

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЭФ УрО РАН,
член-корр. РАН

Р. Чайковский

Чайковский С. А.

«26» октября 2022 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Юровского Льва Александровича **«Развитие методов формирования и усиления коротких микроволновых импульсов»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - радиофизика

Диссертационная работа Юровского Льва Александровича посвящена развитию методов формирования и усиления мощных коротких микроволновых импульсов. Одним из возможных подходов увеличения пиковой мощности излучения является перенос в СВЧ электронику методов, зарекомендовавших себя в лазерной физике. В этой связи в работе рассматриваются: метод усиления чирпированных импульсов, метод формирования коротких импульсов в системе «генератор непрерывного излучения – частотный модулятор – компрессор» и метод формирования солитонов самоиндуцированной прозрачности. Вопрос о формировании и усилении коротких микроволновых импульсов обозначен в Программе фундаментальных исследований РФ на период 2021-2030 гг. в ряду основных научных задачи и ожидаемых прорывных результатов по физике, где в пункте 1.3.6.2. указано «Развитие методов генерации, усиления, преобразования и приема электромагнитных волн», что подтверждает актуальность диссертационной работы. Основными задачами работы явились анализ и адаптация теоретических моделей, описывающих рассматриваемые методы, и оценка возможности их использования для формирования коротких микроволновых импульсов с мегаваттной и гигаваттной пиковой мощностью.

Диссертация состоит из введения, трех глав, а также заключения, в котором сформулированы основные результаты работы. Во введении обоснованы актуальность

темы диссертации, кратко изложены цели и задачи, личный вклад автора, положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе, исследуется возможность реализации метода усиления chirпированных импульсов, заключающегося в предварительном растяжении исходного импульса в диспергирующем элементе (стретчере), последовательном усилении спектральных компонент в усилителе и восстановлении начальной формы в компрессоре. В качестве диспергирующих элементов рассматриваются волноводы с многозаходной винтовой гофрировкой, в которых обеспечивается связь бегущей и квазикритической мод гладкого волновода. Достоинством таких волноводов является широкая рабочая полоса в сочетании с малыми отражениями сигнала от диспергирующего элемента в рабочей полосе. На основе кинематического подхода предложен метод оптимизации параметров стретчера и компрессора, обеспечивающий как эффективное растяжение исходного импульса, так и практически полное восстановление начальной формы сигнала.

Показано, что предлагаемая схема CPA (англ. Chirped Pulse Amplification) может быть использована для повышения пиковой мощности субнаносекундных импульсов сверхизлучения (СИ) до мульти-гигаваттных значений при использовании релятивистской черенковской ЛБВ в качестве усилителя. Рассмотрены различные режимы работы усилителя (режим линейного усиления и режим нелинейного насыщения), реализующиеся при различных значениях пиковой мощности импульса на входе в стретчер. Важно подчеркнуть, что в ситуации, когда усилитель и источник импульсов СИ имеют сопоставимые ток и энергию частиц, непосредственное (без предварительного временного растяжения) усиление импульсов СИ неэффективно.

Возможность использования CPA метода для формирования коротких импульсов мульти-мегаваттного уровня пиковой мощности исследована применительно к широкополосной винтовой гиро-ЛБВ, экспериментально реализованной в ИПФ РАН. В этом случае в качестве источника исходных субнаносекундных импульсов могут быть использованы генераторы, основанные на пассивной синхронизации мод.

Во второй главе исследован метод формирования частотно-модулированного сигнала с целью его последующей компрессии, основанный на режиме вынужденного обратного рассеяния излучения на попутном слаборелятивистском электронном пучке с переменной энергией частиц, обеспечивающем перекачку энергии от высокочастотной волны накачки, к низкочастотной обратной рассеянной волне, где энергия волны накачки частично поглощается электронным пучком, ускоряя его. Абсолютная неустойчивость, имеющая место в такой системе, обеспечивает возбуждение сигнальной волны в

отсутствие внешних резонаторов, что позволяет плавно перестраивать частоту рассеянного излучения при изменении энергии частиц.

Анализ системы проведен как на основе модели трехволнового распада, так и с использованием системы самосогласованных уравнений, учитывающих нелинейность в движении электронов. Показано, что при этом реализуются два механизма насыщения роста амплитуды рассеянной волны. Первый механизм связан с истощением накачки и сопровождается практически полной передачей энергии от накачки сигналу при достаточной длине области рассеяния. Второй механизм связан с нелинейными эффектами в движении электронов и в рамках такого механизма истощением накачки можно пренебречь.

В частотном модуляторе, основанном на вынужденном обратном рассеянии, при использовании в качестве источника накачки длинно-импульсного гиротрона 30 ГГц диапазона, показана возможность достижения высокого квантового выхода, позволяющая при периодическом варьировании энергии электронов формировать на выходе компрессора последовательность коротких субнаносекундных микроволновых импульсов с пиковой мощностью, многократно превышающей мощность накачки.

На основе полученных уравнений показана возможность формирования терагерцовых импульсов СИ при вынужденном обратном рассеянии лазерного излучения на попутном релятивистском электронном пучке. Рассмотрена возможность генерации как одиночного терагерцового импульса при использовании квазинепрерывного электронного пучка, формируемого на основе взрывной эмиссии, так и последовательности импульсов с периодом, равным периоду следования электронных сгустков, формируемых инжектором с фотокатода.

В третьей главе рассматривается метод формирования микроволновых солитонов самоиндуцированной прозрачности (СИП-солитонов) в процессе циклотронно-резонансного взаимодействия коротких импульсов с первоначально прямолинейным электронным пучком, выступающим в роли пассивной среды. Целью данной главы являлся поиск семейства двухпараметрических решений, описывающих формирующиеся СИП-солитоны.

Показано, что форма микроволнового СИП-солитона, в отличие от оптических аналогов, определяется не только его скоростью, но и параметром сдвига относительно частоты циклотронного резонанса. При этом формируемые солитоны обладают частотной зависимостью (чирпом) вдоль бегущей волновой переменной. На основе численного

моделирования попутного и встречного распространения солитонов относительно электронного пучка **показана** устойчивость полученных аналитических решений.

По материалам диссертационной работы имеется ряд замечаний и вопросов. В частности:

1. В главе 1 на стр. 38 вместо возможности трансформации $TE_{3,1}$ в $TM_{0,1}$ и обратно ошибочно говорится о трансформации $TE_{3,1}$ в $TE_{3,1}$ и обратно.

2. Преобразователи типов волн являются такими же функциональными элементами рассматриваемой СРА схемы, как стретчер, усилитель и компрессор. Однако вопросы их реализации в работе не обсуждаются.

3. Как предполагается реализовать входы в усилители и частотные модуляторы, совмещающие ввод сигнальных импульсов и электронных пучков?

4. В анализируемых моделях рассматриваются идеальные электронные пучки. К чему приведет переход к реальным электронным пучкам, обладающим толщиной, радиальной неоднородностью, разбросом продольных и наличием радиальных скоростей?

Отмеченные замечания не влияют на общее положительное впечатление о диссертационной работе. Автором получен ряд новых результатов. В целом, защищаемые Л. А. Юровским положения раскрыты и доказаны в диссертационной работе. Автореферат в сжатой форме достаточно полно отражает содержание диссертации, даёт необходимое представление об использованных методах, подходах и полученных результатах.

В целом диссертация Юровского Льва Александровича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные задачи развития методов получения ультракоротких микроволновых импульсов большой амплитуды. Результаты диссертации имеют важное теоретическое значение и могут быть использованы для дальнейших исследований по радиофизике и в смежных областях в академических и других профильных организациях.

Юровский Лев Александрович является сложившимся специалистом в области радиофизики и высокочастотной электроники; его высокая квалификация не вызывает сомнений. Он уверенно владеет аппаратом аналитического и численного анализа. Основные результаты работы Юровского Л.А. представлены в двадцати научных трудах. Это публикации в профильных зарубежных научных журналах с высоким импакт-фактором и в российских переводных изданиях, а также в материалах (докладах) российских и международных конференций. Описанные методы исследований свидетельствуют о достоверности полученных результатов.

В целом диссертационная работа Юровского Льва Александровича «Развитие методов формирования и усиления коротких микроволновых импульсов» удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - радиофизика.

Работа заслушана и обсуждалась на расширенном семинаре лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН протокол № 5 от 26 октября 2022 года.

Отзыв составил

главный научный сотрудник ИЭФ УрО РАН,
д.т.н., академик РАН

Яландин М.И.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

Тел.: 8 (343) 267-87-96

Факс: (343) 267-87-94

E-mail: admin@iep.uran.ru

Подпись Яландин М.И. заверяю

Ученый секретарь
к.ф.-м.н.

Е.Е. Кокорина

