях и заседаниях:

- Efanov, Vladimir & Efanov, Mikhail. (2013). A new generation of super power picosecond pulsers based on FID technology. IEEE International Conference on Plasma Science. 1-1. 10.1109/PLASMA.2013.6633448.
- Efanov, Vladimir & Efanov, Mikhail & Yarin, Pavel & Komashko, Alexander & Arbuzov, Alexey & Dyublov, Andrey. (2013). Pulse power supplies for power lasers based on FID technology. IEEE International Conference on Plasma Science. 1-1. 10.1109/PLASMA.2013.6634864.
- Efanov, Vladimir & Efanov, Michael & Kricklenko, Kirill & Yarin, Pavel. (2007). FDT Series High Voltage Pulse Generators for Plasma Chemistry Applications. IEEE International Conference on Plasma Science. 425-425. 10.1109/PPPS.2007.4345731.
- Заседание рабочей группы под руководством член-корреспондента РАН Селемира В.Д., 2022
- Семинар Института теоретической и прикладной электродинамики РАН, 2022
- Семинар Объединенного института высоких температур РАН под руководством академика Петрова О.Ф. , 2022

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 16 работ, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых журналах и других изданиях, включенных в список ВАК, и 8 патентов

### **Личный вклад автора**

Все изложенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач исследования, создании экспериментального оборудования, проведении экспериментов в лабораторных и полевых условиях, в обсуждении и формулировке полученных результатов. Непосредственно автором были разработаны, отмакетированы и доведены до уровня полноценных изделий генераторы нано-пикосекундных импульсов с пиковой мощностью до нескольких гигаватт.

## Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 61 наименования. Общий объем 127 страниц, 72 рисунка и 8 таблиц.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во Введении** содержится постановка задачи диссертационного исследования и перечень защищаемых научно-технических положений.

По сравнению с известными генераторами наносекундного диапазона длительностей генераторы на основе ФИД и ДДРВ ключей имеют уникальные наборы параметров, недостижимые для других технологий: сочетание компактности, эффективности, ресурса, долговременной стабильности выходных параметров, низкий уровень джиттера, обеспеченные **короткие** фронты нарастания. Однако их применение в конкретных технических установках требуют адаптации, оптимизации и учета реальных режимов работы нагрузок (ускорителей, лазеров, радаров и т.д.). Это определяет крайнюю актуальность, новизну и практическую значимость исследований и разработок специализированных серий генераторов, учитывающих особенности их перспективного применения.

**В первой главе** дан анализ достигнутого уровня нано-пикосекундных генераторов с использованием трех технологий – SOS-ключей, магнитных и газовых ключей.

На основании проведенного обзора публикаций сделан вывод, что для формирования высоковольтных наносекундных импульсов напряжения создаваемых технических устройств используются газовые разрядники, разрядники с оптическим запуском, магнитные ключи, SOS диоды и кремниевые диодные обострители на ударных ионизационных волнах. С применением этой элементной базы созданы различные генераторы с длительностью импульсов напряжения от долей наносекунд до десятков и сотен наносекунд с амплитудами от десятков киловольт до нескольких

мегавольт. Достигнуты средние мощности генераторов в десятки киловатт, а частоты повторения импульсов могут составлять десятки килогерц. Однако все эти достижения недостаточны для использования подобных генераторов в различных типах радаров, ускорителей, лазеров и многих других высокотехнологичных применениях. Неразрешенные проблемы относятся, прежде всего, к недостаточной эффективности, и, как следствие, большим масса-габаритам генераторов. Принципиальное значение для многих применений являются такие параметры как временная стабильность, малый джиттер и высокая точность регулировки амплитуды и выходной задержки импульсов. Все эти требования трудно выполнимы на основе существующих технологий импульсных генераторов.

Выполненный анализ позволил сформулировать конкретные цели и задачи данной диссертационной работы:

Исследование схемотехнических и конструкторских решений для создания компактных высокоэффективных генераторов наносекундных импульсов напряжения с амплитудой до сотен киловольт с использованием нового поколения ФИД и ДДРВ ключей.

Разработка серии компактных высокостабильных генераторов прямоугольных наносекундных импульсов напряжения для ускорительной техники. Исследование влияния параметров схем и основных рабочих характеристик ФИД и ДДРВ ключей на амплитудную стабильность и джиттер при долговременной эксплуатации оборудования.

Разработка принципиальных схемотехнических и конструктивных решений для создания генераторов нано-пикосекундного диапазона с пиковой мощностью от десятков киловатт до мегаваттного уровня, с частотой повторения до 15 мегагерц, необходимых для ускорительной техники, для оборудования исследования электромагнитной совместимости, для создания систем СШП связи. Исследование принципов суммирования высоковольтных наносекундных импульсов напряжения на частотах мегагерцового уровня.

Создание многоканальных высокостабильных генераторов пикосекундного диапазона и систем управления для умножения частоты следования излученных электромагнитных импульсов до частот 60-100 МГц для проверки электромагнитной совместимости релейных линий к воздействию СШП сигналов.

Исследование возможности создания принципиально нового класса сверхмощных генераторов импульсов напряжения амплитудой до 10-15 кВ с фронтом 20-40 пс на основе нового поколения ФИД и ДДРВ ключей. Создание и калибровка экспериментальной установки и проведение исследований по измерению пикосекундных фронтов и пикосекундного джиттера при мегаваттном уровне мощностей.

Создание экспериментальной установки СШП-излучения с длительностями 60 пс на основе нового генератора с амплитудой более 10 кВ.

Экспериментальное исследование процесса прохождения сверхширокополосного электромагнитного импульса через атмосферу Земли на расстояние более 10 км.

**В главе 2** описываются конструкция и основные рабочие параметры нескольких типов наносекундных генераторов с пиковой мощностью от десяти мегаватт до двух гигаватт.

На основе проведенных исследований разработан генератор с амплитудой 500 кВ на нагрузке 100 Ом, с фронтом нарастания 5 нс и длительностью 20 нс по уровню 50%, с массой всего 50 кг (рисунок 1), примененный в для накачки мощных газовых лазеров. В качестве размыкающих ключей используются серийные ДДРВ ключи с рабочим напряжением 10 кВ, пиковым током около 1 кА и временем переключения около 2-3 нс. ДДРВ ключи собраны в высоковольтные столбы на 500 кВ.

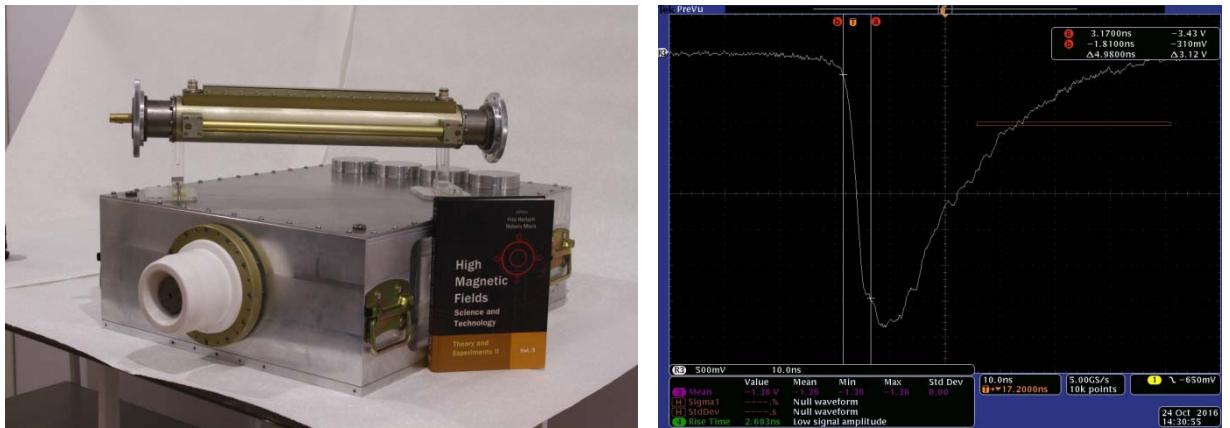
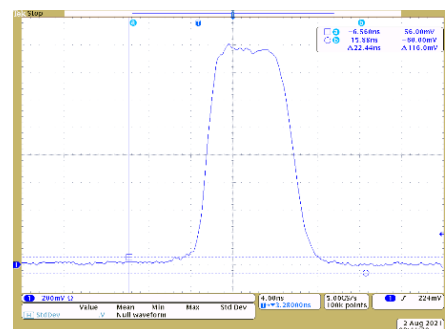


Рисунок 1.

Для применения в составе ускорителя разработан генератор прямоугольных импульсов с амплитудой 27 кВ с длительностью около 20 нс (рисунок 2). В качестве базовой была исследована и использована схема с размыкающим ключом ДДРВ и индуктивным накопителем энергии в виде формирующей линии. В качестве основного силового ключа используется серийный ФИД ключ марки ФД 700 с максимальным рабочим напряжением 7 кВ и пиковым током 10 кА.

Измерения амплитудной стабильности показали, что стандартные отклонения амплитуды составляет примерно 20 В от реального значения амплитуды 27 кВ.

При проведении тестирования были сохранены и обработаны около 800000 осциллограмм импульсов напряжения, построены тренд и гистограмма амплитуды. Среднеквадратичное отклонение составило порядка 0,04% от максимальной амплитуды. Эти результаты значительно лучше



характерных технических требований.

Рисунок 2.

В главе 3 описываются схмотехнические принципы построения высоковольтных наносекундных генераторов с частотой повторения импульсов от 1 МГц до 15 МГц, необходимых для ускорительной техники, для оборудования исследования электромагнитной совместимости, для создания систем СШП связи. Разработанные технические решения умножения амплитуды наносекундных импульсов позволяют достичь мегагерцовых уровней частот повторения.

В качестве решения проблемы устойчивости работы таких генераторов на высоких частотах повторения автором диссертации была разработана и применена высокочастотная схема формирования выходного импульса с применением индуктивного накопителя энергии и размыкающего ключа ДДРВ. В патенте автора [10] подробно описаны принципы работы и преимущества различных вариантов этого решения. Значительным преимуществом использованной схемы является отсутствие резонансных контуров для передачи энергии из емкостных накопителей в выходной индуктивный контур. В результате обеспечивается очень высокая скорость релаксации схемы в первоначальное состояние после генерации высоковольтного импульса.

На рисунке 3 представлен генератор ГИН05-15М-4К, построенный на основе авторского патента, в виде 4-х канального модуля с воздушным охлаждением. Основные рабочие параметры генератора: амплитуда 600 В, фронт 150-200 пс, частота повторения до 15 МГц. **Генератор использован в лабораторной установке для исследования ЭМС.**



Рисунок 3.



Для проведения экспериментов в области физики плазмы была разработана серия мощных генераторов с амплитудой до 10кВ и максимальной частотой повторения от 1МГц до 3МГц.

Один из таких генераторов ГИН10-1М имеет амплитуду выходного импульса 10 кВ на нагрузке 75 Ом, фронт 1 нс и частоту повторения 1 МГц. Средняя выходная мощность генератора ГИН10-1М на нагрузке 75 Ом рекордно высокая и составляет примерно 3500 Вт. При КПД генератора 60-70% тепловая мощность, выделяемая на ключевых элементах, составляет 1500-2000 Вт. Для обеспечения приемлемых тепловых режимов составных частей генератор строился по схеме суммирования амплитуды большого количества каналов в общем выходном тракте.

Для одного из европейских ускорительных центров была разработана серия высокочастотных генераторов с особыми требованиями к форме импульса, режиму генерации и параметрами стабильности и повторяемости импульсов – FPG 5-5МНН. Основные параметры генератора: амплитуда 5 кВ, длительность импульса напряжения 20 нс на нагрузке 50 Ом, частота повторения 4.5 МГц.

В целом, в главе 3 отражены выполненные автором исследования и разработки серии наносекундных генераторов с частотами повторения импульсов в несколько мегагерц для физических исследований и применения в ускорительной технике.

**В четвертой главе** разработан принцип построения **пикосекундных** генераторов напряжения с фронтами 20-40 пс и пиковой мощностью более 5 МВт. Генераторы такого типа необходимы для проведения физических экспериментов, исследований в области ЭМС, для разработок систем СШП радиолокации и связи. В диссертации особое внимание уделено измерению рабочих параметров подобных генераторов и отработке общих рассмотрены метрологических вопросов измерения высоковольтных пикосекундных импульсов.

Достигнутые характеристики генератора (15 кВ с фронтом до 40 пс и джиттером 2 пс RMS) создают уникальную комбинацию параметров, открывающую новые возможности для современной ускорительной, лазерной, локационной и другой научной техники.

Компактность подобных генераторов расширяет перспективу их будущего применения. Очевидно, что достигнутый результат в значительной мере определяется новыми ФИД ключами, поэтому одно из главных направлений дальнейших разработок должно быть направлено на расширение номенклатуры подобных приборов.

Проведенные эксперименты показали большую сложность надежного измерения амплитуды и фронта подобных импульсов напряжения, из-за отсутствия сертифицированных аттенюаторов и других делителей напряжения при мегаваттной пиковой мощности. В данной работе использовались сертифицированные аттенюаторы Varth Electronix с полосой 14 ГГц, Weinschel с полосой 18 ГГц и осциллограф с полосой 30 ГГц. Используемые аттенюаторы имеют равномерную характеристику в декларируемом рабочем диапазоне. Если применить стандартную методику поправок, то измеренный фронт в 37 пс может быть скорректирован до меньшей величины. Очевидно, в столь важных измерениях необходима более точная методика, что является отдельной научно-технической задачей.

**В пятой главе** приведены результаты экспериментального исследования распространения СШП субнаносекундного сигнала в атмосфере Земли на расстояние более 10 км, выполненные с помощью специально разработанных для этой задачи СШП-излучателей. Экспериментально установлено, что деформация формы импульса длительностью 60 пс и его полуширины значительно меньше значений, полученных в теоретических моделях.

Предварительно проведенные полевые эксперименты на малых дистанциях до 60 метров позволили получить данные о влиянии отраженных от земной поверхности сигналов на четкость регистрации основного импульса и установить достаточный угол в 5 градусов возвышения над поверхностью Земли для проведения полномасштабного эксперимента.

Прямой полномасштабный эксперимент, проведенный с помощью сотрудников Института общей физики РАН и Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, выполнивших измерения сигналов на высоте 100 метров и на высоте 2 метра от поверхности земли показал неизменность полуширины СШП-импульсов длительностью около 60 пс при прохождении их излучателями, установленными на подъемном шаре (рис.4), дистанции до 10-15 км.



Рис.4. Фотография размещения двух излучателей с автономным питанием и визирной трубой в корзине подъемного шара.

На рис 5 приведены нормированные по амплитуде формы сигналов при удалении излучателей на расстояние от 1 до 15 км. Высота полета до 1000 м обеспечивает угол возвышения 5 градусов и отсутствие влияния Земли. Около 40 регистраций СШП-сигналов через каждые 5 минут полета показали сохранение формы и полуширины импульсов величиной 60 пс на этой дистанции, что противоречит расчетным результатам и дает основания провести их уточнение.

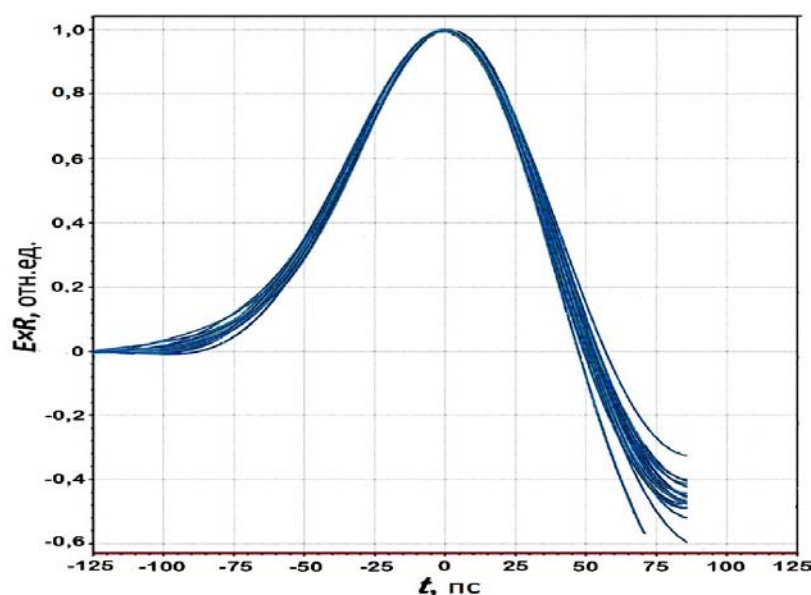


Рис.5. Нормированные сигналы излучения всех зарегистрированных полетных экспериментов на дальности 0,6-14,3 км

Этот результат позволяет, в частности, дать основания для постановки дальнейших исследований по прохождению СШП-импульсов в ионосфере, поскольку атмосферный столб воздуха высотой около 10 км, как показали проведенные эксперименты, не окажет влияния на сигналы, прошедшие через слой ионосферы высотой более 100 км.

**В Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе достигнуты следующие результаты:

1. Разработаны принципы построения компактных генераторов наносекундных импульсов с амплитудой 500 кВ, длительностью импульсов 10 нс по схеме индуктивного накопителя энергии, с размыкающими ДДРВ ключами и основными силовыми ФИД ключами. Генератор применен для накачки мощного газового лазера.
2. Разработан компактный высокостабильный генератор прямоугольных импульсов напряжения на основе ДДРВ и ФИД ключей, с выходной амплитудой до 30 кВ. Экспериментально исследована долговременная амплитудная стабильность 0.1%, одновременно с временным джиттером около 30 пс RMS, при полной задержке 300 нс. Генератор применен в отклоняющих системах синхротронов.
3. Разработана серия генераторов на основе высокочастотных ДДРВ ключей с длительностями импульсов от 300 пс до десятков наносекунд, с амплитудой 0.6 – 10 кВ, с частотами следования импульсов от 1 МГц до 15 МГц. Генераторы нашли применение в мощных СШП-излучателях и плазменных установках. Разработан компактный наносекундный генератор с амплитудой 10 кВ и максимальной постоянной частотой следования до 1 МГц. Широкий диапазон параметров этой серии генераторов по напряжениям и частотам следования позволяет использовать их в физических экспериментах, в ускорительной технике, для исследования ЭМС различного оборудования.
4. Исследован и применен принцип умножения амплитуды высоковольтных импульсов на кабельных линиях с коэффициентом 6 для генераторов мегагерцового диапазона. Разработан генератор прямоугольных импульсов с амплитудой 5 кВ и длительностью в

десятки наносекунд и максимальной частотой следования 5 МГц в пакетном режиме. Генератор применен в системах отклонения электронных пучков.

5. Исследованы научно-технические условия создания и разработана серия генераторов импульсов напряжения с впервые реализованным фронтом 20-40 пс для амплитуд величиной 15 кВ, которые на три порядка больше достигнутого мирового уровня. В качестве ключей использовались ФИД приборы и ДДРВ нового поколения. Создана и прокалибрована установка для измерения пикосекундных времен нарастания и временной нестабильности таких импульсов при мегаваттной мощности измеряемого сигнала. Генераторы применены для запитки СШП-антенн.
6. Проведены исследования и достигнута сверхвысокая временная стабильность для пикосекундных генераторов мегаваттного уровня. При амплитуде 15 кВ и фронте менее 40 пс зарегистрирован джиттер менее 2 пс RMS, и полный размах задержки от импульса к импульсу менее 9 пс при полной задержке около 90 нс.
7. Разработан СШП излучатель на основе генератора пикосекундных импульсов напряжения с фронтом около 50 пс и амплитудой 10 кВ для применения в фундаментальных исследованиях при прохождении СШП-сигналов в атмосфере.
8. Экспериментально исследовано прохождение СШП электромагнитного импульса с полушириной около 60 пс через атмосферу Земли на расстояние до 15 км.

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ДИССЕРТАЦИИ**

1. Fedorov V. M., Efanov M. V., Ostashev V. Ye., Tarakanov V. P. and Ul'yanov A. V. Antenna Array with TEM-Horn for Radiation of High-Power Ultra Short Electromagnetic Pulses // Electronics. Vol. 11, Issue 9, 1011.( 2021). <https://doi.org/10.3390/electronics10091011>.
2. Kolykhalova E. D., Dudelev V. V., Zazulin S. V., Losev S. N., Deryagin A. G., Kuchinskii V. I., Efanov M. V. , Sokolovskii G. S. Generation of high-power ultrashort optical pulses using a semiconductor laser with controlled current humping // Technical Physics volume 62, pages 1885–1888 (2017). <https://doi.org/10.1134/S1063784217120131>.
3. Dudelev V. V., Zazulin S. V., Kolykhalova E. D., Losev S. N., Deryagin A. G., Kuchinskii V. I., Efanov M. V. , Sokolovskii G. S. Generation of high-power ultrashort optical pulses by semiconductor lasers // Technical Physics Letters volume 42, pages1159–1162 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1063785016120191>.
4. Ефанов М.В., Лебедев Е.Ф., Ульянов А.В., Федоров В.М., Шурупов М.А. Излучательно-измерительный комплекс для исследования прохождения сверхширокополосных сигналов в атмосфере и ионосфере Земли // Теплофизика высоких температур. 2001, том 59, №6, с. 877-884.
5. Великанов С.Д., Гаранин С.Г., Домажиров А.П., Ефанов В.М., Ефанов М.В., Казанцев С.Ю., Кодола Б.Е., Комаров Ю.Н., Кононов И.Г., Подлесных С. В., Сивачев А.А., Фирсов К. Н., Щуров В.В., Ярин П.М. Мощный электроразрядный HF-лазер с твердотельным генератором накачки // Квантовая электроника, Т. 40 № 5, 2010. Сс. 393-396.

6. V.M. Efanov, M.V. Efanov, A.V. Komashko, A.V. Kriklenko, P.M. Yarin, S.V. Zazoulin, High-Voltage and High-PRF FID Pulse Generators. // Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9, 2010.
7. V.M. Efanov, M.V. Efanov, A.S. Arbuzov, A.V. Kriklenko, N.K. Savastianov. Megavolt all-solid-state FID pulse generators for accelerator applications. // 2007 IEEE 34th International Conference on Plasma Science (ICOPS).
8. Пат. 2580787, Российская Федерация, МПК H03K 3/53, генератор мощных наносекундных импульсов (варианты). // Ефанов М.В., Зазулин С.В., Краснов А.В. Заявка 2015104632/08 2015.02.11.
9. Ефанов М.В., Ефанов В.М., Краснов А.В. Генератор высоковольтных импульсов // Патент на изобретение № RU2636108C1 с приоритетом от 14.02.2017 г.
10. Ефанов М.В., Зазулин С.В., Краснов А.В. Генератор мощных наносекундных импульсов (варианты) // Патент на изобретение № RU2580787C1 с приоритетом от 11.02.2015 г.
11. Мырова Л.О., Фомина И.А., Пименов П. Н., Панкина Е.Г., Минченко Т.В., Ефанов М.В., Киричек Р.В. Многоканальный комплекс воздействия сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения с высокой частотой повторения на наземные широкополосные линии радиосвязи // Патент на изобретение № RU2579986C1 с приоритетом от 05.02.2015 г.
12. Ефанов В.М., Ефанов М.В. Генератор импульсов // Патент на изобретение № RU 2589240 C1 с приоритетом от 20.04.2015 г.
13. Ефанов М.В., Краснов А.В. Система стабилизации задержки// Патент на изобретение № RU2580445C1, приоритет от 31.12.2014 г.
14. Ефанов В.М., Ефанов М.В. Способ управления электронным ключом // Патент на изобретение № RU 2533326C1 с приоритетом от 22.04.2013 г.



15. Ефанов В.М., Ефанов М.В. Ускоритель // Патент на изобретение № RU 139712 U1 с приоритетом от 29.04.2013 г.
16. Ефанов В.М., Ефанов М.В. Импульсный трансформатор на неоднородной линии // Патент на изобретение № RU 2542755 С1 с приоритетом от 20.10.2013 г.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев, Формирование субнаносекундных перепадов тока при задержке пробоя кремниевых р-п переходов, Письма в ЖТФ 5(15), 950-953 (1979).
2. И. В. Грехов, В. М. Ефанов, А. Ф. Кардо-Сысоев, С. В. Шендерей, “Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения на полупроводниковых диодах с дрейфовым механизмом восстановления напряжения”, Письма в ЖТФ, 9:7 (1983), 435–439
3. Ж. И. Алфёров, В. М. Ефанов, Ю. М. Задиранов, А. Ф. Кардо-Сысоев, В. И. Корольков, С. И. Пономарев, А. В. Рожков, “Электрически управляемые трехэлектродные высоковольтные переключатели субнаносекундного диапазона на основе многослойной GaAs–AlGaAs гетероструктуры”, Письма в ЖТФ, 12:21 (1986), 1281–1285
4. Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. Мощные полупроводниковые обострители субнаносекундного диапазона // Приборы и техника эксперимента. 1981. №4. С. 135–136.
5. V.M. Efanov; A.F. Kardo-Sysoev; M.A. Larionov; I.G. Tchashnikov; P.M. Yarin; A.V. Kriklenko. Powerful semiconductor 80 kV nanosecond pulser. 11th IEEE International Pulsed Power Conference (Cat. No.97CH36127)
6. Грехов И. В. и др. Мощные дрейфовые обострители с наносекундным временем восстановления // ПТЭ. 1984. в.5. С.103–105.
7. Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.А. «Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов», Доклады Академии Наук, т.330, No3, с.315-317, 1993г.

8. G. Loisch\*, V. Belokurov, F. Obier, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany. Few-nanosecond stripline kickers for top-up injection into PETRA IV // 13th Int. Particle Acc. Conf., IPAC2022, Bangkok, Thailand.
9. W, Zhang & Sandberg, Jon & Hahn, Harald & Fischer, W. & Liaw, C.-J & Pai, C. & Tuozzolo, J.E.. (2012). Research and development of RHIC injection kicker upgrade with nano second FID pulse generator.
10. Болтинцев В.Б., Ильяхин В.Н., Ефанов М.В. Обследование свайных оснований методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования // Жилищное строительство. 2022. № 9. С. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-9-40-47>
11. Tat Loon Chng, C. Ding, M. Naphade, B.M. M Goldberg, I.V. V Adamovich, et al.. Characterization of an Optical Pulse Slicer for Gas-Phase Electric Field Measurements Using Field-Induced Second Harmonic Generation. Journal of Instrumentation, IOP Publishing, 2020, 15 (03), pp.C03005-C03005.10.1088/1748-0221/15/03/C03005 . hal-03033625
12. Xu, Da & Lacoste, Deanna & Laux, Christophe. (2016). Ignition of Quiescent Lean Propane–Air Mixtures at High Pressure by Nanosecond Repetitively Pulsed Discharges. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 36. 10.1007/s11090-015-9680-3.

**Ефанов Михаил Владимирович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХМОЩНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ НАНО-  
ПИКОСЕКУНДНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

**Автореферат**

**Подписано к печати .....2022 г.**

**Тираж 100 экз. Заказ № ....**

**Отпечатано в типографии .....**

**Г. Москва .....**