

## ОТЗЫВ

официального оппонента  
ведущего научного сотрудника, кандидата физико-математических наук  
Вдовина Владимира Александровича  
по диссертации **Ефанова Михаила Владимировича**  
на тему:

«Разработка и исследование сверхмощных твердотельных наносекундных генераторов и их применение»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата  
технических наук, по специальности 1.3.13 – электрофизика,  
электрофизические установки

В последние годы растёт интерес к созданию мощных твердотельных генераторов коротких электрических импульсов. Такие приборы традиционно используются в ускорительной технике, в экспериментах в области фундаментальной физики, химии, физики плазмы, а в последние годы и в радиолокации, а также в исследованиях в области биологии и медицины. Широкая область применимости таких генераторов обусловлена сочетанием уникальных, порой несовместимых, параметров: высокими значениями амплитуды и мощности импульсов, длительностями в единицы нано- и десятки пикосекунд и частотой следования десятки МГц. Поэтому исследования процессов функционирования таких устройств, их физических и технических характеристик являются важной и актуальной задачей, имеющей практическое значение.

С использованием разных схемотехнических и конструктивных решений, а также на основе новых поколений скоростных твердотельных переключателей, рассмотренных в диссертации, М.В. Ефановым получен ряд новых важных результатов:

- разработан новый принцип построения компактных наносекундных генераторов гигаваттного уровня мощности на основе ДДРВ (дрейфовых диодов с резким восстановлением напряжения) и FID (Fast Ionization Dynistor) ключей и электронных схем с индуктивными накопителями энергии, на основе которого удалось повысить эффективность генерации высоковольтных импульсов с амплитудой до 500 кВ и уменьшить массогабаритные характеристики.

- проанализирована схема построения высокостабильных генераторов высоковольтных прямоугольных импульсов напряжения с размыкающими ДДРВ ключами и формирующей линией в качестве индуктивного накопителя, позволяющая увеличить долговременную стабильность амплитудных и временных параметров выходных импульсов. Достигнута и экспериментально измерена амплитудная нестабильность лучше 0,1% от максимальной амплитуды 27 кВ.

- разработан метод построения генераторов субнаносекундной длительности с высокой частотой повторения от 1 МГц до 15 МГц на основе высокочастотных ДДРВ ключей, с длительностями импульсов от 300 пс до десятков наносекунд, с амплитудой 0.6 – 10 кВ, направленный на достижение высокой надежности, эффективности и компактности подобных генераторов. Для достижения максимальной эффективности генераторов проведена оптимизация параметров схем и силовых ключей.

- разработан мощный высокостабильный генератор с фронтом нарастания от 20 до 40 пс и амплитудой выходного импульса до 17 кВ с частотой повторения импульсов до 10 кГц.

Разработанные в диссертационной работе приборы использовались, например, для запитки мощного газового лазера, в устройствах эксплуатации ускорителей, для проведения экспериментов в области физики плазмы.

Текст диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 61 источник.

Во введении подчеркивается актуальность тематики диссертационной работы, сформулирована цель работы, поставлены научные задачи, описана научная новизна, практическая ценность результатов, сформулированы защищаемые положения, даны сведения об апробации работы, представлена структура диссертации.

Первая глава посвящена анализу литературы о существующих и перспективных технологиях построения мощных нано-пикосекундных генераторов. Рассмотрены различные варианты быстрых переключателей. Проведен анализ существующих ограничений для улучшения достигнутых параметров. В конце главы сформулированы цели работы.

Во второй главе представлены результаты проведенных автором диссертации исследований и разработок нескольких типов компактных высокоэффективных генераторов наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии. Описываются конструкция и основные рабочие параметры наносекундных генераторов с пиковой мощностью от 10 МВт до двух гигаватт.

В третьей главе рассматриваются схемотехнические принципы построения высоковольтных наносекундных генераторов с высокой частотой повторения импульсов от 1 МГц до 15 МГц. Разработаны технические решения умножения амплитуды наносекундных импульсов на частотах повторения мегагерцового уровня.

В четвертой главе разработан принцип построения генераторов с уникальными фронтами 20-40 пс при пиковой мощности 5 МВт. Проведено измерение рабочих параметров подобных генераторов и рассмотрены метрологические вопросы измерения высоковольтных пикосекундных импульсов.

В пятой главе экспериментально исследовано распространения СШП импульсов длительностью 60 пс в атмосфере Земли на расстояние до 10 – 15 км. Для этого использовались разработанные в главе 4 генераторы. Экспериментально установлено, что искажения формы импульса на расстояниях 10-15 км не происходит.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе и дан список публикаций автора по теме диссертации.

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

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. Неудачно представлены осциллограммы импульсов в виде фотографии экранов маленького размера, на которых часто не видны детали рисунка и масштабы осей, например, рис.2.4, 2.11, 3.2, 3.4 и т.д. Об осциллограмме на рис.3.8, например, сказано «что как видно из осциллограммы, контраст пред-импульса по отношению к амплитуде.....». Но из рисунка как раз ничего не видно. А на рис.4.3, где представлены амплитудно-частотные характеристики не видно полосы частот.
2. Экспериментальная часть работы изложена чрезмерно кратко, что иногда приводит к странным результатам. Например, в выводах главы 2 сказано, что «исследование различных типов изолирующих жидкостей показало, что наилучшим выбором является карбогал». Но в описании 2 главы вообще не упоминались изолирующие жидкости. Желательно также иметь более подробное обоснование выбора ключей (например, раздел 2.1). По каким критериям осуществлялся выбор?
3. При исследовании по измерению джиттера (гл.4) ничего не сказано о том, за счет чего он появляется и какой его теоретический предел.
4. Желательно обосновать уширение импульсов в экспериментах, результаты которых представлены на рис.5.5 и 5.6. Т.к. в диапазоне спектра от 0 до 10 ГГц (спектр исходного импульса, рис.5.2) нет дисперсии, что было прекрасно показано в следующем разделе (рис.5.12).
5. Замечания по оформлению – на некоторых рисунках главы 1 отсутствуют название рисунка и расшифровка элементов, приведенных на них.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертант показал хорошее владение экспериментальными методами электрофизики. Результаты работы хорошо известны научной общественности.

Автореферат правильно и полно отражает содержание работы, основные ее выводы соответствуют тексту диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Ефанова Михаила Владимировича на тему: «Разработка и исследование сверхмощных твердотельных нано-пикосекундных генераторов и их применение», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи по созданию сверхмощных твердотельных нано-пикосекундных генераторов.

По актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов диссертационная работа М.В. Ефанова соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013г. (ред.07.06.2021г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор М.В. Ефанов заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки.

#### **Официальный оппонент**

ведущий научный сотрудник лаб.201 (лаборатория математических методов в радиофизике и биомедицине) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

**Вдовин Владимир Александрович**

05.12.2022 г.

Адрес: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Телефон: +7(495)6293403

Электронная почта: vdv@cplire.ru

Ученая степень: кандидат физико-математических наук

Отзыв к.ф.-м.н. Вдовина В.А. удостоверяю:

**Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН**

к.ф.-м.н.



**И.И. Чусов**