

LXXII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯДРО–2022:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

ИСТОЧНИКИ СИНХРОТРОННОГО И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В НАУЧНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ

Вариант лабораторного комптоновского источника НИЯУ МИФИ

В. С. Дюбков,^{1,*} С. М. Полозов,^{1,†} В. И. Ращиков^{1,‡}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
институт Лаплаз, кафедра электрофизических установок
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

(Поступила в редакцию 29.09.2022; после доработки 19.10.2022; принята к публикации 31.10.2022)

Создание сравнительно недорогих и компактных (в масштабе нескольких метров) источников монохроматического рентгеновского излучения возможно с использованием обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на пучке электронов. Такие источники могут быть использованы в материаловедении при создании новых материалов, диагностике наноструктур на атомарном уровне, в исследованиях биосистем, в медицине и фармакологии, в физике и химии быстропротекающих процессов горения и взрыва. Создание источника рентгеновского излучения возможно на основе компактного накопительного канала с инжекцией электронов из нормально проводящего линейного ускорителя с фотопушкой, работающего в 3 ГГц частотном диапазоне. Использование магнитного накопительного канала позволяет получить высокую яркость источника, сравнительно высокую среднюю интенсивность генерируемых фотонов при заданных параметрах электронного и лазерного импульсов, регулировку энергии генерируемых фотонов в широком диапазоне, высокую степень их монохроматичности и когерентности. Для генерации фотонного потока с перестраиваемой энергией в интервале 5–45 кэВ линейный ускоритель должен обладать возможностью регулировки энергии электронных пучков в диапазоне 20–60 МэВ. В работе представлены результаты, полученные при проектировании линейного ускорителя и компактного накопительного кольцевого канала для источника рентгеновского излучения с энергией фотонов в диапазоне энергий 5–45 кэВ и исследовании возможных неустойчивостей движения пикосекундных релятивистских электронных сгустков.

PACS: 02.60.Сь, 02.10.Уп, 07.85.Фв, 41.85.Лс. УДК: 537.87, 537.533.79, 51.74

Ключевые слова: обратное комптоновское рассеяние, фотон, электронный сгусток, ускоритель, накопитель, динамика пучка, излучение.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2310403](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2310403)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка компактных схем генерации излучения в диапазоне энергий фотонов 5–45 кэВ для кольцевых и линейных ускорителей ведется как в крупных научных центрах, так и в отдельных лабораториях. Такие схемы генерации востребованы в области материаловедения, включая исследования нано- и биосистем (динамические процессы в живых клетках), медицины и фармакологии (разработка и создание новых лекарств), физики и химии быстропротекающих процессов. Однако современные синхротроны и лазеры на свободных электронах — это уникальные крупногабаритные, с размерами от сотен метров до километров, и дорогостоящие установки, локализованные в специальных центрах, вследствие чего проведение исследований с помощью генерируемого фотон-

ного излучения возможно только там, а не в обычных исследовательских лабораториях, что ограничивает их широкую доступность. Для того, чтобы сделать фотонные источники доступными для большего числа потребителей путем снижения их стоимости и габаритов (с линейны масштабом не более нескольких метров) может быть использован один из нескольких механизмов генерации фотонов, к числу которых относится ондуляторное излучение, излучение при каналировании, излучение Смита–Парселла, когерентное тормозное излучение, черенковское излучение, способное давать чрезвычайно узкие и яркие линии спектра в рентгеновском диапазоне, и другие. В число таких типов излучения входит и рассеяние фотонов на релятивистских электронных пучках с преобразованием частоты фотонов в жесткую часть спектра с коэффициентом конверсии, пропорциональным квадрату Лоренц-фактора. Этот эффект называется обратным томсоновским рассеянием, или, при учете отдачи в квантовом режиме, обратным комптоновским рассеянием. Механизм обратного комптоновского рассеяния является перспективным инструментом для генерации рентгеновского излучения

* vsdyubkov@mephi.ru

† smpolozov@mephi.ru

‡ virashchikov@mephi.ru

в широком частотном диапазоне наряду с уже существующими источниками синхротронного излучения третьего и четвертого поколений. Именно на основе этого типа излучения может быть создан потенциально самый яркий и интенсивный источник с величиной яркости, по некоторым оценкам, сравнимой с современными синхротронами. Исследования в данном направлении ведутся в США, Японии, Германии и других странах.

Одно из главных преимуществ генерации рентгеновских фотонов на основе комптоновского рассеяния состоит в том, что для этого требуются электроны с энергией в несколько десятков мегаэлектронвольт. На сегодняшний день достигнутая интенсивность фотонов комптоновского источника далека от его потенциальной возможности: наибольшее гарантированно достигнутое число фотонов в импульсе в несколько сотен тысяч раз меньше теоретически предсказанного. Среди причин, не позволяющих до сих пор реализовать данный источник с наилучшими характеристиками, можно отметить короткое время взаимодействия электронного и фотонного пучков, ограничение на мощность лазера, обусловленное возникновением побочных явлений, некогерентность излучения, расходимость и разброс по энергиям электронного и фотонного пучков.

В настоящей работе предлагается создание генератора рентгеновского излучения в световом ондуляторе в диапазоне энергий 5–45 кэВ на основе обратного комптоновского рассеяния на базе компактного синхротрона, работающего в режиме накопления, с инжекцией электронов при полной энергии (top-up инжекция) из нормально проводящего линейного ускорителя 3 ГГц диапазона с перестраиваемой энергией 20–60 МэВ, что предполагает достижение лучших характеристик электронного пучка. Подобная схема имеет распространение в мировой практике и впервые, вероятно, была предложена в работе [1]. На сегодняшний день существует коммерчески реализуемый «комптоновский» источник Lyncan Compact Light Source (США), накопительное кольцо которого имеет магнитную структуру типа DBA (double-bend achromat) [2, 3] с энергией электронного пучка от 7 до 35 МэВ и генерируемым полным фотонным потоком 10^{11} фотонов/с. Во Франции реализуется технический проект ThomX [4], направленный на генерацию фотонов с энергией 50–90 кэВ и потоком в жестком диапазоне $10^{11} - 10^{13}$ фотонов/с на основе обратного комптоновского рассеяния. В работах [5, 6] предложен вариант накопительного кольца проекта NESTOR для генерации комптоновских фотонов в диапазоне 20–80 кэВ периметром 12 м на энергию электронов 20–100 МэВ. Также стоит отметить проект LEXG источника фотонов на энергию 20–45 кэВ [7].

1. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ-ИНЖЕКТОР

В НИЯУ МИФИ ведётся разработка компактного источника излучения на основе эффекта обратного комптоновского рассеяния [8, 9], который не только станет исследовательской установкой, но и войдет в состав учебно-научной инфраструктуры МИФИ. Предполагается, что ускорительная часть источника будет состоять из линейного ускорителя электронов с фотопушкой (ЛУЭ) и магнитного кольцевого канала (накопительного синхротрона).

В качестве инжектора электронных пучков с эмиттансом ≤ 100 нм·рад и длительностью порядка нескольких пикосекунд рассматривается линейный ускоритель на энергию электронов, соответствующую энергии накопления в кольцевом магнитном канале (накопительном синхротроне), с возможностью перестройки энергии электронов в интервале энергий 20–60 МэВ. Генерация обратного комптоновского рассеяния на линейном ускорителе и других типов когерентного излучения (черенковского, переходного, ондуляторного и т.д.) в том числе может быть произведена в рассматриваемой схеме и с использованием только линейного ускорителя (линейная схема). ЛУЭ будет состоять из 3.6-ячеечной фотопушки на энергию около 10 МэВ (рис. 1) длиной около 45 см и регулярной секции на стоячей волне на основе бипериодической ускоряющей структуры (БУС) длиной 210 см с изменяемым приростом энергии на единицу длины за счет регулировки мощности СВЧ-питания регулярной секции. Разработанная модель ЛУЭ обеспечивает формирование электронных пучков с требуемыми для источника комптоновского излучения параметрами. Основные параметры фотопушки представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры фотопушки

Параметр	Значение
Длина волны, см	10.0
Вид колебаний	π
Число ускоряющих ячеек	4 (3.6)
Длина секции, см	45
Амплитуда ускоряющего поля, кВ/см	600
Энергия пучка, МэВ	10
Шунтовое сопротивление, МОм	35
Собственная добротность	16000
Коэффициент токопрохождения, %	> 93
Продольные потери частиц, %	< 7

Для питания регулярной секции ЛУЭ длиной ~ 2 м при напряженности поля 600 кВ/см потребуется клистрон мощностью около 45 МВт. Поскольку на данный момент такие клистроны в Российской Федерации серийно не производятся, рассматривается возможность использования серийных клистронов меньшей мощности. Одним из возможных вари-

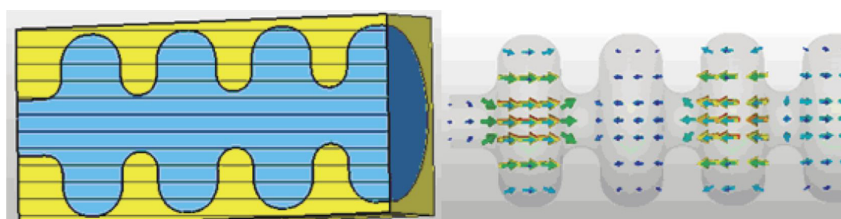


Рис. 1. Модель фотопушки на основе 3.6-ячеечной структуры на стоячей волне и распределение поля в ней, вид колебаний π , катод на рисунке находится справа

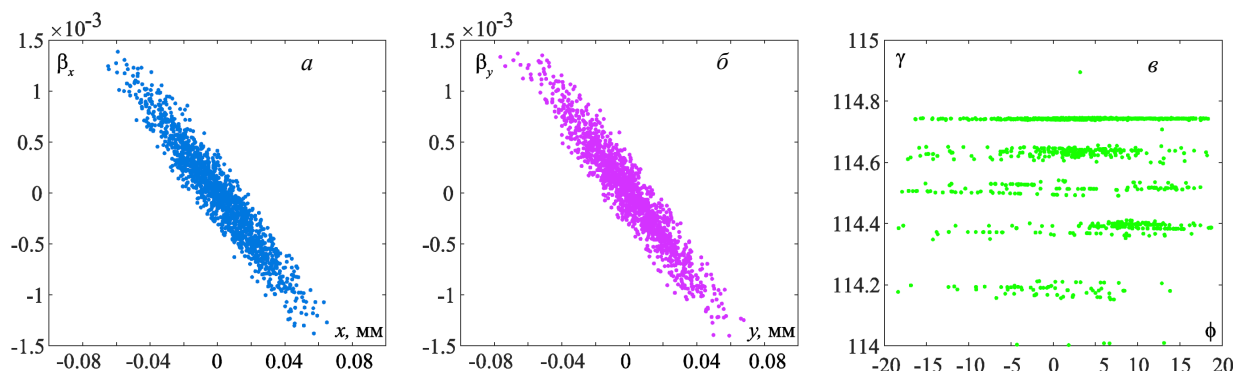


Рис. 2. Фазовые портреты пучка в конце БУС: *a* — горизонтальный фазовый портрет, *b* — вертикальный фазовый портрет, *в* — продольный фазовый портрет

Таблица 2. Основные параметры БУС

Параметр	Значение
Длина волны, см	10.0
Вид колебаний	$\pi/2$
Число ускоряющих ячеек	40
Длина секции, см	210
Амплитуда ускоряющего поля, кВ/см	100–440
Энергия инжекции, МэВ	9.6
Выходная энергия, МэВ	20–60
Шунтовое сопротивление, МОм/м	95
Коэффициент токопрохождения, %	100
Энергетический спектр на выходе, %	0.45–0.30
Поперечный эмиттанс, нм·рад	< 100

антов является клистрон КИУ-56 с рабочей частотой 2856 МГц и импульсной мощностью до 25 МВт при частоте повторения импульсов до 300 Гц производства НПП «Исток». Мощности 20–25 МВт достаточно для создания в регулярной секции поля с напряженностью 400–450 кВ/см, что позволяет увеличить энергию пучка электронов на 45–50 МэВ и вполне удовлетворить требования к параметрам источника излучения.

Выполнено моделирование динамики электронов в разработанном ЛУЭ и исследование электродинамических характеристик фотопушки и регулярной секции ЛУЭ. Напряженность поля в фотопушке составляет 600 кВ/см, а в регулярной секции БУС — 100–450 кВ/см. Основные параметры БУС

представлены в табл. 2. При фазе инжекции в регулярную секцию, равной 1.8 рад, амплитуде напряженности поля на оси 400 кВ/см энергия на выходе составляет 57.3 МэВ, ширина энергетического спектра пучка не превышает 0.09% (4RMS), поперечный геометрический эмиттанс пучка составляет около 75 нм·рад, заряд электронного пучка 250 пКл. Фазовые портреты пучка на выходе ускорителя представлены на рис. 2, *a*, *b* и *в*. Для увеличения энергии сгустка до 60 МэВ потребуются повысить амплитуду ускоряющего поля в регулярной секции до 430–440 кВ/см, что, при мощности клистрона 25 МВт, близко к пределу и потребует очень высокого качества изготовления секции (измеренное значение собственной добротности секции не должно быть менее 90 % от расчетного) и волноводного тракта.

2. ДИНАМИКА ПИКΟΣЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ В НАКОПИТЕЛЕ

2.1. Магнитная структура кольцевого канала накопителя

Для получения поперечного размера электронного пучка $\sigma_{rms} = 170$ мкм в точке взаимодействия с лазерным излучением при значении поперечного геометрического эмиттанса пучка из линейного ускорителя $\varepsilon_{x,rms} \leq 100$ нм·рад в соответствии с $\beta_x = \frac{\sigma_{x,rms}^2}{\varepsilon_{x,rms}}$ значение горизонтальной бета-функ-

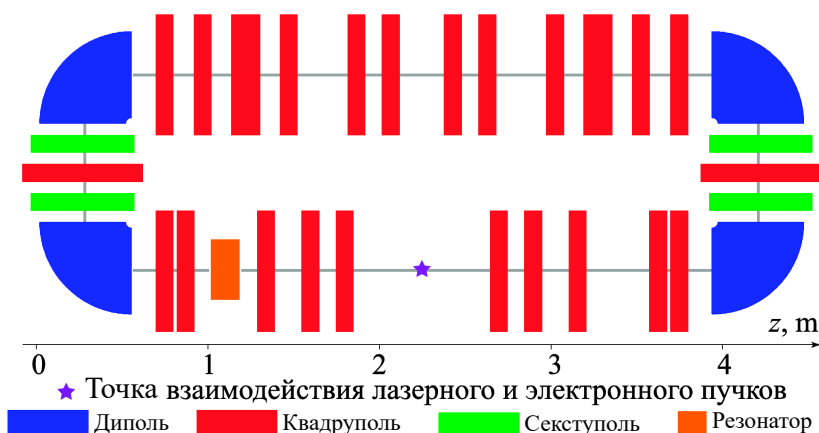


Рис. 3. Вид магнитной структуры накопительного канала

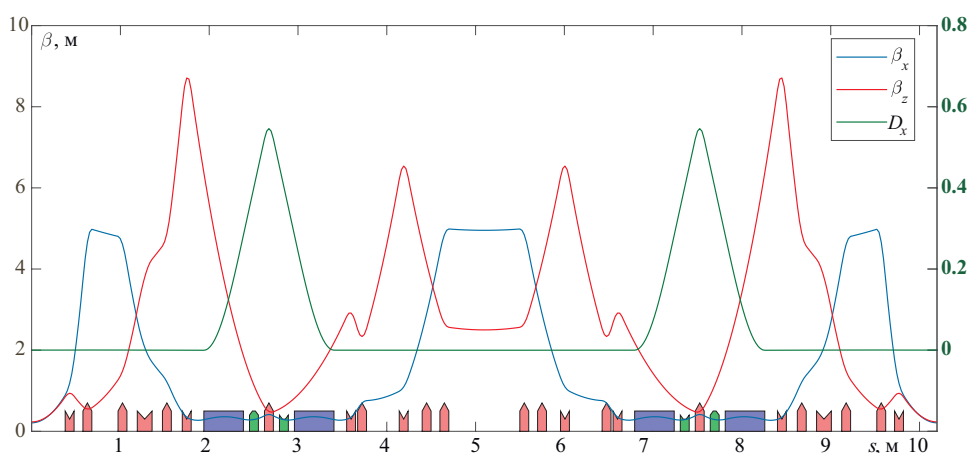


Рис. 4. Оптические функции накопительного кольцевого канала

ции накопительного кольца в точке взаимодействия должна быть около 30 см. Близкое к такому значению должна иметь вертикальная бета-функция накопительного кольца β_y в точке взаимодействия для случая пучка круглого поперечного сечения. Для минимизации поперечных размеров электронного пучка в точке взаимодействия дисперсионная функция накопителя D_x должна иметь нулевое значение, т.к.

$$\sigma_{x,rms}^2 = \beta_x \varepsilon_{x,rms} + D_x^2 [(p - p_0) / p_0],$$

где p — импульс электронного пучка, p_0 — равновесное значение импульса электронов, на которое рассчитан накопитель. Кроме того, для большей вариативности расположения лазера и эффективности взаимодействия электронов с лазерным излучением длина прямолинейного промежутка накопительного кольца должна быть возможно большей.

В результате произведённых расчётов и исходя из требований к параметрам электронного пучка в месте его встречи с потоком лазерных фотонов предложен вариант магнитной структуры кольца-накопителя (рис. 3), обеспечивающий приемлемые значения динамической апертуры и энергетическо-

го акцептанса, определяющих время жизни электронного пучка в нем.

Для коррекции натуральной хроматичности в магнитной структуре накопителя типа DBA (двойной ахроматический поворот) предусмотрены две пары секступольных линз. Коррекция хроматичности необходима ввиду конверсии разброса частиц по импульсам в разброс частиц по продольной координате, что необходимо учитывать при расчёте эффекта Тушека. Кроме того, для контроля продольного размера электронного сгустка в канале предполагается разместить один высокочастотный резонатор. Основные параметры накопительного синхротрона при выключенных секступольных линзах представлены в табл. 3.

На рис. 4 представлен график зависимости оптических функций канала-накопителя. Значения горизонтальной β_x и вертикальной β_y функций в точке взаимодействия с лазерным импульсом составляют 23 см и параболически возрастают при удалении от неё, но не превышают 30 см на длине 30 см. Максимальное значение β_x составляет 4.987 м, а β_y — 8.681 м, что важно при проектировании вакуумных камер накопителя.

На рис. 5 и 6 представлены результаты расчёта

Таблица 3. Основные параметры канала-накопителя

Параметр	Значение
Периметр, м	10.197
Энергия, МэВ	20–60
Равновесный горизонтальный эмиттанс, нм·рад	9
Относительный энергетический разброс, %	0.009
Коэффициент пространственного расширения орбит	0.0634
Равновесная длина электронного сгустка при нулевом токе, мм	0.13
Приведенные бетатронные частоты (горизонтальная, вертикальная)	2.802, 1.232
Натуральная хроматичность (горизонтальная, вертикальная)	-3.8, -3.5
Потери энергии электронным сгустком за один оборот, эВ	0.05–4.04
Амплитудное значение ВЧ напряжения на резонаторе, кВ	300
Рабочая частота ВЧ резонатора, ГГц	3
Кратность	102

динамической апертуры для нескольких значений хроматичности и энергетического акцептанса (без коррекции хроматичности). Отрицательные значения горизонтальной (ξ_x) и вертикальной хроматичностей (ξ_y) не приводят к каким-либо неустойчивостям за время циркуляции сгустка в канале для предполагаемого односгусткового режима работы канала-накопителя (см., например, [10]). Так, из рис. 5 видно, что при коррекции натуральной хроматичности происходит быстрое уменьшение динамической апертуры, равно как и энергетического акцептанса. Расчеты выполнены с помощью пакета АТ [11].

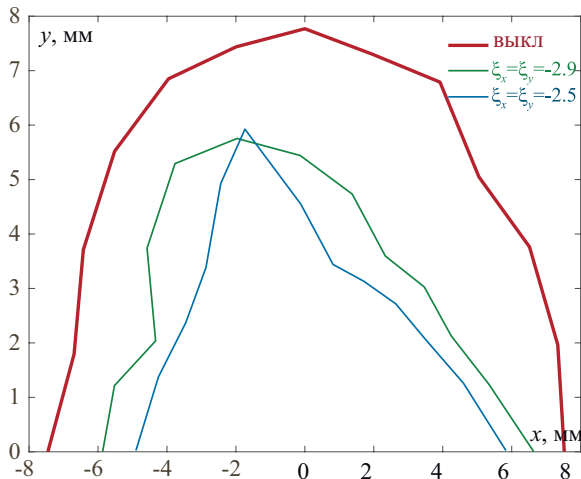


Рис. 5. Динамическая апертура

2.2. Анализ динамики пикосекундных электронных сгустков

Анализ динамики электронного пучка в накопительном кольце с заданной магнитной структурой выполнен с использованием пакета программ Elegant [12]. Расчет проводился без учета наведен-

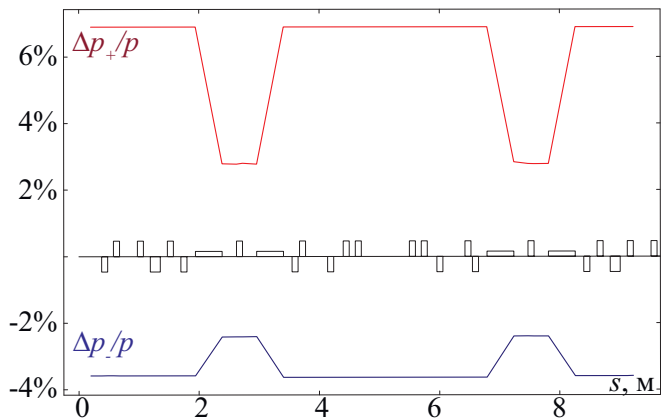


Рис. 6. Энергетический акцептанс

ных пучком полей в стенках канала. Отметим, что радиационное затухание в диапазоне энергий электронного сгустка 20–60 МэВ пренебрежимо мало (см. табл. 3). Заряд пучка при расчетах принят равным 300 пКл. На рис. 7 представлены изменения среднеквадратических значений длины пучка электронов с энергией 60 МэВ (σ_s) и разброса по энергии (σ_E) во времени, которые обусловлены взаимодействием с ВЧ полем резонатора. Из представленных на рис. 7 результатов видно, что σ_s и σ_E за 1 мс (соответствует порядка 40000 оборотам) принимают равновесные значения 0.8 мм и 0.055% соответственно.

Оценка влияния внутрипучкового рассеяния на величину горизонтального эмиттанса, среднеквадратических значений разброса частиц по энергии внутри сгустка и длины сгустка в зависимости от его заряда представлены на рис. 8, а, б, в соответственно. Время установления равновесного эмиттанса составило 200 мс. Видно, что с ростом заряда в электронном пучке его эмиттанс увеличивается, что может послужить препятствием для дальнейшей циркуляции пучка в заданном канале при больших значениях заряда. Однако внутрипучковое рас-

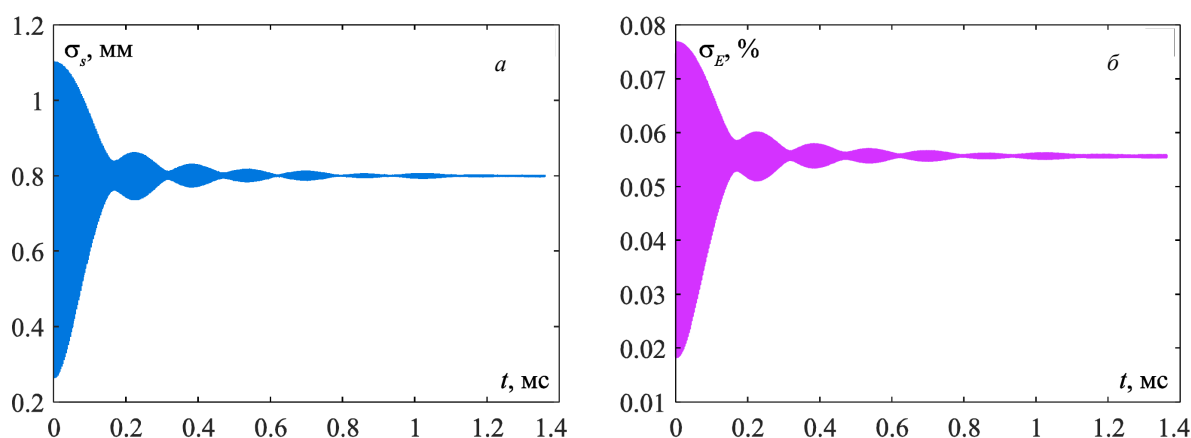


Рис. 7. Среднеквадратические значения длины сгустка (а) и энергетического разброса (б) как функции времени

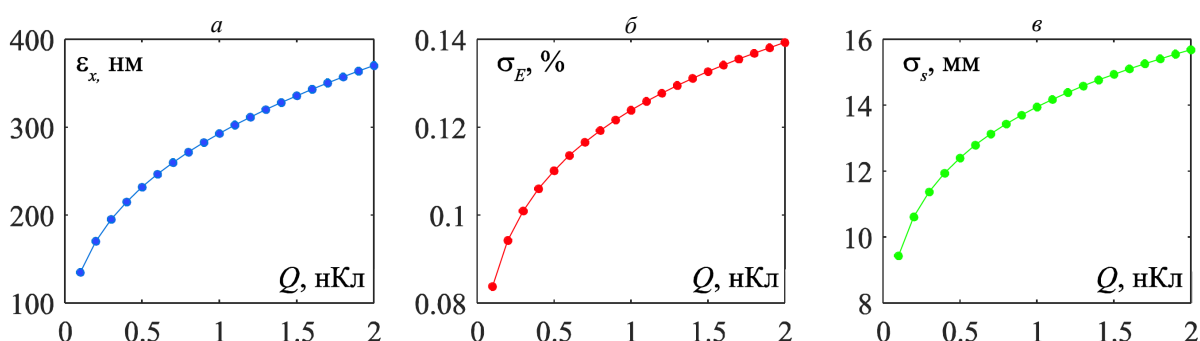


Рис. 8. Изменение вследствие внутрипучкового рассеяния горизонтального эмиттанса пучка (а), среднеквадратических энергетического разброса электронов в сгустке (б) и длины сгустка (в) от величины заряда сгустка

сеяние, наряду с влиянием наведенных сгустком полей (микроволновая неустойчивость в орбитальном направлении его движения), приводит к удлинению сгустка, а, следовательно, к уменьшению плотности заряда в нем, что частично ослабляет вызванный внутрипучковым рассеянием рост эмиттанса.

Одним из основных процессов, определяющих время жизни сгустка в кольцевых установках, является однократный эффект Тушека. На рис. 9 представлен результат расчета времени жизни электронного пучка в зависимости от величины его заряда. Видно, что при необходимом для работы установки заряде сгустка 300 пКл время его жизни оказывается приемлемым.

Предварительная оценка порога микроволновой неустойчивости, выполненная с использованием масштабированного наведенного поля установок с подобной структурой кольцевого магнитного канала, дает значение предельного заряда пучка, равное 1.5 нКл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В НИЯУ МИФИ ведётся разработка фотонного источника на основе эффекта обратного рассеяния Комптона. Одним из перспективных вариантов та-

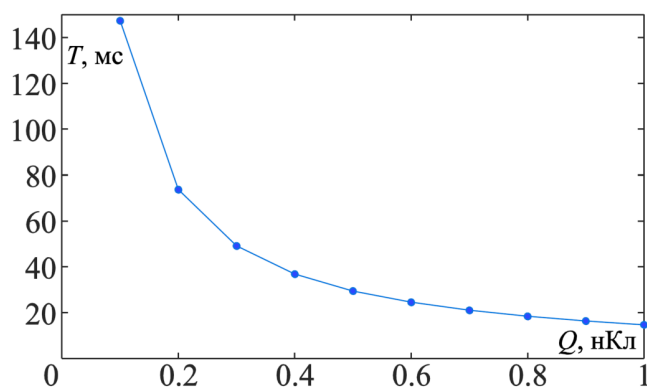


Рис. 9. Время жизни сгустка в накопителе по Тушеку как функция его заряда

кого источника является малогабаритный ускорительно-накопительный комплекс на базе линейного электронного ускорителя и накопительного магнитного канала. Линейный ускоритель включает 3.6-ячеечную фотопушку на энергию около 10 МэВ и регулярную секцию на стоячей волне на основе БУС с регулируемым приростом энергии.

Магнитная структура компактного накопительного кольца на энергию 20–60 МэВ представляет собой классическую структуру двойного ахроматиче-

ского поворота. Результаты моделирования динамики пикосекундных сгустков в накопительном кольце показывают, что предложенный вариант магнитной структуры обеспечивает значение вертикальной бета-функции в точке взаимодействия сгустка с лазерным импульсом менее 30 см при нулевом значении дисперсионной функции. При периметре накопительного кольца 10.197 м и максимальной энергии электронов 60 МэВ частота обращения составляет 29.4 МГц, а коэффициент уплотнения орбит — 0.0634.

Исследование динамики сгустка в накопителе показало, что, как и ожидалось, внутрипучковое рас-

сеяние является одним из наиболее существенных эффектов, приводящим к росту поперечного эмиттанса пучка. Эффект Тушека ограничивает время жизни пучка в накопительном кольце и накладывает ограничение на его заряд. При необходимом заряде сгустка 300 пКл время жизни пучка составляет 50 мс. Порог микроволновой неустойчивости оказывается значительно выше. Для дальнейшего анализа неустойчивостей пучка выполняется построение импедансной модели кольцевого магнитного канала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-29-12036).

- [1] Huang Z., Ruth R. // SLAC-PUB-7556. September 1997, P. 11.
- [2] <https://lynceantech.com>.
- [3] Rifkin et al. // US patent 7277526 B2 (02.10.2007).
- [4] Variola A., Haissinski J., Loulergue A., Zomer F. et al. // *ThomX Technical Design Report*.
- [5] Gladkikh P., Karnaukhov I., Telegin Yu. et al. // *Proceedings of EPAC 2002. Paris, France 2002. P. 787*.
- [6] Gladkikh P. //
- [7] Bessonov E.G., Gorbunkov M.V., Kostryukov P.V. et al. // *J. Instrum.* 2009. 4. P07017.
- [8] Dyubkov V.S. et al. // *Proc. of IPAC'21. Campinas, Brazil. 2021. P. 186*.
- [9] Dyubkov V.S., Polozov S.M. // *Proc. of RuPAC 2021. Alushta, Russia. 2021. P. 277*.
- [10] Hertel N., Muller S.P., Nielsen J.S. Report 28-07-2009.
- [11] Rogers W. et al. *pyAT: A Python build of Accelerator Toolbox. in Proc. IPAC'17, Copenhagen, Denmark. May 2017. P. 3855*.
- [12] <https://ops.aps.anl.gov/cgi-bin/oagLog4.cgi?name=elegant.2021.3.0.tar.gz>

A Variant of the Laboratory Compton Source at the NRNU MEPhI

V. S. Dyubkov^a, S. M. Polozov^b, V. I. Rashchikov^c

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

Moscow, 115409, Russia

E-mail: ^avsdyubkov@mephi.ru, ^bsmpolozov@mephi.ru, ^cvirashchikov@mephi.ru

Designing relatively inexpensive and compact (on a scale of several meters) sources of monochromatic X-ray radiation is possible using Compton backscattering of laser photons on an electron beam. Such sources can be used in materials science when creating new material, for nanostructure diagnostics at the atomic level, in biosystems research, in medicine and pharmacology, and in the physics and chemistry of fast combustion and explosion processes. The design of an X-ray source is possible on the basis of a compact storage ring with electron injection from a normally conducting linear accelerator with a photogun operating in the 3 GHz frequency range. The use of a storage ring makes it possible to obtain a high brightness of the source, a relatively high average intensity of the generated photons for given parameters of the electron and laser pulses, regulation of the energy of the generated photons in a wide range, and a high degree of their monochromaticity and coherence. To generate a photon flux with a tunable energy in the range 5–45 keV, the linear accelerator (linac) must produce electron bunch with a tunable energy in the range 20–60 MeV. This paper presents the results obtained in the design of a linear accelerator and a compact storage ring for an X-ray source with a photon energy in the energy range of 5–45 keV and a study of possible instabilities in the motion of picosecond relativistic electron bunches.

PACS: 02.60.Cb, 02.10.Yn, 07.85.Fv, 41.85.Lc.

Keywords: inverse Compton scattering, photon, electron bunch, accelerator, storage ring, beam dynamics, radiation.

Received 29 September 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2023. 78, No. 1. Pp. 66–73.*

Сведения об авторах

1. Дюбков Вячеслав Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (499) 324-29-95, e-mail: vsdyubkov@mephi.ru.
2. Полозов Сергей Маркович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (499) 324-29-95, e-mail: smpolozov@mephi.ru.
3. Рашиков Владимир Иванович — канд. техн. наук, доцент; тел.: (499) 324-29-95, e-mail: virashchikov@mephi.ru.