

ЕЛЬЧАНИНОВ АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ

МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ СВЧ-ГЕНЕРАТОРЫ НА ОСНОВЕ ЛАМПЫ  
ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ В РЕЖИМЕ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ

01.04.04 — физическая электроника

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Институте сильноточной электроники СО РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Ростов В. В. (Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Кошелев В. И. (Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск)

кандидат физико-математических наук,  
Шлапаковский А. С. (ФГНУ Научно-исследовательский институт ядерной физики)

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Защита состоится “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2007 в \_\_\_\_\_ ч. \_\_\_\_\_ мин на заседании Диссертационного совета Д 003.31.01 при Институте сильноточной электроники СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2007.

Учёный секретарь Диссертационного совета доктор физико-математических наук, профессор

Проскуровский Д. И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Тема исследования, её актуальность

Сверхизлучение (СИ) — одно из наиболее интересных явлений в физике кооперативного электромагнитного излучения — было предсказано Р. Дике<sup>1</sup> в 1954 г. для двухуровневой квантовой системы с инверсной населённостью. Оно заключается в том, что при определённых условиях возможно формирование в активной среде мощного импульса излучения, энергия которого равна всей энергии, запасённой в системе, а мощность пропорциональна квадрату числа частиц, что говорит о том, что все частицы излучают в одной фазе, то есть излучение носит кооперативный характер.

Интерес к поиску аналогов явления сверхизлучения в нековантовых системах возник в середине 80-х годов. В настоящее время возможность реализации сверхизлучательного механизма генерации электромагнитных импульсов как теоретически, так и экспериментально продемонстрирована в лазерах на свободных электронах, приборах с циклотронным и черенковским взаимодействием. Характерной особенностью режима СИ является формирование короткого импульса, содержащего всего несколько периодов электромагнитного поля. Оценки эффективности излучения (отношения энергии излучения к суммарной начальной энергии ансамбля электронов) в численном расчете дают величину  $> 50\%$ , что может значительно превышать энергетическую эффективность аналогичных приборов при работе в стационарном режиме. Высокая эффективность энергообмена обусловлена благоприятным продольным распределением амплитуды поля в электромагнитном импульсе, обеспечивающим формирование электронных сгустков в тормозящей фазе. Мощность излучения, как показано в описанных далее экспериментах, при этом может превышать мощность электронного пучка. Это связано с выполнением одного из условий СИ, когда время передачи энергии в электромагнитный пакет

---

<sup>1</sup>Dicke R.H. // Phys. Rev., 1954, V. 93, P. 99–110.

(или время высвечивания  $t_{\Sigma}$ ) значительно превышает его длительность  $\Delta t$ . Другим важным условием реализации режима СИ является ограниченность во времени электронного сгустка ( $t_b < t_{\Sigma}$ ). И наконец, как и в квантовой системе, время релаксации когерентности в среде должно превышать  $t_{\Sigma}$ .

При малых длительностях электромагнитного импульса существенно возрастает электрическая прочность системы, что даёт возможность получения предельно высоких для микроволнового диапазона уровней мощности. Эти особенности делают сверхизлучательные приборы перспективным источником сверхмощных (гигаваттного уровня) электромагнитных импульсов.

Одна из первых моделей СИ системы в классической электронике была разработана в Институте прикладной физики РАН. Она представляла собой замедляющую систему в однородном продольном магнитном поле, вдоль которой распространяются навстречу друг другу два пучка электронов<sup>2</sup>. В дальнейшем в ИПФ РАН была разработана теория СИ в более простых системах как на основе циклотронного механизма<sup>3</sup>, так и в случае черенковского взаимодействия. В совместных работах ИПФ и Института электрофизики УрО РАН возможность реализации аналога эффекта СИ была установлена экспериментально<sup>4</sup>.

Генераторы СВЧ-диапазона на основе эффекта сверхизлучения, благодаря своим уникальным параметрам (высокая мощность и эффективность, малая длительность импульса), могут послужить базой для развития радиолокации высокого разрешения, найти применение в биофизических исследованиях, ускорительной технике, физике плазмы. В перспективе, при решении ряда технических проблем, высокоэффективные генераторы коротких мощных СВЧ-импульсов могут найти и тех-

---

<sup>2</sup>Железняков В.В., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. С. 1095.

<sup>3</sup>Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С. // Письма в ЖЭТФ, 1994, Т. 60, В. 7, С. 501.

<sup>4</sup>Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Коноплев И.В. и др. // Письма в ЖЭТФ, 1996, Т. 63, В. 5, С. 322.

нологическое применение, например в катализе и плазмохимии.

Экспериментальные исследования сверхизлучательных СВЧ-генераторов ведутся в Институте электрофизики УрО РАН и Институте сильноточной электроники СО РАН.

Основной целью диссертационной работы являлось исследование нестационарной генерации сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения в сантиметровом диапазоне длин волн при взаимодействии сильноточного электронного пучка с синхронной пространственной гармоникой встречной волны в периодических замедляющих системах типа лампы обратной волны.

На защиту выносятся следующие положения:

- Экспериментально показано, что в релятивистской лампе обратной волны с длиной электродинамической системы, многократно превышающей стартовую, в области параметров гофрировки, обеспечивающих минимальное расплывание волнового пакета из-за частотной дисперсии его групповой скорости, реализуется генерация сверхкоротких импульсов СВЧ-излучения с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного пучка. При длине электродинамической системы, превышающей стартовую в 6 раз, и отношении среднего диаметра замедляющей системы к длине волны излучения 1.5 в 3-см диапазоне длин волн получена пиковая мощность 3 ГВт при коэффициенте преобразования мощности от электронного пучка в излучение, равном 1.8.
- Сокращение длительности фронта импульса ускоряющего напряжения на вакуумном диоде с 2 нс до 0.5 нс позволяет увеличить ресурс стабильной генерации СВЧ-импульсов в релятивистской лампе обратной волны 3-см диапазона с уровнем магнитного поля ниже области циклотронного поглощения встречной волны при работе в импульсно-периодическом режиме с  $10^4$  до  $10^6$  импульсов, что свя-

зано с сокращением времени запаздывания тока в вакуумной диоде с взрывоэмиссионным катодом относительно импульса напряжения и уменьшением задержки возбуждения СВЧ-импульса.

- Наличие зависимости инкремента неустойчивости в системе электронный пучок — встречная волна от диаметра пучка позволяет осуществлять регулировку длительности генерируемого СВЧ-импульса. В релятивистской лампе обратной волны с частотой генерации 3.7 ГГц, при 5% изменении диаметра электронного пучка, диапазон регулировки достигает 30%.

#### Достоверность результатов.

Для анализа процессов генерации использовались как простые одномерные нестационарные модели, так и полномасштабные численные эксперименты на основе программы KARAT с реальными геометриями электродинамической системы ЛОВ. Достоверность теоретического анализа подтверждается качественным и количественным согласием с результатами экспериментов, проведенных как в ИСЭ СО РАН, так и в Институте электрофизики УрО РАН. Разнообразие использованных в экспериментальных работах методик регистрации, часто дублирующих друг друга, способствовало повышению точности и достоверности измерений выходных параметров генерации.

#### Научная новизна работы.

В работе проведен разносторонний анализ нестационарных процессов в релятивистской лампе обратной волны в сверхизлучательном режиме. Найдены условия для эффективной генерации импульсов излучения с длительностью в единицы периодов ВЧ-поля.

В численном расчете показано, что выходная мощность такого генератора может превышать мощность электронного пучка. Этот эффект объясняется аккумуляцией энергии в коротком по сравнению с длиной системы электромагнит-

ном импульсе, который, перемещаясь, взаимодействует с новыми порциями электронного потока. Возможность получения в релятивистской ЛОВ импульсов с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного пучка, была подтверждена экспериментально /1, 2, 3/. Результат был достигнут благодаря использованию замедляющих систем с пониженной дисперсией групповой скорости, а также выбором оптимальных условий такого режима генерации, в частности, с использованием неоднородных замедляющих систем и профилированием ведущего магнитного поля.

Дальнейшие исследования были направлены как на определение фундаментальных и практических ограничений на мощность в импульсе (в настоящий момент максимальная мощность, полученная в СИ ЛОВ, составляет около 3 ГВт /4, 5/), так и создание установок для прикладных задач, в частности, работающих в импульсно-периодическом режиме. В связи с этим возникла потребность в повышении ресурса работы взрывоэмиссионного катода, разработке систем, работающих при уровне ведущего магнитного поля ниже величины, соответствующей циклотронному резонансному поглощению встречной волны, общей оптимизации системы с точки зрения энергетической эффективности, анализу влияния пучковых неустойчивостей на процесс генерации.

Высокие коэффициенты конверсии (отношение мощности СВЧ-излучения к мощности пучка) позволили создать установки гигаваттного уровня мощности при умеренной энергии электронов, что дало возможность не только значительно уменьшить габариты и стоимость системы, но и привело к заметному снижению уровня рентгеновского тормозного излучения и упрощению биологической защиты.

Практическая значимость работы, внедрение результатов.

Результаты работы позволили реализовать новый класс релятивистских СВЧ-приборов с уникальными параметрами. Разработана серия экспериментальных установок, работаю-

щих как в режиме однократных импульсов, так и импульсно-периодическом режимах. Установки использовались при проведении исследований в ИСЭ СО РАН, ИЭФ УрО РАН, компаниях ITNPP (Франция), BAE Systems (Великобритания), университете NUDT (Китай).

Вклад автора заключался в участии в постановке задач исследования, проведении численного моделирования, конструировании электродинамических систем и других частей экспериментальных установок, средств диагностики, проведении экспериментов и интерпретации полученных результатов. Все эксперименты выполнены либо непосредственно автором, либо с его активным участием.

Публикации результатов. Основные результаты диссертационной работы изложены в статьях /1/ — /11/ и представлены на конференциях BEAMS'2002 (Альбукерк, США), BEAMS'2006 (Великобритания), Международных симпозиумах по сильноточной электронике (2004 и 2006 г.г., г. Томск), Школе-семинаре по СВЧ-электронике и радиофизике (2006 год, г. Саратов), а также на семинарах ИСЭ СО РАН.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из четырех глав, введения и заключения. Объем диссертации составляет 106 страниц, включая 48 рисунков, 2 таблицы, и список литературы из 58 наименований.

Первая глава посвящена анализу работ в области релятивистской СВЧ-электроники по использованию нестационарных процессов для генерации коротких мощных импульсов СВЧ-излучения.

В разделе 1.2 описывается система уравнений, соответствующая одномерной нестационарной модели лампы обратной волны с однонаправленным движением электронов (гидродинамическая модель)<sup>5</sup>. Вводится параметр коэффициента конверсии, как отношение пиковой мощности СВЧ-излучения к мощности

---

<sup>5</sup>Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П., Федосеева Т. Н. // Изв. вузов. Радиофизика, 1978, Т. 21, В. 7, С. 1037—1052.



электронного пучка.

В разделе 1.3 приводится оценка длительности импульса формируемого в замедляющей системе типа ЛОВ. Указывается, что зависимость оптимальной длительности СВЧ-импульса от энергии инжектируемых электронов имеет тот же характер, что и длина пространства взаимодействия в классической ЛОВ.

В разделе 1.4 описывается метод оптимизации профиля параметра связи по длине взаимодействия основанный на постоянстве амплитуды синхронной гармоники/5/. В конце главы формулируются задачи исследования.

Вторая глава посвящена изложению теоретического обоснования решаемой задачи.

В разделах 2.1, 2.2 представлены результаты анализа расчетов, выполненных с использованием одномерной нестационарной модели для случаев однородного и гиперболического продольного профиля сопротивления связи.

Найдены условия формирования в протяженной замедляющей системе коротких пиков мощности с высокой эффективностью.

Получены величины оптимальной длительности электронного пучка и уровня начальных возмущений. Показано, что в замедляющей системе с однородным сопротивлением связи, мощность импульса излучения на выходе может превышать мощность исходного электронного пучка. Например, для начальной энергии частиц  $\gamma_0 = 1.6$  и безразмерной длины системы  $\xi_k = 6$  коэффициент конверсии по мощности достигает  $K = 1.16$  (рис. 1). Использование неоднородных замедляющих систем позволяет увеличить выходную мощность ещё в несколько раз ( $K = 2.83$  при тех же условиях).

В разделе 2.3 описывается возможность регулировки длительности генерируемого СВЧ-импульса за счет того, что инкремент развивающейся в системе неустойчивости пропорционален сопротивлению связи пучка с волной. Регулировка сопротивления связи может быть произведена за счет изменения

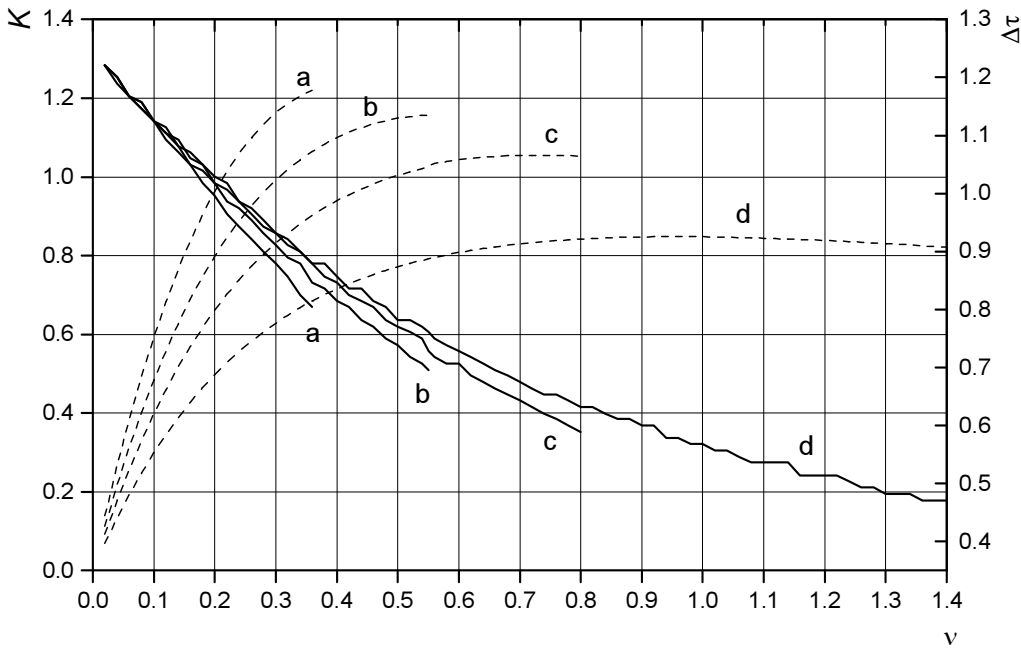


Рис. 1. Длительность импульса (сплошные линии) и коэффициент конверсии (пунктир) в однородной замедляющей системе в зависимости от параметра нелинейности для  $\gamma_0 \approx 1$  (a),  $\gamma_0 = 1.6$  (b),  $\gamma_0 = 3$  (c),  $\gamma_0 \gg 1$  (d).

расстояния между электронным пучком и гофрировкой.

В разделе 2.4 указывается, что существует условие на оптимальную длительность фронта пучка, спектральные компоненты тока которого обеспечивают затравку для возникновения генерации.

Разделы 2.5—2.6 посвящены сравнению результатов гидродинамического приближения с PIC-моделью, допускающей остановку частиц. Показано, что область появления отраженных частиц в гидродинамической модели соответствует максимуму коэффициента конверсии.

В разделе 2.7 получена оценка влияния энергетического разброса электронов пучка на выходные параметры генератора. Показано, что с ростом разброса длительность выходного импульса возрастает, при этом энергетическая эффективность генератора снижается значительно медленнее, чем падает коэффициент конверсии по мощности.

В разделе 2.8 обосновывается необходимость использования низкодисперсионных замедляющих систем.

В третьей главе описаны особенности использовавшихся экспериментальных установок и систем диагностики, приведены методики измерения временных, спектральных и энергетических параметров субнаносекундных СВЧ-импульсов сантиметрового диапазона гигаваттного уровня мощности.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований релятивистских электронных СВЧ-генераторов, разработанных в соответствии с описанными принципами.

Раздел 4.2 посвящен описанию генератора на базе компактного ускорителя СИНУС-120 с параметрами: напряжение на вакуумной диоде до 330 кВ, длительность импульса 4 нс, ток пучка до 2.6 кА при величине ведущего магнитного поля 2.4 Т. В этом эксперименте впервые в ЛОВ был получен СВЧ-импульс с мощностью, превосходящей мощность электронного пучка (рис. 2). Длительность импульса СВЧ-излучения составляла 0.5 нс, центральная частота 9.9 ГГц.

В разделе 4.3 описывается эксперимент, направленный на достижение максимального коэффициента конверсии. Использовался ускоритель типа СИНУС-200 и ЛОВ с увеличенной длиной ЗС (50 периодов гофрировки) и выводом излучения с катодного края. В эксперименте была получена выходная мощность 3 ГВт при длительности СВЧ-импульса 0.65 нс и центральной частоте 9.3 ГГц. Получен коэффициент конверсии 1.8, энергия в импульсе достигала 2.4 Дж. Катодное напряжение составляло 320 кВ, при длительности 9 нс и токе пучка 5.5 кА. Эксперимент показал важность учета пучковых неустойчивостей при разработке протяженных замедляющих систем.

Последующие эксперименты ставили своей целью создание работающих в импульсно-периодическом режиме установок для практических применений. Продолжительный режим работы потребовал снижения рассеиваемой в соленоиде мощности,

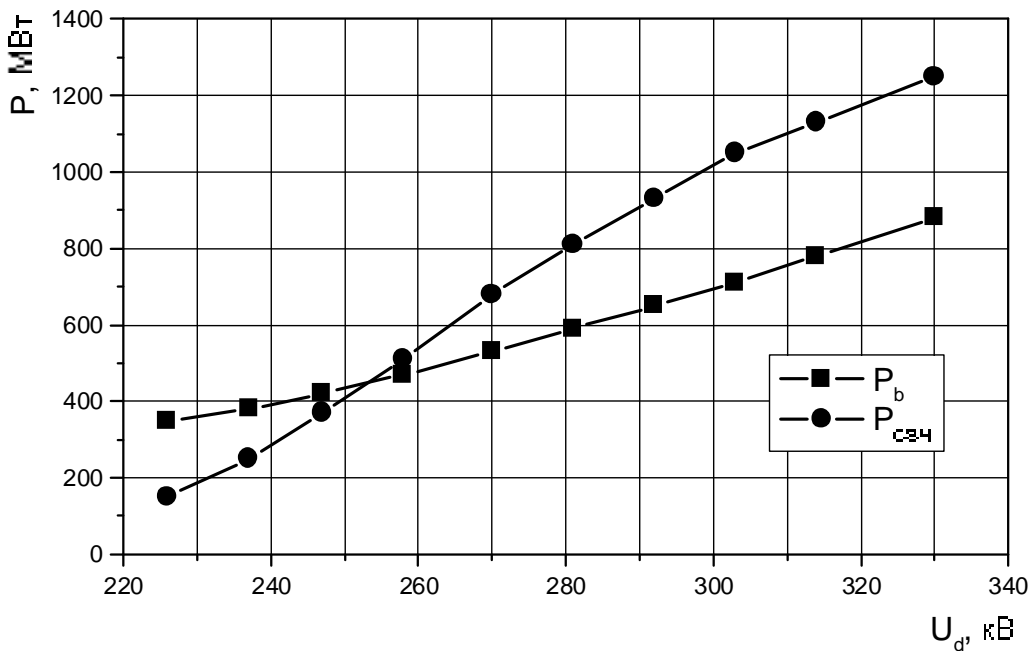


Рис. 2. Зависимость выходной СВЧ-мощности и мощности электронного пучка от напряжения на диоде.

что привело к необходимости создания электродинамических систем способных работать в низких магнитных полях, ниже величины, соответствующей резонансному циклотронному поглощению встречной волны.

Были разработаны генераторы 3-см (раздел 4.4) и 8-см (раздел 4.5) диапазонов. Коэффициент конверсии в обоих экспериментах составлял около 0.5, а длительность импульса излучения была приблизительно вдвое выше, чем реализуемая в сильных магнитных полях, что обусловлено большей толщиной электронного пучка и возрастанием разброса скоростей частиц. При работе в длительном импульсно-периодическом режиме с деградацией взрывоэмиссионного катода время нарастания тока в вакуумном диоде увеличивается настолько, что становится сравнимо с полной длительностью импульса напряжения. Этот эффект усиливается в слабых магнитных полях и приводит к возрастанию задержки импульса СВЧ-излучения относительно фронта импульса напряжения на диоде. Для улучшения условий формирования электронного пучка в конструкцию

генератора был включен обостряющий разрядник, формирующий фронт импульса напряжения на катоде с длительностью около 0.5 нс. Были использованы катоды из фольгированного стеклотекстолита, так как их эмиссионная способность падала с наработкой медленнее, чем при использовании катодов из графита. Ресурс катодов составлял до  $10^6$  импульсов. Использование двухсекционных соленоидов с независимой регулировкой тока позволило осуществить электронную перестройку длительности СВЧ-импульса за счет регулировки диаметра пучка в ЗС. Благодаря непосредственной регистрации ВЧ-сигнала в 8-см эксперименте был обнаружен эффект синхронизации фазы излучения с фронтом импульса напряжения на катоде.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. В работе проведен анализ нестационарных процессов в релятивистской лампе обратной волны в сверхизлучательном режиме. Найдены области параметров электродинамических систем, позволяющих реализовать эффективную генерацию мощных импульсов излучения с длительностью в единицы периодов ВЧ-колебания. Показано, что частотная дисперсия групповой скорости волны в замедляющей системе может являться одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих эффективность генерации коротких импульсов.
2. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность генерации в релятивистской лампе обратной волны импульса СВЧ-излучения с длительностью в единицы периодов ВЧ-колебаний и с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного пучка.
3. Предложена и реализована возможность регулировки дли-

тельности СВЧ-импульса сверхизлучательной ЛОВ за счет малых — в несколько процентов — вариаций диаметра пучка. Эффект обусловлен зависимостью инкремента абсолютной неустойчивости в системе "электронный пучок — встречная волна" от сопротивления связи. Диапазон регулировки достигает 30%. Регулировка осуществляется электронным способом, путем изменения соотношения токов в катодной и дрейфовых секциях соленоида.

4. Показано, что основной причиной снижения выходной мощности сверхизлучательного генератора с низким магнитным полем в длительном импульсно-периодическом режиме является ухудшение эмиссионных свойств катода, приводящее к росту задержки тока электронного пучка и снижению стабильности его параметров. Сокращение длительности фронта импульса напряжения на вакуумном диоде с 2 нс до 0.5 нс улучшает стабильность работы и замедляет падение мощности в длительном периодическом режиме. При этом ресурс работы катода возрастает с  $10^4$  до  $10^6$  импульсов.
5. Разработана серия генераторов мощных сверхкоротких СВЧ-импульсов сантиметрового диапазона на основе компактных ускорителей электронов, работающих как в однократном, так и импульсно-периодическом режимах. В исследованных генераторах получена импульсная мощность: в 3-см диапазоне в разовом режиме — 3 ГВт при коэффициенте конверсии 1.8, в 3-см диапазоне в периодическом режиме — 0.5 ГВт при коэффициенте конверсии 0.5, в 8-см диапазоне в периодическом режиме - 0.8 ГВт при коэффициенте конверсии 0.5.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить Владислава Владимировича Ростова за руководство работой и д. ф.-м. н. Наума Самуиловича Гинзбурга за ценные замечания, чл.-корр. РАН Михаила Ивановича Яланда за внима-

ние к работе и практическую помощь, а также коллег из отдела физической электроники ИСЭ СО РАН за сотрудничество и поддержку.

**Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:**

- [1] Elchaninov A.A., S.D. Korovin, I.V. Pegel, V.V. Rostov, V.G. Shpak, M.I. Yalandin. Highly Efficient Generation of Subnanosecond Pulses in Ka-Band and Nanosecond Pulses in X-Band. // Proc. 14<sup>th</sup> Int. Con. On High-Power Particle Beams, Albuquerque, NM, June 23-28, 2002, P. 279—282.
- [2] Ельчанинов А.А., Коровин С.Д., Ростов В.В., Пегель И.В., Месяц Г.А., Яландин М.И., Гинзбург Н.С. Черенковское сверхизлучение с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного потока // Письма в ЖЭТФ, 2003, т. 77, В. 6, С. 314—318.
- [3] Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Пегель И. В., Ростов В. В., С. Н. Рукин, В. Г. Шпак, М. И. Яландин. Сверхизлучательный режим релятивистской ЛОВ с высокой пиковой мощностью микроволновых импульсов // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 2003, Т. 46, В. 3—4, С. 55—56.
- [4] A. A. Eltchaninov, S. D. Korovin, V. V. Rostov, I. V. Pegel, G. A. Mesyats, S. N. Rukin, V. G. Shpak, M. I. Yalandin, N. S. Ginzburg. Production of short microwave pulses with a peak power exceeding the driving electron beam power // Laser and particle beams, 2003, V. 21, Issue 02, P. 187 - 196.
- [5] А. А. Ельчанинов, С. Д. Коровин, И. В. Пегель, В. В. Ростов. Генерирование коротких мощных СВЧ-импульсов в режиме пространственного накопления электромагнитной энергии // Вопросы атомной науки и техники. Серия "плазменная электроника и новые методы ускорения"(3), 2003, № 4, С. 20—25.

- [6] Eltchaninov A. A., Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Rostov V. V., Shpak V. G., Yalandin M. I. Review of studies of superradiative microwave generation in X-band and Ka-band relativistic BWO's. // IEEE Trans. Plasma Sci., 2004, V. 32, № 3, P. 1093—1099
- [7] Korovin S. D., Eltchaninov A. A., Rostov V. V., Shpak V. G., Yalandin M. I., Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Zotova I. V. Generation of Cherenkov superradiance pulses with a peak power exceeding the power of the driving short electron beam. // Physical review E, 2006, V. 74, № 1, P. 6501—6508.
- [8] Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Пегель И. В., Ростов В. В., Яландин М. И. Генерация мощных сверхкоротких импульсов СВЧ-излучения. // Известия вузов. Радиофизика, 2003, Т. 46, № 8—9, С. 1—9.
- [9] Ельчанинов А. А., Климов А. И., Куркан К. И. Гетеродинный измеритель спектральных характеристик мощных наносекундных с.в.ч-импульсов трехсантиметрового диапазона. // ПТЭ, 2000, № 1, С. 98—100.
- [10] Rostov V. V., Eltchaninov A. A., Korovin S. D., Mesyats G. A., Rukin S. N., Shpak V. G., and Yalandin M. I. Generation of High Peak and High Average Power Subnanosecond-Width 10-GHz Microwave Pulses. // Proc. 13th Int. Simp. On High Current Electronics, 2004, Tomsk, Russia, P. 250—253.
- [11] Афанасьев К. В., Быков Н. М., Губанов В. П., Ельчанинов А. А., Климов А. И., Коровин С. Д., Ростов В. В., Степченко А. С. Импульсно-периодический источник мощного когерентного электромагнитного излучения 8-см диапазона с наносекундной длительностью импульсов // Письма в ЖТФ, 2006, Т. 32, В. 21, С. 23—28.