

Объединенный институт ядерных исследований
Лаборатория физики высоких энергий

На правах рукописи

УДК 621 384 633

Каминский Алим Константинович

**Мазер на свободных электронах с «обратным» ведущим
магнитным полем и его использование для исследования
ресурса ускоряющих структур коллайдеров**

01-04-20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна – 2014

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Братман Владимир Львович,
ИПФ РАН, Нижний Новгород,
доктор физико-математических наук, профессор
Стрелков Павел Сергеевич,
ИОФ РАН, Москва,
Член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
Яландин Михаил Иванович,
ИЭФ УРО РАН, Екатеринбург.

Ведущая организация:

ФИ РАН им П.Н. Лебедева, Москва.

Защита состоится « ____ » _____ 2014 г. на заседании специализированного совета Д 720. 001.03 при ЛЯП ОИЯИ по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в Объединенном институте ядерных исследований (141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Объединенного института ядерных исследований и на сайте . http://www.info.jinr.ru/dissertation/DC_dlnp.htm

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета _____

Карамышева Г.А.

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность темы диссертации.

В настоящее время в ЦЕРНе (Швейцария) активно ведутся работы по проектированию и созданию линейного электрон-позитронного коллайдера CLIC. В проекте этого коллайдера заложены рекордно высокие значения энергии электронов и позитронов (до 5 ТэВ), темпа ускорения (100 МВ/м) и рабочей частоты (12 ГГц). Среди проектных параметров коллайдера нужно также отметить также его высокую светимость (более 10^{34} см⁻²с⁻¹) [1, 2]. Идея значительного увеличения ускоряющих полей (до 500-1000 МВ/м) за счет увеличения рабочей частоты до 10-40 ГГц сформулирована в работе [3]. В работах [4-7] показано, что для создания e^+, e^- коллайдера на энергию 1ТэВ при темпе ускорения 200 МВ/м, длине коллайдера 5 км и частоте 17 ГГц требуется обеспечить кроме большой величины полной импульсной СВЧ мощности весьма значительную погонную мощность (около 600 МВт/м). Поскольку в микроволновом диапазоне эффективность традиционно использовавшихся источников СВЧ мощности (клистронов) с ростом частоты резко снижается, то становится очевидным, что разработка и создание мощных, высокоэффективных одномодовых источников данного диапазона является актуальной задачей и для СВЧ электроники, и для приложений, связанных с решением задач коллайдерной тематики.

Типичная величина добротности ускоряющей структуры коллайдера составляет около 1000. Из этого следует, что ширина спектра источника СВЧ мощности и допустимое рассогласование частот источника и нагрузки должно быть меньше 10-40 МГц. Перспективными импульсными источниками, способными обеспечить в микроволновом диапазоне узкополосное излучение с уровнем мощности 10^6 Вт - 10^9 Вт, являются мазеры на свободных электронах (МСЭ). Принцип работы МСЭ основан на вынужденном ондуляторном излучении релятивистских электронных пучков (РЭП). В применении к коллайдерам можно рассматривать два варианта использования МСЭ:

1. *Создание источников большой импульсной мощности в диапазоне частот, определяемых условиями задачи.*

2. *Тестирование элементов ускоряющих структур коллайдера.* Задачи тестирования состоят в том, чтобы в режиме большой импульсной мощности определить основные факторы, которые ограничивают величину предельно допустимого темпа ускорения, и найти способы снижения этих ограничений. Сформулированную задачу можно рассматривать как часть более общей проблемы - выбора материала, способного обеспечить надежную эксплуатацию высокоградиентной ускоряющей структуры коллайдера в диапазоне частот 10-40 ГГц в течение около 20 лет (т. е. в течение примерно $5 \cdot 10^{10}$ рабочих импульсов).

В работах [10-12] показано, что при длинах волн короче 10 мм (при рабочих частотах выше 30 ГГц) самыми жесткими становятся ограничения на ускоряющий градиент из-за импульсных циклических нагрузок. Физическое объяснение этого нового ограничения состоит в следующем. Глубина скинслоя для меди в диапазоне частот от 10 ГГц до 90 ГГц в десятки раз меньше глубины теплового скинслоя. За время СВЧ импульса, которое составляет около сотни наносекунд, тепло не успевает распространиться вглубь металла, и вся поглощенная за импульс энергия расходуется на нагрев его тонкого (около микрона) слоя. Величина нагрева поверхностного слоя металла может достигать сотен градусов. В результате, даже при незначительных импульсных нагревах между нагретым и холодным соседним слоем металла возникают механические напряжения, которые суммируются с каждым новым импульсом. При воздействии большого числа N таких импульсов в металле могут возникнуть механические повреждения. Из вышесказанного следует, что получение экспериментальных данных по определению этого нового ограничения на величину темпа ускорения в коллайдерах является актуальной задачей, имеющей важное практическое значение.

Цели диссертационной работы

1. Разработка новых типов МСЭ генераторов и МСЭ усилителей с целью значительного уменьшения, по сравнению с «традиционными» схемами МСЭ, зависимостей их параметров от начальных энергетического и скоростного разбросов в электронном пучке ускорителя. Создание на этой основе МСЭ источников, имеющих существенно лучшую, чем в «традиционных» схемах МСЭ, комбинацию таких выходных характеристик как ширина спектра, возможность прецизионного согласования частот генератора и нагрузки, эффективность.
2. Создание на основе реализованного МСЭ высокочастотного стенда для проведения исследований по актуальным проблемам проектирования e^+, e^- коллайдеров и проведение исследований на стенде по проблемам, важным для проектирования коллайдеров. [13].

Научная новизна и практическая ценность

1. Предложен и обоснован новый тип МСЭ [1*-10*], который имеет существенно более слабую чувствительность к энергетическому и скоростному разбросам в электронном пучке, чем «традиционные» схемы МСЭ. Такой тип МСЭ в наших публикациях назван МСЭ с «обратным» ведущим полем. Этот термин в литературе считается установившимся. В зарубежной литературе встречается два варианта названия МСЭ такого типа: «backward» либо «reversed».
2. На основе ускорителя ЛИУ-3000 на частоте 30 ГГц впервые создан МСЭ генератор с «обратным» ведущим полем. В новом типе МСЭ генератора получена в 20 - 25 раз более узкая,

чем в «традиционных» схемах МСЭ, ширина спектра при одновременном 2 - 3-кратном увеличении импульсной мощности до 3 - 5 МВт .

3. С использованием ускорителя ЛИУ-3000 на частоте 36,4 ГГц созданы МСЭ усилители с «обратным» ведущим полем с постоянным и профилированным по длине полем вигглера. В МСЭ с профилированием поля вигглера получено увеличение выходной мощности с 5 - 6 МВт до 20 - 25 МВт. Ширина спектра в обоих типах усилителей не превышала 1 - 2%

4. Предложен и реализован МСЭ генератор с «обратным» ведущим полем и с брэгговским резонатором в цепи обратной связи. Достигнуто дальнейшее уменьшение ширины спектра излучения (в 15 - 20 раз по сравнению с МСЭ с двухзеркальным резонатором типа Фабри-Перо) - до величины 5 - 10 МГц, которая близка к естественной ширине спектра при длительности импульса около 200 нс. Уменьшение ширины спектра сопровождалось увеличением выходной мощности МСЭ-генератора до 18 - 25 МВт.

5. Для вывода излучения из вакуумного волновода МСЭ в атмосферу без электрических пробоев и для защиты элементов СВЧ тракта от разрушения из-за высадки электронного пучка в качестве выходной секции МСЭ использованы сверхразмерные волноводы, в которых реализуется эффект Тальбо.

6. На основе реализованного МСЭ-генератора нового типа создан стенд для тестирования ресурса металлов и сплавов под воздействием мощных циклических СВЧ-импульсов. В ходе исследований, проведенных по инициативе и в коллаборации с группой CLIC, получены новые результаты по определению динамики повреждения меди вплоть до ее разрушения при величинах импульсного нагрева до 200 - 300 °С.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались автором на семинарах ОНМУ, ЛФВЭ ЛНФ и ЛЯП, на секции ускорительного отделения, на ПКК ОИЯИ, а также на семинарах в ИПФ РАН (Нижний Новгород), ФИ РАН, ИОФ РАН, МРТИ (Москва). Результаты исследований МСЭ с «обратным» ведущим полем докладывались на 11 и 13 Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна 1988, 1992), на 2 Всесоюзном совещании по новым методам ускорения заряженных частиц (Норд Амберд, Армения 1989), на 7 Всесоюзном семинаре по сильноточной релятивистской электронике (Томск, 1991), на 14 Международной конференции ускорителям высоких энергий (Цукубо, Япония, 1989), на 3 и 4 Международных совещаниях по линейным коллайдерам (Протвино, 1991; Гармиш-Партенкирхен, Германия 1992), на 14 и 15 международных конференциях по ЛСЭ (Кобэ, Япония 1992 и Хагуэ, Нидерланды, 1997), на SPIE Symposium Intense Microwave and Particle Beams III (Лос-Анжелес, США 1992), на Международных совещаниях «Сильные микроволны в

плазме» (Нижний Новгород, 1999, 2002, 2005, 2008, 2011), на рабочих совещаниях группы CLIC (ЦЕРН, Швейцария 2006, 2007, 2008) и др. Итоговые результаты диссертации докладывались на методическом семинаре ЛФВЭ в 2013г. (Дубна), на ускорительных секциях общеинститутского семинара и семинара ЛЯП ОИЯИ (2013) и на X семинаре памяти В.П.Саранцева в г. Алуште (2013). Основные результаты по теме диссертации опубликованы в работах[1*-43*].

Личный вклад автора

Идея создания МСЭ в ОИЯИ с использованием линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-3000 была обоснована автором диссертации на НТС ОНМУ ОИЯИ в 1983 году. С тех пор автор диссертационной работы определял программу исследований и был фактическим руководителем исследований МСЭ, проводившихся в ОИЯИ. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах проектирования и создания МСЭ, начиная от диагностики электронного пучка ускорителя ЛИУ 3000, и кончая получением результатов по каждой исследованной схеме генератора или усилителя. Автором сформулирована идея создания МСЭ генератора с «обратным» ведущим магнитным полем и проведены исследования новой схемы на ЛИУ-3000. Результаты этих исследований, а также результаты исследований усилительных схем МСЭ с постоянным и профилированным полем вигглера вошли в кандидатскую диссертацию автора. После этого автором была предложена схема МСЭ генератора с «обратным» ведущим магнитным полем и с брэгговским резонатором в цепи обратной связи. Все указанные схемы МСЭ были реализованы впервые под руководством и при участии автора.

Предложение использовать МСЭ генератор с «обратным» ведущим магнитным полем для разработки проекта коллайдера CLIC было рассмотрено во время встречи в Дубне представителей научных коллективов CLIC (ЦЕРН), ИФФ РАН (Нижний Новгород) и ОИЯИ (Дубна) [13]. После предварительной проработки параметров узлов стенда, весь цикл исследований с целью получения экспериментальных результатов был выполнен под руководством и при непосредственном участии автора. Полученные на стенде результаты докладывались автором на семинарах коллаборации CLIC в ЦЕРНе в 2006 - 2008 г. и опубликованы в российских и зарубежных журналах. Из них 43 публикации включены в настоящую диссертацию, включая 23 публикации в рецензируемых журналах.

Положения, выносимые на защиту.

1. Для тестирования элементов ускоряющих структур коллайдеров в диапазоне частот до 40 ГГц, в котором отсутствуют коммерческие мощные импульсные источники СВЧ мощности, могут быть использованы мазеры на свободных электронах (МСЭ) с «обратным» ведущим магнитным полем. Ключевыми параметрами таких источников являются узкий спектр (лучше

$1 \cdot 10^{-3}$), фиксация рабочей частоты с погрешностью меньшей, чем $1 \cdot 10^{-3}$, прецизионное согласование частот источника и нагрузки, величина импульсной мощности больше 10 МВт и длительность СВЧ импульса больше 150 нс.

2. Использование предложенных автором диссертации и впервые реализованных им МСЭ генератора и усилителя с «обратным» ведущим магнитным полем позволяет существенно снизить их чувствительность к скоростному и энергетическому разбросам в электронном пучке и улучшить их спектральные характеристики в 20-25 раз по сравнению с «традиционными» схемами МСЭ. Включение селективного брэгговского резонатора со скачком фазы гофрировки в цепь обратной связи МСЭ с «обратным» ведущим полем позволяет улучшить его спектральные характеристики еще более, чем на порядок при одновременном увеличении его выходной мощности. В усилительной схеме МСЭ с «обратным» ведущим полем достигается шестикратное увеличение эффективности по сравнению с «традиционными» схемами, а при профилировании поля вигглера по длине выходная мощность усилителя увеличивается в 4-5 раза по сравнению с МСЭ усилителем с постоянной амплитудой поля вигглера.

3. Вывод излучения из вакуумного волновода МСЭ в атмосферу в отсутствие пробоев на выходном вакуумном окне, получение на выходе МСЭ волнового пучка с гауссовым распределением поля, защита выходного окна МСЭ от высадки на него интенсивного электронного пучка, возможность измерения величины и формы тока электронного пучка на выходе МСЭ могут быть реализованы путем использования сверхразмерного волновода, основанного на эффекте Тальбо. В подобном волноводе поперечное распределение СВЧ поля непрерывно меняется с изменением его длины, и заданное распределение поля воспроизводится на некотором расстоянии вследствие интерференции волноводных мод, обладающих квазиэквидистантным спектром групповых скоростей.

4. Параметры излучения, достигнутые в МСЭ генераторе с «обратным» ведущим полем и брэгговским резонатором со скачком фазы гофрировки, позволяют создать на его основе специализированный исследовательский СВЧ стенд для тестирования ресурса металлов и сплавов при облучении их мощными СВЧ импульсами. Параметры стенда дают возможность зарегистрировать и исследовать процесс повреждения исследуемого металла или сплава под воздействием циклических мощных СВЧ импульсов от начальной стадии повреждения до его разрушения при величинах импульсного нагрева до 200°C - 300°C , которые в несколько раз превышают предельные значения нагрева, достигнутые в экспериментах по СВЧ нагреву металлов, проводимых в SLAC (США). Это позволяет на стенде при умеренном числе импульсов исследовать более тугоплавкие, чем медь, металлы, а также сплавы с различными характеристиками.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы (66 пунктов) и списка публикаций автора по теме диссертации (43 пункта). Объем диссертации составляет 207 страниц, включая 80 рисунков. Основные результаты диссертации опубликованы в работах 1*-43*, из которых 23 публикации в рекомендованных ВАК (зарубежных и российских) реферируемых журналах.

В диссертации используется сплошная нумерация цитируемых источников и авторских работ (последние помечены символом (*)). Нумерация параграфов, рисунков и формул производится по главам: к номеру параграфов, рисунков и формул впереди добавляется цифра, соответствующая номеру главы.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснованы актуальность, цель, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Обсуждается набор требований на источники СВЧ мощности на частоте 30 ГГц для использования их в экспериментах по тестированию элементов ускоряющих структур коллайдеров или для запитки высокодобротных ($Q \sim 1000-1500$) резонаторов. Эти требования приведены в таблице 1.

В начале **первой главы**, на основе анализа работ [19-33] сделаны оценки выходных параметров МСЭ, сформулированы требования на диапазон ведущего магнитного поля, поля вигглера и энергию пучка. В качестве источника электронного пучка использован ускоритель электронов ЛИУ-3000 [14,1*-10*]: энергия электронов $E_b = 1,5$ МэВ, ($\gamma = 4$), ток пучка $I_b = 200$ А, длительность импульса тока $\tau_b = 200$ нс, цикличность работы $0,5 \div 1,0$ Гц. Исследования МСЭ начинаются с «традиционной» схемы со спиральным вигглером и ведущим магнитным полем. Термин «традиционная» схема характеризует схему МСЭ, у которой направления вращения электронов в поле вигглера и в ведущем магнитном поле совпадают.

Таблица 1. Требования на параметры МСЭ источника СВЧ излучения с учетом возможности использования его для запитки высокоградиентных структур или резонансных нагрузок с добротностью ($Q \geq 1000$) на частоте 30 ГГц.

	Параметр	Требования
1	Рабочая частота, ГГц	30
2	Относительная ширина спектра, %	не более 0,1
3	Относительная нестабильность частоты, %	не более 0,1
4	Длительность СВЧ импульса, нс	не менее 140
5	Время задержки СВЧ импульса (относительно импульса тока пучка), нс	не более 30
6	Относительная нестабильность амплитуды СВЧ импульсов, %	менее 10
7	Мощность, МВт	10, желательно больше

Из-за относительно небольшой величины тока на выходе ускорителя ЛИУ 3000, значительного энергетического разброса в пучке и ряда других особенностей ускорителя сначала решалась задача экспериментального определения параметров МСЭ генераторов или усилителей, которые могут быть получены в «традиционных» схемах МСЭ. Затем полученные результаты сравнивались с требованиями таблицы 1.

В разделе 1.2 дано описание выбранных магнитной и электродинамической систем МСЭ генератора и МСЭ усилителя для диапазона 10-40 ГГц. Приведены результаты измерений параметров электронного пучка в электропроводе ускорителя и в волноводе МСЭ. В результате экспериментов по оптимизации инжекции пучка в волновод МСЭ в нем была осуществлена транспортировка электронного пучка с плотностью тока около 1 кА/см² и с колебаниями плотности тока, не превышающими 20% [1*-5*].

В разделе 1.3 приведено описание экспериментов по исследованию характеристик «традиционных» схем МСЭ [1*-8*]. В экспериментах с МСЭ-генератором в качестве электродинамической системы использовался двухзеркальный резонатор с отражателями из металлических шайб, помещенных в волновод. Измеренный спектр излучения показан на рис. 1а, мощность излучения составила 1 - 2 МВт в диапазоне частот 30 - 36 ГГц. В экспериментах по исследованию МСЭ-усилителя в «традиционной» схеме не удалось получить сигналов мегаваттного уровня (меньшие по мощности сигналы были сравнимы с величинами наводок на измерительную систему). Результаты экспериментов подробно изложены в публикациях [1*-8*]. Из сравнения полученных параметров МСЭ с требованиями таблицы 1 видно, что в выбранной схеме МСЭ ряд выходных параметров генератора (например, ширина спектра) превышали требуемые примерно в 400 раз.

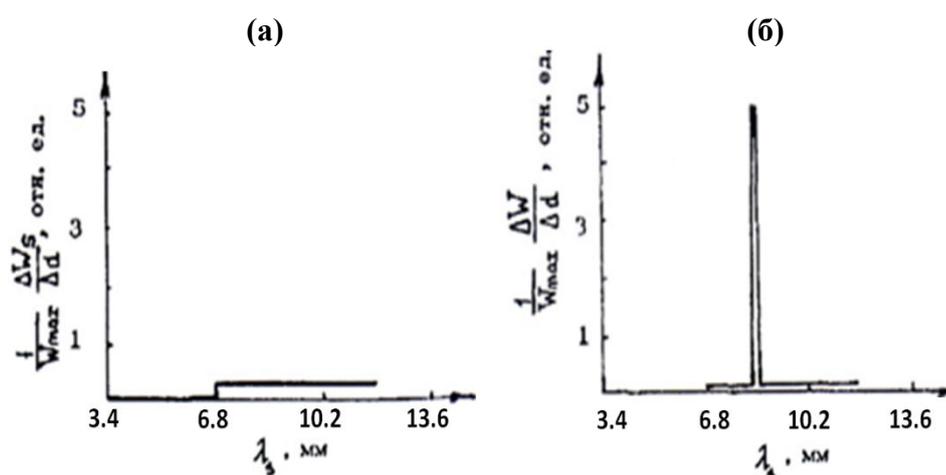


Рис. 1. Спектр излучения, полученный в «традиционной» схеме МСЭ генератора (а) и в МСЭ генераторе с «обратным» ведущим магнитным полем (б).

Раздел 1.4 посвящен обоснованию предложенного автором нового типа МСЭ, который оказался значительно менее чувствительным к энергетическому и скоростному разбросам в электронном пучке, чем «традиционные» схемы. Обоснование нового типа МСЭ удобно провести, рассмотрев сначала характерные особенности работы «традиционных» схем МСЭ. В них даже при использовании электронных пучков в единицы и десятки килоампер для увеличения коэффициентов усиления (инкрементов) [27-29] режим работы МСЭ обычно выбирался вблизи области так называемого циклотронного резонанса (1), т. е. резонанса между колебаниями электронов пучка в ведущем магнитном поле и баунс-колебаниями в периодическом магнитостатическом поле вигглера:

$$\omega_H/\gamma \approx k_w v \quad (1)$$

Здесь ω_H - нерелятивистская gyro-частота, γ - релятивистский фактор электронов, $k_w = 2\pi/\lambda_w$ - так называемое волновое число вигглера, λ_w - пространственный период его поля, v - продольная компонента скорости электронов. В ряде работ (например, в [24]) показано, что в этом режиме можно действительно получить заметное увеличение инкремента неустойчивости электромагнитных волн и волны пространственного заряда. Однако при этом необходимо также учитывать опасность резкого ухудшения характеристик электронного пучка, (см., например, [10*, 34]).

Выбор рабочего режима МСЭ обычно начинается с расчета и анализа траекторий пучка в поле вигглера B_w и ведущем поле B_0 . ([19-33, 35-37, 2*-8*]). Для нахождения этих траекторий считается общепринятой методика, изложенная в работах [24, 32], согласно которой строится семейство кривых, определяющих зависимость v от B_0 при фиксированных значениях энергии электронов, периоде и поле вигглера (так называемые диаграммы Фройнда). Для определения продольной скорости численно решается уравнение четвертой степени [5*-8*]

$$v^4 - v^3(2eB_0)/(\gamma m c k_w) + v^2[e^2(B_0^2 + B_w^2)/(\gamma m c k_w)^2 - c^2(1 - \gamma^2)] + v(2eB_0)c^2(1 - \gamma^2)/(\gamma m c k_w) - (e^2 B_0^2)(1 - \gamma^2)/(\gamma m c k_w)^2 = 0, \quad (2)$$

затем из закона сохранения энергии находятся соответствующие значения поперечной скорости v_{\perp} . В теории МСЭ эта процедура стала общепринятой. При анализе решений уравнения (2) в области малых значений ведущего поля $B_0 < B_{рез}$, где $B_{рез}$ - есть поле, соответствующее циклотронному резонансу (1), многие авторы отмечали [29,30,33], что фиксированному значению ведущего поля B_0 соответствуют три положительных значения продольной скорости электронов $v = c\beta$. Для одного из вариантов диаграммы Фройнда эти значения ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) показаны на рис. 2а. В области отрицательных значений ведущего поля (на кривой III) показан

четвертый, отрицательный, корень β_4 этого уравнения, соответствующий полю B_0^* . В статьях, посвященных анализу динамики электронов в полях МСЭ это отрицательное решение считалось не имеющим «нефизичным». Направление продольной скорости, показанное решением β_4 , противоположно направлению ведущего поля и реальной скорости электронного пучка.

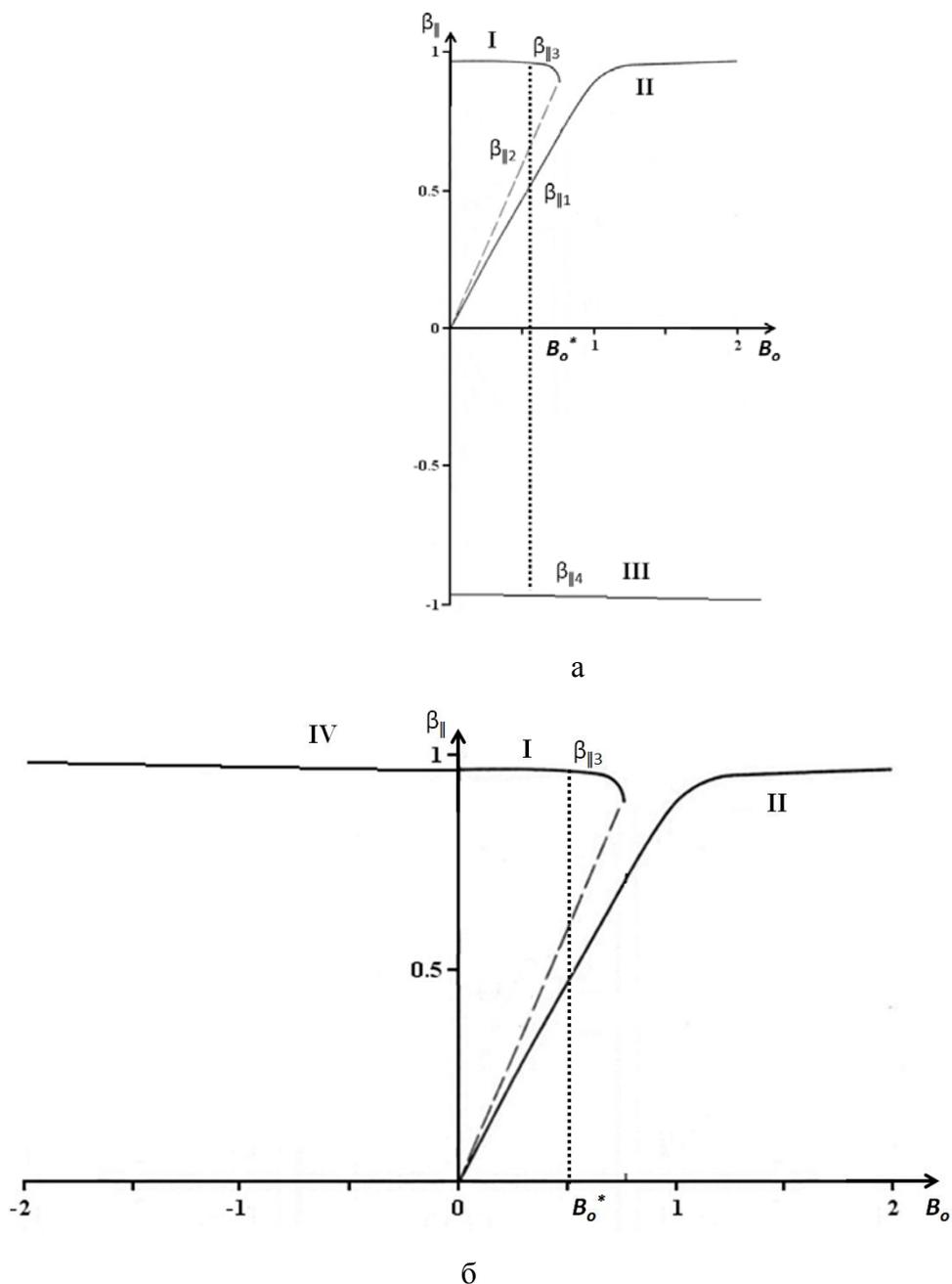


Рис. 2. Модифицированные диаграммы Фройнда, демонстрирующие обоснование схемы МСЭ с «обратным» ведущим магнитным полем.

Идея, заложенная в разработку МСЭ нового типа, заключается в том, чтобы получить положительное решение уравнения (2), подобное решению III, в котором в широком диапазоне

значений ведущего поля зависимость $\beta(\beta, B_0)$ есть плавная функция без циклотронного резонанса. В экспериментах с использованием пучка ускорителя ЛИУ 3000, а затем и в численном моделировании, было показано, что требуемую комбинацию полей B_0, B_w можно найти, если поменять на противоположное направление ведущего поля B_0 . О этом случае действительно

Из рис. 2б, при использовании системы координат с отрицательными значениями поля B_0 , видно, что при изменении направления ведущего магнитного поля на противоположное, четвертое решение уравнения (2) для продольной скорости электронов становится положительным (кривая IV) и соответствует направлению продольной скорости электронного пучка, но противоположно новому направлению ведущего магнитного поля B_0 .

В ОИЯИ, с использованием ускорителя ЛИУ-3000, были проведены исследования характеристик генераторных и усилительных схем МСЭ с «обратным» ведущим магнитным полем, проанализированы зависимости выходных характеристик МСЭ от полей (B_0, B_w) и от параметров электронного пучка. Из сравнения выходных характеристик излучения в МСЭ с «обратным» ведущим магнитным полем и в «традиционных» схемах МСЭ видно, что в новом типе МСЭ генератора получен в 20-25 раз более узкий спектр (сравнение рис. 1б и рис. 1а), а также в 2-3 раза увеличена мощность излучения.

В работах [8*,11*] и [35-37] показано, что существенные отличия выходных характеристик МСЭ с «обратным» магнитным полем и «традиционных» схем МСЭ могут быть объяснены различием динамики электронов в области взаимодействия электронного пучка и СВЧ волны. В диссертации этот вопрос анализируется в пятом разделе главы 1:

I. *«Традиционная» схема МСЭ:* при работе вблизи циклотронного резонанса происходит значительное ухудшение качества пучка. Неравновесные электроны пучка (движущиеся около стационарной винтовой траектории) на длине взаимодействия совершают всего около одного бетатронного колебания. Следовательно, динамика и энергоотбор для таких электронов сильно отличаются от равновесных.

II. *МСЭ с «обратным» полем:* из-за того, что циклотронный резонанс для приосевых частиц отсутствует, в этом типе МСЭ реализуется существенно более высокое качество формирования винтовых РЭП. Неравновесные электроны пучка на длине взаимодействия совершают большое количество бетатронных колебаний, и энергообмен неравновесных и равновесных электронов в среднем (при усреднении по данным колебаниям) отличаются мало (см. подробнее [5*-8*,11*]).

В диссертации рассмотрены несколько примеров численного моделирования, в которых показано, что в МСЭ с «обратным» полем обеспечивается значительно лучшее качество электронного пучка, чем в «традиционных» МСЭ. Один из таких примеров приведен на рис. 3а,б, взятом из работы [17*].

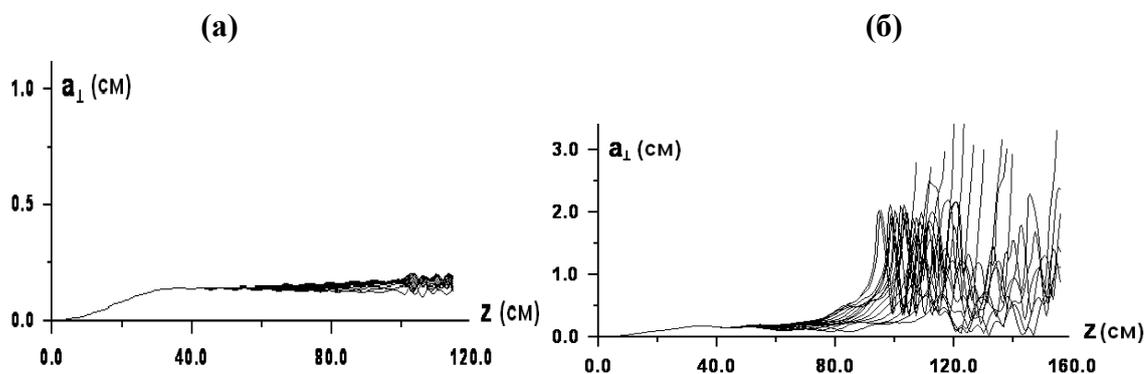


Рис. 3. Зависимости от продольной координаты радиусов вращения электронов в МСЭ с «обратным» ведущим полем при $\beta_{\perp\text{par}}/\beta_{\perp} = 0.5$ (а) и в «традиционной» схеме МСЭ при $\beta_{\perp\text{par}}/\beta_{\perp} = 0.15$ (б).

На этом рисунке показаны расчетные зависимости от продольной координаты радиусов вращения электронов, имеющих начальный скоростной разброс $\beta_{\perp\text{par}}/\beta_{\perp}$, для МСЭ с «обратным» ведущим полем (а) и для «традиционной» схемы МСЭ (б). Из результатов моделирования следует, что в процессе движения по волноводу в «традиционных» МСЭ поперечные размеры пучка заметно увеличиваются. Это приводит к снижению эффективности МСЭ, нарушению синхронизма взаимодействия пучка и волны и даже и к потере части пучка из-за высадки электронов на стенки волновода.

В усилительной схеме МСЭ с «обратным» ведущим полем на частоте 36,4 ГГц получена мощность излучения 5-6 МВт, которая незначительно превышает величину, полученную в этом типе МСЭ генератора. Для дальнейшего увеличения выходной мощности МСЭ усилителя с «обратным» ведущим полем были проведены исследования с профилированным по длине полем вигглера. Идея повышения эффективности МСЭ за счет профилирования поля вигглера была предложена в работах [38,39]. На основе результатов экспериментального исследования МСЭ с несколькими вариантами профилирования поля вигглера была выбрана схема с двухступенчатым профилированием, которая обеспечила увеличение выходной мощности МСЭ в 4 раза (до значений 20-25 МВт) [2*-8*]). Коэффициент возрастания СВЧ мощности за счет профилирования поля вигглера близок к полученному в работе [9]. Однако в эксперименте, выполненном в ОИЯИ, были достигнуты существенно лучшие спектральные характеристики МСЭ, чем в [9], хотя параметры электронного пучка ускорителя ЕТА были намного лучше, чем

у пучка ЛИУ 3000. Полученные результаты являются убедительным подтверждением преимущества МСЭ с «обратным» ведущим полем над «традиционными» схемами МСЭ.

После того, как основные результаты диссертации были доложены на семинарах и НТС разного уровня автору стали известными две теоретические работы [53, 54], выполненные учеными Китая, в которых проведено сравнение МСЭ с «обратным» ведущим магнитным полем и «традиционных» схем МСЭ. В этих работах результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными, полученными в МТИ и ОИЯИ. Результаты моделирования оказались в хорошем соответствии с экспериментальными данными и явились еще одним убедительным подтверждением преимуществ МСЭ с «обратным» ведущим магнитным полем по сравнению с «традиционными» схемами МСЭ. Чтобы не нарушать ход изложения материала и нумерацию цитирования, указанные работы помещены в конце списка цитируемой литературы.

Вторая глава посвящена новым, предложенным автором, усовершенствованиям МСЭ генератора с «обратным» ведущим магнитным полем, цель которых заключалась в дальнейшем значительном уменьшении ширины спектра генератора при одновременном увеличении его выходной мощности. Для запитки высокодобротных резонаторов с добротностью $Q \geq 1000$ требуется, в соответствии с таблицей 1, ширина спектра МСЭ лучше, чем $\delta\omega/\omega \sim 10^{-3}$. Следовательно, необходимо еще более чем на порядок улучшить и спектральные характеристики МСЭ генератора и обеспечить возможность прецизионного согласования частот МСЭ и нагрузки. Принципиальная возможность решения поставленной задачи рассмотрена в первом разделе главы.

Для этого в схеме МСЭ генератора с «обратным» ведущим полем вместо резонатора из полированных металлических шайб были проведены исследования МСЭ с несколькими типами брэгговских резонаторов, обеспечивающих селективную распределенную обратную связь в узком диапазоне частот. В брэгговском резонаторе при выполнении определенных условий (брэгговского резонанса) обеспечивается взаимное переотражение двух волн: а) попутной синхронной с пучком волны и взаимодействующей с ним и б) волны обратной связи, движущейся навстречу пучку. Указанные волны могут принадлежать как к одному, так и к разным типам волн регулярного волновода. В микроволновом диапазоне в качестве брэгговских зеркал могут быть использованы отрезки регулярных волноводов со слабой периодической гофрировкой боковых стенок. Идея использования брэгговских резонаторов в мощных микроволновых генераторах была сформулирована в работе [40] и развита в работах [41-43]. В цитируемых работах рассмотрены три типа брэгговских резонаторов. И в экспериментах с

пучком, и в численном моделировании, все три типа резонаторов были исследованы. Один из них - двухзеркальный брэгговский резонатор - использовался ранее в нескольких экспериментах с мощными «традиционными» МСЭ и МЦАР-генераторами. Однако получавшиеся в этих экспериментах ширины спектра, как правило, оказывались на уровне, превышающем единицы процентов. В зависимости от результатов экспериментов наряду с известными брэгговскими резонаторами были исследованы также их модификации.

Третий раздел главы 2 содержит описание экспериментальной установки и полученных результатов экспериментов. Для транспортировки пучка без потерь тока в МСЭ-генераторе использовался существенно сверхразмерный волновод с диаметром $D \approx 2\lambda$. В нем могло распространяться большое число различных мод, отличающихся продольными и поперечными индексами. В качестве рабочего в брэгговской структуре был выбран цикл обратной связи, сформированный низшей попутной волной $H_{1,1}$ типа и встречной волной $E_{1,1}$ в районе частоты 30 ГГц. Кроме указанной зоны брэгговского рассеяния рабочая попутная волна $H_{1,1}$ испытывала отражение во встречную волну того же ($H_{1,1}$) типа в районе частоты 28 ГГц, в волну $H_{1,2}$ типа в полосе около 34 ГГц и в волну $E_{1,2}$ в полосе около 37 ГГц [12*-14*]. В работах [12*-14*] при оптимизации выходной мощности МСЭ с «обратным» магнитным полем при работе на связанных модах $H_{1,1}$, $E_{1,1}$ и $E_{1,2}$ получены величины мощности генератора 6 МВт, 20 МВт и 3 МВт соответственно. В работе [14*] при сравнении по выходной мощности МСЭ с «обратным» магнитным полем и «традиционных» МСЭ получено соответственно величины 23 МВт и 7 МВт. В последующих экспериментах, в основном, использовался брэгговский резонатор со связанной модой E_{11} .

Для получения стабильной одномодовой генерации с узким спектром и увеличения мощности были испытаны различные режимы работы МСЭ. Экспериментально и в численном моделировании было установлено, что при плавном изменении параметров брэгговских зеркал (длин, глубины гофрировки), тока и энергии пучка и величин полей V_0 и V_w установившийся режим генерации может быть как одночастотным, так и многочастотным. Максимальная эффективность генератора, как правило, достигалась в одномодовом, одночастотном режиме генерации. Экспериментально было установлено, что одномодовый режим генерации в МСЭ с «обратным» ведущим полем устанавливается в двухзеркальных брэгговских резонаторах, а также в резонаторах со скачком фазы гофрировки при оптимальной добротности резонатора $Q \approx 400-500$. При увеличении добротности резонатора до $Q=900-1000$ конечное состояние МСЭ могло получиться и одномодовым, и многомодовым. При значениях добротности резонатора более полутора тысяч наблюдалась только многомодовая генерация МСЭ. При работе МСЭ генератора в «традиционной» схеме наблюдалась, как правило, генерация с небольшой

мощностью при больших значениях добротности ($Q > 1400$), причем в большинстве случаев наблюдалась многомодовая генерация.

При внедрении гетеродинной методики измерения частоты и спектра и двухчастотную генерацию, и генерацию с широким спектром, и узкополосную, одномодовую генерацию можно было наблюдать непосредственно по сигналам с гетеродинного измерителя (рис. 4).

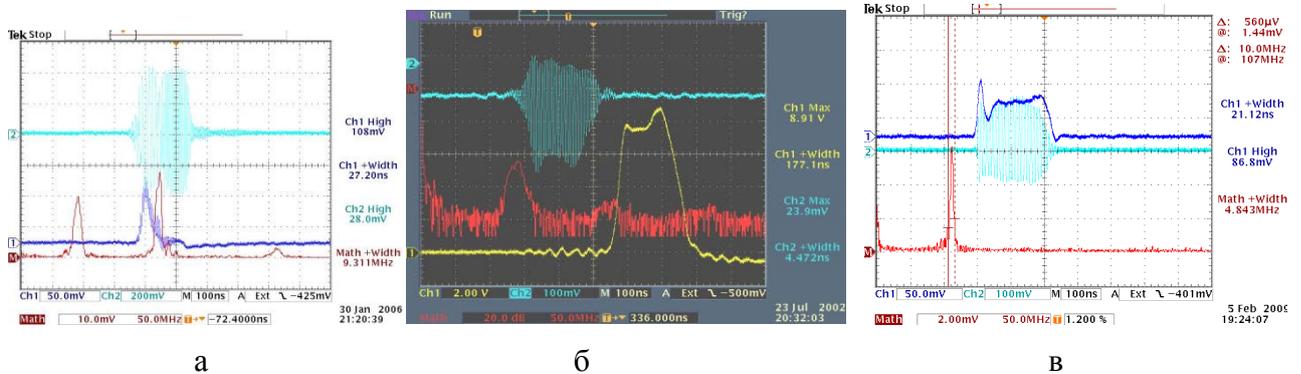


Рис. 4 Осциллограммы, демонстрирующие двухчастотный режимы работы МСЭ (а), широкополосную генерацию (б) и узкополосную, одномодовую генерацию (в). На осциллограммах: луч 1 – СВЧ сигнал, луч 2 – сигнал биений, луч 3 спектр (50 МГц/дел).

С целью увеличения выходной мощности МСЭ генератора и в численном моделировании, и экспериментально была проанализирована работа МСЭ с запуском генератора на так называемой «стартерной» моде [14*,16*,19*]. В данном режиме работы на начальном этапе генератор запускался на более высокой частоте, чем частота рабочей моды. Эта «стартерная» мода имела большой инкремент но относительно небольшую мощность в установившемся режиме генерации. В процессе отбора энергии у электронов обеспечивались условия для запуска более низкочастотной рабочей моды. В нелинейном режиме рабочая мода подавляла «стартерную» и, в соответствии с моделированием, обеспечивалось увеличение выходной мощности МСЭ примерно в полтора раза по сравнению с работой на этой частоте в обычном режиме. Однако при экспериментальных исследованиях МСЭ в режиме «стартерной» моды наблюдалось лишь незначительное увеличение выходной мощности, но при этом обычно регистрировался более широкий спектр, чем при простой настройке генератора. Поэтому для запитки высокодобротных резонаторов эта схема МСЭ не использовалась.

Среди исследованных типов брэгговских резонаторов лучшие результаты по спектру, стабильности частоты и эффективности были получены в МСЭ с брэгговскими резонаторами со скачком фазы гофрировки π при глубине гофрировки около 0,25-0,35 мм [23*,27*-30*]. В результате подбора параметров брэгговского резонатора удавалось получать режимы генерации с шириной спектра от 5 МГц до 10 МГц [20*-23*], что близко к теоретическому пределу для импульсов длительностью 200 нс. С использованием этого типа резонатора в МСЭ генераторе

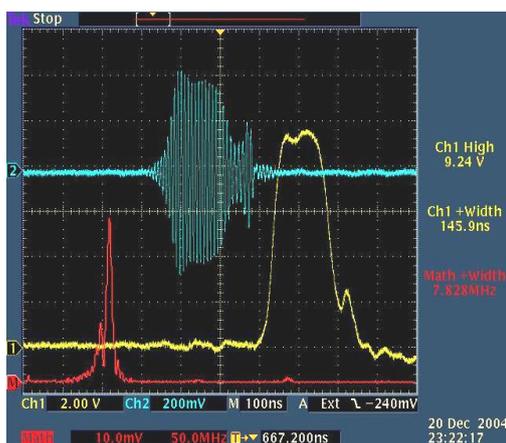
была также экспериментально продемонстрирована возможность прецизионной регулировки рабочей частоты МСЭ в широком диапазоне (около 5%) [20*-23*,27*-30*].

Полученные результаты удовлетворяют требованиям на МСЭ источник, сформулированным во введении. Максимальный энергозапас (4 Дж) получен в импульсах длительностью ~200 нс при мощности излучения 20 МВт. До внедрения гетеродинной методики для измерения длины волны и спектра использовались более грубые системы измерений: с помощью запредельных волноводов, с помощью фотохронографа (streakcamera) и по фотографированию и обработке СВЧ пробоев воздуха [15*,25*]. Особенность таких измерений в том, что в них использовались независимые системы калибровки измерительных систем.

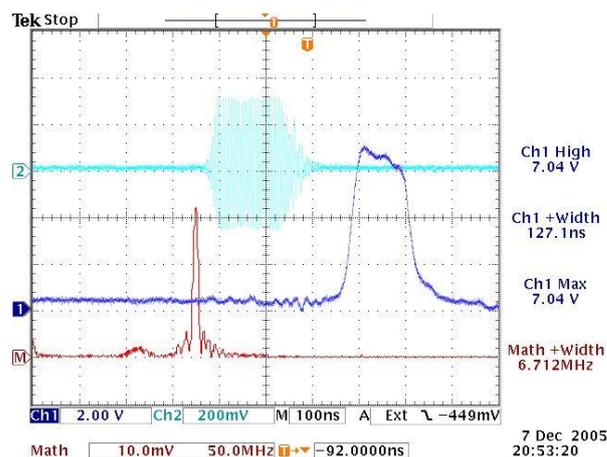
На рис. 5, показаны фотографии нескольких осциллограмм, полученных в разные годы в процессе эксплуатации МСЭ генератора, при проведении экспериментов, ориентированных на коллайдерную тематику. Видно, что ширина спектра МСЭ генератора на протяжении его многолетней работы оставалась лучше 0,1%.

При нормировке на мощность пучка ЛИУ 3000 ($200\text{А} \cdot 0,8\text{МэВ} = 160\text{МВт}$) получена эффективность МСЭ генератора $\eta_1 = 12\%$. Если выходную мощность генератора нормировать на мощность пучка, который распространялся в волноводе МСЭ ($120\text{ А} \cdot 0,8\text{ МэВ} = 96\text{ МВт}$), получится эффективность $\eta_2 = 20\%$. В статьях по МСЭ источникам для оценок их эффективности используются оба варианта. В некоторых сериях экспериментов была получена эффективность МСЭ η_2 , превышающая 25%, но при существенно меньшей длительности импульса излучения. Такие режимы не представляли интереса для решения задачи запитки высокочастотного резонатора, поскольку в проводимых нами экспериментах требовалось получить максимально возможный нагрев металла за время СВЧ импульса, поэтому получение большой длительности СВЧ импульса было принципиально важно. Таким образом, замена резонаторов с зеркалами в виде диафрагм на брэгговские резонаторы позволила уменьшить ширину спектра с 2-1 % до 0,1% - 0,03% при одновременном увеличении выходной мощности примерно в четыре раза.

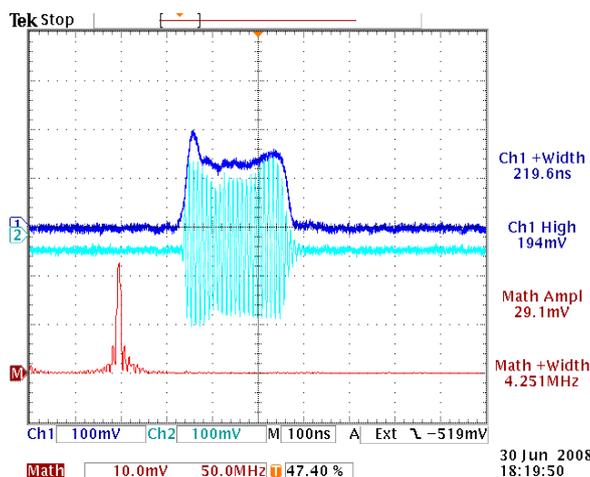
Для использования полученного СВЧ излучения в экспериментах по коллайдерной тематике необходимо вывести излучение из вакуумного волновода МСЭ в атмосферу и обеспечить его транспортировку без искажений, с минимальными потерями до исследуемого высокочастотного резонатора. Для этого СВЧ пучок на выходе генератора преобразовывался из волноводной моды в Гауссов пучок в профилированном неадиабатичном конверторе.



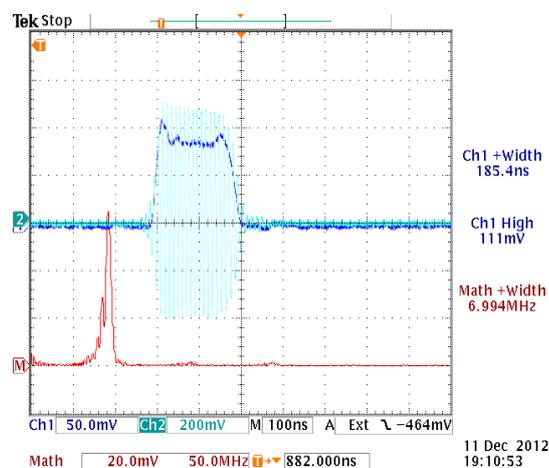
а



б



в



г

Рис.5. Типичные осциллограммы спектров МСЭ генераторов с «обратным» ведущим полем и брегговским резонатором, полученные в 2004-2012 гг.

При выводе излучения из вакуума, начиная с мощности МСЭ 5 МВт, возникали регулярные пробой по поверхности вакуумной пленки, которые приводили к шунтированию СВЧ пучка, к искажениям модового состава излучения и влияли на работу МСЭ генератора вплоть до срыва генерации. Чтобы решить эту проблему, область вывода излучения из вакуума была дополнена волноводом, в котором реализовывался эффект Тальбо (изменение распределения излучения по сечению волновода в зависимости от его продольной координаты и воспроизведение поперечного распределения поля на некотором расстоянии) [25*-27*]. Моделирование показало, что для волновода диаметром 70 мм радиальное распределение СВЧ пучка, которое было в начале волновода, повторилось на длине $l=90$ см. При $l = 72$ см распределение получилось близким к однородному, в этом месте волновода можно установить вакуумное окно и обеспечить вывод излучения из вакуума в атмосферу без пробоев на нем. В таком волноводе оказалось возможным осуществить сброс электронного пучка на стенку волновода и защитить

вакуумное окно от прямой высадки электронов. При использовании волновода Тальбо появилась возможность измерения в каждом импульсе величины тока электронного пучка на выходе МСЭ. Это значительно упростило настройку режима работы генератора.

Третья глава посвящена применению созданного МСЭ генератора для создания СВЧ стенда с целью запитки высокодобротного резонатора, моделирующего температурный режим ускоряющей структуры коллайдера CLIC. На созданной установке решалась задача получения экспериментальных результатов по определению стойкости меди по отношению к импульсным циклическим нагрузкам. Проблема циклического воздействия на металл коротких, повторяющихся токовых импульсов была сформулирована в работе [44]. В этой работе было введено понятие безопасной температуры $\delta T_{\text{бзп}}$ при импульсном нагреве металла электронным пучком. Предполагалось, что при малых импульсных нагревах ($\delta T < \delta T_{\text{бзп}}$) в металле происходят только упругие деформации, которые не вызывают явлений усталости. При $\delta T \geq \delta T_{\text{бзп}}$ в металле постулировалось возникновение пластических деформаций, накопление которых является причиной усталости металла и затем его разрушения. Из расчетов этого явления, сделанных в работах [11,12,44-47], следовали несколько весьма нетривиальных выводов:

а) при $\delta T \geq \delta T_{\text{бзп}}$ в результате циклических воздействий может произойти повреждение (и даже разрушение) металла при весьма низких импульсных нагревах (около 100°C);

б) механизм накопления повреждений проявляется как простое суммирование дефектов после каждого импульса. Отсюда следует, что повреждение металла является пороговым эффектом и зависит от величины приложенного импульсного напряжения.

В работах [11,12,45-47] были сделаны расчеты порогового числа импульсов для разных материалов в зависимости от величины импульсного нагрева или эквивалентного импульсного циклического механического воздействия. Из выполненных расчетов, в частности, следовало, что традиционно использовавшаяся для изготовления ускоряющих структур бескислородная медь с учетом необходимого запаса прочности может не обеспечить требуемого числа рабочих импульсов тэвного коллайдера. Поэтому актуальным стал вопрос поиска новых материалов или сплавов для изготовления ускоряющих структур коллайдеров. В работах [46-49] обосновывалось утверждение, что при выборе материала для изготовления высокодобротной ускоряющей структуры необходимо учитывать механические и технологические свойства материалов. Следовательно, для выбора материала ускоряющей структуры необходимы экспериментальные данные по определению порогового числа импульсов в зависимости от величины импульсного нагрева. Однако из порогового характера повреждения исследуемых материалов следует, что для получения одной экспериментальной точки при рабочих значениях

импульсного нагрева требуется количество циклов, равное или превышающее $5 \cdot 10^{10}$. Следовательно, реальные экспериментальные результаты можно получить только при масштабировании отдельных параметров, в качестве которых выбирались либо рабочая частота, либо величина импульсного нагрева. Были созданы специальные экспериментальные стенды: в ЦЕРНе на частотах $\sim 10^{15}$ Гц и $\sim 10^4$ Гц [11,12,47] и в СВЧ диапазоне на частоте около 10^{10} Гц (SLAC) [48-52]. Подробно эти вопросы анализируются в разделе 1 главы 3.

В работах [11,12] приведены диаграммы, на которых с соответствующими нормировками отображены на одних осях результаты ультразвуковых и лазерных экспериментов, рабочие частоты в которых отличаются почти на одиннадцать порядков. В этих экспериментах при определении порогового числа импульсов сопоставлялись разные конечные результаты. В ультразвуковых экспериментах пороговым считалось число импульсов, при котором на образце фиксировались явные следы разрушения материала. В лазерных экспериментах пороговое число импульсов определялось как число импульсов, при котором на образце регистрировались первые признаки повреждения поверхности (шероховатости с размером около 20 нм). Обоснованием допустимости такого сравнения результатов считалось утверждение, что переход от первых признаков повреждения образца до его разрушения будет происходить очень резко.

Несколько позже к этим результатам были добавлены результаты, полученные в SLACe в СВЧ диапазоне, на частоте около 11,4 ГГц двумя экспериментальными группами [48,49] и [50,51]. В диссертации эти группы названы соответственно SLAC1 и SLAC2. Источниками импульсной мощности в этих экспериментах были клистроны с выходной мощностью 50 МВт, с длительностью импульса около 1500 нс и с частотой повторения 60 Гц. Проектная величина импульсного нагрева выделенного участка образца из бескислородной меди оценивалась в 350°C . Предполагалось использование систем диагностики по контролю добротности исследуемого резонатора (основная система) и по анализу поверхности исследуемого образца с использованием микроскопов (в конце облучения).

В экспериментах группы SLAC1 были исследованы два образца из бескислородной меди при импульсном нагреве 80°C - 120°C . Препятствием к получению более высоких значений импульсного нагрева оказались электрические пробой. Особенность экспериментов группы SLAC2 состояла в том, что в них исследовались и анализировались состояние поверхности образцов из различных материалов при двух фиксированных количествах импульсов: $N_1=2 \cdot 10^6$ и $N_2=10 \cdot 10^6$. Поэтому корректное сравнение результатов, полученных группами SLAC1 и SLAC2 довольно сложно. При анализе результатов, полученных с медными образцами, видны значительные количественные расхождения в результатах этих групп.

Поскольку в экспериментах SLAC1 и SLAC2 величина импульсного нагрева исследуемых образцов не превышала 120°C, руководство коллаборации CLIC предложило провести в Дубне аналогичные исследования при существенно увеличенном импульсном нагреве (около 200°C) [13]. В качестве источника импульсной СВЧ мощности предлагалось использовать МСЭ генератор ОИЯИ-ИПФ (20 МВт*180 нс), работающий на частоте 30 ГГц. Третий и четвертый разделы посвящены рассмотрению проблем, при которых возможно решение поставленной задачи.

Одна проблема заключалась в проектировании стенда, на котором за время импульса МСЭ возможно получение столь высокого импульсного нагрева в медном образце. Особенность создаваемого СВЧ стенда заключалась в том, что при энергозапасе МСЭ источника ОИЯИ, меньшем 4 Дж/импульс (это в 20-25 раз меньше энергозапаса СВЧ источников SLAC) требовалось получить в медном образце импульсный нагрев в два-три раза более высокий, чем достигнут в экспериментах SLACa. Параллельно с этим в работе [33*], выполненной совместно с коллегами из ИПФ РАН, в численном моделировании анализировалась задача - возможна ли запитка высокодобротного резонатора ($Q \geq 1000$) на большом уровне мощности при использовании МСЭ источника. Суть проблемы состоит в том, что при накачке высокодобротного резонатора импульсным излучением МСЭ на начальной стадии прихода СВЧ импульса в нагрузку возникает практически полное его отражение. Однако появление в СВЧ тракте примерно 10% отражения в источник мощности может приводить к резкому ухудшению его работы вплоть до срыва генерации. Моделирование показало, что при точной настройке тестового резонатора на частоту генерации МСЭ, при больших расстояниях до нагрузки происходит просветление тестового резонатора и идет процесс накопления в нем энергии. Кроме того, моделирование показало, что наличие в тракте 10%-15% потерь мощности, мало сказывается на величине нагрева стенок резонатора, но резко уменьшает отрицательное воздействие отраженного сигнала на работу МСЭ.

Основными элементами стенда, созданного в ОИЯИ, были: МСЭ-генератор - источник СВЧ-мощности, система вывода излучения из вакуумного волновода МСЭ в атмосферу, высокодобротный тестовый резонатор ($Q \sim 1500$), системы преобразования мод, системы контроля мощности, длительности, стабильности частоты СВЧ-импульсов и структуры рабочей моды. Системы диагностики обеспечивали измерения параметров импульсов на выходе генератора, на выходе тестового резонатора и в разных участках тракта. Эти вопросы рассмотрены в работах [28*-32*].

Пятый раздел главы три посвящен представлению и обсуждению полученных экспериментальных результатов. На первом этапе (подраздел 5а) решалась задача испытания стенда в режиме набора статистики при пониженной величине импульсного нагрева медного образца. В этой серии испытаний предусматривалось также испытание различных систем диагностики. При величине импульсного нагрева медного образца 40°C было проведено испытание всех его систем при числе импульсов $1,3 \cdot 10^5$ [23*-29*,31*,32*].

В подразделе 5б приведены результаты полномасштабного эксперимента, проведенного при увеличении импульсного нагрева до 200°C [25*,26*,29*-33*]. В этом эксперименте решались задачи обеспечения стабильной, без пробоев, работы стенда при значительном увеличении импульсного нагрева кромки исследуемого образца и определения количества импульсов облучения, после которых при импульсном нагреве 200°C будут заметны последствия циклического воздействия на металл. Из сравнения микрофотографий кромки исследуемого кольца до облучения и после облучения $3 \cdot 10^4$ импульсами были зарегистрированы отчетливые следы повреждения медного образца [30*,31*,33*,34*].

Полученный результат позволил дополнить задачу экспериментальных исследований на стенде, для чего была проверена возможность его стабильной работы при импульсном нагреве меди вплоть до 300°C. Испытания оказались успешными. Однако, чтобы на результат измерений не влияли явления, связанные с сильным перегревом меди, последующие эксперименты проводились при величине импульсного нагрева 250°C. В этих экспериментах решались задачи: экспериментального определения числа импульсов, которые соответствуют началу повреждения меди, наблюдения процесса повреждения металла вплоть до начала его разрушения, определения физической либо технической причины, в результате которой продолжение эксперимента будет считаться нецелесообразным.

Было сделано пять извлечений исследуемого образца с последующим анализом поверхности и дальнейшим облучением. При первом извлечении образца, после $N_1 = 1,6 \cdot 10^4$ импульсов следы повреждения были обнаружены только на кромке кольца - наиболее прогреваемом участке [32*-38*]. Эти повреждения имели вид микроострий различной формы. Характер повреждений этого участка мало менялся при дальнейшем облучении. По-видимому, из-за малой площади этого участка и из-за того, что резонатор был запитан на электропрочной $TE_{0,1,1}$ моде, появление микроострий не приводило к возникновению пробоев.

После второго, третьего и четвертого извлечений образца ($N_2=3,2 \cdot 10^4$, $N_3=4,8 \cdot 10^4$ и $N_4=6,0 \cdot 10^4$ импульсов) были зарегистрированы повреждения также вне его кромки (рис. 6а,б). Площадь, занятая повреждениями, увеличивалась с ростом числа импульсов облучения. Эти

повреждения имели вид чередующихся относительно плавных выступов и впадин и капель различного размера.



Рис. 6 Фотографии участка поверхности медного образца вблизи центральной кромки до облучения (а) и после облучения $5 \cdot 10^4$ импульсами (б) при величине импульсного нагрева 250°C . Фотографии получены с помощью оптического микроскопа.

Пятое вскрытие и остановка процесса облучения были сделаны после $N_5 = 6,3 \cdot 10^4$ импульсов из-за зарегистрированного несколькими датчиками пробоя в области резонатора. Исследование образца показало, что в дополнение к микроостриям на кромке и к шероховатостям вне ее на поверхности образца были зарегистрированы значительные (длиной более 100 мкм и глубиной в несколько микрон) трещины (рис.7). Появление таких микротрещин, по-видимому, привело к резкому снижению электрической прочности резонатора и к появлению пробоев в нем.

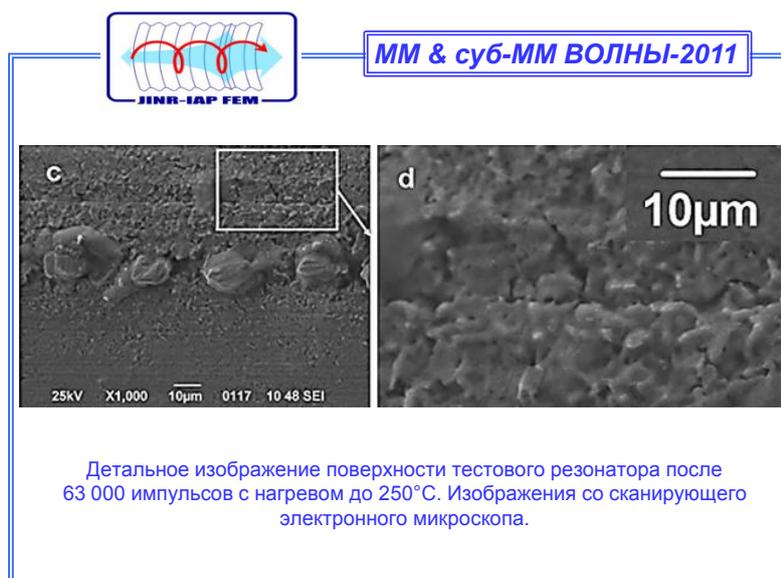


Рис. 7. Микрофотография поверхности медного образца после 63000 импульсов облучения при величине импульсного нагрева 250°C .

Таким образом, проведенные исследования определили предельное число импульсов ($1,6 \cdot 10^4$), после которого начинаются заметные повреждения меди при заданной величине импульсного нагрева, а также число импульсов, при которых наступило разрушение исследуемого образца ($6,3 \cdot 10^4$). Экспериментально установлено, что разрушение металла не наступило резко после появления первых признаков повреждения его поверхности – по числу рабочих импульсов эти процессы отличаются почти в четыре раза. Результаты этих экспериментов опубликованы в работах [35*-43*].

На рис. 8 на диаграмме Хейкинена, на которой показаны результаты лазерных и ультразвуковых экспериментов, а также экспериментов SLAC1 и SLAC2, выполненных при малых величинах импульсного нагрева, показаны результаты экспериментов, проведенных в ОИЯИ при величинах импульсного нагрева соответственно 200°C и 250°C . Кружочками на этом рисунке отмечены числа импульсов, соответствующие повреждению образца, а квадрат иллюстрирует появление микротрещин, пробоя и разрушения образца.

Поскольку в проведенных на стенде ОИЯИ экспериментах без СВЧ пробоев были достигнуты величины импульсного нагрева меди, превышающие 250°C , можно сделать вывод, что созданный стенд позволяет при умеренном числе импульсов исследовать более тугоплавкие, чем медь, металлы и сплавы. В заключительной части третьей главы приведено сравнение результатов, полученных с использованием МСЭ источника, с результатами других групп, полученными либо при сильно отличающихся частотах (до 10^5 раз), либо в СВЧ диапазоне при малых величинах импульсного нагрева.

При больших величинах импульсного нагрева (200 - 250°C) экспериментальные результаты кроме ОИЯИ были получены только в ЦЕРНе [11,48] при использовании в качестве источника импульсного нагрева ультрафиолетового лазера. В полученных нами результатах по исследованию повреждения меди измеренные значения числа импульсов $N_{\text{пов}}$ незначительно превышают соответствующие данные ЦЕРНа. Если учесть, что в лазерных экспериментах регистрировалась существенно более ранняя стадия повреждения металла (в них фиксировались повреждения поверхности на уровне 20 нм), чем в СВЧ экспериментах ОИЯИ, то согласие результатов измерений оказывается лучше, чем следует из рис. 8. Из этого сравнения с очевидностью следует, что для данной задачи отличие в $2,5$ раза частот коллайдера SLAC и лазера ОИЯИ несущественны.

Из рис. 8 с учетом приведенных асимптотических зависимостей можно сделать вывод, что полученные в Дубне результаты по регистрации разрушения меди неплохо согласуются с результатами группы SLAC1, которые были получены при величинах импульсного нагрева в 2 -

2,5 раза меньших и при длительностях СВЧ импульсов в 7-8 раз больших, чем в экспериментах ОИЯИ с МСЭ генератором.

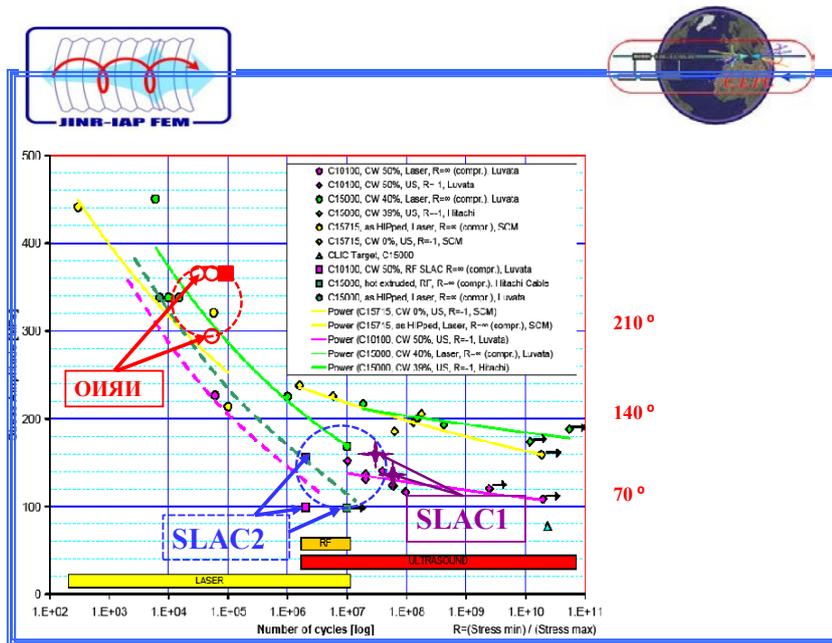


Рис.8. Диаграмма, иллюстрирующая переход от повреждения медного образца к его разрушению.

В работах [51,52] приведены фотографии внутренних поверхностей использовавшихся в экспериментах 50 МВт и 75 МВт-ных клистронов. Эти результаты получены в совместных экспериментах SLAC, ЦЕРН и КЕК. Из этих фотографий видно, что поверхности волноводов клистронов сильно повреждены. Фотографии поврежденных клистронов похожи на полученные нами фотографии медных колец на разных стадиях повреждения, после которых наступают растрескивание металла и пробои. Отсюда следует, что полученные результаты по исследованию стойкости металлов по отношению к мощным импульсным циклическим нагрузкам могут быть полезными также для разработчиков мощных СВЧ источников.

Основные результаты работы

1. Показано, что для запитки и тестирования высокоградиентных ускоряющих структур суперколлайдеров нового поколения мощным излучением миллиметрового диапазона длин волн могут быть эффективно использованы мазеры на свободных электронах (МСЭ). Такие источники способны одновременно обеспечить узкий спектр излучения ($\Delta f/f < 10^{-3}$), высокую стабильность рабочей частоты ($\Delta f/f < 10^{-3}$), выходную мощность более 10 МВт и длительность СВЧ-импульсов не менее 150 нс при высоком уровне стабильности мощности и длительности импульсов излучения ($\Delta(W \tau)/(W \tau) < 0,1$) и ресурсе работы более 10^5 импульсов.

2. Предложен и на базе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 впервые создан новый тип релятивистского электронного СВЧ-генератора: МСЭ с «обратным» ведущим магнитным полем, который обладает значительно меньшей чувствительностью к энергетическому и скоростному разбросам электронов, чем «традиционные» МСЭ. Экспериментально продемонстрировано и подтверждено численным моделированием, что «обратное» направление ведущего поля позволяет существенно улучшить выходные параметры МСЭ. В МСЭ с «обратным» полем и двухзеркальным резонатором типа Фабри-Перо получено уменьшение ширины спектра излучения в 20 раз и увеличение выходной мощности в 2 - 3 раза по сравнению с «традиционными» схемами МСЭ.
3. В МСЭ-усилителе с «обратным» магнитным полем на частоте 36.4 ГГц получена выходная мощность 6 МВт при коэффициенте усиления около 20 дБ и ширине спектра излучения около 1%. Профилирование периода вигглера по длине системы с целью поддержания условий синхронного взаимодействия электронов с попутной волной позволило увеличить выходную мощность усилителя до 20 - 25 МВт.
4. Впервые реализован ряд модификаций МСЭ-генератора с «обратным» полем и брэгговскими резонаторами различных типов. При использовании в МСЭ с «обратным» полем брэгговского резонатора со скачком фазы гофрировки и электронного пучка ускорителя ЛИУ-3000 с энергетическим разбросом в несколько процентов на частоте 30 ГГц получена мощность излучения 20 - 25 МВт при стабильности частоты лучше 0,01% и ширине спектра 5 - 8 МГц, близкой к предельному значению для импульса длительностью 150 - 200 нс.
5. На основе реализованного МСЭ-генератора создан стенд для тестирования элементов СВЧ-структур электрон-позитронного коллайдера CLIC по отношению к импульсному циклическому воздействию большой мощности. В качестве имитатора высокодобротной ускоряющей структуры, моделирующей температурный режим структуры CLIC, использован двухзеркальный резонатор с добротностью около 1500. Созданы: система вывода СВЧ излучения из вакуумного волновода МСЭ в атмосферу, система транспортировки его к тестовому резонатору (нагрузке), необходимые преобразователи мод. СВЧ тракт оснащен системами диагностики спектра, частоты, длительности и энергии импульсов. В отсутствие электрических пробоев осуществлена запитка высокодобротного тестового резонатора полной мощностью излучения МСЭ-генератора и достигнут рекордный импульсный нагрев участка медного резонатора до температуры 300°C.

6. Исследованы стойкость меди по отношению к импульсному циклическому воздействию на частоте 30 ГГц и динамика разрушения ее поверхности в процессе облучения при температурах нагрева 200 - 250 °С и числе импульсов около 60000. При импульсном нагреве до температуры 250°С и числе импульсов 63000 зарегистрирован переход медного образца из фазы повреждения в фазу разрушения. При этом на поверхности металла обнаружено большое количество микротрещин, которые резко снижают электрическую прочность резонатора и инициируют электрические пробои. Показано, что число СВЧ-импульсов облучения, соответствующих началу повреждения и началу разрушения металла, отличается более, чем в четыре раза. Результаты экспериментов противоречат модели, в соответствии с которой после появления первых признаков повреждения разрушение металла должно развиваться лавинообразно. Полученные результаты существенно дополнили имеющиеся экспериментальные данные по исследованию ресурса металлов по отношению к импульсным нагрузкам и могут быть полезны при проектировании как ускоряющих структур, так и мощных СВЧ приборов. Результаты экспериментов, проведенных при величинах импульсного нагрева 250°С и выше в отсутствие электрических пробоев, свидетельствуют о возможности успешного тестирования на стенде более тугоплавких (по сравнению с медью) металлов и сплавов.

Цитируемая литература

1. Н.Н. Braun, R. Corsini T. D. Amico et al. Reports CERN. *The CLIC RF power source* (a novel scheme of two-beam acceleration for electron positron linear colliders).
2. Wilson I., Bossart R., Braun G.C. et al/ *CLIC, a 0,5 to 5 TeV e^{\pm} compact linear collider*// Proc. of European Particle Accelerator Conf. "HEAC-1998", P.107-111.
3. Sessler A.M. *The free electron laser as a power source for a high-gradient accelerating structure.*// AIP conf. proc. No 91, American Institute of physics, New York, 1982.
4. Hopkins D.B. and Kuenning R.W. *The two-beam accelerator: structure studies and 35 GHz experiments*// IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-32, No.5. October 1985, p. 3476 – 3480.
5. Palmer R.B. *The interdependence of parameters for TeV linear colliders*// SLAC-pub-4295, April 1987 (A) p. 1-36.
6. Hopkins D.B., Hoyer E.H., Hallbach K. et al. *An FEL power source for a TeV linear collider*// LBL 25936, October, 1988, p 1-32.
7. Hopkins D.B. and Sessler A.M. *Status of LBL/LLNL FEL research for two beam accelerator applications* // LBL- 26932, march, 1989, p. 1-5.
8. Orzechowsky T.J., Sharlemann E.T., Anderson B.R. et. al. *High-gain free-electron laser using induction linear accelerators* // IEEE J. Quant. Electr. 1985. V.QE-21, no.3. P.344-356.
9. Orzechowsky T.J., Anderson B.R., Clark J.C. et. al. *High-efficiency of microwave radiation from tapered-wiggler free-electron laser* // Phys. Rev. Lett. 1986. V.57, no.17. P.2172-2174.
10. Wilson P.B. *RF Power Sources for 5-TeV - 15-TeV Linear Colliders.*// SLAC-PUB-7256 (1996), 12p.
11. Calatroni S., Neupert H., Taborrelli M/ *Fatigue testing of materials by UV pulsed laser irradiation*// Proceeding of EPAC 2004, Lucerne Switzerland.

12. Heikkinen S, Calatroni S., Neupert H, Wuensch W. *Status of the fatigue studies on the CLIC accelerating structures*// CERN-AB-2006-031, CLIC Note 678.
13. Agreement K723-PS. *Experimental study of the effects of surface heating of copper cavities by multiple high power 30 GHz RF pulses*//CERN European organization for nuclear research, 2001.
14. Анацкий А.И., Богданов О.С., Букаев П.В. и др. *Линейный индукционный ускоритель*//Атомная Энергия. Т. 21, № 6. 1966. С. 439-445.
15. Corsini R., Delahaye J.P. *The CLIC multi- drive beam scheme*// CLIC Note 331 1999.
16. Braun H., Corsini R., D'Amico T. et al. *A new method of power generation for two-beam linear colliders*// Proc. of European Particle Accelerator Conf. "EPAC-1998". P.248-252.
17. Braun H.H., Döbert S., Groening L. *High-power testing of 30 GHz accelerating structures at the CLIC test facility (CTF II)*.CLIC Note 475, Cern/PS 2001-2009 (AE).
18. Döbert S. *Status and future prospects of CLIC*// CLIC-Note-768, CERN-BE-2009-001.
19. *Генераторы на свободных электронах*. Под редакцией А.А. Рухадзе, М., Мир, 1983. 259 стр.
20. Маршалл Т. *Лазеры на свободных электронах*//Москва. Мир. 1987. 238 стр.
21. Варфоломеев А.А. *Лазеры на свободных электронах и перспективы их развития*.- М.: ИАЭ, 1980, 117 с.
22. Sprangle P. and Smith R.A. *Теория лазеров на свободных электронах* //Phys. Rev. A. 21 1980, p 293.
23. Sprangle P., Smith R.A., Granatsein V.L. *Free electron laser and stimulated scattering from relativistic electron beams*// NRL Memorandum Report 391, 1978, Washington, D.C., p.70.
24. Freund H.P., Jounston S., Sprangle P. *Three-dimensional theory of free-electron laser with axial guide field* // IEEE J. of Quant. Electr. 1983. V.QE-19, no.3. P. 322-327.
25. McDermot D.B., Marshall T.C., Sclesinger S. et. al. *High-power free-electron laser on stimulated Raman backscattering* // Phys. Rev. Lett. 1978. V.41, no.5. P.1368-1371.
26. Grossman A.A. and Marshall T.C. *A free electron lasers oscillator based on a cyclotron-undulator interaction*//IEEE J. of Quant. Electr.1983. V.Qe-19, no.3. P. 334-327.
27. Jackson R.H., Gold S.H., Parker R.K. et all. *Design and operation of a collective millimeter-wave free-electron laser*//IEEE J. Quant. Electr. 1983. V.QE-19, no.3. P. 346-354.
28. Parker R.K., Jackson R.H., Gold S.H. et all. *Axial magnetic field effects on the operation of a millimeter-wave free electron laser*// NRL, Washington, D.C. 20375, 1981, p. 923-930.
29. Freund H.P. and Sprangle P. *Collective effects on the operation of free-electron laser with an axial guide field*// Phys. Rev. A, Vol.26, No. 4 October 1982, p. 2004-2015.
30. Карбушев Н.И., Рухадзе А.А. *Шаткус А.Д. К линейной теории лазеров на свободных электронах в цилиндрических объемах взаимодействия*// ЖТФ, 1984, т. 54, № 3, с. 534-541.
31. Diament.P. *Electron orbits and stability in realizable and unrealizable wigglers of free electron lasers*// Phys. Rev. A., vol. 48, p. 2537-2552, 1981.
32. Freund H.P. *Nonlinear analysis of the free-electron-laser amplifiers with axial guide fields*//Phys. Rev. A. Vol. 27, No. 4. 1983,p. 1977-1988.
33. Roberson C.W., Sprangle P. *A review of free-electron lasers* // Phys. Fluids. 1989. V.1, no.1. P.3-67.
34. Conde M.E., Bekefi G. *Experimental study of a 33.3 GHz free electron laser amplifier with a reversed axial guide magnetic field* // Phys. Rev. Lett. 1991. V.67, no.22. P.3082-3088.
35. Chu K.R., Lin A.T. *Harmonic gyroresonance of lectrons in combined helical wiggler and axial guide magnetic fields*// Phys. Rev. Lett. 1991. V.67, no.23. P. 3235-3238.
36. Гинзбург Н.С., Новожилова Ю.В. *О дисперсионном уравнении ЛСЭ с комбинированным ондуляторным и однородным магнитным полем* // Изв. ВУЗов: Радиофизика. 1987. Т. XXX, №11. С.1371-1378.

37. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю. *Увеличение эффективности лазера на свободных электронах с помощью адиабатического уменьшения резонансной энергии.* // ЖТФ. 1991. Т.61, №10. С.147-153.
38. Кролл Н., Мортон Н., Розенблют М. *Лазеры на свободных электронах с переменными параметрами.* // В книге «Генераторы на свободных электронах». Под редакцией А.А. Рухадзе, М., Мир, с.69-83, 1083. Free-electron lasers with variable parameter wigglers // IEEE J. of QE, Vol. QE.17. No. 5 1991. P.1436-1440.
39. Кролл Н., Мортон Н., Розенблют М. *Увеличение эффективности лазера на свободных электронах с помощью адиабатического уменьшения резонансной энергии.* // В книге «Генераторы на свободных электронах». Под редакцией А.А. Рухадзе, М., Мир, 1083 с.84-105.
40. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И. *Селекция мод в высокочастотных релятивистских электронных генераторах с распределенным взаимодействием* // В кн. : Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1981, с. 62-100.
41. Денисов Г.Г., Резников М.Г. *Гофрированные цилиндрические резонаторы для коротковолновых релятивистских СВЧ генераторов* // Известия вузов. 1982, том XXV № 5, с. 562-569.
42. Братман В.Л., Денисов Г.Г., Офицеров М.М. *Мазеры на циклотронном авторезонансе миллиметрового диапазона длин волн* // В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1983, с. 127-159.
43. Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S. et all. *FEL's with Bragg reflection resonators: cyclotron autoresonance masers versus ubitrons* // IEEE J. Quant. Electr. 1983. V.QE-19, no.3. P.282-296.
44. Коваленко В.Ф. *Теплофизические процессы и электровакуумные приборы.* М.: Сов. Радио. 1975. 216 с.
45. Nezhevenko O.A. *On the limitations of accelerating gradient in linear colliders due to the pulse heating* // Omega-P, Inc., 202008 Yale Station, New Haven, CT 06520.
46. Petelin M., Fix A. *Comparison of metals in their steanness to pulse-periodic microwave heating fatigue* // Vacuum electronics conference, 2009, IVEC 2009, p. 163-164.
47. Heikkinen S. *Pulsed surface heating: Ultrasonic and laser experiments* // High gradient Workshop 2006, CERN, Geneva Specialized experiments., Proceeding of PAC'97.
48. Pritzkau D.P., Bowden B, Gordon R. et all. *Possible high power limitations from RF pulsed heating* // SLAC PUB 8013, 1998.
49. Pritzkau D.P., R.H.Siemann R.H. *Experimental study of rf pulsed heating on oxygen free electronic copper* // Physical review special topics – accelerators and beams, vol. 5, 112002 (2002).
50. Tantawi S. *High-power RF tests results: SLAC2* // CLIC-09 Int. Workshop, CERN, Geneva, Switzerland, 2009.
51. Laurent L., Tantawi S., Dolgashev V. et all. *Experimental study of rf pulsed heating* // Physical review special topics - accelerators and beams, vol. 14, 041001 (2011). P.1-21.
52. L. Laurent, V. Dolgashev, A. Haase, A. et all. *SEM Report on Various Pulse Heating Samples and on SLAC X-Band Klystron Circuits.* // 2007.
53. Xiao-Li Huang, Shi-Jian Wang, Yong-Gen Xu et al. *Equilibrium electrons in free electron lasers with a 3D helical wiggler and a guide magnetic field: Nonlinear simulations* // Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams. 2012. V.15. P.120702.
54. Shi-Chang Zhang. *Focusing effect and modulation mechanism of the beam self-fields on the electron's Larmor rotation in a free-electron laser with an axial guide magnetic field* // Physics letters A 3777 (2013) 319-322.

Основные публикации автора по теме диссертации

- 1*. Викторов Ю.Б., Каминский А.К., Косухин В.В., Саранцев В.П., Сергеев А.П. *Формирование плотно электронного пучка и его транспортировка в поле соленоида*// Сообщение ОИЯИ 9-89-388 1989, с. 1-8.
- 2* Викторов Ю.Б., Каминский А.К., Рубин С.Б. Саранцев В.П., Сергеев А.П. *Эксперименты по усилению в ондуляторе излучения миллиметрового диапазона*// Труды XI всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1989, т. II, с. 95-98.
- 3*. Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Rubin S.B., Sarantsev V.P., Sergeev A.P. *Experiments on the efficiency increase of FEL amplifier on the base of LIU 3000*// Particle Accelerators, vol. 33, p. 189-194, 1990.
- 4*. Каминский А.А., Каминский А.К., Рубин С.Б. Саранцев В.П., Сергеев А.П. *Эксперименты по повышению эффективности ЛСЭ-усилителя на базе ЛИУ-3000*// ВАНТ, серия: ядерно-физические исследования, выпуск 6(14) 1990, с. 75-78.
- 5*. Викторов Ю.Б., Драганов А.Б., Каминский А.К., Коцаренко Н.Я., Рубин С.Б. Саранцев В.П., Сергеев А.П., Силивра А.А. *Экспериментальное и теоретическое исследование параметрической неустойчивости волн в РЭП*// ЖТФ. Т.61, в.4.1991, с. 133-140.
- 6*. Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Rubin S.B., Sarantsev V.P., Sergeev A.P., Kotsarenko N.Ya., Silivra A.A. *Investigation of FEL with strong helical pump and backward guide field*// Third International Workshop on Linear Colliders, LC 91, Protvino, V. 3, p. 228-240.
- 7*. Каминский А.А., Каминский А.К., Рубин С.Б., Саранцев В.П., Сергеев А.П., Коцаренко Н.Я., Силивра А.А. *Исследование ЛСЭ с сильной спиральной накачкой и обратным ведущим полем*// Релятивистская высокочастотная Электроника. Вып. 7 / ИПФАН СССР. Горький, 1992. С. 60-80.
- 8*. Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Sarantsev V.P. I Sedykh S.N., Sergeev A.P. *Investigation of a microwave FEL with a reversed guide field*// NIM A 341 (1994) 105-108.
- 9*. Viktorov Ju.B, Draganov A.B., Kaminsky A.K., Kotsarenko N.Ya., Rubin S.B., Sarantsev V.P., Sergeev A.P., Silivra A.A. *Broadband instability in free electron lasers*// Optics communications. V01. 79, No 1.2, 1990, p. 81-87.
- 10*. Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Karbushev N I., Sarantsev V.P., I Sedykh S.N., Sergeev A.P., Silivra A.A. *Cyclotron resonance in a FEL with a spiral undulator and an inverse axial magnetic field*// NIM A 331 (1993) 531-534.
- 11*. Ginzburg N.S., Kaminsky A.K., Kaminsky A.A., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. *Theoretical and experimental comparison of FEL-oscillators with conventional and reversed guide field*// IEEE Trans. on Plasma Science. 1998. V.26, no.3. P.536-54. *Theoretical and experimental comparison of the FEL-oscillators with the convenient and reversed guide field*// Inventional workshop on high power microwave generation and pulse shortening. Edinburg. 1997, p. 203-207.
- 12*. Ginzburg N.S., Kaminsky A.K., Kaminsky A.A., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. *Single- mode operation conditions in JINR-IAP millimeter-wave FEL-oscillator*// IEEE, Plasma science, Vol.26, No.3, June 1998, p. 542-547. International Workshop on High Power Microwave Generation and Pulse Shortening, Edinburg, 1997, Digest of Technical Papers, 239-243.
- 13*. Kaminsky A.K., Ginzburg N.S., Kaminsky A.A., Peskov N.Yu., Sergeev A.P., Sarantsev V.P., Sedykh S.N., Sergeev A.S. *High-efficiency FEL-oscillator with Bragg resonator operated in reversed guide field regime*// Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research A. 1996. V.A375. P.215-218.
- 14*. Ginzburg N.S., Kaminsky A.K., Kaminsky A.A., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. *Experimental observation of mode competition and single mode operation in JINR-IAP millimeter-wave FEM-oscillator*// Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research A. 1998. V.A407. P.167-171.

- 15*. Filin S.V., Ginzburg N.S., Kaminsky A.K., Laziev E.M., Peskov N.Yu., Puzynin A.I., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. *Bunch Dynamics in mm-Wave FEL-Oscillator*// Proceedings of 21st Free-Electron Laser Conference (FEL'99), Hamburg, Germany, August 23-26, Elsevier Science B.V., 2000, part II, p. 25-26.
- 16*. Ginzburg N.S., Elzhov A.V., Kaminsky A.K., Perelstein E.A., Peskov N.Y., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. *Starting mode regime in an FEM oscillator with a Bragg resonator* // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research A. 2002. V.A483. P.225-230.
- 17*. Kaminsky A.K., Kaminsky A.A., Sedykh S.N., Sergeev A.P. Field distribution investigation in few types of helical undulators//In Proc. 18th Int. FEL Conf., Rome, Italy, 1996, p. II.109-II.110.
- 18*. Ginzburg N.S., Kaminsky A.K., Kaminsky A.A., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. *Efficiency optimization of the JINR-IAP narrow-band millimeter wavelength FEL-oscillator*// Proceedings of II Asian Symposium on Free Electron Lasers, Novosibirsk, 1996, p. 232–239.
- 19*. Елжов А.В., Гинзбург Н.С., Каминский А.К., Перельштейн Э.А., Песков Н.Ю., Седых С.Н., Сергеев А.П., Сергеев А.С. *Режим стартерной моды в МСЭ-генераторе с брэгговским резонатором* // Труды IV Научного семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, ОИЯИ, 2002, с. 33–39.
- 20*. Ginzburg N.S., Goldenberg C.A., Kaminsky A.K., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P. *Millimeter-wave FEL-oscillator with a new type Bragg resonator: advantages in efficiency and selectivity*// Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A. 2000. V.A445. P.253-256.
- 21*. Богаченков В.А., Гинзбург Н.С., Каминский А.А., Каминский А.К., Песков Н.Ю., Саранцев В.П., Седых С.Н., Сергеев А.П., Сергеев А.С. *Высокоэффективный узкополосный ЛСЭ-генератор с брэгговским резонатором и обратным ведущим полем (начальные эксперименты)*. // Письма в ЖТФ, 1995, т. 21, вып. 22, с. 44–50.
- 22*. Ginzburg N.S., Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. *High-efficiency single-mode Free-Electron Maser oscillator based on a Bragg resonator with step of phase of corrugation* // Phys. Rev. Lett. 2000. V.84. P.3574-3577.
- 23*. Elzhov A.V., Ginzburg N.S., Ilyakov E.V., Ivanov I.N., Kazacha V.I., Kaminsky A.K., Kulagin I.S., Perelstein E.A., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S., Zaitsev N.I. *JINR-IAP FEM oscillator with Bragg resonator: experimental investigation and application*// Strong Microwaves in Plasmas, Nizhny Novgorod, IAP RAS, 2003, v. 1, p. 190–194.
- 24*. Kaminsky A.K., Elzhov A.V., Ivanov I.N., Kazacha V.I., Kosukhin V.V., Perelstein E.A., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Denisov G.G., Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Laziev E.M. *JINR activity in microwave sources for future linear colliders*// Proc. of 7th European Particle Accelerator Conference, Viena, 2000, p. 2075-2077.
- 25*. Elzhov A.V., Ginzburg N.S., Ivanov I.N., Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Kuzikov S.V., Kazacha V.I., Kosukhin V.V., Laziev E.M., Perelstein E.A., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Shalyapin V.N., Sumbaev A.P., Tiutiunnikov S.I., Vardanyan A.O. *Recent experiments on free-electron maser for two-beam accelerators*// Proceedings of XVII International Conference on High Energy Accelerators, Dubna, 07–12 September 1998, p. 160–162.
- 26*. Elzhov A.V., Ginzburg N.S., Gorbachev E.V. et al. *Status of 30 GHz facility for experimental investigation of the copper cavity lifetime (CLIC collider project)*// Proceeding of 26th free electron laser conference (FEL 2004), Trieste, Italy, August 29-September 3, 2004, p. 318-321. PDF file.
- 27*. Elzhov A.V., Ginzburg N.S., Kaminsky A.K., Kuzikov S.V., Perelstein E.A., Peskov N.Yu., Petelin M.I., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S., Syratchev I.V., Zaitsev N.I. *Test facility for investigation of heating of 30 GHz accelerating structure imitator for the CLIC project* // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A. 2004. V.A528. P.225-230.

- 28*. C.A.Goldenberg C.A., Ginzburg N.S., Kaminsky A.K., Peskov N.Yu., Sedykh S.N.,Sergeev A.P. *Precise Frequency Tuning in the Millimeter-wave FEL-oscillator with the Bragg resonator*// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A445, 2000, 257-260.
- 29*. Ginzburg N.S., Elzhov A.V., Ilyakov E.V., Ivanov I.N., Kazacha V.I., Kaminsky A.K., Kulagin I.S., Perelstein E.A., Peskov N.Yu., Sedykh S.N Sergeev A.P., Sergeev A.S., Zaitsev N.I. Experiment on precise frequency tuning in the FEM-oscillator with the Bragg resonator// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A483, 2002, 231-234.
- 30*. *. Ginzburg N.S., Elzhov A.V., Ilyakov E.V., Ivanov I.N., Kazacha V.I., Kaminsky A.K., Perelstein E.A., Peskov N.Y., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. JINR-IAP FEM oscillator with Bragg resonator// Problems of Atomic Science and Technology. Series “Nuclear Physics Investigations” (39), 2001, № 5, p. 60–62.
- 31*. Елжов А.В., Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иванов И.Н., Иляков Е.В., Каминский А.К., Косухин В.В., Кузиков С.В., Кулагин И.С., Песков Н.Ю., Перельштейн Э.А., Петелин М.И., Седых С.Н., Сергеев А.П., Сергеев А.С., Сырачев И.В. *Стенд для исследования ресурса имитатора ускоряющей структуры коллайдера CLIC при воздействии мощного импульсного излучения на частоте 30 ГГц* // Письма в Журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2005. Т.2, №3 (126). С.102-105.
- 32*. A.V.Elzhov, A.K.Kaminsky, A.P.Kozlov, E.A.Perelstein, S.N.Sedykh, A.I.Sidorov N.S.Ginzburg, S.V.Kuzikov, N.Yu.Peskov. *JINR-IAP-CLIC experiment on copper cavity heating*//High gradient RF 2006 Workshop, CERN, Geneva, 2006.
- 33*. Гинзбург Н.С., Каминский А.К., Кузиков С.В., Перельштейн Э.А., Песков Н.Ю., Седых С.Н., Сергеев А.П., Сергеев А.С. // *О возможности использования МСЭ с брэгговским резонатором для тестирования высокооборотных резонансных структур* // ЖТФ. 2006. Т.76, №7. С.69-75.
- 34*. DanilovYu.Yu., GinzburgN.S., GolubevI.I.,GorbachevE.V., KaminskyA.K., KozlovA.P., KusikovS.V., LebedevN.I., Perelstein E.A., Peskov N.Yu., PetelinM.I., PilyarN.V., RukoyatkinaT.I., SedykhS.N., SergeevA.P., SergeevA.S., VikharevA.A., ZaitsevN.I. *Progress in CLIC-JINR-IAPRASexperimenton 30 GHzcoppercavityheating*// Report at CLIC Meeting 2006.
- 35*. DanilovYu.Yu., GinzburgN.S., GolubevI.I. KaminskyA.K., KozlovA.P., KuzikovS.V.,PerelsteinE.A., PeskovN.Yu., PetelinM.I., SedykhS.N., SergeevA.P., SergeevA.S. VikharevA.A., ZaitsevN.I.*Firstfull-scaleresultinCLIC-JINR-IAPRASexperimenton 30 GHzcoppercavityheating*// In book StrongMicrowaves: sourcesandapplications, IAPRAS, NizhnyNovgorod, 2009, v.1, P. 230-235.
- 36*. DanilovYu.Yu., GinzburgN.S., GolubevI.I. GorbachevE.V.,KaminskyA.K., KozlovA.P., KuzikovS.V.,LebedevN.I., PerelsteinE.A., PeskovN.Yu., PetelinM.I., PilyarN.V., RukoyatkinaT.I., SedykhS.N., SergeevA.P., SergeevA.S. TarasovV.V.,VikharevA.A., ZaitsevN.I. *Recent result of JINR-IAP experiment on RF cavity heating* //CLIC 08 Workshop, CERN, 2008;_ <http://indico.cern.ch/getFile.py/access? contribId= 190&sessionId=59&resId= 1&materialId= slides&confId=30383>
- 37*. Каминский А.К., Перельштейн Э.А., Седых С.Н., Гинзбург Н.С., Кузиков С.В., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. *Демонстрация работы мощного 30-ГГц МСЭ на резонансную нагрузку* //Письма в ЖТФ. 2010. Т.36, №5. С.37-46.
- 38*. Вихарев А.А., Гинзбург Н.С., Голубев И.И., Данилов Ю.Ю., Зайцев Н.И., Каминский А.К., Козлов А.П., Кузиков С.В., Перельштейн Э.А., Песков Н.Ю., Петелин М.И., Седых С.Н., Сергеев А.П., Сергеев А.С. *Эксперименты по импульсному циклическому нагреву медной поверхности на основе мощного 30 ГГц МСЭ* // Письма в ЖТФ. 2011. Т.37, №3. С.16-22.
- 39*. KaminskyA.K , GinzburgN.S., GolubevI.I., KoslovA.P.,KratkoA.F., KuzikovS.V., Perelstein E.A., Peskov N.Yu., PetelinM.I., SedykhS.N., SergeevA.P., SergeevA.S., VikharevA.A., ZaitsevN.I. *JINR-IAPexperimentontheRFheating: Resultsanddataanalysis*//Proc. of 8thInt. Workshop

«Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and applications», N. Novgorod, Russia, 2011. P. 313-314.

40*. Vikharev A.A., Ginzburg N.S., Golubev I.I., Danilov Yu.Yu., Zaitsev N.I., Kaminsky A.K., Kozlov A.P., Kusikov S.V., Perelstein E.A., Peskov N.Yu., Petelin M.I., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. *Pulsed cycling heating of copper surface using high-power 30-GHz free-electron maser*// ISSN 1063-7850, Technical Physics Letters, 2011, V.37.N2. p.102-105.

41*. Ginzburg N.S., Golubev I.I., Kaminsky A.K., Koslov A.P., Kuzikov S.V., Perelstein E.A., Peskov N.Yu., Petelin M.I., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S., Vikharev A.A., Zaitsev N.I. *Experiment on pulse heating and surface degradation of a copper cavity powered by powerful 30 GHz free electron maser*// Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams 2011. V. 14. P.-041002.