

9-2005-182

На правах рукописи

ЕЛЖОВ
Артем Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
В ДРАЙВЕРЕ ДВУХПУЧКОВОГО УСКОРИТЕЛЯ
С СОПРОВОЖДАЮЩЕЙ ВОЛНОЙ
И В ГРУППИРОВАТЕЛЯХ СИЛЬНОТОЧНЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ**

**Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва 2005

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Перельштейн Элкуно Аврумович (ОИЯИ)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Масунов Эдуард Сергеевич (МИФИ)

доктор физико-математических наук, с.н.с.
Агафонов Алексей Вениаминович (ФИ РАН)

Ведущая организация:

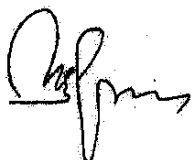
Московский радиотехнический институт РАН (г. Москва)

Защита состоится 27 декабря 2005 года в 14³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.130.01 Московского инженерно-физического института (государственного университета) в аудитории конференц-зал МИФИ по адресу: Москва, Каширское шоссе, 31, телефон 324-84-98, 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан 25 ноября 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.130.01
к.т.н., доцент

 И.С. Щедрин

1. Общая характеристика работы

1.1. Актуальность темы

Крупнейшие ускорительные проекты – коллайдеры, разрабатываемые в мире в настоящее время, направлены на дальнейший прогресс в физике высоких энергий. На 2007 г. намечен пуск Большого адронного коллайдера – LHC, сооружаемого в Европейском центре ядерных исследований – ЦЕРН. Сталкивающиеся частицы – протоны с энергией 7 ТэВ, протяженность кольца 27 км. Следующим после LHC ускорительным проектом на сверхвысокие энергии должен стать сверхпроводящий линейный электрон-позитронный коллайдер ILC (International Linear Collider) на энергию 0.5–1 ТэВ. Предполагается использовать технологию сверхпроводящих резонаторов. Этот проект стал бы идеальным дополнением к LHC по охватываемому спектру исследований по физике частиц.

Разработка "теплых" линейных электрон-позитронных коллайдеров на тэвные энергии ведется в различных лабораториях на протяжении ряда лет в двух направлениях: традиционная схема и схема двухпучкового коллайдера. В проектах электрон-позитронных линейных коллайдеров NLC (SLAC, США) и JLC (КЕК, Цукуба, Япония) [1], основанных на традиционной схеме линейных резонансных ускорителей, используется клистронная схема СВЧ-питания ускоряющих структур. Это сопряжено с решением ряда технических проблем, главные из которых – необходимость разработки и высокая стоимость мощных клистронов, а также необходимость расположения большого числа согласованных между собой клистронов на протяжении всего ускорителя.

Схема двухпучкового электрон-позитронного коллайдера принята в проекте CLIC (Compact Linear Collider) [2], разрабатываемом в ЦЕРН. За счет повышения рабочей частоты до 30 ГГц в основном варианте проекта предусматривается достижение темпа ускорения 150 МэВ/м и энергии частиц 3 ТэВ, что существенно выше, чем в других проектах линейных коллайдеров.

Данный проект наиболее продвинут по ряду решений; в частности системы инъекции пучков строятся на базе существующего ускорительного комплекса.

Принцип двухпучкового ускорителя (ДПУ) основан на использовании одного вспомогательного – драйверного – сильноточного электронного пучка с относительно небольшой энергией для генерации высокочастотной электромагнитной мощности, которая подается в ускоряющие структуры для ускорения главного пучка.

В работе [3] впервые была высказана идея совмещения генерирующего и ускоряющего устройств в одной установке. Это положило начало изучению одноканального ДПУ, в котором драйверный и главный пучки распространяются в одном общем канале [4, 5]. В работе [5] показана важность учета нагрузки электродинамической системы сильноточным драйверным пучком. В работе [6] изучалась одна из разновидностей двухпучкового ускорения ионного пучка, в которой драйверный пучок распространяется, по сути, в плазменном волноводе.

Первое предложение о создании ДПУ с пространственно разделенными драйвером и главным ускорителем было сделано Э. Сесслером [7]. В предложенной схеме драйверный сильноточный электронный пучок распространяется по цепочке чередующихся генераторных и доускоряющих секций линейных индукционных ускорителей (ЛИУ). На входе драйвера необходимо обеспечить группировку пучка с энергией порядка десятка МэВ. В генераторной секции происходит возбуждение индуцированного излучения миллиметрового диапазона при прохождении сгруппированного пучка через резонаторы, используемые, например, в лазерах на свободных электронах – ЛСЭ [8] или в релятивистских клистронах [9]. В резонаторе накачивается электромагнитное поле, затем СВЧ-мощность полностью выводится из него для подачи в ускоряющие структуры главного ускорителя, в котором электроны (позитроны) ускоряются с большим темпом набора энергии. Энергетические потери драйверного пучка на индуцированное излучение восполняются в доускоряющих секциях ЛИУ, где создается продольное

электрическое поле. Пара генераторной и доускоряющей секций образует ячейку СВЧ-системы драйвера. Особенность двухпучкового коллайдера CLIC заключается в том, что используется ультрарелятивистский драйверный пучок, обладающий высокой устойчивостью и не требующий доускорения. Отбор энергии от драйверного пучка осуществляется на большой длине в многочисленных участках вывода СВЧ-мощности.

Ранее в СВЧ-электронике Е.Д. Белявским [10] было предложено использовать ускоряющее электростатическое поле для повышения КПД слабoreлятивистских ламп бегущей волны (ЛБВ). В первых теоретических исследованиях драйвера ДПУ с восстановлением энергетических потерь драйверного пучка [8, 11] взаимодействие описывалось идеализированной моделью – принималось распределенным по всей длине драйвера. Однако, для более детального описания динамики пучка и волны необходима более реалистичная дискретная модель. Теоретические исследования системы изолированных по СВЧ-полю ячеек, возбуждаемых предварительно сгруппированным пучком, были впервые выполнены в работе [12] и продолжены в [13]. Показано, что последовательное возбуждение ячеек возможно при определенных условиях, зависящих от типа ячейки.

Для разработки драйвера с СВЧ-источниками на основе резонаторов и полным выводом мощности требуется разрешить ряд проблем, связанных с предварительной группировкой релятивистского пучка и обеспечением фазовой и амплитудной стабильности излучения как по времени, так и по длине драйвера. Это требует решать сложную задачу временной стабильности драйверного электронного пучка и его воспроизведения от ячейки к ячейке. В несвязанных между собой ячейках процессы возбуждения резонаторов протекают независимо, и фазы выходного излучения не коррелируют (случайны). Это препятствует воспроизведению пучка на входе в очередную ячейку, что подтверждается результатами моделирования [12].

Чтобы обеспечить фазовую стабильность при выводе излучения на различных участках драйвера, Э.А. Перельштейном была предложена схема

двухпучкового ускорителя, в котором СВЧ-волна распространяется по всей длине драйвера и нигде не выводится полностью [3*, 4*]. В диссертации теоретически исследуется драйвер такого ДПУ на основе ЛИУ [3*, 4*, 5*, 8*], в котором снимаются трудности, характерные для драйвера с полным выводом СВЧ-мощности в каждой ячейке драйвера. В изучаемой схеме группировка электронного пучка производится при достаточно низкой начальной энергии (~ 1 МэВ), дальнейшее ускорение сгруппированного пучка до требуемой конечной энергии происходит в сопровождающей усиленной волне, которая нигде не выводится полностью.

В схеме ДПУ с сопровождающей волной достигается высокий темп набора энергии (из каждой ячейки выводится импульсная СВЧ-мощность с пиковым значением порядка 100 МВт при длительности импульса в десятки наносекунд). Эта схема представляет интерес не только для коллайдеров, но и для линейных электронных ускорителей на меньшие энергии.

Группировка осуществляется непосредственно на драйверном пучке, в начале ускорителя, с использованием тех же электродинамических и ускоряющих систем, что и в основной части драйвера. В то же время разработанный группирователь может быть включен в качестве источника электронного пучка для других типов драйверных схем. Исследованы также группирователи электронного пучка другого вида – на лазерах на свободных электронах, которые представляют интерес как инжекторы пучка и источники СВЧ-мощности для линейных электронных ускорителей.

Актуальность диссертационной работы связана с тем, что исследованные в ней вопросы связаны с созданием линейных коллайдеров (новая схема двухпучкового линейного коллайдера), с разработкой источников излучения в миллиметровом диапазоне длин волн и группирователей интенсивных электронных пучков для линейных ускорителей, а также с созданием линейных ускорителей электронов с большим темпом набора энергии.

1.2. Цель диссертации

Целью диссертации является:

– исследование физических процессов в драйвере двухпучкового ускорителя с сопровождающей волной и определение требований к драйверу, обеспечивающих стабильность излучения, выводимого из драйвера для подачи в главный ускоритель;

– исследование особенностей группирователей сильноточных электронных пучков и источников излучения в миллиметровом диапазоне длин волн, которые могут быть использованы как в драйвере ДПУ с сопровождающей волной, так и в других драйверных схемах, а также в линейных электронных ускорителях на сравнительно небольшие энергии.

1.3. Научная новизна работы

• Путем численного моделирования исследована новая схема драйвера двухпучкового ускорителя – схема с сопровождающей волной, в которой сильноточный электронный пучок, получая энергию в секциях линейного индукционного ускорителя, преобразует ее в СВЧ-мощность для питания секций главного ускорителя. Впервые подтверждены работоспособность схемы и выявлены ее достоинства. Сформулированы требования к устройствам вывода мощности для поддержания фазовой стабильности системы, сделаны оценки для величин разброса набега фазы на ячейку вывода мощности, при котором величины фазовых и амплитудных нестабильностей приемлемы для передачи мощности в главный ускоритель коллайдера.

• Разработано программное обеспечение для моделирования группировки пучка и транспортировки сгустков в ЛБВ с учетом энергетического разброса в пучке.

• Разработана новая 1.5-мерная модель лазера на свободных электронах, который может быть использован в коллайдерах. Модель не требует

существенных вычислительных ресурсов и вместе с тем учитывает главные физические процессы в ЛСЭ-усилителе.

- Впервые экспериментально зарегистрирована группировка электронного пучка в группирователе на основе ЛБВ с помощью черенковского излучения.

1.4. Практическая ценность работы

- Исследованная схема драйвера двухпучкового ускорителя с сопровождающей волной может быть использована при проектировании линейных коллайдеров и линейных электронных ускорителей с большим темпом набора энергии. Результаты исследований послужили основой выполнения проекта РФФИ № 98-02-17685, в рамках которого в ОИЯИ реализован группирователь пучка на основе ЛБВ.

- Разработанная модель ЛСЭ-усилителя, не требующая существенных вычислительных ресурсов, пригодна для численного моделирования и определения основных параметров усилителя – инкрементов и уровня насыщения. Модель может быть использована при подготовке экспериментов для выбора рабочих параметров усилителей, а также в экспериментальных исследованиях ЛСЭ миллиметрового диапазона, проводимых в ОИЯИ совместно с ИПФ РАН.

- В 2001 г. работа автора по теме диссертации была поддержана РФФИ (проект № 01-02-06249), в рамках программы поддержки молодых ученых и специалистов.

- Результаты работы использовались при выполнении других проектов, поддержанных РФФИ (проекты №№ 97-02-16643, 00-02-17519, 03-02-16530).

1.5. На защиту выносятся следующие положения

- Выполненное моделирование драйвера ДПУ с сопровождающей волной показывает, что существуют квазистационарные состояния драйверного пучка с сопровождающей волной. Подтверждены следующие достоинства схемы

драйвера с сопровождающей волной: 1) отсутствие необходимости осуществлять группировку пучка при высоких энергиях ~ 10 МэВ; 2) отсутствие необходимости разрабатывать группирователь пучка как отдельное устройство; 3) возможность обеспечить в дискретной схеме ДПУ пространственную стабильность СВЧ-мощности. Показана возможность обеспечения фазовой и амплитудной стабильности СВЧ-волны. При выполнении сформулированных требований к устройствам вывода мощности (ограничений на фазовый сдвиг, допусков на амплитудные и фазовые отклонения) удерживается квазистационарное состояние пучка с высокой степенью группировки. Амплитудные и фазовые нестабильности сохраняются на уровне, приемлемом для передачи мощности в главный ускоритель коллайдера.

- Моделирование группировки электронного пучка ускорителя ОИЯИ ЛИУ-3000 с энергией в диапазоне 1÷2 МэВ в лампе бегущей волны показывает, что высокая степень группировки может быть достигнута на небольшой длине, а при дальнейшем сопровождении пучка синхронной волной качество группировки сохраняется на протяжении как минимум нескольких метров. На основе моделирования переходного участка драйвера показана возможность экспериментальной проверки неоднократного вывода мощности при сохранении высокой степени группировки пучка на ускорителе ЛИУ-3000.
- Разработанная в приближении спирального движения электронов 1.5-мерная модель ЛСЭ-усилителей со спиральными вигглерами, работающих в разных режимах по отношению к продольному магнитному полю, позволяет получить результаты с точностью, близкой к точности трехмерного моделирования, используя значительно меньший объем вычислительных ресурсов. Модель учитывает эффекты пространственного заряда и важнейшие процессы, определяющие динамику ЛСЭ-усилителя.
- В экспериментах, выполненных с ЛБВ-группирователем для модели драйвера ДПУ на ускорителе ЛИУ-3000 при энергии ~ 0.6 МэВ, получены

уровень мощности волны и степень группировки пучка, соответствующие расчетным. Электронные сгустки поддерживаются в сопровождении усиленной СВЧ-волны и разрушаются в отсутствие волны.

1.6. Аprobация работы и публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1*–18*], докладывались на российских и международных конференциях и семинарах: на VI и VII Европейских конференциях по ускорителям частиц (Стокгольм, Швеция, 1998; Вена, Австрия, 2000), международных конференциях по ускорителям частиц (Ванкувер, Канада, 1997; Нью-Йорк, США, 1999), XVII Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Дубна, 1998), 26-й Международной конференции по лазерам на свободных электронах (Триест, Италия, 2004), Международной рабочей встрече "Мощные микроволны в плазме" (Нижний Новгород, 2002), 12-й Международной конференции по мощным пучкам заряженных частиц (Хайфа, Израиль, 1998), XV и XIX Международных семинарах по линейным ускорителям заряженных частиц (Алушта, Украина, 1997 и 2005), XVII Международном семинаре "Плазменная электроника и новые методы ускорения" (Харьков, Украина, 2000), XIX Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 2004), II, III и VI Научных семинарах памяти В.П. Саранцева (Дубна, 1997, 1999 и Алушта, 2005), VII и IX Всероссийских Школах-семинарах "Физика и применение микроволн" (Звенигород, 2001 и 2003), III–V Научных конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 1999, 2000, 2001), а также на научно-методических семинарах ЛФЧ и ЛЯП ОИЯИ.

1.7. Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации составляет 111 страниц, включая 51 рисунок, 3 таблицы и список литературы из 102 наименований, 18 из которых посвящены теме диссертации.

2. Краткое содержание диссертации

В диссертации исследованы особенности драйвера двухпучкового ускорителя с сопровождающей волной и группирователей сильноточных электронных пучков. Особое внимание уделяется физическим процессам, определяющим взаимодействие электронного пучка с волной.

Во *Введении* обоснована перспективность использования исследуемых схем драйвера, а также группирователей сильноточных электронных пучков и источников миллиметрового излучения при создании электронных коллайдеров тэвного диапазона энергий и линейных электронных ускорителей на меньшие энергии. Раскрыта актуальность темы; сформулированы актуальность, цели. Изложены новизна результатов, научная значимость диссертационной работы. Сформулированы тезисы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию драйвера двухпучкового ускорителя с сопровождающей электромагнитной волной (см. принципиальную схему на рис. 1).

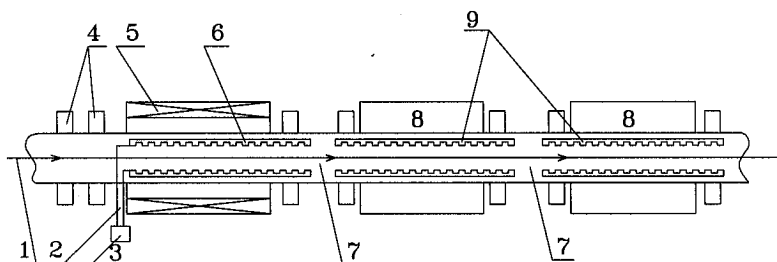


Рис. 1. Схема драйвера ДПУ: 1) электронный пучок; 2) волновод; 3) магнетрон; 4) фокусирующие магнитные линзы; 5) соленоид; 6) ЛБВ; 7) участки вывода СВЧ мощности; 8) ускоряющие секции; 9) гофрированный волновод – замедляющая электродинамическая структура.

В драйвере двухпучкового ускорителя с сопровождающей волной электронный пучок с энергией 1–2 МэВ, создаваемый в инжекторе, вводится в группирователь. В качестве последнего может быть использована ЛБВ в режиме усиления, рассматриваемая в последующих главах. Далее по ходу драйвера электронные сгустки продолжают движение в ЛИУ в сопровождении

СВЧ-волны, усиливаемой в волноводных электродинамических структурах. Ускоряющее электрическое поле может быть приложено непрерывно по всей длине драйвера либо на отдельных ускоряющих промежутках. Вывод СВЧ-мощности из драйвера производится только на переходных участках. Система достигает стационарного состояния на первых нескольких десятках метров, где энергия сгустков возрастает до уровня ~ 10 МэВ. Затем следует область квазистационарной генерации СВЧ-волны: вся мощность, передаваемая ускоряющим полем пучку, преобразуется в СВЧ-мощность.

В первой главе выполнено численное моделирование ускорения и транспортировки сгустков сильноточного электронного пучка (сила тока ~ 500 А), сопровождаемых электромагнитной волной во внешнем электрическом поле, динамики взаимодействия пучка с волной в полной схеме драйвера (работы [3*, 4*, 5*, 6*, 8*]). В моделировании учитывалась существенная нагрузка волны пучком. Исследовались три варианта драйвера: 1) внешнее электрическое поле и ослабление СВЧ-мощности (для вывода в главный ускоритель) непрерывно распределены вдоль драйвера; 2) драйвер состоит из отдельных периодических ячеек – индукционных секций, чередующихся с переходными участками; 3) драйвер состоит из отдельных периодических ячеек, а ускоряющее напряжение каждой секции сосредоточивается в узком ускоряющем промежутке. Для всех случаев найдены стационарные состояния системы, в которых при поддержке высокой степени группировки электронного пучка осуществляется распределенный или периодический вывод СВЧ-мощности для главного ускорителя.

На рис. 2 показаны расчетные зависимости средней энергии сгустка от расстояния. Энергия выходит на средне-стационарный уровень в переходной области протяженностью около 40 м. Далее, в квазистационарном режиме, энергия сгустка в среднем сохраняется. На рис. 3 приведено распределение показателя степени группировки пучка $B = | \langle e^{i\psi} \rangle |$ – примере непрерывно

распределенных ускоряющих полей и вывода СВЧ-мощности (ψ – фазы частиц относительно СВЧ-волны, скобки $\langle \dots \rangle$ означают усреднение по сгустку).

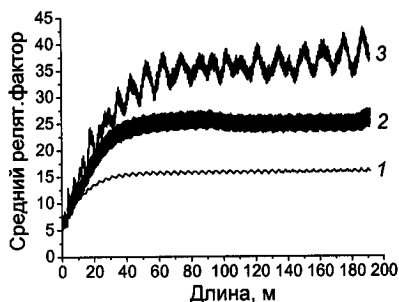


Рис. 2. Средняя энергия электронов в зависимости от длины для: 1 – непрерывно распределенных параметров драйвера; 2 – отдельных периодических ячеек, 3 – отдельных ячеек с узкими ускоряющими промежутками.

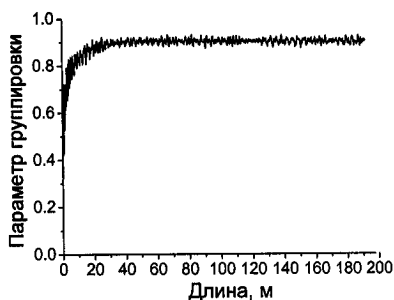


Рис. 3. Параметр группировки в зависимости от длины для непрерывно распределенных параметров драйвера.

На протяжении длины не менее 200 м энергия пучка и группировка стабильно сохраняются, а значит, поддерживается квазистационарное состояние драйвера. Внешним электрическим полем электронному пучку передается мощность ~ 500 МВт, которая в квазистационарном состоянии преобразуется в энергию волны. Из каждой ячейки выводится примерно 70% мощности. При эффективности вывода $\sim 20\%$ импульсная мощность, выведенная из одной секции, составляет порядка 100 МВт в максимуме, при длительности импульса в десятки наносекунд.

Показано, что для сохранения квазистационарного решения допустимы погрешности в токе электронного пучка до $\sim 10\%$.

Эти результаты подтверждают работоспособность схемы драйвера с сопровождающей волной.

Особое место в диссертации занимает вопрос фазовой стабильности и устойчивости группировки драйверного пучка. При его исследовании большое значение имеет влияние фазовых возмущений при выводе СВЧ-мощности [17*, 16*]. Чтобы учитывать фазовый сдвиг при периодическом выводе мощности,

модифицирована математическая модель драйвера. Квазистационарное состояние драйвера поддерживается, если систематическое фазовое возмущение выводимой волны в каждой ячейке вывода достаточно мало. Это ограничение можно сформулировать в виде численного критерия. Для рассмотренного примера драйвера с отдельными периодическими ячейками величина набега фазы на участке вывода $\delta\varphi$ должна быть много меньше величины ~ 1.3 рад.

Проведенное моделирование драйвера в широком диапазоне величин фазового набега на ячейку показало, что если величина $\delta\varphi$ находится в установленных пределах, то квазистационарное состояние драйвера сохраняется. Это иллюстрируется распределениями СВЧ-мощности и степени группировки (рис. 4,5).

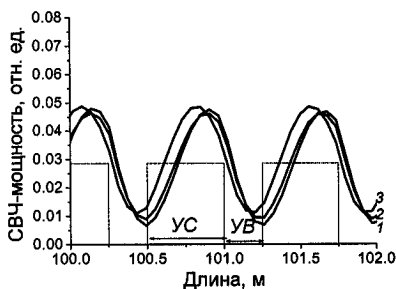


Рис. 4. Пространственные зависимости мощности СВЧ-волны на участке драйвера для разных значений набега фазы на ячейку: 1 — $\delta\varphi = 0$; 2 — $\delta\varphi = 0.1\pi$; 3 — $\delta\varphi = 0.5\pi$. Условно показано положение ускоряющих секций (УС) и участков вывода мощности (УВ).

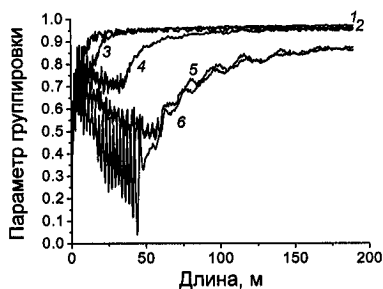


Рис. 5. Пространственные зависимости параметра группировки. 1 — $\delta\varphi = 0$; 2 — $\delta\varphi = 0.1\pi$; 3 — $\delta\varphi = 0.4\pi$; 4 — $\delta\varphi = 0.5\pi$; 5 — $\delta\varphi = 0.7\pi$; 6 — $\delta\varphi = \pi$.

В диссертации исследуется вопрос о допусках на разброс амплитуды и фазы сопровождающей и выведенной волн. Он обусловлен ограничениями на разброс амплитуды и фазы СВЧ-поля в ускоряющих структурах линейных коллайдеров — как от импульса к импульсу, так и по длине ускорителя, — которые связаны с тем, что этот разброс приводит к флуктуациям энергии пучка.

Анализ влияния случайных возмущений амплитуды и фазы СВЧ-поля на входе в ускоряющие секции линейного коллайдера, построенного по традиционной схеме питания отдельных секций независимыми источниками, проведен в работе [14]. В ней для конкретного примера (проект NLC на энергию 1 ТэВ) получено, что для сведения ошибки в конечной энергии пучка к уровню не более 0.1%, отклонения амплитуды и фазы СВЧ-поля в каждой ускоряющей структуре должны находиться в пределах 2% и 3° соответственно.

В отличие от традиционной схемы питания ускоряющих структур, в двухпучковом ускорителе случайные возмущения амплитуды и фазы СВЧ-волны при выводе из драйвера складываются из случайных ошибок на каждом отдельном устройстве вывода и скоррелированных через электронный пучок случайных возмущений от предыдущих секций. Соответственно в устройствах вывода мощности должны удовлетворяться допуски на амплитудные и фазовые отклонения, возникающие из условий ускорения главного пучка.

Задача определения допусков решается путем введения набега фазы сопровождающей волны на одной ячейке в виде случайной величины с нулевым средним значением и дисперсией $\sigma_{\delta\varphi}$. Зависимости, получаемые в моделировании, носят статистический характер. На рис. 6,7 приведены результаты обработки пространственных зависимостей отклонений мощности и фазы сопровождающей СВЧ-волны от невозмущенного режима (квазистационарного режима без фазовых возмущений). Их анализ показывает: при характерном разбросе набега фазы на ячейку вывода мощности в драйвере в несколько долей градуса относительные отклонения мощности сопровождающей и выведенной волн находятся на уровне долей процентов, а фазовая нестабильность имеет масштаб 0.1 рад. Такой масштаб фазовых и амплитудных нестабильностей (ср. пример [14]) приемлем для передачи мощности в главный ускоритель коллайдера.

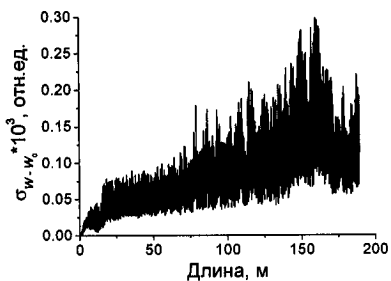
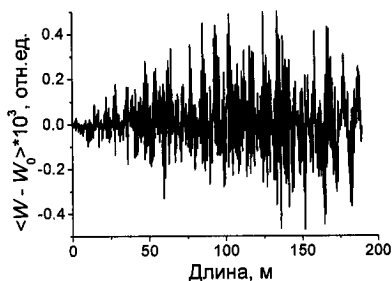


Рис. 6. Статистические характеристики пространственной зависимости отклонения мощности сопровождающей СВЧ-волны от невозмущенного режима при $\sigma_{\delta\varphi} \approx 0.3^\circ$. Результат усреднения по 100 случайным выборкам величин фазового набег на ячейку вывода: слева – среднее значение; справа – дисперсия.

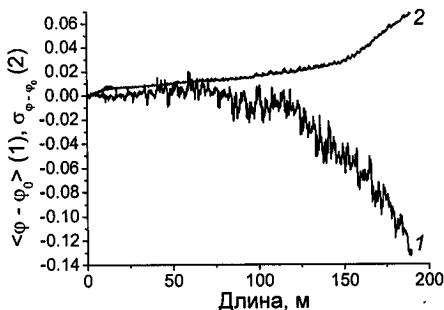


Рис. 7. Статистические характеристики пространственной зависимости отклонения фазы выведенной СВЧ волны от невозмущенного режима при $\sigma_{\delta\varphi} \approx 0.3^\circ$. Результат усреднения по 100 случайным выборкам величин фазового набег на ячейку вывода. Кривая 1 – среднее значение, кривая 2 – дисперсия.

Таким образом, показана работоспособность схемы драйвера с сопровождающей волной и подтверждены ее преимущества.

В разработке драйверных схем и вообще резонансных ускорителей на высокие энергии важное место занимают вопросы формирования группировки пучка. В этой связи актуальны разработка группирующих устройств и исследование процессов взаимодействия пучка с волной в них. Численному моделированию этих процессов в ЛБВ и ЛСЭ миллиметрового диапазона длин волн посвящена вторая глава.

Для предварительной группировки пучка для драйвера ДПУ представляется естественным использовать ЛБВ – структуру, подобную той, на которой строится электродинамическая система самого драйвера. Она

наиболее эффективна для группировки малорелятивистских электронных пучков (с энергией порядка 1 МэВ).

Выполнено моделирование группирователя сильноточного электронного пучка на основе ЛБВ-усилителя [1*, 7*]. Показано, что высокая степень группировки пучка с током ~ 500 А и энергией в диапазоне 1–2 МэВ может быть достигнута в короткой лампе бегущей волны на длине 0.5–1 м. Эффективность группировки в ЛБВ снижается с увеличением начальной энергии электронов. Выполнены также расчеты транспортировки сгруппированного пучка в ЛБВ. Показано, что в сопровождении синхронной волны группировка сохраняется на расстояниях не менее ~ 5 м. Эти результаты послужили предпосылкой к началу разработки модели драйвера на ускорителе ЛИУ-3000 (ОИЯИ), что отражено в третьей главе.

С другой стороны, для группировки пучков с большей энергией эффективнее использовать ЛСЭ. Разработка таких устройств представляет самостоятельную ценность. В частности, ЛСЭ-группирователь можно рассматривать как инжектор электронного пучка для других драйверных схем и линейных электронных ускорителей на меньшие энергии.

Полное трехмерное моделирование динамики ЛСЭ позволяет достичь наилучшего согласия с экспериментальными данными. Однако, соответствующее программное обеспечение имеет ограниченную доступность и требует существенных вычислительных ресурсов. К тому же, при этом не всегда удастся выделить физические факторы, определяющие особенности того или иного режима усиления в ЛСЭ. В этой связи представляется актуальным применение компактных приближенных моделей, учитывающих доминирующие физические процессы и позволяющие определять рабочие характеристики усилителя с приемлемой точностью.

В диссертации разработана 1.5-мерная модель ЛСЭ-усилителя в приближении спиральных траекторий частиц [14*, 15*, 18*], в которой поперечное движение электронов описывается амплитудой поперечной скорости. В модели учитываются влияние пространственного заряда пучка и

постоянного внешнего (ведущего) магнитного поля на динамику частиц. Отличительной особенностью модели является учет изменения амплитуды поперечной скорости из-за взаимодействия с полем усиливаемого излучения и полями пространственного заряда, которое приводит к изменению связи пучка с волной. Эти процессы описываются малыми возмущениями компонент скоростей частиц относительно стационарных (невозмущенных) спиральных траекторий. Сформулированы ограничения на величины возмущений, определяющие область применимости принятого приближения спиральных траекторий. Возмущение поперечной скорости каждой частицы должно быть мало относительно амплитуды поперечной скорости.

Особое внимание в диссертации уделено режимам ЛСЭ с обратным ведущим полем (при этом направления вращения электронов в продольном и ондуляторном магнитных полях противоположны), в которых достигается высокая энергетическая эффективность и спектральная плотность излучения.

Для испытания разработанной 1.5-мерной модели проведено моделирование ряда экспериментов с миллиметровыми ЛСЭ – МСЭ-усилителями, работавшими в различных режимах – как по эффектам пространственного заряда (комптоновский и рамановский режимы), так и по ведущему магнитному полю.

Проведено моделирование трех режимов по продольному магнитному полю для эксперимента с рамановским МСЭ в MIT (США) [16]. В режиме с малым прямым ведущим полем, при сравнительной близости рабочей точки к циклотронному резонансу, поперечные колебания частиц растут настолько, что нельзя применять приближение спиральных траекторий, решения в 1.5-мерной модели становятся расходящимися. В режиме с большим прямым ведущим полем 1.5-мерное моделирование дает завышенный уровень выходной мощности, как и в трехмерных расчетах [18]. Снижение усиления в режимах с прямым ведущим полем может объясняться конкуренцией рабочей волны с высокочастотными модами, возбуждаемыми из уровня шумов (моды сверхизлучения). Для режима с обратным ведущим полем 1.5-мерная модель

достаточно хорошо описывает рост СВЧ-мощности по длине, пока не достигается насыщение (рис. 8). При больших мощностях полей излучения условия малости возмущений спиральных электронных орбит нарушаются, и 1.5-мерное моделирование приводит к занижению выходной мощности.

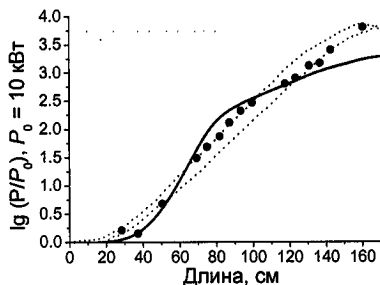


Рис. 8. СВЧ-мощность МСЭ-усилителя с обратным продольным магнитным полем $B_g = -10.92$ кГс [16] по длине: экспериментальные данные (точки), расчет по 3-мерной модели ARACHNE [18] (пунктирные линии для двух наборов параметров в пределах погрешности эксперимента) и расчет по 1.5-мерной модели (сплошная линия).

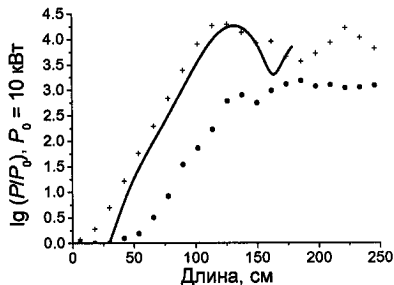


Рис. 9. СВЧ-мощность МСЭ-усилителя CESTA в зависимости от длины взаимодействия электронного пучка с вигглером: данные CESTA [17] – экспериментальные (точки) и расчетные (кресты); результат расчета для холодного пучка по 1.5-мерной модели (сплошная линия).

Моделирование комптоновского МСЭ без продольного магнитного поля в CESTA (Франция) [17] показало хорошее согласие с результатами трехмерного моделирования [17] (рис. 9). Расхождение между расчетом и экспериментом для 1.5-мерной модели такое же, как для трехмерной [17] и связывается с отклонениями характеристик пучка от идеальных, которые не учитывались в обеих моделях.

В диссертации исследован также режим с обратным ведущим магнитным полем МСЭ-усилителя на ускорителе ЛИУ-3000 (ОИЯИ) [15]. Рабочие параметры эксперимента лежат в промежуточной области по отношению к влиянию эффектов пространственного заряда, где ни один из видов взаимодействия не является доминирующим – т.е. находятся на границе комптоновского режима с большим усилением и рамановского режима. Тем не менее, согласно выполненному 1.5-мерному моделированию (рис. 10), эффекты

пространственного заряда не имеют большого значения. Полученные зависимости мощности укладываются в интервал, определяемый погрешностями эксперимента. Согласие с экспериментальными данными качественно лучше, чем для расчетов [2*], выполненных в квазиодномерной модели комптоновского усиления с упрощенной оценкой коэффициента связи пучка с волной. Для экспериментов [17, 15] возмущения скоростей частиц остаются в допустимых пределах, что свидетельствует о надежности результатов, полученных в приближении спирального движения.

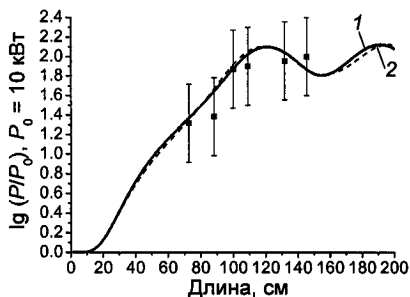


Рис. 10. СВЧ-мощность МСЭ-усилителя с продольным магнитным полем $B_g = -1.4$ кГс [15]. Квадратами показаны измеренные значения. Расчеты по 1.5-мерной модели для энергетического разброса $\delta\gamma/\gamma = 2\%$ с учетом пространственного заряда и без него (штриховая и сплошная линии)

Разработанную модель ЛСЭ-усилителей можно использовать для быстрых и сравнительно точных оценок динамики ЛСЭ-усилителей со спиральными вигглерами и обратным ведущим магнитным полем, в частности, для возможных будущих экспериментов с МСЭ-усилителем на пучке ускорителя ЛИУ-3000. Модель можно расширить для изучения ЛСЭ-генераторов подобных конфигураций – например, МСЭ-генератора с брегговским резонатором (ОИЯИ–ИПФ РАН).

Экспериментальная реализация группирователя пучка для драйвера двухпучкового ускорителя проводилась на базе ускорителя ЛИУ-3000 (ОИЯИ), с использованием лампы бегущей волны. Результаты теоретических и экспериментальных работ [9*, 12*, 13*], выполненных в связи с этой задачей, изложены в третьей главе.

Выполнено численное моделирование группирователя электронного пучка ускорителя ЛИУ-3000 с энергиями ~ 0.6 МэВ (в расчете на эксперимент

с имевшейся электродинамической структурой [19]) и 0.8 МэВ (энергия в штатном режиме ускорителя с двумя секциями). Показано, что выходная мощность должна достигать нескольких мегаватт, а степень группировки – $B \sim 0.5$.

При планировании экспериментов на установке ЛИУ-3000 проведено моделирование транспортировки сгруппированного пучка. Показано, что качество группировки должно сохраняться на протяжении десятков метров.

В целях разработки модели драйвера ДПУ с сопровождающей волной на пучке ЛИУ-3000, было проведено моделирование начального участка драйвера для параметров пучка данного ускорителя. В расчете получена возможность вывода СВЧ-мощности на уровне 10–15 МВт на секцию, при сохранении высокого уровня группировки пучка. Это показывает возможность экспериментальной проверки многократного вывода мощности на ускорителе ЛИУ-3000.

На рис. 11 показана схема эксперимента с ЛБВ-усилителем [9*, 12*, 13*] с имевшейся электродинамической структурой [19]. Источником затравочной мощности на частоте 36.4 ГГц являлся магнетрон. Волна вводилась в область взаимодействия с помощью квазиоптической системы. В качестве электродинамической структуры использовался гофрированный волновод из тонкого медного слоя. Диагностика СВЧ-мощности осуществлялась с помощью полупроводниковых кристаллических детекторов. Для регистрации электронных сгустков использовался кварцевый образец, при прохождении через который электронного пучка возникало черенковское излучение.

Экспериментально зарегистрированные мощность усиленного излучения и группировка электронного пучка с энергией ~ 0.6 МэВ [10*, 11*] (см. временной профиль пучка на рис. 12) находятся в соответствии с расчетными результатами. Представлен временной профиль сгруппированного электронного пучка, зарегистрированный в черенковском излучении с помощью стрик-камеры. Обработка полученных профилей дает степень группировки, соответствующую расчету.

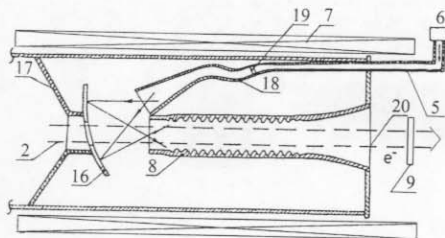


Рис. 11. Схема эксперимента:
 1) электронная пушка; 2) электронный пучок;
 3) ускоряющие секции; 4) фокусирующие магнитные линзы; 5) тракт транспортировки СВЧ-волны; 6) магнетрон; 7) соленоид; 8) замедляющий волновод; 9) кварцевый образец; 10) отклоняющие магниты; 11) оптическое черенковское излучение; 12) СВЧ-излучение; 13) СВЧ-детектор; 14) оптическое зеркало; 15) стрик-камера; 16) квазиоптическое зеркало; 17) система крепления зеркала; 18) преобразователь моды; 19) и 20) вакуумные окна.

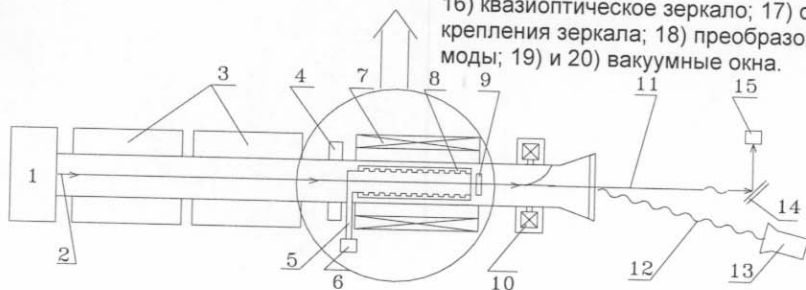


Рис. 12. Временной профиль сгруппированного электронного пучка, полученный в фоторегистраторе.

В численном моделировании получено, что электронные сгустки пучка ЛИУ-3000 полностью разрушаются на расстоянии ~ 4 см после выхода группирователя, если пучок не сопровождается усиленной СВЧ-волной. В то же время, экспериментально подтверждено, что электронный пучок, будучи сопровождаемым синхронной волной, сохраняет высокую степень группировки на расстоянии не менее ~ 10 см после достижения насыщения. Длина, на которой регистрировалась группировка пучка в сопровождении синхронной волны, была ограничена длиной имевшегося волновода.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

3. Основные результаты работы

Впервые исследована новая схема драйвера двухпучкового ускорителя – драйвера с сопровождающей волной. В этой схеме сгруппированный

электронный пучок распространяется в сопровождении усиленной СВЧ-волны, что обеспечивает автофазировку и устойчивую продольную группировку пучка вдоль всего драйвера. Достоинствами данной схемы являются: возможность обеспечения фазовой и амплитудной стабильности СВЧ-волны, отсутствие необходимости в ускорении пучка до энергий ~ 10 МэВ и группировке при этих энергиях, а также в разработке группирователя пучка как отдельного устройства.

1. В численном моделировании показано, что сильноточный электронный пучок, предварительно сгруппированный на низких энергиях (~ 1 МэВ), может быть ускорен до энергий ~ 10 МэВ при сохранении высокой степени группировки. Далее драйверный пучок может распространяться в сопровождении СВЧ-волны на протяжении сотен метров, сохраняя высокую степень группировки. При этом энергия, передаваемая пучку ускоряющим полем, преобразуется в СВЧ-мощность.

2. Изучена проблема фазовой и амплитудной нестабильностей СВЧ-волны, выводимой из драйвера в главный ускоритель. Получены ограничения на фазовые возмущения в устройствах вывода мощности, при которых нестабильность выводимой волны остается в допустимых пределах.

При систематическом набеге фазы на ячейку вывода мощности в пределах десятка градусов можно удержать квазистационарное состояние драйвера, в котором сохраняется группировка пучка и стабильное преобразование энергии ускоряющего поля в СВЧ-мощность.

При разбросе набеге фазы на ячейку вывода мощности на уровне нескольких долей градуса фазовые и амплитудные нестабильности имеют достаточно малый масштаб, приемлемый для передачи мощности в главный ускоритель коллайдера.

Таким образом, показана работоспособность схемы драйвера с сопровождающей волной и подтверждены ее достоинства.

3. Для исследования группирователя пучка на лазере на свободных электронах разработана новая 1.5-мерная модель ЛСЭ-усилителей со

спиральными вигглерами. Модель применима для ЛСЭ, работающих в различных режимах – как по отношению к влиянию эффектов пространственного заряда, так и в зависимости от внешних полей (ЛСЭ с ведущим магнитным полем разной ориентации и без него). Определены ограничения на применимость модели и сформулированы оценочные критерии. Разработанная модель успешно испытана путем сравнительного анализа с результатами трехмерных расчетов и в меньшей степени – в сравнении с экспериментальными данными ЛСЭ в различных режимах работы. Модель, учитывающая важнейшие процессы в ЛСЭ-усилителе, позволяет получить результаты с точностью, близкой к точности трехмерного моделирования, требуя значительно меньше вычислительных ресурсов.

4. Теоретически исследованы динамика сильнооточного электронного пучка в ЛБВ-группирователе и транспортировка сгруппированного пучка в сопровождающей волне. Получена высокая степень группировки электронного пучка с энергией 1–2 МэВ на расстоянии 0.5–1 м. Показано, что электронные сгустки поддерживаются в сопровождении усиленной СВЧ-волны на расстоянии не менее 5 м и разрушаются в отсутствие волны.

5. Выполнено моделирование динамики ЛБВ-группирователей пучка ускорителя электронов ЛИУ-3000 с энергиями ~ 0.6 и 0.8 МэВ. Экспериментально зарегистрированы группировка пучка с энергией ~ 0.6 МэВ и поддержание сгустков в сопровождении усиленной СВЧ-волны. Уровень мощности волны и степень группировки пучка соответствуют расчетным величинам.

6. В моделировании переходного участка драйвера для пучка ускорителя электронов ЛИУ-3000 показана возможность неоднократного вывода мощности при сохранении высокой степени группировки пучка. Для рабочих параметров пучка выводимая СВЧ-мощность может достигать 10–15 МВт на секцию.

4. Список основных публикаций по теме диссертации

- 1*. E.A. Perelstein, L.V. Bobyleva, A.V. Elzhov, V.I. Kazacha.– Theoretical study of power relativistic amplifiers for electron beam bunching.– Сообщения ОИЯИ / JINR Communications, E9-97-5, Dubna, 1997; Proc. of 1997 Particle Accelerator Conference (PAC'97), Vancouver, B.C., Canada, p. 488–490.
- 2*. E.A. Perelstein, L.V. Bobyleva, A.V. Elzhov, V.I. Kazacha.– Simulation of electron beam bunching process in relativistic microwave amplifiers for two beam accelerator.– Вопросы атомной науки и техники. Серия “Ядерно-физические исследования”, 1997, вып. 2,3 (29,30), с. 78–80.
- 3*. A.V. Elzhov, V.I. Kazacha, E.A. Perelstein.– New scheme of two beam accelerator driver on base of linear induction accelerator.– Вопросы атомной науки и техники. Серия “Ядерно-физические исследования”, 1997, вып. 4,5 (31,32), с. 129–131; Труды II Научного семинара памяти В.П. Саранцева, Дубна, 1998, с. 119–124.
- 4*. A.V. Elzhov, A.A. Kaminsky, A.K. Kaminsky, V.I. Kazacha, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev.– New scheme of two beam accelerator driver based on linear induction accelerator.– Proceedings of 12th International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS'98), Haifa (Israel), v. 1, 1998, p. 314–317.
- 5*. A.V. Elzhov, A.A. Kaminsky, A.K. Kaminsky, V.I. Kazacha, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev.– New scheme of two beam accelerator driver based on linear induction accelerator.– Proceedings of Sixth European Particle Accelerator Conference (EPAC'98), Stockholm, 1998, p. 472–474.
- 6*. A.V. Elzhov, A.A. Kaminsky, A.K. Kaminsky, V.I. Kazacha, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev.– Development of new scheme of two beam accelerator driver based on linear induction sections.– Proceedings of XVII International Conference on High Energy Accelerators (HEACC'98), Dubna, 1998, p. 125–127.
- 7*. Э.А. Перельштейн, Л.В. Бобылева, А.В. Елзов, В.И. Казача.– Теоретическое исследование группировки электронного пучка в релятивистских усилителях мощности.– ЖТФ, 1999, т. 69, № 2, с. 98–102.
- 8*. A.V. Elzhov, A.A. Kaminsky, A.K. Kaminsky, V.I. Kazacha, E.M. Laziev, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev.– Study of Modified TBA Driver Scheme.– Proceedings of 1999 Particle Accelerator Conference (PAC'99), New York, p. 3393–3395.
- 9*. А.В. Елзов, В.И. Казача, А.К. Каминский, Э.А. Перельштейн, С.Н. Седых, А.П. Сергеев.– Новые результаты экспериментов по исследованию группировки электронного пучка в ЛБВ на установке ОИЯИ ЛИУ-3000.– Труды IV Научной конференции молодых ученых и специалистов, Дубна, 2000, с. 289–291.

- 10*. A.K. Kaminsky, A.V. Elzhov, I.N. Ivanov, V.I. Kazacha, V.V. Kosukhin, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev, G.G. Denisov, N.S. Ginzburg, N.Yu. Peskov, A.S. Sergeev, E.M. Laziev.– JINR activity in microwave sources for future linear colliders.– Proc. of Seventh European Particle Accelerator Conference (EPAC'2000), Vienna, 2000, p. 2075–2077.
- 11*. A.V. Elzhov, I.N. Ivanov, A.K. Kaminsky, V.I. Kazacha, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev, G.G. Denisov, N.S. Ginzburg, N.Yu. Peskov, A.S. Sergeev, E.M. Laziev.– JINR activity in microwave sources for TeV range linear colliders.– Вопросы атомной науки и техники. Серия “Ядерно-физические исследования” (36), 2000, № 2, с. 103–106.
- 12*. A.V. Elzhov, A.K. Kaminsky, V.I. Kazacha, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev.– Study of scheme of two beam accelerator driver with accompanying electromagnetic wave.– Сообщения ОИЯИ / JINR Communications, E9-2000-294, Dubna, 2000. 17 pp.
- 13*. Н.С. Гинзбург, А.В. Елзов, В.И. Казача, А.К. Каминский, Э.А. Перельштейн, Н.Ю. Песков, С.Н. Седых, А.П. Сергеев, А.С. Сергеев.– Разработка в ОИЯИ источников миллиметрового излучения для линейных электрон-позитронных коллайдеров.– Известия РАН. Серия физическая, 2001, т. 65, № 12, с. 1686–1688.
- 14*. А.В. Елзов, А.К. Каминский, Э.А. Перельштейн, С.Н. Седых, А.П. Сергеев.– Моделирование ЛСЭ-усилителей миллиметрового диапазона.– Известия РАН. Серия физическая, 2003, т. 67, № 12, с. 1669–1673.
- 15*. A.V. Elzhov, A.K. Kaminsky, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev.– Simulating FEM amplifiers: features in various regimes.– Proceedings of 26th Free-Electron Laser Conference (FEL'2004), Trieste, Italy, 2004, p. 187–189.
- 16*. A.V. Elzhov, E.A. Perelstein.– Influence of phase shift of accompanying wave on electron dynamics in two-beam accelerator driver.– Proceedings of XIX Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'2004), Dubna, 2004, p. 189–191.
- 17*. А.В. Елзов, Э.А. Перельштейн.– Влияние фазового сдвига сопровождающей волны на динамику электронов в драйвере двухпучкового ускорителя.– Физика элементарных частиц и атомного ядра. Письма (Письма в ЭЧАЯ), 2005, т. 2, № 4 (127), с. 74–81.
- 18*. A.V. Elzhov, A.K. Kaminsky, E.A. Perelstein, S.N. Sedykh, A.P. Sergeev.– 1.5d simulation of FEM amplifiers in various regimes with respect to guide magnetic field and space charge effects.– Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams, 2005, v. 8, 090701. 8pp.

5. Список цитируемой литературы

- [1] P. Tenenbaum.— The JLC/NLC baseline design.— Proc. of 2003 Particle Accelerator Conference (PAC'2003), Portland, Oregon, USA, 2003, p. 681–683.
- [2] I. Wilson (for the CLIC Study Team).— The compact linear collider CLIC.— CERN/AB 2004-100, CLIC Note 617, Dec 2004. 12 pp.
- [3] Г.И. Бабат.— Авторское свидетельство №72707, 1941.
- [4] Р. Вэрнек, Ж. Вэнсан, А. Лебуте, г-жа Р. Вэрнек.— Новый тип линейного ускорителя с выключенным генератором.— Гражданское строительство (французский журнал), 1958, т. 135, № 12, с. 278–282.
- [5] Э.С. Масунов, Ю.К. Батыгин.— Исследование взаимодействия двух пучков в периодической волноводной замедляющей системе.— В сборнике: Ускорители, вып. XVII (М.: Атомиздат, 1979), с. 83–88.
- [6] Н.М. Гаврилов, А.В. Нестерович.— К вопросу об ускорении ионов волнами плотности электронного пучка.— ЖТФ, 1973, т. 43, вып. 6, с. 1238–1243.
- [7] A.M. Sessler.— The free electron laser as a power source for a high-gradient accelerating structure.— Proc. Workshop on the Laser Acceleration of Particles (Los Alamos, N.Mex., Feb 18–23, 1982), ed. Paul. J. Channel, AIP Conf. Proc. 91 (1982), p. 154–159. LBL-14158, Feb 1982. 6pp.
- [8] A.M. Sessler, D.H. Whittum, J.S. Wurtele, W.M. Sharp, M.A. Makowski.— Standing-wave free-electron laser two-beam accelerator.— Nucl. Instrum. Meth. A, 1991, v. 306, p. 592–605.
- [9] D.E. Anderson, S. Eylon, S. Lidia, L. Reginato, D. Vanecek, S. Yu, T. Houck, G. Westenskow, E. Henestrova.— Design of a 1-MV induction injector for the relativistic klystron two-beam accelerator.— Proc. of 1997 Particle Accelerator Conference (PAC'97), Vancouver, B.C., Canada, p. 590–592.
- [10] Е.Д. Белявский.— О режиме работы приборов О-типа с захватом электронных сгустков полем электромагнитной волны.— Радиотехника и электроника, 1971, т. 16, № 1, с. 208–210.
- [11] Н.С. Гинзбург, И.А. Манькин, В.Е. Поляк, А.С. Сергеев, А.В. Сморгонский, В.А. Филатов.— Режим захвата частиц синхронной волной как метод повышения КПД приборов СВЧ.— В сборнике: Релятивистская высокочастотная электроника, вып. 5 (ИПФ АН СССР, Горький, 1988, ред. А.В. Гапонов-Грехов), с. 37–77.
- [12] G.G. Denisov, V.L. Bratman, A.K. Krasnykh, E.A. Perelstein, A.V. Savilov, A.S. Sergeev, A.P. Sumbaev.— Problems of autobunching and phase stability for the TBA-driver: calculations and design for a modeling experiment.— Nucl. Instrum. Meth. A, 1995, v. 358, p. 528–531.

- [13] А.В. Савилов.— Режим самозахвата электронов в СВЧ-системе двухпучкового ускорителя.— ЖТФ, 1996, т. 66, вып. 9, с. 148–163.
- [14] T. Higo, K. Kubo and K. Yokoya.— Tolerances in X-band main linacs of future linear colliders.— Proceedings of 1999 Particle Accelerator Conference (PAC'99), New York, p. 3435–3437.
- [15] Ю.Б. Викторов, А.К. Каминский, С.Б. Рубин, В.П. Саранцев, А.П. Сергеев.— Эксперименты по усилению в ондуляторе излучения миллиметрового диапазона.— Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, Дубна, 1989, с. 95–98.
- [16] M.E. Conde and G. Bekefi.— Experimental study of a 33.3-GHz free-electron-laser amplifier with a reversed axial guide magnetic field.— Phys. Rev. Lett., 1991, v. 67, № 22, p. 3082–3085.
- [17] J. Gardelle, J. Labrousche, G. Marchese, J.L. Rullier, D. Villate, J.T. Donohue.— Analysis of the beam bunching produced by a free-electron laser.— Preprint CESTA/5 (1996); Phys. Plasmas, 1996, v. 3, № 11, p. 4197–4206.
- [18] A.K. Ganguly and H.P. Freund.— Three-dimensional nonlinear simulation of a high-power free-electron laser.— Nucl. Instrum. Meth. A, 1993, v. 331, p. 501–504.
- [19] E.B. Abubakirov, O.V. Arkhipov, L.V. Bobyleva, I.E. Botvinnik, V.L. Bratman, D.V. Vinogradov, G.G. Denisov, V.I. Kazacha, G.I. Konnov, A.K. Krasnykh, I.V. Kuznetsov, A.Yu. Nikitsky, M.M. Ofitserov, E.A. Perelstein, A.I. Sidorov.— Generation and acceleration of high-current annular electron beam in linear induction accelerator and microwave power from Cherenkov TWT.— Proc. of Second European Particle Accelerator Conference (EPAC'90), Nice, France, 1990, p. 34–36; Сообщения ОИЯИ, Е9-91-50, Dubna, 1991.

Получено 21 ноября 2005 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 21.11.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,62. Уч.-изд. л. 1,72. Тираж 100 экз. Заказ № 55109.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/