

Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Գրիգորյան Բագրատ Աշոտի

ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԱՐԱԳԱՑՈՒՅԻՉՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ ՓՈՔՐ ԷՄԻՏԱՆՍՈՎ ԿԱՌՃ
ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՓՆՁԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՑԻԱՅԻ ՈՒՍՈՒՆԱՍԻՐՈՒՄ

Ա.04.20-“Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և
արագացուցչային տեխնիկա” մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների
թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան -2004

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.И. Алиханяна
Григорян Баграт Ашотович

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ КОРОТКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ С
МАЛЫМ ЭМИТТАНСОМ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.20 — “Физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника”.

Ереван-2004

Ատենախոսության թեման հաստատված է Ա. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում
Գիտական ղեկավար -

ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտոր Վ. Մ. Յականով
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտոր Է. Դ. Գազազյան - ԵրՖԻ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածու Մ. Լ. Պետրոսյան - ԵրՖԻ
Երևանի Պետական Համալսարանի միջուկային ֆիզիկայի և էներգետիկայի ամբիոն

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ

Առաջատար կազմակերպություն

Պաշտպանությունը կայանալու է 28 դեկտեմբերի 2004 թ. ժամը 14:00 -ին ԲՈՒՀ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում, որը գործում է Ա. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում (375036, Երևան, Ալիխանյան Եղբայրների փող. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտի գրադարանում:

Սեղմագիրը արաքված է 26 նոյեմբերի 2004 թ.

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար ֆ.մ.գ.թ. Ա. Թ. Մարգարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте им. А.И. Алиханяна .

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук В. М. Цаканов

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук Э. Д. Газазян, ЕрФИ
Кандидат физико-математических наук М. Л. Петросян, ЕрФИ

Ведущая организация: Кафедра ядерной физики и энергетики Ереванского Государственного Университета

Защита состоится 28 декабря 2004 г. в 14:00 ч. на заседании специализированного совета ВАК 024 действующего при Ереванском физическом институте им. А.И. Алиханяна, (375036, ул. Братьев Алиханян 2, г. Ереван)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского физического института им. А.И. Алиханяна.

Автореферат разослан 26 ноября 2004 г.

Ученый секретарь спец. совета 024, к. ф-м. н. Ա. Թ. Մարգարյան А. Т. Маргарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Достижение прецизионных параметров пучков заряженных частиц в ускорителях в настоящее время приобрело особую актуальность в мире в связи с успешным продвижением работ по генерации самоиндуцированного лазера на свободных электронах [1] и разработкой специализированных источников синхротронного излучения [2] с высокой яркостью фотонных пучков. Вопросы, связанные с получением коротких сгустков заряженных частиц с малым поперечным эмиттансом являются важной частью исследований в этой области и находятся в центре внимания ведущих ускорительных лабораторий мира [3].

При формировании электронного сгустка на начальной стадии нерелятивистских энергий доминирующую роль в динамике сгустка играют силы пространственного заряда, динамика пучка строго нелинейная при малых энергиях и сильно скоррелирована в 6-мерном фазовом пространстве. Поэтому проблемы физики пучков при получении прецизионных электронных пучков в электронных пушках, как с лазерным так и с термическим накалом, играют определяющую роль при генерации и формировании электронных пучков с заданными пространственно-угловыми и энергетическими характеристиками. Необходимо отметить, что при разработке и моделировании реальной установки, задача сама по себе является многопараметрической, требующей учета, как эффектов пространственного заряда, так и параметров установки, таких, как время нарастания лазерного импульса, длительность плоской вершины, фаза высокочастотного резонатора, расположение и поле соленида и т.д. Особое требование к таким системам формирования пучка предъявляется с точки зрения потерь частиц при генерации и формировании коротких сгустков с малым эмиттансом, что позволяет избежать как пульсаций параметров сгустка от импульса к импульсу, так и искажений пучка в процессе его дальнейшего формирования на высоких энергиях.

Диссертационная работа основана на исследованиях, проведенных для системы формирования сгустков от высокочастотной пушки с лазерным накалом, для тестового ускорителя в DESY TTF-FEL (TESLA Test Facility-Free Electron Laser), а также на разработке и моделировании предускорителя частиц для источника синхротронного излучения CANDLE. Оба проекта относятся к актуальным установкам в области физики и техники пучков заряженных частиц.

Целью диссертационной работы является исследование проблем формирования коротких электронных сгустков с малым поперечным эмиттансом для ускорителей заряженных частиц, в частности:

- Исследование эффектов корреляции поперечно-продольного распределения частиц в процессе формирования нерелятивистского электронного сгустка с учетом сил пространственного заряда.
- Развитие численных методов описания динамики пучка при наличии поперечно-продольной корреляции внутри сгустка.
- Исследование влияния параметров лазера (времени его нарастания, длительности плоской вершины) на параметры формируемого сгустка, его эмиттанс, длительность и энергетический разброс.
- Исследование сжатия поперечного эмиттанса пучка с помощью соленоида, оптимизации расположения и поля соленоида.
- Разработка системы многочастотного группирования частиц для предварительного формирования электронного пучка для источников синхротронного излучения.
- Исследование динамики пучка в процессе группирования и ускорения, эволюция фазового распределения и энергетического разброса.

Научная новизна работы. В работе была определена и оценена корреляция поперечной фазовой плоскости с продольной координатой внутри сгустка и с энергетическим разбросом частиц внутри сгустка. Впервые введены коэффициенты корреляции. Разработан алгоритм расчета коэффициентов корреляции для линейной и квадратичной корреляции поперечной фазовой плоскости с продольной координатой.. Разработанная

методика позволяет также определять корреляционные коэффициенты для высших порядков, используя систему уравнений, полученной в диссертационной работе.

Разработанная методика учета поперечно-продольной корреляции частиц внедрена в известную программу для расчетов динамики пучка с учетом воздействия сил пространственного заряда ASTRA. Таким образом, введение корреляции позволяет проследить за деформацией фазового эллипса пучка в зависимости от продольной координаты внутри сгустка. Вклад корреляции уменьшается с увеличением энергии и, таким образом, показано, что на стадии формирования пучка вклад корреляции в значение эмиттанса является определяющим.

С учетом поперечно-продольной корреляции частиц были проведены расчеты и оптимизованы параметры ускорителя TTF в DESY. Инжектор ускорителя TTF состоит из электронной ВЧ пушки с лазерным накалом катода, соленоидального магнита и ускоряющего модуля. Была исследована зависимость основных характеристик пучка: эмиттанса, временной структуры, энергетического разброса внутри сгустка от параметров установки. В результате исследований получены оптимальные значения для параметров установки, напрямую влияющие на динамику формирования сгустка. Выполнено согласование таких параметров установки, как: время нарастания лазерного импульса, поперечные размеры лазера, поле и расположение соленоидного магнита, ВЧ фаза в резонаторе электронной пушки. Результаты проделанной работы легли в основу настройки ВЧ пушки TTF с лазерным накалом катода. Это позволило получить требуемые параметры пучка в основной ускоряющей секции и далее на входе в ондулятор, где было впервые получено мощное когерентное излучение самоиндуцированного лазера на свободных электронах с длиной волны 106 нм на ускорителе TTF, в DESY.

Разработана и исследована система многочастотного группирования электронного пучка, которая легла в основу моделирования и проектирования линейного ускорителя на 100 МэВ для источника синхротронного излучения CANDLE. Благодаря разработанной системе

группирования, получено продольное сжатие сгустков более чем в 60 раз, с эффективным захватом частиц в режим ускорения более 90% частиц и с длительностью сгустков 15 псек на выходе основного линейного ускорителя.

Практическое значение. При формировании нерелятивистского электронного сгустка учет поперечно-продольной корреляции частиц позволяет проследить деформацию фазового эллипса, что дает возможность реально описать поведение частиц в 6 мерном фазовом объеме и разработать соответствующую систему компенсации разбухания поперечного эмиттанса при малых энергиях частиц.

Новая методика, внедренная в программу для расчета динамики пучка с учетом сил пространственного заряда ASTRA, позволила разработать и смоделировать ускоритель с параметрами, удовлетворяющий реальным требованиям к электронному сгустку.

Результаты проведенных исследований особенно актуальны при настройке параметров установок для оптимизации характеристик электронного пучка. Результаты работы были успешно внедрены при модернизации линейного ускорителя TTF, а также, использованы в проекте инжектора X-FEL (X-ray Free Electron Laser, DESY), что позволило достичь параметров электронного пучка, заложенных в проект.

Разработанная система группирования для источника синхротронного излучения CANDLE позволяет эффективно захватить более 90% частиц. Важность результатов исследований диктуется жесткими требованиями к устойчивости, воспроизводимости электронных пучков в современных источниках синхротронного излучения третьего поколения.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследования динамики электронного сгустка с учетом сил пространственного заряда. Впервые введены коэффициенты корреляции осей поперечного фазового эллипса с продольной координатой внутри сгустка и найдены системы описывающих их

уравнений, как в линейном, так и в квадратичном приближениях. Рассчитаны коэффициенты корреляции для ускорителя TTF.

2. Исследована зависимость эмиттанса пучка в электронных пушках с лазерным накалом катода от времени нарастания и длительности плоской вершины лазерного импульса, фазы ВЧ поля резонатора, расположения и поля соленоида. Получены оптимальные значения этих параметров для линейного ускорителя TTF, что позволило достичь проектных параметров электронного пучка, удовлетворяющих требованиям генерации самоиндуцированного лазера на свободных электронах.
3. Разработана и смоделирована система формирования электронных сгустков для линейного ускорителя на 100 МэВ для источника синхротронного излучения CANDLE. Предложена и исследована схема многочастотного группирования электронного пучка, позволяющая достичь компрессии пучка в 60 раз и осуществить захват частиц с эффективностью более 90%.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Particle Accelerator Conference, PAC'01, Chicago, Illinois, USA, 18-22 Jun, 2001
2. Shanghai Symposium on Intermediate Energy Light Sources, SSRC-01, Shanghai China, 24-26 September 2001.
3. European Particle Accelerator Conference, EPAC '02, Paris, France, 3-7 Jun, 2002.
4. 24-th International Free Electron Laser Conference and 9-th FEL Users Workshop (FEL2002), Argonne, Illinois, USA, 9-13 Sep., 2002.
5. "Физика-2003", Третье национальное научное собрание молодых физиков, ЕГУ, Ереван, Армения, 4-8 Ноябрь, 2003.
6. European Particle Accelerator Conference EPAC'04, Lucerne, Switzerland, 5-9 July, 2004.

Публикации

По материалам работы опубликовано 13 научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Личное участие автора в выполнении работы выразилось в исследовании корреляции осей поперечного фазового эллипса с продольной координатой внутри сгустка, разработки методики их численного расчета и создании компьютерной программы на основе предложенного алгоритма.

В исследовании, выполнении численного моделирования и оптимизации рабочих параметров ускорителя ТТФ с точки зрения динамики формирования электронного сгустка.

В разработке, исследовании и моделировании линейного ускорителя с системой многочастотного группирования электронного пучка для источника синхротронного излучения CANDLE.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 104 страницы, в том числе 42 рисунка, 12 таблиц и 78 литературных ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель работы, обоснована актуальность темы и ее научная новизна. Кратко описаны содержание диссертации, методы решения поставленных задач, полученные результаты. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены основные типы электронных источников, принципы их работы и методы эмиссии электронов.

Приведены теоретические подходы к описанию динамики электронных пучков в 6 мерном пространстве с учетом сил пространственного заряда. Сформулировано и приведено статистическое описание сгустка частиц на фазовой плоскости. На основе статистического подхода к описанию сгустка

частиц в фазовом пространстве, введены коэффициенты поперечно-продольной корреляции фазовой плоскости. Дано линейное и квадратичное приближение для коэффициентов корреляции:

$$X' = C_1 + C_2 \cdot X + C_3 \cdot X \cdot Z$$

$$X' = C_1 + C_2 \cdot X + C_3 \cdot X \cdot Z + C_4 \cdot X \cdot Z^2 \quad (1)$$

Выведены условия для определения коэффициентов корреляции

$$\alpha = \sum_{i=1}^N (X'_i - C_1 - C_2 \cdot X_i - C_3 \cdot X_i \cdot Z_i)^2 = \min \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \alpha}{\partial C_1} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N (X'_i - C_1 - C_2 \cdot X_i - C_3 \cdot X_i \cdot Z_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial C_2} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N (X'_i - C_1 - C_2 \cdot X_i - C_3 \cdot X_i \cdot Z_i) \cdot X_i = 0$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial C_3} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N (X'_i - C_1 - C_2 \cdot X_i - C_3 \cdot X_i \cdot Z_i) \cdot X_i \cdot Z_i = 0$$

Расчет коэффициентов корреляции сведен к решению системы алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N X'_i = N \cdot C_1 + C_2 \cdot \sum_{i=1}^N X_i + C_3 \cdot \sum_{i=1}^N X_i \cdot Z_i \\ \sum_{i=1}^N X'_i \cdot X_i = C_1 \sum_{i=1}^N X_i + C_2 \cdot \sum_{i=1}^N X_i^2 + C_3 \cdot \sum_{i=1}^N X_i^2 \cdot Z_i \\ \sum_{i=1}^N X'_i \cdot X_i \cdot Z_i = C_1 \sum_{i=1}^N X_i \cdot Z_i + C_2 \cdot \sum_{i=1}^N X_i^2 \cdot Z_i + C_3 \cdot \sum_{i=1}^N X_i^2 \cdot Z_i^2 \end{cases} \quad (3)$$

Для решения системы использован матричный метод, или метод Крамера. Разработан алгоритм, позволяющий вычислить высокие порядки корреляции. На рис. 1 приведена эволюция коэффициентов корреляции сгустка вдоль ускорителя ТТФ, откуда видно, что на начальной стадии формирования реальный пучок сильно скоррелирован.

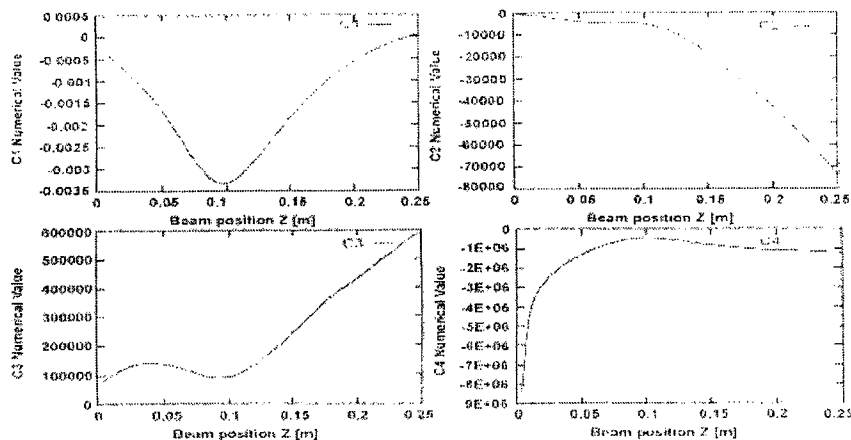


Рисунок 1. Коэффициенты корреляции вдоль электронной пушки ускорителя TTF.

На основе разработанного алгоритма исследовано изменение эмиттанса сгустка, с учетом и без учета корреляции. Показано, что вклад корреляции в динамику электронного пучка существенен на стадии его формирования, при нерелятивистских энергиях сгустка. Приведены расчеты для коэффициентов корреляции и изменения поперечного эмиттанса пучка в линейном ускорителе TTF, DESY. Описаны методы подавления и компенсации корреляционного вклада в динамику эмиттанса [3]. Полученные результаты для ускорителя TTF подтверждают важность учета корреляции для дальнейшего расчета системы.

На рисунке 2 приведено развитие эмиттанса вдоль линейного ускорителя TTF с учетом, без учета корреляции и для идеального случая, когда действием сил пространственного заряда пренебрегается и нормализованный эмиттанс сохраняется.

Рассмотрен метод компенсации увеличения эмиттанса сгустка от действия сил пространственного заряда [4]. Приведены расчеты для оптимального местоположения соленоидного магнита, компенсирующего действие сил пространственного заряда. Также рассмотрен вклад термального эмиттанса [5] в реальное значение эмиттанса пучка. Обосновано использование секции на 3-ей гармонике для предварительного сжатия пучка перед входом в

магнитный компрессор. Рассчитаны параметры пучка при использовании секции на 3-ей гармонике, и приведены условия для ее использования.

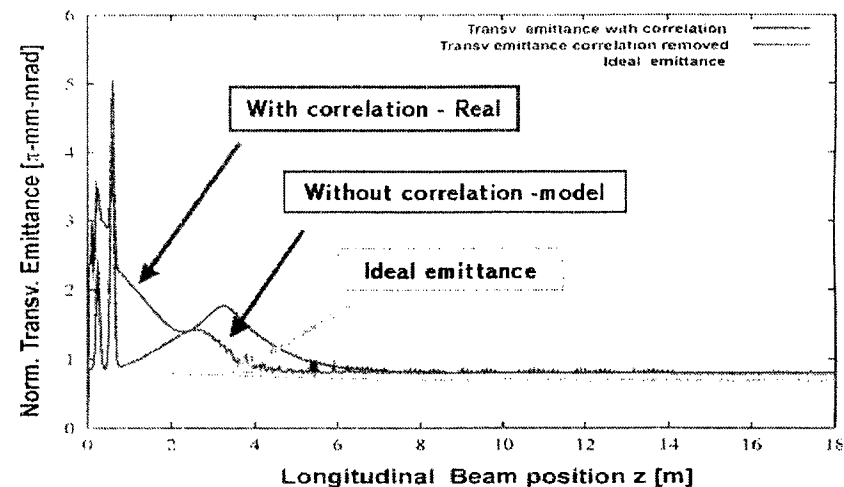


Рисунок 2. Развитие эмиттанса вдоль линейного ускорителя TTF. Приведены эмиттанс с учетом корреляции, без учета корреляции и для идеального эмиттанса (без учета сил пространственного заряда).

Во второй главе исследованы эффекты влияния времени нарастания и длительности плоской вершины лазерного импульса, поперечных размеров лазера на формирование пучка в электронных пушках с фотокатодом. Исследования проводились с учетом сил пространственного заряда и корреляций, введенных в первой главе. Численное моделирование выполнено для ускорителя TTF. Приведены результаты оптимизации параметров установки, внедренные на ускорителе которые привели к значительному улучшению характеристик электронного пучка. Исследованы оптимальные условия настройки ускорителя, приведена динамика пучка с учетом и без учета корреляции. На рис. 3 приведены зависимости поперечного и продольного эмиттанса на выходе электронной пушки от

параметров лазера накала катода (поперечный размер и длительность плоской вершины) для различных ВЧ фаз в резонаторе.

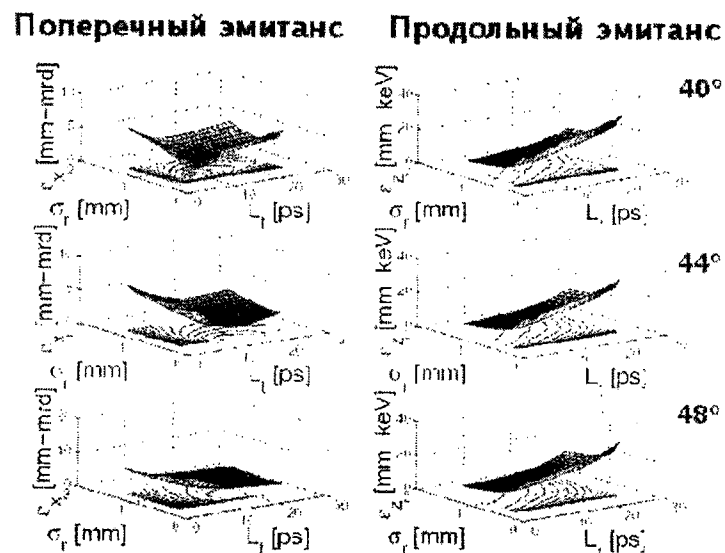


Рисунок 3. Зависимость поперечного (слева) и продольного (справа) эмиттанса на выходе электронной пушки TTF от поперечного размера лазера σ_r и от длительности плоской вершины лазерного импульса L_f .

Далее в главе, численно исследована зависимость поперечного эмиттанса пучка от расположения соленоида и магнитного поля в нем. Результаты анализа показаны на рис.4. В результате проведенных исследований найдены следующие оптимальные значения параметров установки TTF:

- Время нарастания лазера <1 псек
- Длительность плоской вершины лазерного импульса <8.5 псек
- Поперечные размеры лазера ~2.6мм
- Расположение соленоида - 38 см
- Величина поля соленоида -0.195 Т
- Фаза ВЧ резонатора -42.7 градуса.

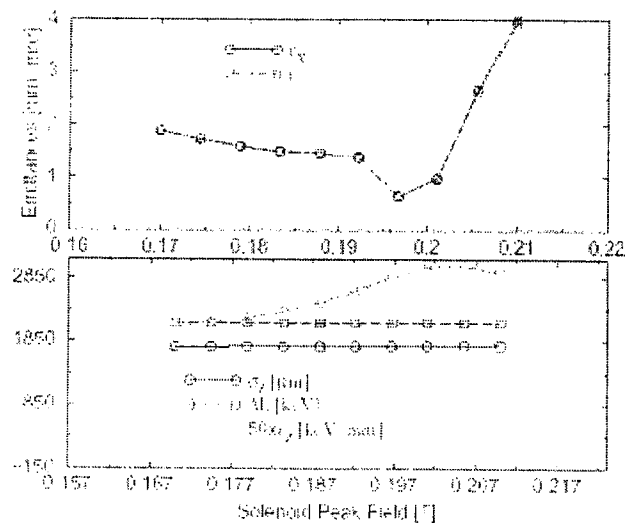


Рисунок 4. Зависимость продольного и поперечного эмиттанса от величины магнитного поля соленоида.

Третья глава посвящена разработке и моделированию линейного ускорителя для источника синхротронного излучения CANDLE. Основные требования к линейному ускорителю следующие:

- Три режима устойчивой работы одно-, много-сгустковые и режим квази-непрерывной инжекции (top-up).
- Рабочая частота 2Гц
- Минимальные потери частиц сгустка <10%
- Энергетический разброс в сгустке ~0.5%
- Скорость инжекции при 100 МэВ-400мА/мин

Для генерации частиц рассматривалась триодная электронная пушка с термическим накалом катода. Основные параметры электронной пушки с напряжением 90 кВ и пучка для двух режимов работы приведены в таблице 1.

Полученный пучок с энергией 90 кэВ проходит группирование в системе группирователей. Для группирования пучка используется известный метод

ввода электронного пучка в группирующий резонатор на нулевой ВЧ фазе. Таким образом, при нерелятивистской энергии сгустка, передние частицы тормозятся, а задние ускоряются. В результате пучок сжимается в продольных размерах. Оптимальное расстояние группирования задается формулой (4)

$$L_{\text{bunching}} = \frac{\lambda_{\text{RF}}}{2\pi} \frac{m_e c^2 \beta^3 \gamma^3}{e U_{\text{peak}}} \quad (4)$$

где λ_{RF} — длина ВЧ волны в резонаторе, U_{peak} — пиковое напряжение в группирующем резонаторе $\beta = v/c$, где v — скорость частиц, γ — Лоренц фактор.

Таблица 1. Основные характеристики электронной пушки и пучка.

	Одно-сгустк.	Много-сгустк.
Длительность эл. пучка (нс)	1	200-600
Попер. размер пучка на вых. пушки (мм)	6.6	4.8
Поп. норм. эмит. $\epsilon_{x \text{ норм}}$ (мм-мрад)	10 π	10.25 π
Пиковый ток в импульсе (мА)	1500	15
Ср. плотн. тока на катоде (мА / μm^2)	20	0.3

Система группирователей выбрана таким образом, что следующий группирователь расположен на расстоянии оптимального группирования от предыдущего. Другой особенностью разработанной системы группирователей является дополнительная группировка на второй гармонике в 1 ГГц.

В результате исследований различных схем группирования, разработана система группирователей, состоящая из группирующего резонатора на

стоячей волне с частотой 500 МГц, резонатора на стоячей волне на частоте второй гармоники 1000 МГц и предускорителя на бегущей волне на частоте 3 ГГц, где частицы, окончательно группируясь, получают одновременно ускорение от 90 кэВ до 3 МэВ. Далее следует основная ускоряющая секция с темпом ускорения 17 МВ/м, где пучок ускоряется до конечной энергии 100 МэВ. В результате разработки системы группирования и правильного подбора параметров ускорителя получено сжатие пучка в 60 раз, и начальный пучок длительностью в 1 нсек сжимается до 15 псек, что составляет около 18° частоты основного ускоряющего модуля на 3 ГГц.

Проведена трассировка частиц вдоль всего ускорителя. Результаты показали (рис. 5а), что потери частиц в структуре ускорителя составляют менее 10%, с энергетическим разбросом внутри сгустка менее 0.5 %. Исследована также динамика поперечного эмиттанса вдоль ускорителя (рис 5б), для получения требуемого эмиттанса в 6 мм-мрад на выходе из ускорителя. Таким образом, разработанная схема полностью удовлетворяет требованиям к линейному ускорителю.

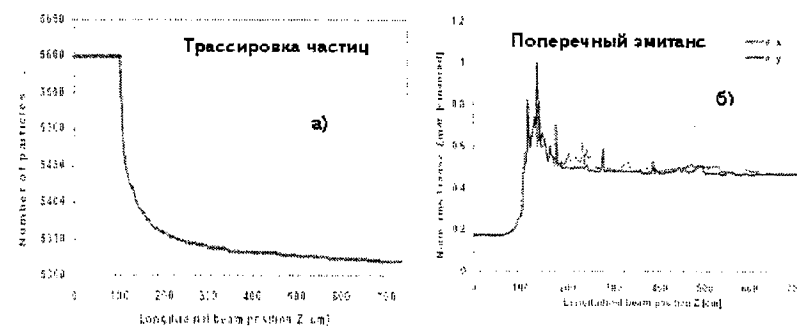


Рис. 5. Трассировка частиц (а) и эмиттанс пучка вдоль ускорителя (б).

При движении сгустка заряженных частиц через диафрагмированную структуру возбуждаются кильватерные поля, действующие на частицы самого сгустка и приводящие к ухудшению его параметров. Исследовано влияние поперечных кильватерных полей в ускоряющей структуре на среднеквадратичный эмиттанс пучка. Получено аналитическое выражение для увеличения эмиттанса

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = C_T^2 \frac{\beta_0}{\beta} \left(\frac{E}{E'} \right)^4 g(1 + g \ln g - g)^2 \quad (5)$$

Получено предельное значение для заряда сгустка в $Q=1.6$ нК, при котором увеличение эмиттанса от действия кильватерных полей составляет менее 1%.

Выводы

1. Исследована поперечно-продольная корреляция внутри сгустка, и определены коэффициенты, определяющие линейную и квадратичную корреляции. Разработан алгоритм расчета коэффициентов корреляции, который включен в программу расчетов динамики пучка с учетом сил пространственного заряда ASTRA. Проведены расчеты изменения эмиттанса с учетом корреляции. Показано, что на стадии формирования пучка вклад корреляции в динамику пучка существенен.
2. Исследована зависимость эмиттанса пучка от времени нарастания лазера, длительности плоской вершины, фазы ВЧ резонатора и параметров фокусирующего соленоида. Проведены расчеты для оптимизации значений параметров пучка на выходе из электронной пушки для инжектора X-FEL. Найден оптимальные значения параметров установки. Полученные результаты легли в основу проектирования нового инжектора для самоиндуцированного лазера на свободных электронах X-FEL.
3. Исследована динамика пучка на стадии формирования для разработки системы группирователей для линейного предускорителя источника синхротронного излучения CANDLE. Предложена схема многочастотного группирования, благодаря которой получено сжатие электронного пучка в 60 раз, что, в свою очередь, позволило получить эффективный захват в режим ускорения более 90% всех частиц с энергетическим разбросом внутри сгустка меньше 0.5%. Также

исследовано увеличение эмиттанса от действия кильватерных полей, возбуждаемых при движении релятивистского сгустка в диафрагмированной структуре. Найдено максимальное значение заряда сгустка, при котором увеличение эмиттанса от воздействия кильватерных полей составляет около 1%

Цитируемая литература

- [1]. M. Dohlus, K. Flottmann, O.S. Kozlov, T. Limberg, P. Piot, E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller, M.V. Yurkov (DESY & Dubna, JINR & Fermilab), "START-TO-END SIMULATIONS OF SASE FEL AT THE TESLA TEST FACILITY, PHASE 1. ", 17pp. Nucl. Instrum. Meth. **A530**: 217-233, 2004
- [2]. E.L. Saldin, E.A. Shneidmiller, M.V. Yurkov, "DESIGN FORMULAS FOR SHORT-WAVELENGTH FELS", DESY-04-012, January 2004.
- [3]. B.E. Carlsten, D.T. Palmer, " ENHANCED EMITTANCE COMPENSATION IN A HIGH-FREQUENCY RF PHOTOINJECTOR USING RF RADIAL FOCUSING ", Nucl. Instr. Meth., **A 425**, pp. 37-50, 1999.
- [4]. B.E. Carlsten, " NEW PHOTOELECTRIC INJECTOR DESIGN FOR THE LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY XUV FEL ACCELERATOR ", Nucl. Instr. Meth., **A 285**, pp. 313-319 (1989)
- [5]. Zikri M. Yusuf, Manoel E. Conde, Wei Gai (Argonne), "SCHOTTKY-ENABLED PHOTOEMISSION IN A RF ACCELERATOR PHOTOINJECTOR - POSSIBLE GENERATION OF ULTRA-LOW TRANSVERSE THERMAL EMITTANCE ELECTRON BEAM", Phys.Rev.Lett. **93**: 114801, 4pp., 2004.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. M. Ferrario (Frascati), K. Flottmann, T. Limberg, P. Piot (DESY), B. Grigorian (Yerevan Phys. Inst.), CONCEPTUAL DESIGN OF THE XFEL PHOTOINJECTOR. DESY-TESLA-FEL-2001-03, Feb 2001. 59pp.
2. K. Flottmann, P. Piot (DESY), M. Ferrario (Frascati), B. Grigorian (Yerevan Phys. Inst.), THE TESLA X-FEL INJECTOR. DESY-M-01-060, PAC-2001-WPAH062, Nov 2001. 3pp., IEEE Particle Accelerator Conference (PAC 2001), Chicago, Illinois, 18-22 Jun 2001.

3. Yu. Martirosyan, B. Grigoryan, V. Tsakanov, CANDLE, Armenia, BOOSTER SYNCHROTRON FOR CANDLE LIGHT SOURCE. Shanghai Symposium on Intermediate Energy Light Sources, Shanghai, China, September 24-26, 2001, SSRC 02-1, March 2002, pp. 115-119.
4. V. Ayvazian, N. Baboi, I. Bohnet, R. Brinkmann, M. Castellano, P. Castro, L. Catani, S. Choroba, A. Cianchi, M. Dohlus, H.T. Edwards, B. Faatz, A.A. Fateev, J. Feldhaus, K. Floettmann, A. Gamp, T. Garvey, C. Gerth, V. Grechko, B. Grigorian, U. Hahn, C. Hessler, K. Honkavaara, M. Huning, R. Ischebeck, M. Jablonka, T. Kamps, M. Korfer, M. Krassilnikov, J. Krzywinski, M. Liepe, A. Liero, T. Limberg, H. Loos, M. Luong, C. Magne, J. Menzel, P. Michelato, M. Minty, U.C. Muller, D. Nolle, A. Novokhatsky, C. Pagani, F. Peters, J. Pfluger, P. Piot, L. Plucinski, K. Rehlich, I. Reyzi, A. Richter, J. Rossbach, E.L. Saldin, W. Sandner, H. Schlarb, G. Schmidt, P. Schmuser, J.R. Schneider, E.A. Schneidmiller, H.J. Schreiber, S. Schreiber, D. Sertore, S. Setzer, S. Simrock, R. Sobierajski, B. Sonntag, B. Steeg, F. Stephan, K.P. Sychev, K. Tiedtke, M. Tonutti, R. Treusch, D. Trines, D. Turke, V. Verzilov, R. Wanzenberg, T. Weiland, H. Weise, M. Wendt, I. Will, S. Wolff, K. Wittenburg, M.V. Yurkov, K. Zapfe, GENERATION OF GW RADIATION PULSES FROM A VUV FREE ELECTRON LASER OPERATING IN THE FEMTOSECOND REGIME. DESY-01-226, Dec 2001. 5pp. Published in Phys.Rev.Lett. 88: 104802, 2002.
5. V. Tsakanov, V. Avagian, V. Ayvazian, G. Amatuni, B. Grigorian, M. Ivanian, E. Laziev, Yu. Martirosian, R. Mikaelian, S. Tatikian, A. Vardanian, CENTER FOR THE ADVANCEMENT OF NATURAL DISCOVERIES USING LIGHT EMISSION: A NEW PROJECT FOR 3-GEV INTERMEDIATE-ENERGY LIGHT SOURCE IN THE REPUBLIC OF ARMENIA, 2002. Published in Rev. Sci. Instrum. 73: 1411-1413, 2002.
6. V. Ayvazian, N. Baboi, I. Bohnet, R. Brinkmann, M. Castellano, P. Castro, L. Catani, S. Choroba, A. Cianchi, M. Dohlus, H.T. Edwards, B. Faatz, A.A. Fateev, J. Feldhaus, K. Floettmann, A. Gamp, T. Garvey, H. Genz, C. Gerth, V. Grechko, B. Grigorian, U. Hahn, C. Hessler, K. Honkavaara, M. Huning, R. Ischebeck, M. Jablonka, T. Kamps, M. Koerfer,

- M. Krassilnikov, J. Krzywinski, M. Liepe, A. Liero, T. Limberg, H. Loos, M. Luong, C. Magne, J. Menzel, P. Michelato, M. Minty, U.C. Muller, D. Nolle, A. Novokhatsky, C. Pagani, F. Peters, J. Pfluger, P. Piot, L. Plucinski, K. Rehlich, I. Reyzi, A. Richter, J. Rossbach, E.L. Saldin, W. Sandner, H. Schlarb, G. Schmidt, P. Schmuser, J.R. Schneider, E.A. Schneidmiller, H.J. Schreiber, S. Schreiber, D. Sertore, S. Setzer, S. Simrock, R. Sobierajski, B. Sonntag, B. Steeg, F. Stephan, K.P. Sychev, K. Tiedtke, M. Tonutti, R. Treusch, D. Trines, D. Turke, V. Verzilov, R. Wanzenberg, T. Weiland, H. Weise, M. Wendt, T. Wilhein, I. Will, S. Wolff, K. Wittenburg, M.V. Yurkov, K. Zapfe, A NEW POWERFUL SOURCE FOR COHERENT VUV RADIATION: DEMONSTRATION OF EXPONENTIAL GROWTH AND SATURATION AT THE TTF FREE ELECTRON LASER. DESY-02-065, May 2002. 9pp. Published in Eur. Phys. J. D20: 149-156, 2002.
7. B. Grigorian, A. Vardanian, V. Tsakanov, THE DESIGN AND SIMULATION STUDIES OF THE PRE-INJECTOR FOR CANDLE LIGHT SOURCE. ASLS-CANDLE-02-011, Nov 2002. 7 pp., 8th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2002), Paris, France, 3-7 Jun 2002. Published in *Paris 2002, EPAC'02* 1765-1767.
8. V. Tsakanov, A. Abashian, M. Aghasian, G. Amatuni, V. Avagian, V. Aivazian, A. Davtian, H. Gagiyani, A. Grigorian, B. Grigorian, V. Harutiunian, M. Ivanian, V. Jalalian, V. Khachatryan, E. Laziev, Yu. Martirosian, A. Melkonian, R. Mikaelian, S. Minasian, S. Nagdalian, A. Petrosian, K. Rehlich, A. Rstakian, Kh.N. Sanosian, S.N. Simrock, S. Tatikian, A. Vardanian, V.A. Vartanian, A. Yayloyan, STATUS OF 3-GEV INTERMEDIATE ENERGY LIGHT SOURCE PROJECT CANDLE IN REPUBLIC OF ARMENIA. ASLS-CANDLE-02-004, Nov 2002. 7pp., 8th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2002), Paris, France, 3-7 Jun 2002. Published in *Paris 2002, EPAC 02* 763-765.
9. V. Ayvazian, J.P. Carneiro, P. Castro, B. Faatz, A.A. Fateev, J. Feldhaus, C. Gerth, V. Grechko, B. Grigorian, U. Hahn, K. Honkavaara, M. Huning, R. Ischebeck, U. Jastrow, R. Kammering, J. Menzel, M. Minty, D. Noelle, J. Pfluger, P. Piot, L. Plucinski, K. Rehlich, J. Rossbach, E.L.

Saldin, H. Schlarb, E.A. Schneidmiller, S. Schreiber, R. Sobierajski, B. Steeg, F. Stulle, K.P. Sychev, K. Tiedtke, R. Treusch, H. Weise, M. Wendt, M.V. Yurkov (DESY & Dubna, JINR & Moscow, INR & Yerevan Phys. Inst. & Aachen, Tech. Hochsch.), STUDY OF THE STATISTICAL PROPERTIES OF THE RADIATION FROM A VUV SASE FEL OPERATING IN THE FEMTOSECOND REGIME. DESY-TESLA-FEL-2002-06B, Oct 2002. 5pp. Prepared for 24th International Free Electron Laser Conference and 9th FEL Users Workshop (FEL 2002), Argonne, Illinois, 9-13 Sep 2002. Published in Nucl. Instrum. Meth. A507: 368-372, 2003.

10. Б. Григорян, БАНЧИРОВКА И УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ CANDLE, Известия Национальной Академии Наук РА, Физика, т. 39, No. 6, с. 361-365, (2004)
11. B. Grigoryan, V. Tsakanov, CANDLE, Armenia, BEAM DYNAMICS IN 100 MEV S-BAND LINAC FOR CANDLE. EPAC'04, Lucerne, Switzerland, Proceedings of EPAC'04, pp. 1129-1131, 2004.
12. V. Tsakanov, M. Aghasyan, G. Amatuni, V. Avagyan, A. Grigoryan, B. Grigoryan, M. Ivanyan, V. Jalalyan, D. Kalantaryan, V. Khachatryan, E. Laziev, Yu. Martirosyan, R. Mikaelyan, S. Minasyan, Kh. Sanosyan, S. Tatikian, S. Tunyan, A. Vardanyan, CANDLE, Armenia, STATUS OF 3 GEV CANDLE SYNCHROTRON LIGHT FACILITY PROJECT. Presented at EPAC'04, Lucerne, Switzerland, Proceedings of EPAC'04, pp. 2251-2253, 2004.
13. B. Grigoryan, E. Laziev, V. Tsakanov, A. Vardanyan, OPTIMIZATION OF THE BUNCHING SECTION FOR CANDLE PRE-INJECTOR LINAC, ASLS-CANDLE R-03-011, pp.9, 2003.

ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉՆԵՐԻ ՀԱՍԱՐ ՓՈՔՐ ԷՄԻՏԱՆՍՈՎ ԿԱՌՃ
ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՓՆՋԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՑԻԱՅԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄ

Ամփոփագիր

Ատենախոսության մեջ ուսումնասիրված են էլեկտրոնային փնջերի ձևավորման դինամիկան: 6 չափանի փուլային տարածության մեջ մասնիկների բաշխվածության վիճակագրական ներկայացումը օգտագործելով, ներմուծվում են փուլային հարթության և երկայնակի կորդինատի փոխկապակցվածության գործակիցները: Նրանց թվային արժեքները որոշելու համար մշակված է հատուկ ալգորիթ, որը ներմուծված է ASTRA - մասնիկների դինամիկայի հաշվարկման համար օգտագործվող հայտնի ծրագրի մեջ: Նորացված ASTRA ծրագիրը օգտագործվել է DESY արագացուցչային կենտրոնի TTF (TESLA Test Facility) գծային արագացուցիչում փնջի ձևավորման դինամիկայի հաշվարկների համար: Հաշվարկները ընդգրկել են էլեկտրոնային փնջի բնութագրիչ պարամետրերի վրա արագացուցիչի սարքավորումների աշխատանքային պարամետրերի ազդեցության ուսումնասիրում: Կատարված հաշվարկները կիրառվել են TTF արագացուցիչում, որտեղ ստացվել է 106 նմ ալիքի երկարությամբ ազատ էլեկտրոնային լազեր SASE-FEL (Self Amplified Spontaneous Emission electron Laser): Մշակված մոտեցումները կիրառված են նաև CANDLE սինքրոտրոնային ճառագայթման կենտրոնի ներարկիչ 100 ՄԷՎ -անոց գծային արագացուցիչի նախագծման ժամանակ: Հաշվի առնելով փոքր էներգիաների ժամանակ էլեկտրոնային փնջի ձևավորման ընթացքում տեղի ունեցող և փնջի պարամետրերի վրա բացասական ազդող այնպիսի երևույթները, ինչպիսին են տարածական լիցքի ուժերի ազդեցությունը և թանձրուկի մեջ լայնակի փուլային էլիպսի առանցքների և երկայնակի կորդինատի փոխկապակցվածությունը, առաջարկվել և հաշվարկվել է թանձրուկավորման յուրահատուկ համակարգ, որի կիրառումը թույլ է տալիս էֆեկտիվ արագացնել թանձրուկում եղած մասնիկների ավելի քան 90%-ը:

Կատարված աշխատանքի արդյունքների մի մասը հաջողությամբ կիրառվել է TTF արագացուցիչում: Կատարված աշխատանքը կարելի է ամփոփել հետևյալով՝

- Ներմուծվել են լայնակի փուլային հարթության գործակիցներ և առաջարկվել է նրանց թվային արժեքների հաշվարկման ալգորիթ:
- Ներմուծված գործակիցներով նորացված ASTRA ծրագրով հաշվարկվել են TTF արագացուցիչի աշխատանքային պարամետրերը և որպես ճիշտ հաշվարկի արդյունք արագացուցիչի համապատասխան կարգավորումից հետո ստացվել է ազատ էլեկտրոնային լազերի ճառագայթում:
- Առաջարկվել և հաշվարկվել է յուրահատուկ թանձրուկավորման համակարգ, որը թույլ է տվել սեղմել 1 նվ թանձրուկը մինչև 0.015 նվ, ինչը իր հերթին կապահովի թանձրուկի ավելի քան 90% մասնիկների էֆեկտիվ արագացում, CANDLE սինքրոտրոնային ճառագայթման համալիրի ներարկիչ գծային արագացուցիչում: