

На правах рукописи

МАТВЕЕНКО Александр Николаевич

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
В УСКОРИТЕЛЕ-РЕКУПЕРАТОРЕ ЛСЭ

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК-2006

Работа выполнена в Институте ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

Винокуров
Николай Александрович – доктор физико.-математических наук,
профессор, Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Кооп
Иван Александрович – доктор физико.-математических наук,
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

Корчуганов
Владимир Николаевич – доктор физико.-математических наук,
РНЦ “Курчатовский институт”,
г. Москва.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ: – Институт физических проблем
им. П.Л. Капицы РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2006 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Ускорители-рекуператоры (УР) являются новым быстро развивающимся направлением физики ускорителей [1-3]. Предложенные в 1965 году, они открывают новые горизонты в области физики и техники ускорителей благодаря возможности создавать пучки с высоким средним током, сравнимым с током накопителей, сохраняя при этом основное преимущество линейных ускорителей – низкий эмиттанс пучка, определяемый электронной пушкой.

Возможные применения УР включают создание источников синхротронного излучения, лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), электронных охладителей для ускорителей ионов, электрон-ионные коллайдеры [3-4].

В настоящее время в мире создано три высокочастотных сильноточных УР: в Джефферсоновской лаборатории США [5], в Японском исследовательском институте атомной энергии [6], и в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в Новосибирске [7].

Приведенные УР строили в первую очередь как источники электронного пучка для мощных ЛСЭ. На всех этих ускорителях были установлены ЛСЭ и достигнуты рекордные параметры по мощности излучения в своих диапазонах длин волн.

Для повышения мощности ЛСЭ на базе УР требуется повышение мощности электронного пучка. Другие приложения требуют получения пучков с малыми поперечными или продольным эмиттансами, высоким зарядом в сгустке. Для улучшения параметров пучков требуется в первую очередь улучшать параметры инжекторов.

В данной диссертационной работе изучены некоторые особенности динамики электронного пучка в ускорителе-рекуператоре, приведены результаты измерения параметров пучка Новосибирского УР.

В работе также рассмотрена магнитная система изохронного поворота для кольцевого ЛСЭ на длину волны 500 ангстрем. Схема кольцевого ЛСЭ предложена в 1996 году [8] и пока не реализована нигде в мире. Изохронный поворот с сохранением группировки с высокой точностью представляет также интерес для источников синхротронного излучения четвертого поколения.

Основные цели работы

1. Измерение матрицы откликов Новосибирского УР и сравнение с расчетами.
2. Экспериментальное изучение фокусировки пучка ондулятором, разработка методики проводки электронного пучка по оси ондулятора.
3. Измерение эмиттанса электронного пучка в инжекторе УР.
4. Измерение акцептансов рекуперации УР.
5. Разработка изохронного поворота для кольцевого ЛСЭ и источников СИ 4-го поколения.

Научная новизна

Новосибирский УР – уникальная установка, поэтому большинство экспериментальных результатов, полученных при изучении динамики пучка в нем, обладают научной новизной. Измерения матриц отклика, эмиттанса пучка и акцептансов канала рекуперации проводились на Новосибирском УР впервые. Автором была предложена и экспериментально опробована оригинальная методика измерения акцептансов канала рекуперации.

Автором впервые были проведены оценки вклада в разгруппировку пучка флуктуаций синхротронного излучения и аббераций второго порядка и показана возможность создания изохронного поворота для кольцевого ЛСЭ на длину волны 500 ангстрем.

Практическая ценность результатов работы

Результаты измерений параметров магнитной оптики используются на ускорителе-рекуператоре Новосибирского ЛСЭ для оперативной настройки ускорителя и оптимизации параметров излучения. Проведенные измерения эмиттанса пучка в электростатической пушке и инжекторе могут быть использованы при проектировании инжекторов сильноточных ускорителей-рекуператоров. Проведенные измерения параметров ондуляторов и предложенная процедура плавной перестройки длины волны излучения Новосибирского ЛСЭ используется при работе ускорителя-рекуператора.

Проведенные расчеты изохронного поворота кольцевого ЛСЭ могут быть использованы при создании ЛСЭ на длину волны 500 ангстрем. Полученные ограничения на разгруппировку пучка важны при рассмотрении более коротковолновых ЛСЭ.

Вышеназванные результаты используются в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН и могут быть использованы в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна), а также зарубежом – в Национальной лаборатории им. Джефферсона (США) и Японском институте по исследованию атомной энергии.

Автор выносит на защиту следующие результаты работы:

1. Измерены матрицы откликов Новосибирского УР. Проведено сравнение с расчетными значениями.
2. Экспериментально изучена фокусировка пучка ондулятором, разработана методика проводки электронного пучка по оси ондулятора.
3. Проведены измерения эмиттанса электронного пучка из электростатической электронной пушки с катодно-сеточным узлом. Изучена зависимость эмиттанса от величины электрического поля вблизи управляющей сетки. Получено хорошее согласие с оценками роста эмиттанса при прохождении через сетку.
4. Проведены измерения эмиттанса электронного пучка после группировки и ускорения в инжекторе. Измерена зависимость эмиттанса от напряжения на группирующем резонаторе. Обнаружено увеличение поперечного эмиттанса при группировке электронных сгустков.
5. Предложена и экспериментально реализована методика измерения акцептансов рекуперации.
6. Измерены акцептансы рекуперации первой очереди Новосибирского УР.
7. Изучены ограничения, накладываемые квантовыми флуктуациями синхротронного излучения и абберациями второго порядка на параметры электронного пучка, проходящего через изохронный поворот. Разработан вариант изохронного поворота для кольцевого ЛСЭ. Отмечена важность полученных ограничений для конструкции ускорителей-рекуператоров источников СИ 4-го поколения.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы, изложена на 109 страницах. Текст иллюстрирован 43 рисунками, содержит 11 таблиц.

Апробация диссертационной работы

Основные результаты, представленные в данной работе, неоднократно докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Двадцать шестой международной конференции по лазерам на свободных электронах FEL2004 (Триест, Италия, 2004); Девятнадцатой Российской конференции по ускорителям заряженных частиц RUPAC2004, (Дубна, 2004); Десятой Европейской конференции по ускорителям заряженных частиц EPAC2006, (Edinburgh, UK, 2006); Конференции по линейным ускорителям заряженных частиц LINAC2006 (Knoxville, USA, 2006); Двадцатой Российской конференции по ускорителям заряженных частиц RUPAC2006, (Новосибирск, 2006); а также на семинарах в ИЯФ СО РАН (Новосибирск).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность рассмотренных в диссертации вопросов, рассмотрено современное состояние физики ускорителей-рекуператоров, приведены параметры существующих и проектирующихся установок, сформулированы основные цели данной работы, а также в сжатой форме изложено содержание отдельных глав.

Первая глава имеет вводный характер. В ней кратко описаны принципы действия ускорителя-рекуператора и лазера на свободных электронах, приведены достигнутые параметры электронного пучка и излучения ЛСЭ. Затем приведено описание систем ускорителя-рекуператора Новосибирского ЛСЭ. Глава состоит из 8 подразделов, в которых последовательно описаны электростатическая пушка и модулятор, высокочастотная система, система контроля положения пучка на основе т. н. пикап-станций, датчики переходного излучения, датчики среднего и пикового тока пучка, вакуумная система и система температурного контроля.

На Рис. 1 приведена схема ускорителя-рекуператора Новосибирского ЛСЭ.

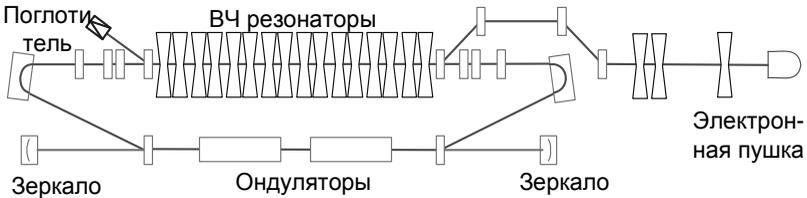


Рис. 1. Схема ускорителя-рекуператора Новосибирского ЛСЭ.

Вторая глава содержит краткий обзор существующих программных средств для моделирования динамики пучка в магнитной системе ускорителя. В главе представлены результаты моделирования динамики пучка в УР Новосибирского ЛСЭ. Затем приводится описание экспериментов по измерению параметров магнитной оптики ускорителя.

Одной из задач при работе Новосибирского ЛСЭ является плавная перестройка длины волны излучения. Перестройка достигается изменением тока ондулятора I

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right),$$

где λ_w – период ондулятора, γ – релятивистский фактор, $K = \frac{eB\lambda_w}{2\pi mc^2} \sim I$

параметр ондуляторности. При этом необходимо настроить прохождение пучка по оси ондулятора, чтобы во время изменения тока ондулятора не возникали потери пучка.

Особенностью ондулятора является распределение фокусировки по x и y направлениям, что достигается выбором формы полюсов ондулятора. Фокусные расстояния ондулятора по двум направлениям были измерены с помощью процедуры, схематически показанной на Рис. 2. В корректоре перед ондулятором периодически менялся ток, что приводило к изменению траектории пучка в ондуляторе, являющимся с точки зрения электронной оптики толстой линзой, а ток ондулятора выбирался так, чтобы не возникало смещение пучка на пикапе после ондулятора (т. е. строилось изображение корректора на пикапе).

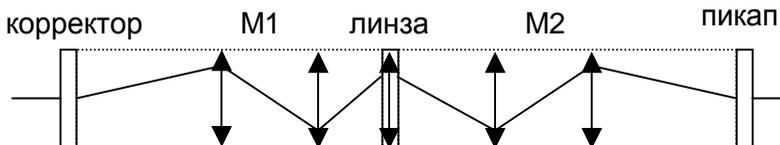


Рис. 2. Схема измерения фокусного расстояния толстой линзы (нарисованной в виде последовательности тонких линз). Применялось, в частности, для измерения оптической силы ондулятора.

После изучения фокусировки ондулятором и компенсации краевых интегралов поля была предложена процедура оперативной проводки пучка по оси ондулятора. После выполнения этой процедуры (см. Рис. 3) стало возможным осуществлять плавную перестройку длины волны излучения в диапазоне

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{cp}} \sim 25\%$$

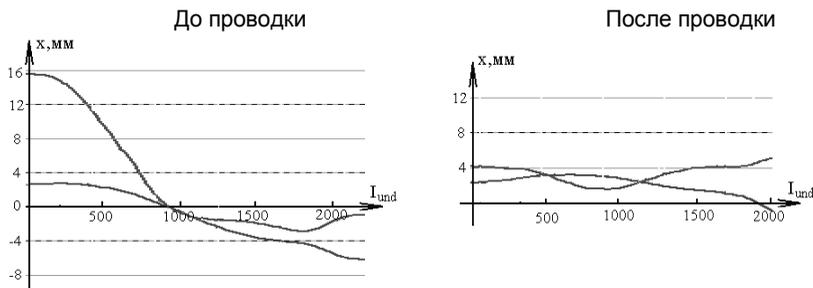


Рис. 3. Результаты проводки пучка по оси ондулятора.

Другой важной для работы ускорителя проблемой является измерение матрицы отклика. В данной работе представлены результаты измерения, как полной матрицы отклика ускорителя, так и более точное измерение блоков матрицы на основе итерационной процедуры. Практическим приложением матрицы отклика является вычисление коэффициентов пропорциональности

между токами трех корректоров, при которых такая тройка корректоров не вызывает смещения пучка после тройки. Схема действия тройки корректоров показана на Рис. 4.

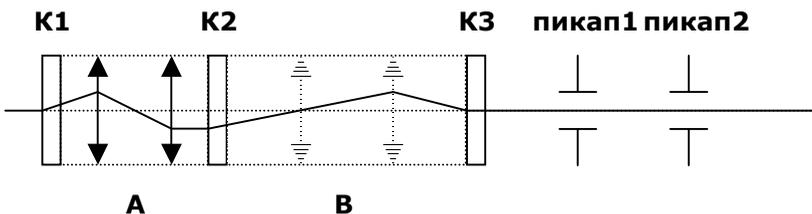


Рис. 4. Схема действия тройки корректоров на пучок.

Для повышения точности измерения коэффициентов троек было предложено контролировать смещение пучка по большему числу пикапов и использовать итерационную процедуру. На первом шаге (см. Рис. 5) в корректора задавались поочередно некоторые токи I_0 . Из полученной матрицы отклика находились приближенные коэффициенты тройки с помощью процедуры SVD (сингулярное разложение матрицы). Затем в корректора задавались токи с этими коэффициентами, но большей амплитуды, после чего снова вычислялись уточненные коэффициенты. Процедура сходилась за несколько шагов.

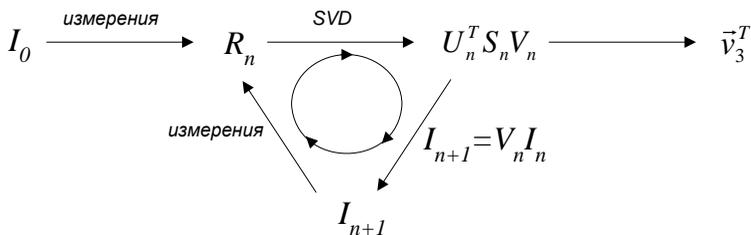


Рис. 5. Схема итерационной процедуры для измерения коэффициентов троек корректоров.

В работе представлены результаты измерения коэффициентов некоторых троек корректоров, проведено сравнение с расчетными коэффициентами.

Третья глава посвящена измерениям эмиттанса электронного пучка УР Новосибирского ЛСЭ. Схема измерения эмиттанса показана на Рис. 6.

В качестве датчика переходного излучения (ДПИ) использовалась толстая медная водоохлаждаемая пластинка или титановая фольга толщиной 50 мкм. Всего на установке имеется 9 ДПИ.

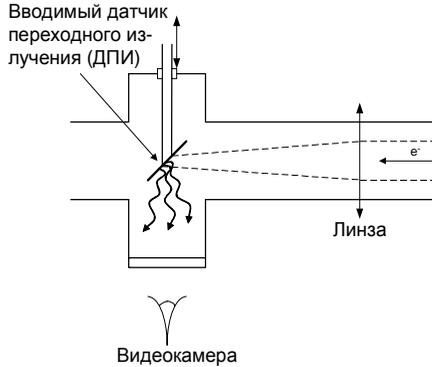


Рис. 6. Схема измерения эмиттанса электронного пучка по датчику переходного излучения.

Для регистрации изображения использовались видеокамеры КРС-303ВН производства компании KT&C Co. со сменными объективами. Изображение оцифровывалось платой видеозахвата.

Для обработки результатов измерений была написана программа, которая сначала аппроксимирует изображения ДПИ стандартными распределениями (Гассово, параболическое) или вычисляет среднеквадратичный размер пучка, а затем по полученным размерам вычисляет параметры Твисса и эмиттанс пучка.

В работе присутствует анализ статистических ошибок измерения, рассмотрены основные источники систематических ошибок: разрешение и линейность видеокамеры, ошибки в полях магнитной системы, пространственный заряд пучка, абберации измеряющей линзы.

Для изменения эмиттанса пучка на выходе электростатической пушки ускорителя-рекуператора использовалась схема регулировки ускоряющего поля за запирающей сеткой с помощью кенотрона (Рис. 7).

Результаты измерения зависимости эмиттанса от поля за сеткой показаны на Рис. 8. Две серии измерений проведены при различных делителях в пушке.

Предполагается, что основным источником эмиттанса пучка является его фокусировка в электростатических линзах ячеек сетки (эффект микролинз). Ускоряющее поле в зазоре сетка-катод составляет 2.5 кВ/см в максимуме, что определяется возможностями модулятора. Поле за сеткой может быть существенно больше. Вклад эффекта микролинз в нормализованный эмиттанс пучка можно оценить как (например, см. [9])

$$\varepsilon_{xl} \sim \Delta ERd / 8\sqrt{3} \sqrt{U \frac{mc^2}{e}},$$

где ΔE – скачок поля на сетке, R – радиус катода, d – размер ячейки сетки, U – напряжение сетка-катод, m , c , e – фундаментальные константы. Подставив параметры нашего катодно-сеточного узла, получим $\delta\epsilon_{\text{эл}} \sim 0.7 \mu\text{m} \cdot \Delta E$ [kV/cm]. Сплошной линией на Рис. 8 показана предполагаемая зависимость эмиттанса при учете только эффекта микролинз на сетке.

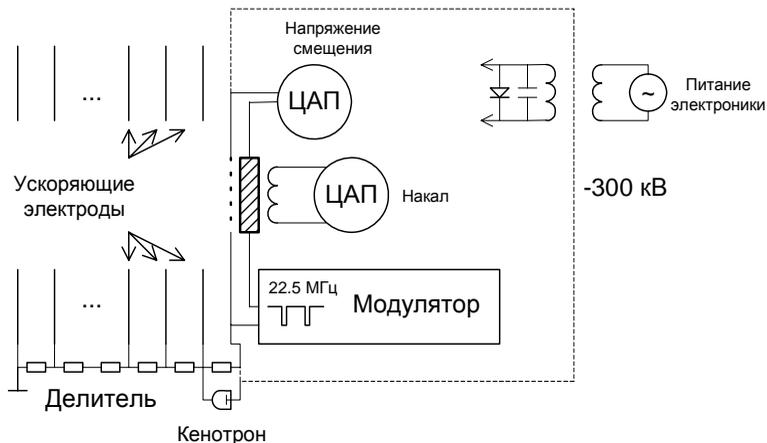


Рис. 7. Схема электростатической пушки. Показан шунтирующий кенотрон в цепи делителя высокого напряжения.

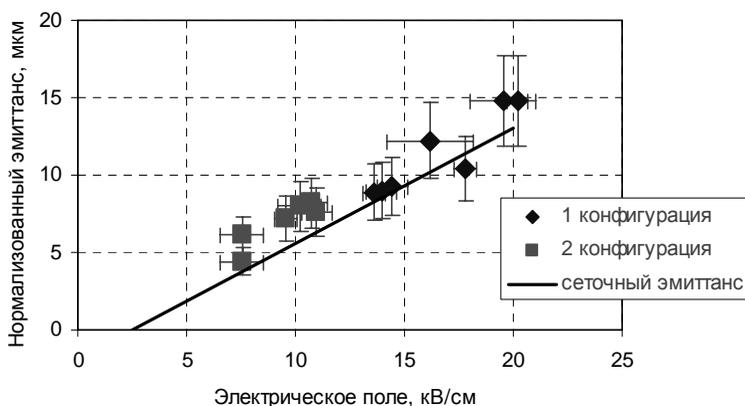


Рис. 8. Результаты измерения эмиттанса пучка в электростатической пушке.

Следующая серия измерений эмиттанса (см. Рис. 9) была проведена на выходе инжектора.

Рост эмиттанса при более сильной группировке объясняется эффектами пространственного заряда. Оценка увеличения эмиттанса из-за действия пространственного заряда в пустом промежутке длиной L дает [10]

$$\epsilon_{xл} \sim 0.2I_{\max}L/[(\beta\gamma)^3 I_0],$$

где I_{\max} – пиковый ток пучка, $I_0 = 17$ кА, β , γ – релятивистские факторы. Если взять $L = 1$ м, $I_{\max} = 5$ А и кинетическую энергию 280 кэВ, получим $\delta\epsilon_{xл} \sim 50$ мкн, что вполне объясняет рост эмиттанса, показанный на Рис. 9.

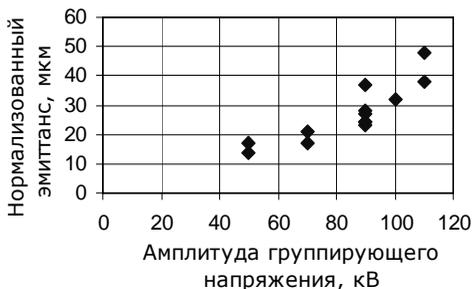


Рис. 9. Результаты измерения эмиттанса пучка после ускорения в инжекторе.

В четвертой главе представлены результаты измерения акцептансов УР Новосибирского ЛСЭ.

Акцептанс канала ускорителя можно измерить экспериментально, например, с помощью двух корректоров, разделенных промежутком с матрицей M . Для разных токов в корректорах измеряется ток в поглотителе. В качестве примера на Рис. 10 представлены результаты измерения потерь пучка от начальных координат в фазовой плоскости $y - y'$. Использовалась пара у-корректоров перед торможением (рекуперацией) пучка. На картинке видны, в частности, аберрации магнитной системы.

Акцептансом пучка мы называем контур потерь пучка по уровню $1/2$. Для большинства интересных случаев акцептанс канала существенно превышает эмиттанс пучка, т.к. потери пучка в канале малы. В этом случае можно оценить эмиттанс пучка по площадям контуров потерь пучка по уровню 0.5 и, например, 0.16 (этот уровень потерь соответствует отклонению пучка от границы акцептанса на одну ширину (σ) Гауссова распределения). На Рис. 11 показаны контурные линии потерь в фазовых плоскостях $x - x'$ и $y - y'$ для канала рекуперации.

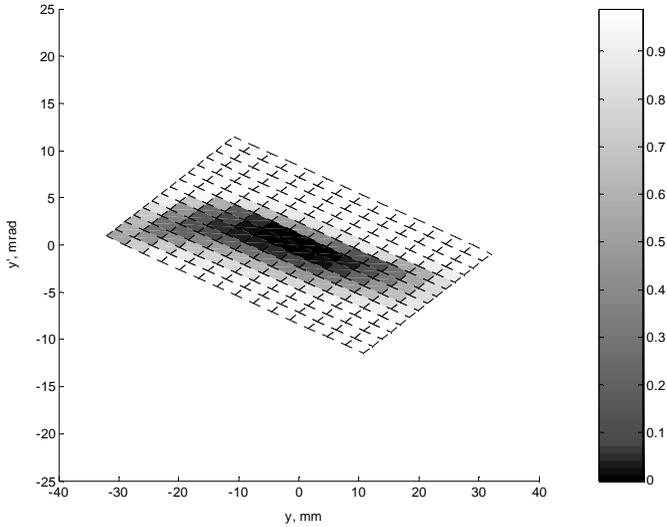


Рис. 10. Поперечный акцептанс канала рекуперации. Фазовая плоскость $y - y'$.

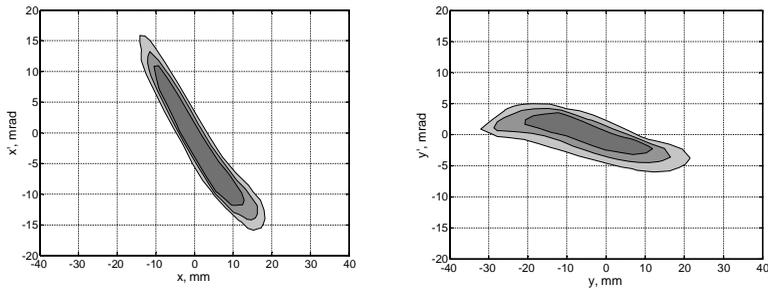


Рис. 11. Акцептанс канала рекуперации в $x - x'$ и $y - y'$ плоскостях. Контурные линии потерь по уровню 0.84, 0.5, и 0.16 позволяют оценить эмиттанс пучка.

На Рис. 12 показаны контурные линии потерь пучка в фазовой плоскости продольных координат ($c\Delta t$, $\Delta E/E$). При измерениях изменялось напряжение на пушке (по вертикали) и время вылета пучка из пушки относительно нулевой фазы мастер-генератора (по горизонтали). “0” энергии соответствует напряжению пушки 270 кВ. В обычном режиме работы напряжение пушки 280 кВ.

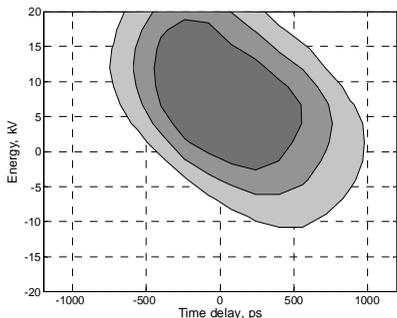


Рис. 12. Акцептанс продольного движения ускорителя-рекуператора.

Пятая глава содержит результаты расчетов магнитной оптики изохронного поворота кольцевого ЛСЭ с длиной волны 500 \AA .

Схема лазера приведена на Рис. 13. Кольцевой ЛСЭ состоит из нескольких (из 7 на рисунке) ондуляторов, разделенных изохронными поворотами. Ускоренный пучок, пролетая через каждый ондулятор, группируется. Группировка пучка сохраняется в поворотах (т. к. повороты изохронные). Пролетая последний ондулятор пучок испускает когерентное излучение, которое попадает в первый ондулятор одновременно со свежим электронным сгустком. При этом происходит модуляция энергии «свежих» электронов, т. е. замыкается цепь обратной связи. После достижения насыщения степени группировки когерентное излучение будет на выходе каждого ондулятора. Обработанный электронный пучок возвращается в линейный ускоритель для рекуперации.

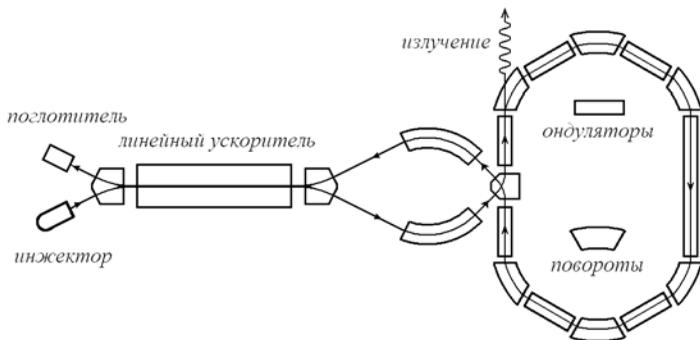


Рис. 13. Возможная конфигурация кольцевого ЛСЭ на базе ускорителя-рекуператора.

В главе представлены оценки вклада в разгруппировку пучка квантовых флуктуаций синхротронного излучения и аббераций второго порядка в магнитной системе поворота, а также результаты расчетов компактного изохронного поворота на 60° для кольцевого ЛСЭ с энергией электронов 500 МэВ и длиной волны излучения 500 \AA .

Для изохронной ахроматической системы разброс времени пролета будет составлять

$$\sigma_{c\Delta t}^2 = \frac{55}{24\sqrt{3}} \frac{r_0^2}{\alpha} \gamma^5 \int_0^L R_{56}^2(s,0) \cdot h^3(s) \cdot ds \cdot$$

где r_0 – классический радиус электрона, $\alpha = 1/137$ – постоянная тонкой структуры, γ – релятивистский фактор, h – кривизна траектории, $R_{56}(s,0)$ – элемент транспортной матрицы от начала поворота до точки s . Для поворота на малый угол α_0 получим

$$\sigma_{c\Delta t}^2 = \frac{55}{24\sqrt{3}} \frac{r_0^2}{\alpha} \gamma^5 \frac{\alpha_0^7}{126} \cdot$$

Т.к. разгруппировка не должна превышать $\lambda/2\pi$, то максимальный допустимый угол поворота составит

$$\alpha_0 \sim \left(\frac{\lambda^2}{4\pi^2 r_0^2 \gamma^5} \right)^{1/7} \cdot$$

Для кольцевых ЛСЭ с длиной волны меньше 100 \AA α_0 оказывается малым. В этом случае изохронный поворот на угол 60° можно делать из нескольких одинаковых изохронных секций, поворачивающих на малый угол. В работе приведены оценки допустимых углов, а также оценки общей длины поворота между ондуляторами в этом случае.

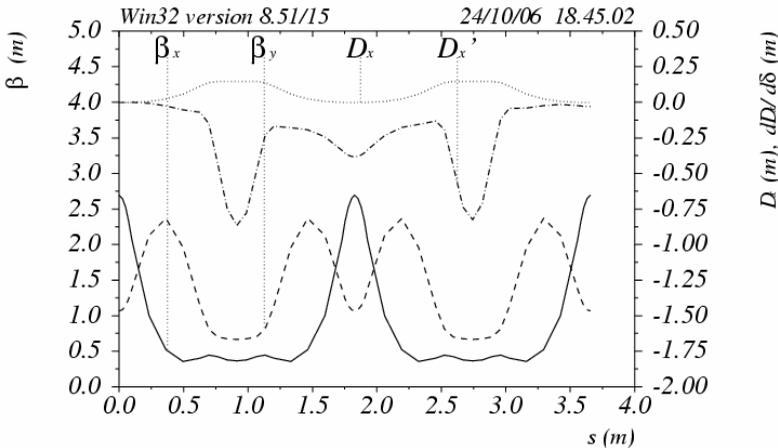
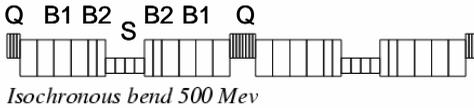


Рис. 14. Оптические функции изохронного ахроматического поворота кольцевого ЛСЭ на длину волны 500 \AA .

Для расчетов изохронного поворота на 60° для 500 МэВ кольцевого ЛСЭ с длиной волны излучения 500 \AA использовалась программа MAD. Поворот состоит из двух одинаковых ахроматических изохронных секций с углом поворота 30° . Каждая секция состоит из двух симметричных половинок, в которых есть два магнита с разными направлениями поворота и секступоль. Между секциями стоят квадрупольные линзы. Для уменьшения общей длины поворота в магнитах совмещены поворот, фокусировка и секступольная коррекция неизохронности во втором порядке.

Оптические функции и схема поворота показаны на Рис. 14. Для более детальной прорисовки функций в MAD каждый элемент разбит на 4 или 2 части.

Вклад аббераций второго порядка в разгруппировку оценивался из слоя транспортной матрицы второго порядка T_{5ij} , рассчитанной в MAD. Для приведенного поворота суммарная разгруппировка пучка из-за квантовых флуктуаций синхротронного излучения и аббераций второго порядка составляет около 80 \AA .

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы, которые одновременно являются выносимыми на защиту положениями.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Е.И. Колобанов, А.Н. Матвеевко, Т.В. Саликова, и др. Изучение эффективности рекуперации на УР Новосибирского ЛСЭ, Сборник докладов Российской конференции по ускорителям заряженных частиц (RUPAC06), Новосибирск, 2006.
2. A.N. Matveenko, N.A. Vinokurov. Normal conducting Energy Recuperator, Proc. of Int. conf. on linear accelerators (LINAC06), Knoxville, USA, 2006.
3. V.S. Cherkassky, ... , A.N. Matveenko, ... , et al. Imaging techniques for a high-power THz free electron laser. // Nuclear instruments and methods in physics research. Sec. A. - 2005. - Vol. A543. P. 102. -109.
4. V.P. Bolotin, ... , A.N. Matveenko, ... , et al. Status of the Novosibirsk Terahertz FEL. // Nuclear instruments and methods in physics research. Sec. A. - 2005. - Vol. A543. P. 81. -84.
5. E.A. Antokhin, ... , A.N. Matveenko, ... , et al. First lasing at the high-power free electron laser at Siberian center for photochemical research. // Nuclear Instruments and methods in physics research. Sec. A. - 2004. - Vol. A528, No 1/2. - P. 15. - 18.
6. Е.А. Антохин, ... , А.Н. Матвеевко, ... , и др. Первые результаты работы мощного лазера на свободных электронах Сибирского центра

фотохимических исследований, // Вопросы атомной науки и техники, серия “Ядерно-физические исследования” (42), 2004, т.1, стр.3-5.

7. A.N. Matveenko, O.A. Shevchenko, N.A. Vinokurov. Isochronous Bend for High Gain Ring FEL, Proceedings of the 26th Int. FEL Conf., p.629-632, Trieste, Italy, 2004.
8. Д.А. Кайран, А.Н. Матвеевко, О.А. Шевченко, Н.А. Винокуров. Измерения поперечного эмиттанта пучка ускорителя-рекуператора мощного ИК ЛСЭ, Сборник докладов Российской конференции по ускорителям заряженных частиц (RUPAC04), Дубна, 2004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] M. Tigner. A Possible Apparatus for Electron-Clashing Experiments, Nuovo Cimento, 37 (1965) 1228.
- [2] I.V. Bazarov. Overview of energy recovery linacs, Proceedings of PAC 2005, p.382-386.
- [3] J.B. Murphy. Energy recovery linacs light sources: an overview, Proceedings of the PAC 2003, p.176-180.
- [4] I. Ben-Zvi, et al. R&D toward cooling of the RHIC collider, Proceedings of the PAC 2003, p.39-41.
- [5] G.R. Neil, et al. The JLab high power ERL light source, Nucl. Instr. and Meth., A 557 (2006), p.9-15.
- [6] E.J. Minehara. Highly efficient and high-power industrial FELs driven by a compact, stand-alone and zero-boil-off superconducting RF linac, Nucl. Instr. and Meth., A 483 (2002) p.8.
- [7] N.A. Vinokurov, et al. Status of the Novosibirsk energy recovering linac, Nucl. Instr. and Meth., A 557 (2006), p.23-27.
- [8] N.A. Vinokurov. Multisegment Wigglers for Short Wavelength FEL, Nucl. Instr. and Meth., A 375 (1996), p. 264.
- [9] Y. Zou, H. Li, M. Reiser, P.G. O'Shea. Theoretical study of transverse emittance growth in a gridded electron gun, Nucl. Instr. and Meth., A 519 (2004), p.432-441.
- [10] N.A. Vinokurov. Space charge, in “High quality beams”, Joint Accelerator School, 2000, p.390-404.

Матвеевко Александр Николаевич

**Особенности динамики электронного пучка
в ускорителе-рекуператоре ЛСЭ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 20.11.2006 г.
Подписано к печати 20.11.2006 г.
Формат 60×90 1/16 Объём 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 53

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапинтере “ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН”
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11.