

Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ
(Երևանի Ֆիզիկայի Ինստիտուտ)

Սահակյան Վահե Վարդանի

ԱՐՏԱԳԻՆ ՏՈՎՈՒՍԱՅՈՒՄՈՎ ԱԶՍ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐԻ ՎՐԱ ՌԵՆՏԳԵՆԱՆ
ԼԱԶԵՐՆԵՐԻ ՌԻՍՈՒՄՆԱՄԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա.04.20 - «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական զիտությունների թեկնածուի զիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ-2012

НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ имени А. И. Алиханяна
(Ереванский Физический Институт)

Ռ
Տապյան Բաբե Վարդանովիչ

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ
ЭЛЕКТРОНАХ С ВНЕШНЕЙ ФОКУСИРОВКОЙ

АВТОРЕФЕРАТ

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

ЕРЕВАН-2012

Ատենախոսության թեման հաստատված է Երևանի պետական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր
Վ. Մ. Ցակևանով (ԵՊՀ ՔԵՄԱ ԳՀ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Է. Մ. Լազին (ԱԱԳԼ)

Առաջատար կազմակերպություն՝

Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Յ. Ռոսսբախ (Համբուրգի Համ., ԳՂՀ)
ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և
Էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2012թ. մայիսի 29-ին ժամը 14.00-ին Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան ազգային գիտական լաբորատորիայում գործող ԲՈՂ-ի «Միջուկի և տարրական մասնիկների ֆիզիկա» 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում (0036, Երևան, Ալիխանյան եղբայրների 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան ազգային գիտական լաբորատորիայի գրադարանում:

Սեղմագիրն ատարված է 2012թ. ապրիլի 27-ին:

024 մասնագիտական խորհրդի գիտական
քարտուղար, ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր

Յ. Գազարյան Է. Գ. Գազարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.
Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук
В. М. Цаканов (ЕГУ КЕНДЛ НИИ)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор
Э. М. Лазиев (ННЛА)

доктор физ.-мат. наук, профессор
Й. Россбах (Унив. Гамбурга, ФРГ)

Ведущая организация:

Институт радиофизики и электроники НАН РА

Защита диссертации состоится 29 мая 2012г. в 14.00 часов на заседании специализированного совета ВАК 024 "Физика ядра и элементарных частиц" действующей при Национальной научной лаборатории им. А.И.Алиханяна (0036, Ереван, ул. братьев Алиханян 2):

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной научной лаборатории имени А. И. Алиханяна.

Автореферат разослан 27 апреля 2012г.

Ученый секретарь спец. совета 024,
доктор физ.- мат. наук

Յ. Գազարյան Э.Д. Газазян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Одним из важнейших направлений современных исследований в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники является генерация мощного рентгеновского излучения высокой яркости на основе процесса сомоиндуцируемого лазера на свободных электронах (СЛСЭ) на выходном пучке от линейного ускорителя. В дополнение к жестким требованиям на эмиттанс пучка и его энергетический разброс на выходе из линейного ускорителя, процесс микробанчировки электронного пучка в ондуляторной секции ускорителя обусловлен согласованием пространственно-угловых характеристик электронных и фотонных пучков с помощью внешней фокусирующей системы для обеспечения эффективного взаимодействия излучения с электронами пучка. Вопрос о фокусировке электронного пучка особенно важен для рентгеновских СЛСЭ, где длина ондуляторов может достигать нескольких сот метров. Поскольку размер и расходимость электронного пучка определяются параметрами внешней фокусировки, то характеристики излучения СЛСЭ (мощность, яркость и длина насыщения излучения) сильно зависят от типа и параметров фокусирующей системы и исследование влияния внешней фокусировки на процесс генерации когерентного излучения является очень важным для достижения оптимальных параметров СЛСЭ.

Более того, для эффективного взаимодействия электронных и фотонных пучков фокусирующие магниты (квадрупольные магниты) должны быть установлены в ондуляторной линии с очень высокой точностью для предотвращения возмущения траектории электронного пучка, приводящего к ухудшению параметров излучения СЛСЭ. Исследование эффектов, связанных с влиянием этих погрешностей для различных фокусирующих систем, является важной проблемой для анализа процесса СЛСЭ в реальных условиях и при конечных допусках на магнитную систему.

Особенностями рентгеновских СЛСЭ являются жесткие требования на параметры электронного пучка на выходе из линейного ускорителя-драйвера: эмиттанс пучка, энергетический разброс и пиковый ток. Поскольку ондуляторная секция СЛСЭ проектируется под идеальные параметры электронного пучка, важным вопросом является исследование зависимости параметров излучения от параметров электронного пучка, включая возможность генерации СЛСЭ электронными пучками малой плотности для избежания эффектов пространственного заряда пучка.

В реальном ускорителе траектории частиц возмущены из-за конечных допусков на юстировку элементов ускорителя и ошибки магнитного поля. Прецизионная коррекция траектории электронных пучков является особенно важным вопросом

для рентгеновских СЛСЭ, поскольку требования к стабильности орбиты электронного пучка лежат в микронной области. Одним из перспективных методов прецизионной коррекции траектории частиц является метод коррекции на основе варирования параметров ускорителя или пучка (энергия пучка, силы квадрупольных магнитов, ускоряющие градиенты и т.д.). При этом конечная разрешимость датчиков положения пучка порождает стохастические ошибки при коррекции орбиты пучка и искажает конечную траекторию пучка после коррекции, что является важной проблемой для достижения проектных параметров СЛСЭ.

Цель работы

Целью диссертационной работы является:

- Исследование влияния различных фокусирующих структур на процесс и характеристики излучения рентгеновского СЛСЭ.
- Исследование эффектов возмущенной орбиты электронного пучка на процесс и характеристики излучения рентгеновского СЛСЭ.
- Исследование влияния параметров электронного пучка (энергия, эмиттанс, энергетический разброс, пиковый ток и заряд сгустка) на мощность и длину насыщения излучения СЛСЭ.
- Исследование СЛСЭ в режиме малых плотностей электронного пучка.
- Исследование прецизионной коррекции орбиты электронного пучка с учетом конечной разрешимости датчиков положения пучка.

Диссертационная работа основана на исследованиях, выполненных для проектов Европейского рентгеновского ЛСЭ (European XFEL) и Швейцарского ЛСЭ (SwissFEL).

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые предложена и исследована новая нестандартная фокусирующая система для СЛСЭ.
2. Получена аналитическая формула для расчета влияния смещений квадрупольных магнитов на параметры излучения СЛСЭ.
3. Проведен сравнительный анализ параметров СЛСЭ для различных фокусирующих систем ускорителя с учетом возмущенной орбиты электронного пучка.
4. Исследован режим генерации СЛСЭ при малых плотностях электронного пучка.
5. Исследован и предложен новый метод коррекции траектории частиц в линейных ускорителях и в транспортных каналах.

Практическая ценность.

- Результаты сравнительного анализа различных фокусирующих систем, представленные в данной работе, могут быть использованы при разработке фокусирующих систем для будущих СЛСЭ, а так же для возможных модификаций фокусирующей системы Европейского источника СЛСЭ.
- Полученные результаты позволяют оценить характеристики излучения в СЛСЭ при различных рабочих режимах ускорителя.
- Получены результаты могут быть использованы для прецизионной коррекции орбиты электронного пучка в линейных ускорителях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования генерации СЛСЭ для различных фокусирующих систем в ондуляторной секции ускорителя. Анализ воздействия возмущенной траектории электронного пучка на формирование СЛСЭ и определение допусков на магнитную систему ондуляторной секции.
2. Новая фокусирующая система с центральным дуплетом в ондуляторной секции, позволяющая достичь максимальной мощности излучения при минимальных допусках на фокусирующую систему.
3. Результаты исследования зависимости мощности излучения, длины насыщения излучения от параметров электронного пучка, включая генерацию СЛСЭ при малых плотностях электронного пучка.
4. Исследование дрейфа орбиты электронного пучка после коррекции и новый метод многоступенчатой коррекции орбиты в линейных ускорителях.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. European Particle Accelerator Conference, EPAC'08, Genoa, Italy, 23-27 June, 2008.
2. Particle Accelerator Conference, PAC09, Vancouver, Canada, 4-8 May, 2009.
3. International Free Electron Laser Conference FEL 2009, Liverpool, UK, 24-28 August, 2009.
4. International Particle Accelerator Conference, IPAC'10, Kyoto, Japan, 23-28 May, 2010.

Материалы диссертации также обсуждались на семинарах в EGU, CANDLE, Институте Пола Шерера и DESY.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 6 научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 114 страниц, в том числе 35 рисунков, 17 таблиц и списка литературы из 96 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сделан обзор по тематике диссертации, сформулированы основные задачи, обоснована их актуальность и научная новизна, а также приведено краткое содержание работы.

В первой главе приведено краткое описание теории СЛСЭ. Так же в этой главе приведены технические характеристики Европейского рентгеновского ЛСЭ и Швейцарского ЛСЭ проектов, для которых получены результаты составляют основную часть диссертационной работы.

Так как аналитические методы имеют ограниченное применение для исследования свойств СЛСЭ, необходимо использовать алгоритмы численного моделирования. Для моделирование работы СЛСЭ в данной диссертационной работе были использованы две компьютерные программы GENESIS и SIMPLEX. Краткое описание численных алгоритмов, которые используются в этих кодах для решения уравнения движения частиц и уравнения для электромагнитного поля приведены в секции 1.6. Для Европейского рентгеновского ЛСЭ и Швейцарского ЛСЭ проектов были рассчитаны параметры излучения СЛСЭ (мощность при насыщении и длина насыщения). Результаты численного моделирования представлены в секции 1.9. В этой секции также приведен сравнительный анализ этих пакетов программ.

Во второй части этой главы была получена аналитическая формула для спектральной яркости излучения длинной секции ондулятора с внешней периодической ФОДО фокусировкой, учитывая пространственно-угловое распределение электронного пучка. В общем случае яркость ондуляторного излучения определяется как:

$$B = \frac{F}{4\pi^2 \Sigma_r^2 \Sigma_r'^2 (\Delta\omega/\omega)},$$

где F - поток фотонов, Σ_r и Σ_r' - эффективный размер и расходимость источника фотонного пучка, $\Delta\omega/\omega$ - спектральная ширина полосы пропускания. Показано, что произведение эффективного размера и расходимости источника (фотонного пучка), A , определяется как

$$A = \Sigma_r^2 \Sigma_r'^2 = \left(\varepsilon \left(\frac{1}{\sin \mu} - \frac{1}{6} \operatorname{tg} \frac{\mu}{2} \right) + \frac{N\lambda}{8\pi^2} \right) \left(4\varepsilon \operatorname{tg} \frac{\mu}{2} + \frac{\lambda}{2N} \right)$$

где ε - эмиттанс электронного пучка, μ - набег фазы за ФОДО период, λ - длина волны излучения и N - количество ФОДО периодов. С помощью этой формулы можно определить оптимальные параметры фокусирующей системы (набег фазы бетаронных колебаний и число ФОДО периодов), обеспечивающие максимальную яркость излучения. В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость нормализованной яркости B_n от набег фазы μ для нескольких фиксированных значений числа ФОДО периодов, а на рис. 2 - зависимость нормализованной яркости B_n от числа ФОДО периодов N при разных значениях набег фазы.

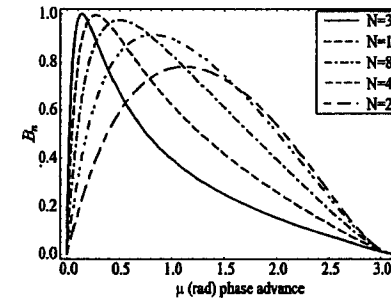


Рис. 1. Зависимость нормализованной яркости от набег фазы при $N=2, 4, 8, 16, 32$.

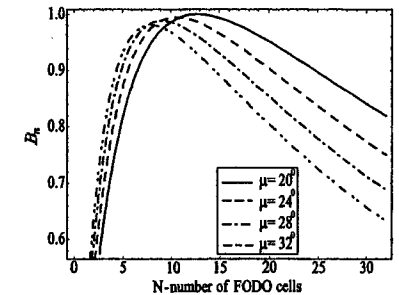


Рис. 2. Зависимость нормализованной яркости от числа ФОДО периодов при $\mu=20, 24, 28, 32^\circ$.

Полученная формула показывает, что уже для обычной ФОДО структуры яркость излучения зависит от параметров магнитной системы. Поскольку яркость излучения качественно описывает эффективное взаимодействие электронных и фотонных пучков в поперечном фазовом пространстве, процесс СЛСЭ также зависит от параметров внешней фокусирующей системы.

Во второй главе диссертационной работы исследован процесс СЛСЭ для различных внешних фокусирующих систем. В частности, различные фокусирующие структуры были рассмотрены для Европейского рентгеновского ЛСЭ.

В диссертационной работе было показано, что для симметричной ФОДО решетки среднеквадратичные поперечный размер σ_x и угловой разброс σ_x' электронного пучка определяются как

$$\overline{\sigma_x^2} = \varepsilon L_c \left[\frac{1}{\sin \mu} - \frac{1}{6} \operatorname{tg} \frac{\mu}{2} \right], \quad \overline{\sigma_x'^2} = \varepsilon \frac{4}{L_c} \operatorname{tg} \frac{\mu}{2}$$

где L_c - длина периода. Поскольку для СЛСЭ процесс усиления строго зависит от эффективного взаимодействия электронных и фотонных пучков на фазовой плоскости, то параметры излучения зависят от параметров фокусирующей системы μ и L_c .

В первой части этой главы исследовано влияние набега фазы на характеристики излучения. Существуют несколько приближенных формул, которые могут быть использованы для расчета оптимального значения набега фазы. Однако, оптимальные параметры фокусирующей системы не могут быть найдены аналитически и для этого необходимо использовать численные методы. Было показано, что когда длина ФОДО периода равна 12.2м (что соответствует проектному значению) для ондуляторной секции SASE1 минимальная длина насыщения получается при $\mu = 22^\circ$. Для ондуляторной секции SASE2 оптимальное значение набега фазы, с точки зрения длины насыщения, равно 20 и 50 градусов, когда длина волны излучения равна 0.1 и 0.4 нм соответственно.

Далее приведены результаты исследования СЛСЭ для различных фокусирующих систем ускорителя и проведен сравнительный анализ параметров излучения. В частности были рассмотрены и исследованы режимы работы СЛСЭ для естественной фокусировки, стандартной ФОДО фокусировки и фокусирующей системы содержащей три ондуляторных сегмента за период. Новая фокусирующая система имеет период ФОДО решетки равно 36.6м, что достигается модификацией стандартной фокусировки отключением промежуточных ФД квадрупольных магнитов. Преимущество этой фокусирующей системы по сравнению со стандартной состоит в сокращении числа квадрупольных линз в три раза и, как следствие, в уменьшении возмущенной орбиты электронного пучка при конечных допусках на смещение линз от оси ускорителя.

Хотя, периодическая ФОДО решетка является широко используемым методом внешней фокусировки для СЛСЭ, вопрос генерации СЛСЭ с нестандартной фокусирующей системой был упущен из общего рассмотрения. В диссертационной работе исследован альтернативный вариант фокусирующей системы с сосредоточенной фокусировкой в центре ондуляторной секции – вариант “центральной фокусировки” с минимальным числом квадрупольных линз. В этом случае все квадрупольные выключены кроме двух ФОДО ячеек в центре ондуляторной секции. На рис. 3 а) представлены периодические решения для горизонтальной и вертикальной бета функций вдоль SASE1 ондуляторной секции в случае центральной фокусировки.

Известно, что для СЛСЭ, работающего в области рентгеновских длин волн, внешняя фокусировка необходима для оптимального согласования параметров электронного и фотонного пучков. Однако изучение возможности работы СЛСЭ без внешней фокусировки в ондуляторной секции, представляет собой особый интерес, поскольку позволяет избежать возмущения траектории электронного пучка из-за конечных допусков на смещение квадрупольных линз от оси ондулятора. Для исследования процесса СЛСЭ без внешней фокусировки необходимо согласовать начальные пространственно-угловые характеристики электронного пучка с аксептансом ондуляторной секции. Нами рассмотрен случай

периодического решения для бетатронной функции, которая позволяет иметь минимум горизонтального размера в середине ондуляторной секции. На рис. 3 б) приведены горизонтальная и вертикальная бетатронные функции вдоль ондуляторной секции SASE2, которые определяют огибающую пучка вдоль канала. Результаты исследования показывают, что процесс самоусиления спонтанного излучения и генерации СЛСЭ имеет место и при естественной ондуляторной фокусировке, хотя процесс микробанчировки электронного пучка замедляется.

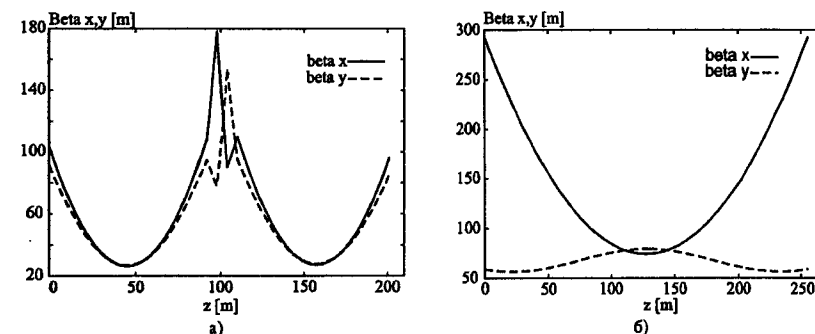


Рис. 3. Изменение горизонтальной и вертикальной бета функций вдоль а) SASE1 в случае центральной фокусировки, б) SASE2 в случае естественной фокусировки

Для сравнения различных фокусирующих систем на рис. 4 показано кривая роста мощности излучения СЛСЭ вдоль ондуляторной линии SASE1 для различных вариантов внешней фокусировки.

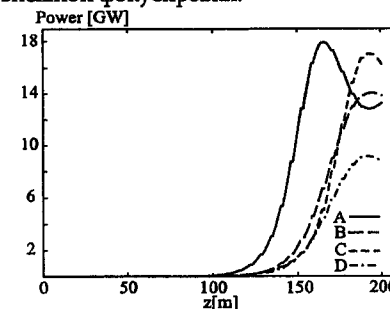


Рис. 4. Кривая роста мощности излучения СЛСЭ вдоль ондуляторной секции SASE1 для: А) стандартной ФОДО структуры, В) ФОДО структуры с длинным периодом, С) центральной фокусировки, D) естественной ондуляторной фокусировки.

В последней части второй главы исследовано влияние смещения квадрупольных магнитов на параметры излучения СЛСЭ. В приближении тонких линз, для симметричных ФОДО систем получена формула описывающая

уменьшение мощности излучения от среднеквадратичного смещения линз от оси ускорителя, имеющая вид:

$$P \approx P_s \exp\left[-\bar{\theta}^2 \frac{L_s}{2\lambda}\right]$$

где P_s - мощность насыщения в идеальном случае (без смещения магнитов), L_s - длина насыщения, а $\bar{\theta}$ среднеквадратичный угол возмущенной орбиты электронного пучка, определяемого как

$$\bar{\theta} = \frac{8\sqrt{2}}{3} \operatorname{tg} \frac{\mu}{2} \cdot \frac{\sigma_q}{L_c} \cdot \left(\frac{L_s}{L_c}\right)^{1/2}$$

где σ_q - среднеквадратичное значение смещения квадрупольных магнитов. В диссертации приведены результаты численного моделирования СЛСЭ для различных фокусирующих систем с учетом смещения квадрупольных магнитов и возмущенной траектории электронного пучка. Расчеты были проведены для среднеквадратичного смещения квадрупольных линз до $5 \mu\text{m}$. Результаты численного моделирования приведены на рис. 5. На графике показано падение мощности излучения при насыщении для разных фокусирующих систем. Результаты численного моделирования показывают, что предложенная фокусирующая система с более длинным периодом, чем стандартная ФОДО решетка менее чувствительна к смещениям квадрупольных линз и уже при среднеквадратичном смещении линз в $3 \mu\text{m}$ мощность излучения выше, чем при стандартной фокусировке

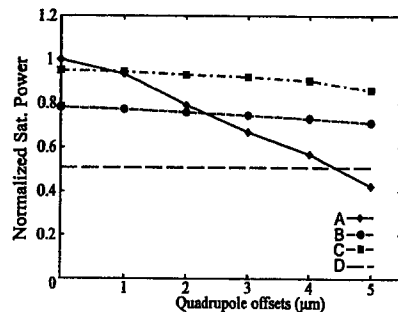


Рис. 5. Зависимость мощности излучения при насыщении от среднеквадратичного смещения квадруполов для: А) стандартной ФОДО структуры, В) ФОДО структуры с длинным периодом, С) центральной фокусировки, Д) естественной ондуляторной фокусировки.

В этой же главе исследован процесс генерации СЛСЭ для центральной фокусирующей системы с учетом конечных допусков на смещение линз от оси. Полученные результаты показывают (Рис. 5), что вариант центральной

фокусировки обеспечивает лучшие характеристики излучения ЛСЭ с точки зрения, как мощности излучения, так и допусков на смещение квадрупольных линз от оси.

Во третьей главе диссертационной работы было рассмотрено влияние основных параметров электронного пучка (энергия, эмиттанс, энергетический разброс, пиковый ток и заряд сгустка) на мощность и длину насыщения ЛСЭ для Европейского рентгеновского ЛСЭ и Швейцарского ЛСЭ.

Для Европейского рентгеновского ЛСЭ выполнены численные моделирования процесса СЛСЭ и определены изменение параметров излучения в зависимости от энергии электронного пучка, заряда сгустка и пикового тока. Численное моделирование было выполнено для случая когда заряд сгустка и пиковый ток меняются в пределах $\pm 10\%$. Было показано, что изменение заряда сгустка и пикового тока в этом диапазоне приводят к изменению мощности излучения при насыщении на 15-20%, и к изменению длины насыщения на 10%. Так же были вычислены параметры излучения, когда энергия электронного пучка изменяется диапазоне от 15 до 20 ГэВ (проектное значение энергии электронного пучка равно 17.5 ГэВ). Результаты численного моделирования для Европейского рентгеновского ЛСЭ представлены в секции 3.4.1.

Для Швейцарского ЛСЭ было исследовано влияние эмиттанса электронного пучка, энергетического разброса и пикового тока на параметры излучения ЛСЭ. Влияние этих параметров было вычислено для двух рабочих режимов ускорителя (для рабочих режимов с зарядом электронных сгустков 10 и 200 пКл). Результаты моделирования представлены в секции 3.4.2.

В последней части этой главы был изучен новый режим работы Европейского рентгеновского ЛСЭ с малым зарядом электронных сгустков. В рассматриваемом случае заряд электронных сгустков равен 20 пКл. Преимущества рабочего режима с малым зарядом электронных сгустков состоят в следующем: 1) с уменьшением заряда сгустков, многие эффекты, которые имеют отрицательное влияние на процесс СЛСЭ и связаны с зарядом сгустка (такие как силы объемного заряда сгустка, генерация кильватерных полей) становятся менее значимыми, 2) можно генерировать электронные пучки с малым эмиттансом, 3) можно получать более короткие импульсы, так как длина сгустков может быть значительно сокращена. Для этого рабочего режима были найдены оптимальные параметры электронного пучка с помощью численного трехмерного моделирования процесса СЛСЭ. Результаты численного моделирования роста мощности излучения вдоль ондуляторной линии SASE1 представлены на рис. 6. Как следует из рис. 6 для SASE1 ондуляторной секции SASE1 насыщение мощности излучения достигается вблизи 115м и мощность излучения достигает порядка 26 ГВт на длине волны 0.1 нм. Результаты моделирования представлены в разделе 3.5.

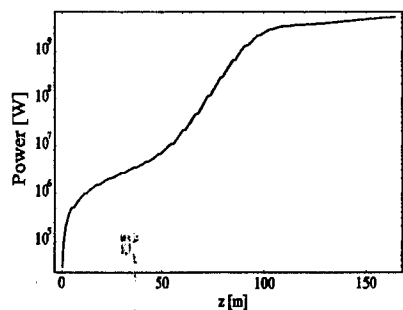


Рис. 6. Кривая роста мощности излучения СЛСЭ вдоль ондуляторной секции SASE1

В четвертой главе диссертационной работы рассмотрена проблема прецизионной бездисперсионной коррекции орбиты электронных пучков и влияние ошибок измерения на остаточную траекторию. Было найдено среднеквадратическое отклонение остаточной орбиты электронных пучков в линейных ускорителях и в транспортных каналах.

Рассмотрено среднеквадратическое отклонение остаточной орбиты вдоль ускорителя после глобальной, многоэтапной и индивидуальной квадрупольной коррекции.

В первой части этой главы сначала вычислено среднеквадратическое отклонение траектории пучка от идеальной орбиты, вызванной смещениями квадрупольных магнитов. Для среднеквадратичных отклонений орбит в линейном ускорителе было получена следующая формула:

$$y_{rms}^{(q)} \approx \sqrt{2} \frac{\sigma_q}{\cos \mu/2} N^{1/2} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_0}{\gamma_N}\right)^{1/2}$$

где σ_q - среднеквадратичное смещение квадрупольных магнитов, N - число ФОДО периодов, γ_0 - начальная энергия, $\gamma_N = \gamma_0 + N \cdot \Delta\gamma$ - энергия в конце линейного ускорителя, $\Delta\gamma$ - полученная энергия в одном ФОДО периоде. В разделах ускорителя, где отсутствует ускорение ($\Delta\gamma = 0$), например в ондуляторных секциях, имеем

$$y_{rms}^{(q)} \approx 2 \frac{\sigma_q}{\cos \mu/2} \cdot N^{1/2}$$

В следующей части приведен основной подход к коррекции орбиты частиц на основе минимизации разницы двух орбит разных энергий с учетом конечной разрешимости датчиков положения пучка. Из уравнения движения было получено, что в случае глобальной коррекции, после минимизации разностной траектории

среднеквадратичное остаточное отклонение в линейных ускорителях определяется формулой

$$y_{rms}^{(c)} = \frac{1}{4\sqrt{6}} \frac{E_1}{\Delta E} \sigma_r \mu_1^2 n^{3/2} \left(1 + 3 \frac{\gamma_0}{\gamma_n}\right)^{1/2}$$

а в ондуляторных секциях

$$y_{rms}^{(c)} = \frac{1}{2\sqrt{6}} \frac{E_1}{\Delta E} \sigma_r \mu^2 n^{3/2}$$

где n - число квадрупольных линз, σ_r - среднеквадратичная ошибка измерений датчиков положения пучка, $\Delta E = E_1 - E_2$, E_1 и E_2 - энергии электронного пучка. Из этой формулы следует, что ошибки определения орбиты пучка при глобальной коррекции аккумулируются вдоль ускорителя и, как следствие, скорректированная орбита, пропорциональная σ_r , испытывает поперечный дрейф вдоль ускорителя и возрастает как с числом квадрупольных линз n как $n^{3/2}$.

В конце этой главы предложен новый метод коррекции (метод многоэтапной коррекции). В рамках этого метода предлагается разделить ускоритель на нескольких частей и в каждой части произвести индивидуальную минимизацию разностной орбиты. Было показано, что в этом случае

$$y_{rms}^{(m)} = \frac{1}{4\sqrt{6}} \frac{E_1}{\Delta E} \sigma_r \mu_1^2 \frac{n^{3/2}}{M} \left(4 - \frac{3}{M} \ln \frac{\gamma_M}{\gamma_0}\right)^{1/2}$$

где M - число частей на которые разделен ускоритель, γ_M - энергия электронного пучка в конце M -ой секции. И как видно, при этом дрейф орбиты вдоль ускорителя подавляется в M раз. В предельном случае, когда коррекция производится после каждого квадрупольного ($M = n$), получается

$$y_{rms}^{(m)} = \frac{1}{4\sqrt{6}} \frac{E_1}{\Delta E} \sigma_r \mu_1^2 n^{1/2} \left(4 - \frac{3}{n} \ln \frac{\gamma_n}{\gamma_0}\right)^{1/2}$$

Из этой формулы следует, что скорректированная таким образом орбита зависит от числа квадрупольных уже как $n^{1/2}$. Для ондуляторной секции имеем

$$y_{rms}^{(m)} = \frac{1}{2\sqrt{6}} \frac{E_1}{\Delta E} \sigma_r \mu^2 n_q^{3/2} m^{1/2}$$

На рис. 7 дано сравнение среднеквадратичного отклонения орбиты для возмущенной траектории, после глобальной коррекции, после многоэтапной коррекции и для случая когда $M = n$ вдоль линейного ускорителя. Результаты приведены для Европейского рентгеновского ЛСЭ.

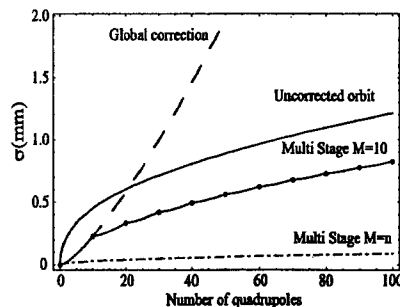


Рис. 7. Среднеквадратическое отклонение орбиты вдоль линейного ускорителя Европейского рентгеновского ЛСЭ.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

- Исследованы процесс генерации СЛСЭ и проведен сравнительный анализ параметров излучения (мощность и длина насыщения) для различных фокусирующих систем в ондуляторной секции ускорителя [1, 2].
- Предложена и исследована новая система фокусировки - метод центральной фокусировки-, позволяющий достичь максимальной мощности излучения при реальных допусках на магнитную фокусирующую систему [3].
- Исследована зависимость параметров излучения СЛСЭ от энергии, эмиттанса, энергетического разброса и тока электронного пучка, а также заряда ступки. Рассмотрен и исследован новый режим Европейского СЛСЭ с малым зарядом электронных ступок [2, 4, 5].
- Исследовано влияние смещения квадрупольных магнитов на мощность и длину насыщения излучения СЛСЭ для различных фокусирующих систем. Получена зависимость параметров излучения от допусков на магнитную систему и исследована коррекция орбиты электронного пучка с учетом конечной разрешимости датчиков положения пучка [6].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. V. Khachatryan, V. Sahakyan, A. Tarloyan, V. Tsakanov, W. Decking, *Optimization of the Focusing Lattice for European XFEL*, Proceedings of European Particle Accelerator Conference EPAC'08, Genoa, Italy, pp. 97-99 (2008).
2. V. Sahakyan, V. Khachatryan, A. Tarloyan, V. Tsakanov, *Impact of Focussing Lattice to European XFEL SASE1 Performance*, Proceedings of International Free Electron Laser Conference FEL'09, Liverpool, UK, pp. 596-598 (2009).

3. В. В. Саакян, *Исследование Характеристик Лазера на Свободных Электронах с Внешней Фокусировкой*, Известия НАН Армении, Физика, т. 46, N4, с. 249-255 (2011).
4. V. Khachatryan, V. Sahakyan, A. Tarloyan, V. Tsakanov, T. Garvey, S. Reiche, *PSI-XFEL Sensitivity to Beam Main Parameters and Undulator Focusing*, Proceedings of Particle Accelerator Conference PAC'09, Vancouver, Canada, pp. 1208-1210 (2009).
5. V. Sahakyan, A. Tarloyan, W. Decking, *Low charge electron beam SASE parameter study for European XFEL*, Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC'10, Kyoto, Japan, pp. 2144-2146 (2010).
6. V. Sahakyan, W. Decking, V. Khachatryan, A. Tarloyan, V. Tsakanov, *Numerical study of focusing lattice impact on the saturation length and power in SASE FEL*, Journal of Instrumentation, 6, P11009, 10 pages (2011).

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկայի և արագացուցչային տեխնիկայի բնագավառի ժամանակակից հետազոտությունների կարևորագույն ուղղություններից է մեծ պայծառությամբ հզոր ռենտգենյան ճառագայթման գեներացումը սպոնտան ինքնաուժեղացվող ազատ էլեկտրոնային լազերների (ԱԷԼ) միջոցով: Էլեկտրոնային և ֆոտոնային փնջերի անկյունային և տարածական բնութագրերի համապատասխանեցումը անդույսատորի սեկցիայում ու այդ փնջերի ռեզոնանսային փոխազդեցության ապահովումը, որը հանգեցնում է թանձրուկներում միկրոթանձրուկային կառուցվածքի ձևավորմանը, հանդիսանում են սպոնտան ինքնաուժեղացվող ԱԷԼ պրոցեսի գործարկման հիմնական պայմանները: Էլեկտրոնային և ֆոտոնային փնջերի փոխազդեցության ապահովման համար երկար անդույսատորային սեկցիայում անհրաժեշտ է կիրառել էլեկտրոնային փնջի ֆոկուսացում: Առենախոսությունը նվիրված է արտաքին ֆոկուսացումով ռենտգենյան ԱԷԼ ուսումնասիրությանը:

Սպոնտան ինքնաուժեղացվող ԱԷԼ ճառագայթման պայծառությունը, հազեցման հզորությունը և երկարությունը որոշվում են արտաքին ֆոկուսացնող համակարգի պարամետրերով: Հետևաբար արտաքին ֆոկուսացնող համակարգի ազդեցության գնահատումը ԱԷԼ բնութագրերի վրա հանդիսանում է կարևոր խնդիր: Հետազոտվել է ԱԷԼ ճառագայթման հատկությունների վրա տարբեր արտաքին ֆոկուսացման համակարգերի ազդեցությունը, ԱԷԼ համար առաջարկվել և ուսումնասիրվել է էլեկտրոնային փնջի ֆոկուսացման նոր՝ կենտրոնական ֆոկուսացման եղանակ:

Սպոնտան ինքնաուժեղացվող ԱԷԼ պրոցեսի վրա բացասական ազդեցություն ունի էլեկտրոնային փնջի հետագծի խտությունը, որը պայմանավորված է ֆոկուսացնող մագնիսների (քառաբևեռ մագնիսների) շեղումներով: Ֆոկուսացնող մագնիսների շեղումներով պայմանավորված երևույթների ուսումնասիրությունը կարևոր խնդիր է, քանի որ իրականությունում ֆոկուսացնող մագնիսների տեղադրման սխալները անխուսափելի են: Ուսումնասիրվել է ԱԷԼ ճառագայթման բնութագրերի վրա ֆոկուսացնող մագնիսների մինչև 5 մկմ շեղումների ազդեցությունը՝ տարբեր արտաքին ֆոկուսացման համակարգերի դեպքերում: Ստացվել է անալիտիկ արտահայտություն, որը թույլ է տալիս հաշվել սպոնտան ինքնաուժեղացվող ԱԷԼ ճառագայթման հազեցման հզորության վրա ֆոկուսացնող մագնիսների շեղումների ազդեցությունը: Ցույց է տրվել, որ առաջարկված կենտրոնական ֆոկուսացման եղանակի դեպքում ֆոկուսացնող մագնիսների շեղումները ունեն ավելի քիչ ազդեցություն ԱԷԼ ճառագայթման բնութագրերի (հազեցման հզորության և երկարության) վրա և այս տարբերակը կարող է հանդիսանալ որպես հիմնական ֆոկուսացման եղանակ ապագայում նախագծվող սպոնտան ինքնաուժեղացվող ԱԷԼ համար:

Սպոնտան ինքնաուժեղացվող ԱԷԼ պրոցեսի համար էլեկտրոնային փնջի պարամետրերի վրա դրվում են խիստ սահմանափակումներ, մասվավորապես

անհաժեշտ է, որ էլեկտրոնային փնջի էմիտտանսը և էներգիայի հարաբերական ցրվածությունը լինեն փոքր, իսկ էլեկտրոնային թանձրուկները ունենան մեծ պիկային հոսանք: Այս պարամետրերը հիմնականում որոշվում են ԱԷԼ համար նախատեսված զծային արագացուցիչում, ընդ որում արագացուցիչի աշխատանքի ընթացքում դրանք կարող են փոփոխվել իրենց նախագծային արժեքներից: Հետևաբար, կարևոր է ԱԷԼ ճառագայթման բնութագրերի կախվածության ուսումնասիրությունը էլեկտրոնային փնջի պարամետրերից: Հետազոտվել են էլեկտրոնային փնջի պարամետրերի, այն է՝ էներգիայի, էմիտտանսի, էներգիայի ցրվածության և պիկային հոսանքի փոփոխության ազդեցությունը ԱԷԼ ճառագայթման հատկությունների վրա: Հաշվարկները կատարվել են «Շվրոպական ռենտգենյան ազատ էլեկտրոնային լազեր» և «Շվեյցարական ազատ էլեկտրոնային լազեր» նախագծերի համար:

Ուսումնասիրվել է սպոնտան ինքնաուժեղացվող ԱԷԼ պրոցեսը փոքր լիցքով (20 պԿ) էլեկտրոնային թանձրուկների դեպքում՝ «Շվրոպական ռենտգենյան ազատ էլեկտրոնային լազեր» նախագծի համար: Փոքր լիցքով թանձրուկներով աշխատանքային ռեժիմի առավելությունը կայանում է հետևյալում. 1) էլեկտրոնային թանձրուկի լիցքերի փոքրացումը հանգեցնում է տարածական լիցքի ազդեցության փոքրացմանը, արդյունքում՝ էլեկտրոնային «թնդանոթում» հնարավոր է գեներացնել ավելի փոքր էմիտտանսով թանձրուկներ, 2) զգալիորեն կարելի է փոքրացնել թանձրուկի երկարությունը, արդյունքում՝ կարելի է ստանալ կարճ ճառագայթման (մի քանի ֆվ տևողությամբ) իմպուլսեր, 3) թանձրուկի լիցքով պայմանավորված և ԱԷԼ պրոցեսի վրա բացասական ազդեցություն ունեցող երևույթները դառնում են պակաս զգալի: Քննարկվել է 20 պԿ լիցքով թանձրուկների դեպքը և այդ աշխատանքային ռեժիմի համար հաշվարկվել են էլեկտրոնային փնջի օպտիմալ պարամետրերը և ԱԷԼ ճառագայթման բնութագրեր:

Արագացուցիչում, իրականում, մասնիկների հետագծերը խտորված են, ինչը պայմանավորված է ինչպես արագացուցիչի էլեմենտների տեղադրման անխուսափելի սխալներով, այնպես էլ մագնիսական դաշտի սխալներով: Էլեկտրոնային փնջի հետագծի ուղղումը կարևոր խնդիր է հատկապես սպոնտան ինքնաուժեղացվող ԱԷԼ-ների համար, երբ հետագծի առավելագույն թույլատրելի շեղումները մի քանի միկրոմետրի կարգի են: Ուսումնասիրվել է էլեկտրոնային փնջի դիրքը գրանցող մոնիտորների գրանցման ճշտությունների ներդրումը հետագծի առանց դիսպերսիոն ուղղման եղանակում: Հաշվարկվել է էլեկտրոնային փնջի հետագծի ուղղումից հետո հետագծի մնացորդային միջին քառակուսային շեղումը: Առաջարկվել է էլեկտրոնային փնջի հետագծի ուղղման նոր եղանակ:

SUMMARY

One of the main tasks of current research in the field of beam physics and accelerator technology is the generation of powerful, high brightness X-ray Free Electron Laser (FEL) radiation via the Self Amplified Spontaneous Emission (SASE) process. The adjustment of the electron and photon beams angular and transverse phase-space characteristics along the undulator line and the resonant interaction of the electron beam with co-propagating radiation leading to the formation of microbunch structure are of basic conditions to drive the SASE FEL process. To ensure the effective interaction of electron beam with co-propagating radiation the electron beam focusing should be applied over long undulator section to maintain the small size of electron beam. The electron beam focusing is especially important for X-ray SASE FELs for which the required undulator section length may reach several hundreds of meters. This thesis is devoted to the study of X-ray FEL with external focusing.

Since the electron beam size and divergence are determined by the focusing lattice parameters, SASE FEL performances (brightness, saturation power and length) strongly depend on the focusing lattice parameters. Therefore, the choice of the electron beam focusing method and focusing lattice parameters are important issue for SASE FELs. The influence of different focusing lattices on FEL radiation parameters is investigated, and the new non-standard focusing system with central focusing doublet has been proposed and studied.

In the real facility the SASE FEL process can degrade due to electron beam orbit distortion caused by quadrupole misalignments in undulator section. The studies of the effects associated with the quadrupole misalignments are important because for the real case the quadrupole misalignments are unavoidable. The influence of quadrupole magnets misalignments up to $5 \mu\text{m}$ on the SASE FEL radiation parameters are studied for different external focusing lattices. The analytical formula has been derived for the calculation of the saturation power reduction caused by the quadrupole misalignments. It is shown that the option of central focusing doublet provides a better performance for SASE FEL, namely the impact of quadrupole misalignments on both saturation power and length becomes less significant and can be considered as a potential candidate for focusing lattice arrangement in future SASE FEL design.

For the X-ray SASE FELs there are strict requirements on the electron beam parameters: low emittance and relative energy spread, and high peak current. These parameters are mainly determined by the injector system and bunch compressors in the FEL driving linac. In real accelerators they can differ from their design values. The determination of acceptable range of the beam main parameters is an important issue both for the facility design study and reliable facility operation. The dependence of SASE FEL radiation parameters on the electron beam main parameters has been investigated numerically for wide range of electron beam energy, emittance, energy spread and peak

current. The numerical simulations are performed for the European XFEL and SwissFEL projects.

The new operation mode for European XFEL with low bunch charge (20 pC) has been studied. The advantages of low bunch charge operation mode are follows: *i)* the decrease of bunch charge leads to reduction of space charge effects and, as a result, smaller emittance can be generated in the gun; *ii)* the bunch length can be significantly reduced and, as a result, the short radiation pulses of a few fs order can be obtained; *iii)* the effects which are conditioned by bunch charge and have degrading influence on the FEL amplification process become less significant. The case of bunch charge 20 pC has been considered and for this operation mode the optimal parameters of electron beam and the radiation parameters have been calculated.

The potential of existing and future linear accelerators depends on achieving very tight alignment and steering tolerances. For the real accelerator the electron beam trajectory is disturbed because of the accelerator components alignment and magnetic field errors. The electron beam orbit correction is an important issue especially for the SASE FELs, for which the orbit distortion must be less than a few micrometers. The contribution of the beam position monitors precision errors on the dispersion free trajectory correction method is studied. The analytical evaluation of rms residual drift of the beam orbit is given when the beam position monitors precision errors are taken into account. A new method of the electron beam orbit correction is proposed.

