

ОТЗЫВ

официального оппонента Рожнева Андрея Георгиевича
о диссертационной работе Юровского Льва Александровича
“Развитие методов формирования и усиления коротких микроволновых импульсов”,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.4 –«Радиофизика»

Генерация одиночных и периодических последовательностей ультракоротких микроволновых импульсов представляет интерес для многих областей физики и техники, включая наносекундную радиолокацию большой дальности и высокого разрешения, спектроскопию, биофизические исследования, диагностику плазмы, ускорение заряженных частиц, спектроскопические исследования, ряд других приложений. Проведенные в последние годы исследования в ведущих международных и российских научных центрах показали, что для целей генерации микроволновых ультракоротких импульсов весьма эффективным оказывается перенесение в классическую электронику методов, ранее предложенных и развитых в оптике и физике лазеров. При этом, однако, возникает значительная специфика, обусловленная тем, что электронные пучки представляют собой движущиеся активные или пассивные среды, для которых принципиальна конечность времени пролета частиц через пространство взаимодействия. В то же время, задача повышения мощности генераторов микроволновых импульсов, особенно в высокочастотных диапазонах, остается актуальной, что, в свою очередь, приводит к необходимости поиска новых схем генераторов и оптимизации параметров уже известных ранее схем.

Для генерации мощных суб-наносекундных электромагнитных импульсов предложено несколько методов, среди которых одним из наиболее перспективных является метод, основанный на использовании черенковского сверхизлучения протяженных электронных сгустков, движущихся в периодических замедляющих структурах. Этот метод позволил получить в Ка-диапазоне в режимах генерации одиночных импульсов гигаваттный уровень пиковой мощности. Однако возможности дальнейшего повышения мощности этим способом ограничены нелинейными эффектами в электронном пучке. В связи с этим важным направлением исследований в данной области микроволновой электроники является разработка методов генерации коротких сверхмощных импульсов, основанных на принципиально других физических явлениях и подходах.

В связи со сказанным можно утверждать, что тема диссертационной работы Л.А. Юровского, состоящая в теоретическом рассмотрении нескольких новых методов генерации мощных коротких импульсов в СВЧ диапазоне, а также в применении развитых теорий для оптимизации параметров генераторов, использующих эти методы, является **актуальной.**

тором в качестве усилителя применяется релятивистская черенковская ЛБВ, а в п. 1.3 аналогичный анализ проводится для случая, когда усилителем является гирос-ЛБВ.

Вторая глава диссертации посвящена рассмотрению взаимодействия электронного потока, движущегося в сильном продольном магнитном поле с полями двух несинхронных ему электромагнитных волн – попутной волны накачки и встречной сигнальной волны. При выполнении условий параметрического взаимодействия этих волн происходит возбуждение сигнальной волны с преобразование частоты волны накачки вниз. Показано, что этот эффект может быть использован для генерации мощных коротких импульсов. Для этого энергия электронов в пучке должна быть определенным образом модулирована во времени.

В разделе 2.1 выводятся уравнения параметрического взаимодействия, описывающие рассматриваемую конфигурацию волн. Сделан вывод о существовании двух механизмов ограничения мощности сигнальной волны, связанных с истощением накачки и с нелинейными эффектами при группировке электронного пучка. В разделе 2.2 изучаются процессы формирования микроволновых импульсов путем компрессии чипированного сигнала, полученного в режиме обратного рамановского рассеяния на электронном потоке с переменной во времени энергией. При этом в качестве компрессора, как и в первой главе, используется волновод с винтовой гофрировкой. В заключительном разделе 2.3 второй главы исследуется генерация импульсов сверхизлучения микроволнового диапазона при рассеянии лазерного излучения на попутном сильноточном релятивистском электронном пучке.

В Третьей главе диссертации предлагается для формирования мощных коротких импульсов использовать аналог хорошо известного эффекта самоиндуцированной прозрачности (СИП), перенеся его из оптического в СВЧ диапазон частот. В качестве такого аналога выступает резонансное циклотронное взаимодействие коротких электромагнитных импульсов с электронным потоком в условиях нормального эффекта Доплера. В п. 3.1 сформулированы уравнения нестационарного циклотронно-резонансного взаимодействия падающего СВЧ импульса с первоначально прямолинейным замагниченным электронным пучком в волноводе. В п. 3.2 на основе полученных уравнений производится аналитический вывод двухпараметрического солитонного решения, зависящего скорости импульса и сдвига несущей частоты солитона относительно частоты циклотронного резонанса. В п. 3.3 доказывается устойчивость полученных солитонов при взаимодействии СВЧ импульса с попутным электронным потоком. В заключительном разделе этой главы (п. 3.4) рассмотрены особенности формирования микроволновых СИП-солитонов при встречном распространении электромагнитного импульса и потока электронов в рамках моделирования начальной и граничной задач. Подтверждена устойчивость полученных

двухпараметрических решений, и с помощью РС-моделирования продемонстрирована возможность повышения мощности импульсов путем нелинейной самокомпрессии, возникающей при формировании СИП-солитона.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

К наиболее важным научным результатам, полученным соискателем в диссертационной работе, могут быть отнесены следующие:

Предложен метод получения мощных ультракоротких импульсов в микроволновом диапазоне на основе метода усиления чипированных импульсов (СРА–метода) с использованиемна этапах растяжения и сжатия импульса отрезков металлического спирально-гофрированного волновода (стретчера и компрессора) с соответствующим образом подобранными параметрами гофрировки, разными для обоих этапов.

Предложен и обоснован метод оптимизации параметров стретчера и компрессора в схеме, предназначенный для получения наибольших значений коэффициентов растяжения и компрессии и обеспечивающий, по возможности, максимальное значение пиковой мощности выходного импульса и сохранение его исходной формы.

Развита теория параметрического взаимодействия электронного потока в сильном магнитном поле с полями двух несинхронных ему электромагнитных волн (волна накачки и сигнальная волна) при условии, что волна накачки является попутной электронному пучку, а сигнальная волна – встречной. Установлены возможные причины ограничения мощности сигнальной волны.

Показано, что в схеме, описанной в предыдущем абзаце, временная модуляция энергии электронов по установленному в диссертации закону приводит к образованию одиночного импульса, который при последующем сжатии в диспергирующей линии преобразуется в мощный короткий импульс СВЧ излучения.

С использованием этой же теории параметрического взаимодействия продемонстрирована генерация терагерцевых импульсов сверхизлучения при обратном рассеянии лазерного излучения на попутном релятивистском электронном пучке.

Показано, что при циклотронно-резонансном взаимодействии коротких микроволновых импульсов с первоначально прямолинейным электронным пучком в этой среде появляется эффект, аналогичный явлению самоиндуцированной прозрачности в нелинейной оптике. На основе этого эффекта предложена и методом РС-моделирования показана возможность самокомпрессии солитоноподобного импульса сверхизлучения. При этом происходит трехкратное увеличение максимальной мощности импульса.

Все перечисленные результаты являются **новыми** и получены впервые.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы и вынесенных на защиту положений подтверждается тем, что для их получения использованы апробированные теоретические подходы, используемые в теории волн, нестационарной релятивистской СВЧ электронике, физике плазмы и оптике. Полученные результаты обладают устойчивой воспроизводимостью, сопоставление расчетных данных, проведенных соискателем на основе различных математических моделей, согласуется с аналитическими оценками.

Практическая значимость работы подтверждается тем, что она направлена на разработку новых методов формирования мощных коротких микроволновых импульсов, которые могут найти применение в различных областях науки и в технических приложениях, например, для сверхдальней радиолокации, ускорения заряженных частиц, диагностики плазмы.

Апробация результатов диссертационной работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 печатных работах, из них 9 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК, 11 работ в сборниках трудов конференций. Эти результаты неоднократно обсуждались на ведущих российских и международных конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов.

Замечания по тексту диссертации. Как и любая большая содержательная работа, диссертация Юровского Л.А. не лишена некоторых недостатков, к которым можно отнести следующие:

1) В Первой главе при формулировке уравнений, описывающих взаимодействие парциальных волн в волноводе с винтовой гофрировкой, для квазикритической волны используются безотражательные граничные условия (1.6). При этом на стр. 22 указывается, что для эффективного ввода и вывода излучения в стретчер и компрессор они должны на обоих концах иметь участки с адиабатически изменяющимися гофрировками. На этих участках нормальная волна действительно будет эффективно преобразовываться в волну круглого однородного волновода, однако для квазикритической волны на этих участках условия адиабатического приближения не выполняются, поскольку здесь критическая частота этой моды близка к частотам, составляющим спектр сигнала. В результате можно ожидать заметного отражения квазикритической волны от неоднородностей гофрировки. Представляется, что граничные условия (1.6) не в полной мере позволяют учесть такие отражения.

2). В диссертации отмечается определенная аналогия полученных двухпараметрических солитонных решений с решениями нелинейного уравнения Шредингера. В то же время широко известно, что для НУШ-солитонов Захаровым и Шаббатом была показана возможность решения обратной задачи, то есть определения характеристик формирующей

щихся солитонов по начальным условиям. В связи с этим возникает вопрос о возможности применения данного метода для микроволновых солитонов самоиндуцированной прозрачности.

3). В Главе 2 показано, что стартовый ток частотного модулятора, основанного на вынужденном рассеянии волн, обладает оптимальным значением радиуса электронного пучка. Для такого поведения должно быть какое-то физическое объяснение, которого в тексте диссертации нет. Хорошо было бы обсудить причину возникновения данного оптимума.

4). В целом стройное изложение содержания работы заметно проигрывает от того, что в диссертации отсутствуют выводы по главам, в которых были бы сконцентрировано изложены основные полученные результаты по каждой главе.

5). Диссертация написана грамотным и ясным русским языком, особенно в тех местах, где рассматривается физическая суть обсуждаемых явлений. К сожалению, эта простота и ясность несколько снижается там, где приводятся результаты проведенных вычислений. В таких местах текст заметно перегружен техническими деталями, несущественными для понимания полученных результатов подробностями, перечислением значений параметров и т.п. (пример - вторая половину параграфа 1.1.2). Подписи к некоторым рисункам перегружены техническими деталями, в результате чего они носят не поясняющий характер, а фактически являются параллельным изложением основного материала (см., например, рисунки 1.7, 1.8, 1.12, 2.5), что также временами затрудняет чтение.

Разумеется, приведенные замечания носят в значительной степени технический характер или играют роль пожеланий для их учета в будущих исследованиях. Эти замечания не снижают общую очень высокую оценку как отдельных полученных результатов, так и всей диссертации в целом.

При выполнении диссертационной работы Юровский Ю.А. продемонстрировал впечатляющий уровень владения теоретическими методами нестационарной вакуумной СВЧ электроники и методами численного моделирования различных нестационарных процессов на компьютере. Диссертант является представителем Нижегородской радиофизической школы, занимающей передовые позиции в изучении процессов генерации, усиления и распространения волн различной физической природы. Принадлежность к этой научной школе является дополнительным свидетельством высокой научной квалификации соискателя.

Заключение

Диссертационная работа Юровского Л.А. “Развитие методов формирования и усиления коротких микроволновых импульсов”, представленная на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, посвящённую решению актуальной задачи радиофизики, связанной с теоретическим исследованием новых методов генерации сверхмощных ультракоротких импульсов СВЧ диапазона частот. Содержание работы полностью соответствует паспорту специальности «Радиофизика». Самостоятельность и оригинальность исследования (включая личный вклад автора), не вызывают сомнений.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию, достоверно отражает полученные научные результаты, защищаемые положения и выводы по проведённому диссертационному исследованию.

Учитывая актуальность рассмотренных в диссертации вопросов, научную новизну, практическую значимость результатов и достоверность сделанных выводов, можно заключить, что диссертация Юровского Л.А. «Развитие методов формирования и усиления коротких микроволновых импульсов» в полной мере отвечает требованиям пунктов 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Юровский Лев Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Официальный оппонент:

Рожнев Андрей Георгиевич
кандидат физико-математических наук
(специальность 01.04.03 – «Радиофизика»),
доцент кафедры нелинейной физики
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д.83
e-mail: rozhnevag@info.sgu.ru
Тел. +7 (8452) 514311

«03» 11 2022г.

Рожнев А.Г.

Я, Рожнев Андрей Георгиевич, выражаю своё согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации Юровского Л.А.

Подпись к.ф.-м.н. Рожнева А.Г. удостоверяю
Ученый секретарь
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»
«3» ноября 2022 г.



Федусенко И.В.