

ИЗ ФОНДОВ РОССИЙСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ БИБЛИОТЕКИ

Башмаков Юрий Алексеевич

**Радиационные эффекты в ондуляторах и
кристаллах**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.ф. -
м.н.

Специальность 01.04.23

Москва

Российская государственная библиотека

diss.rsl.ru

2005

Башмаков, Юрий Алексеевич

Радиационные эффекты в ондуляторах и кристаллах [Электронный ресурс]: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.ф.-м.н.: Спец. 01.04.23 / Башмаков Юрий Алексеевич; Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева РАН. - М.: РГБ, 2005. - Из фондов Российской Государственной Библиотеки.

**Текст воспроизводится по экземпляру, находящемуся в
фонде РГБ:**

Башмаков Юрий Алексеевич

**Радиационные эффекты в ондуляторах и
кристаллах**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
д.ф.-м.н.

Специальность 01.04.23

Москва - 2004

Российская государственная библиотека, 2005
(электронный текст)

**Российская академия наук
Физический институт им. П.Н.Лебедева**

На правах рукописи
УДК 539.124.17

БАШМАКОВ Юрий Алексеевич

**РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В
ОНДУЛЯТОРАХ И КРИСТАЛЛАХ**

Специальность: 01.04.23 - физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2004



Работа выполнена в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор
Диденко Андрей Николаевич

доктор физико-математических наук,
профессор Жуковский Владимир Чеславович

доктор физико-математических наук
Федоров Михаил Владимирович

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной
физики им.Д.В.Скобелевича (НИИЯФ МГУ)

Защита состоится 7 Июня 2004 г. в 12 часов на заседании дис-
сертационного совета Д002.023.02 Физического института им. П.Н.Лебедева
РАН по адресу: 119991 Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН.

Автореферат разослан 19 Апреля 2004 г.

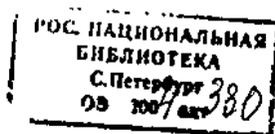
Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.023.02
доктор физико-математических наук


Я.Н.Истомин

Актуальность проблемы В связи с широкими возможностями практических применений в последние годы интенсивно разрабатываются способы получения электромагнитного излучения от релятивистских электронных и позитронных пучков. Излучение высокоэнергетических электронов во внешних магнитных полях обладает целым рядом привлекательных свойств: высокой интенсивностью, резкой направленностью, поляризацией, точно рассчитываемыми спектральными характеристиками. Поэтому в 70-80-ые годы широкое научное и техническое использование нашло синхротронное излучение (СИ), сопровождающее движение электронов и позитронов в поворотных магнитах синхротронов и накопительных колец. Однако при всех своих положительных качествах СИ не могло полностью удовлетворить все возрастающие требования, предъявлявшиеся к характеристикам излучения: интенсивности, спектральному диапазону, монохроматичности, возможности оперативной перестройки вида поляризации. Излучение, в значительной степени удовлетворяющее всем этим требованиям, получается путем пропускания релятивистских заряженных частиц через ондулятор. В ондуляторе испускается электромагнитное излучение, порождаемое колебательным движением быстрых заряженных частиц. Движение такого типа реализуется, например, в пространственно периодическом статическом магнитном поле (магнитный ондулятор), в кристаллах (природный ондулятор), в поле электромагнитной волны (лазерный ондулятор) и в ряде других структур.

В последнее время на электронных накопительных кольцах большое внимание уделяется разработке методов генерации на естественных и искусственных неоднородностях магнитного поля интенсивного магнитотормозного излучения в инфракрасной области спектра.

Разработка эффективных систем медленного вывода электронов из синхротронов и растяжителей позволит проводить широкий круг экспериментов по исследованию радиационных эффектов в кристаллических мишенях. Использование таких мишеней может, в частности, позволить получать интенсивные потоки поляризованных фотонов высокой энергии. Обсуждается вопрос об использовании выведенного пучка для генерации излучения в режиме одного прохода в различных ондуляторах и кристаллических структурах. Другим важным направлением исследования



является изучение динамики и излучения быстрых заряженных частиц в режиме каналирования как в прямых так и в изогнутых кристаллах. Использование кристаллов открывает новые возможности измерения и управления параметрами пучков заряженных частиц.

Цель работы Настоящая диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию электромагнитного излучения релятивистских заряженных частиц при их периодическом движении в ондуляторах, определению условий оптимальной генерации ондуляторного излучения, разработке и созданию магнитных ондуляторов, установке ондулятора на орбиту синхротрон», исследованию и согласованию совместной работы ондулятора и синхротрона, проведению измерений характеристик ондуляторного излучения, развитию новых способов получения интенсивных потоков поляризованных фотонов высокой энергии.

Исследованию динамики и радиационных эффектов, сопровождающих движение заряженных частиц в прямых и изогнутых кристаллах.

Получению экспериментальных данных о динамике электронного сгустка в электронном синхротроне "Пахра", на котором были выполнены приведенные в настоящей диссертации экспериментальные исследования. Сопоставлению их с результатами теоретических расчетов.

Проведению теоретических и экспериментальных исследований динамики частиц в условиях возбуждения нелинейных резонансов радиальных бетатронных колебаний. Проектированию, созданию и оптимизации параметров системы резонансного медленного вывода электронов из синхротрона "Пахра". Исследованию характеристик выведенного пучка. Разработке и изготовлению эффективных и надежных выводных септум-магнитов. Разработке методов формирования в зазоре магнита синхротрона мультипольных магнитных полей.

Научная новизна Впервые проведен полный теоретический анализ свойств ондуляторного излучения, который позволил определить физические характеристики источников ондуляторного излучения, выгодно отличающие его от синхротронного излучения.

Развит общий подход к расчету спектрально-углового распределения излучения релятивистских заряженных частиц в неоднородных магнитных полях прямолинейных промежутков синхротронов и накопителей. Впервые выполнено численное моделирование характеристик излучения

в реальном магнитном поле.

Предложена конструкция спиральной) ондулятора, в котором создается периодически вращающееся при движении вдоль оси ондулятора поперечное магнитное поле. Аналитически и численными методами исследованы поляризационные и спектрально-угловые свойства излучения в таком ондуляторе. Теоретически исследовано излучение в плоском магнитном ондуляторе. Выполнено компьютерное моделирование угловых и спектральных характеристик ондуляторного излучения. Рассмотрено излучение в квадрупольных электрическом и магнитном полях при периодическом движении в них релятивистских заряженных частиц.

Впервые в мировой практике осуществлена генерация и выполнено наблюдение в видимой области спектра излучения релятивистских электронов в ондуляторе, установленном в прямолинейный промежуток циклического ускорителя - синхротрона. Продемонстрирована пространственная монохроматичность ондуляторного излучения. Предложен, изготовлен и испытан на синхротроне "Пахра" универсальный спиральный ондулятор, в котором вид поляризации электромагнитного излучения может легко перестраиваться.

Впервые осуществлена генерация интенсивного узконаправленного излучения в длинноволновой области спектра путем введения в прямолинейный промежуток синхротрона "Пахра" импульсного дипольного магнитного поля.

Развита теория движения положительно заряженных частиц при каналировании в изогнутых кристаллах. Впервые с помощью анализа поперечного движения каналированных частиц на фазовой плоскости определены области устойчивого и неустойчивого движения. Для фокусировки вторичных частиц - родителей нейтрино - предложена оригинальная конструкция кристаллического горна.

Исследован новый вид излучения, сопровождающий каналирование положительных заряженных частиц в изогнутом кристалле. Рассмотрена связь его характерных частот с параметрами траектории частицы.

Впервые осуществлен медленный вывод частиц из синхротрона с использованием нелинейного резонанса радиальных бетатронных колебаний четвертого порядка. Разработаны и созданы конструкции отклоняющих септум-магнитов с малыми рассеянными полями, что позволяет

снизить до приемлемой величины влияние этих магнитов на динамику частиц в рабочей области ускорителя.

Развит новый метод расчета замкнутой орбиты в циклическом ускорителе, позволяющий эффективно проводить вычисления с учетом реальных:: магнитных полей ускорителя.

Научная и практическая ценность Работы, вошедшие в диссертацию, заложили теоретические основы разработки, проектирования и сооружения источников ондуляторного излучения, ставших одним из ключевых элементов широко распространенных по всему миру современных специализированных источников синхротронного излучения. В частности, результаты этих работ были использованы при постановке и проведении экспериментов по исследованию свойств ондуляторного излучения на электронных синхротронах и накопительных кольцах. Первые эксперименты по наблюдению и исследованию ондуляторного излучения с орбиты электронных синхротронов показали возможность успешного сопряжения ондулятора и циклического ускорителя. Использование внутри накопительного кольца ондуляторов, уменьшение эмиттанса и улучшение контроля за траекторией и формой электронного пучка в накопителе привело в последние годы к значительному повышению интенсивности и улучшению коллимации генерируемых пучков излучения.

Метод измерения параметров циркулирующего пучка по ондуляторному излучению был успешно опробован на синхротроне "Пахра" и получил дальнейшее развитие на крупных электронных и протонных накопительных кольцах.

Системы, основанные на использовании предложенного в диссертации спирального ондулятора, широко используются для генерации циркулярно поляризованного электромагнитного излучения в широкой области спектра. В последнее время обсуждается возможность их применения также для управления спином протонов в протонных накопительных кольцах.

Уникальные спектральные и поляризационные свойства ондуляторного излучения в настоящее время широко используются в исследованиях по спектроскопии атомов, молекул, твердого тела, молекулярной физики, биологии, фотохимии и в целом ряде других исследований.

Перспективной областью применения излучения в неоднородны крае-

вых полях прямолинейных промежутков накопительных колец уже получившей свое практическое развитие, например, на накопителе электронов Сибирь-1 РНЦ "Курчатовский институт", является диагностика электронных и протонных пучков в синхротронах и накопителях. Интерес к этому излучению значительно возрос в последнее время также в связи с работами по созданию мощных источников инфракрасного излучения.

Схема, аналогичная предложенной в диссертации схеме получения фотонов высокой энергии, в дальнейшем была реализована ИЯФ СО РАН для измерения степени поляризации встречных электрон-позитронных пучков.

Развитые в диссертации подходы и физические результаты использовались при развитии теории и интерпретации экспериментальных данных по исследованию излучения частиц при каналировании в кристаллах. Рассмотренное в диссертации излучение позитронов сверхвысокой энергии при их каналировании в прямых и изогнутых кристаллах впоследствии исследовалось экспериментально. Было показано, что интенсивность этого излучения значительно превосходит интенсивность излучения в аморфной среде. Это новое направление исследований получило дальнейшее развитие в работах целого ряда других авторов.

Результаты проведенного рассмотрения динамики положительно заряженных частиц в изогнутых кристаллах нашли качественное подтверждение в экспериментах по отклонению изогнутыми кристаллами протонов высокой энергии.

Оптическая диагностика основных характеристик ускоренного электронного пучка в синхротроне "Пахра" имеет большую практическую ценность для его применения в качестве источника ондуляторного и синхротронного излучения. Полученные результаты использовались в дальнейшем в ОФВЭ ФИАН при разработке и настройке системы медленного вывода электронов из синхротрона "Пахра".

Создана система медленного вывода электронов из синхротрона "Пахра". Выведенный электронный пучок придает новое качество синхротрону и открывает возможности для проведения широкого круга физических экспериментов, в том числе и с применением кристаллических мишеней. Разработаны септум-магниты с малыми рассеянными магнитными полями. Такие магниты могут эффективно использоваться как при

выводе частиц из ускорителей, так и в процессе инъекции, что подтверждается опытом эксплуатации на синхротроне "Пахра". Разработанный метод формирования нелинейных магнитных полей позволил осуществить резонансную раскачку пучка в широком диапазоне энергий. Развита методика численного моделирования линейной и нелинейной динамики частиц в синхротроне позволяет с большой точностью определять рабочие параметры и оптимизировать процесс настройки системы медленного вывода.

Апробация работы Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на: Европейских конференциях по ускорителям частиц ЕРАС'90 (Ницца, Франция, 1990), ЕРАС'98 (Стокгольм, Швеция, 1998), ЕРАС 2000 (Вена, Австрия, 2000), национальных конференциях США по ускорителям частиц РАС'91 (Сан-Франциско, 1991), РАС'93 (Вашингтон, 1993), РАС'95 (Даллас, 1995), X Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Серпухов, 1977), Третьем, Двенадцатом (Москва 1972, 1990), Пятом, Шестом, Седьмом, Девятом, Одинадцатом Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1976, 1978, 1980, 1984, 1988), Всесоюзной конференции "Разработка и практическое использование электронных ускорителей" (Томск, 1975), Международной конференции по технологии магнитов МТ-13 (Виктория, Канада, 1993), IV Всесоюзном семинаре по релятивистской высокочастотной электронике (Москва, 1984), Шестой международной конференции по вычислительной ускорительной физике IСАР 2000 (Дармштадт, Германия 2000), совместном Англо - Советском семинаре по исследованиям с использованием синхротронного излучения (Дарсбери, Великобритания, 1982), конференции по использованию синхротронного излучения (Великобритания, 1991), Всесоюзных конференциях по физике вакуумного ультрафиолетового излучения и взаимодействию излучения с веществом ВУФ - 75 (Ужгород, 1975), ВУФ - 78 (Ленинград, 1978), ВУФ - 82 (Москва, 1982), рабочем совещании пользователей HASYLAB (Гамбург, Германия, 1991), VIII, XIV Всесоюзных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами (Москва, 1976, 1984 гг.), Первой национальной конференции по излучению заряженных частиц в кристаллах (Северный Кавказ, 1980), Всесоюзном совещании по проблемам применения эффектов каналирования частиц кристаллами в физике высоких

энергий (ИФВЭ, Протвино, 1991), Международном симпозиуме по спиновым явлениям в физике высоких энергий SPIN'94 (Блумингтон, США, 1994), XVI международной конференции по частицам и ядрам PANIC96 (Вильямсбург, США, 1996), Европейской: конференции по ядерной физике: поляризация в электронном рассеянии (Санторини, Греция, 1995), школе по Динамическим системам (ICTP, Триест, Италия, 1991), рабочем совещании по программе эксперимента "POLEX" (ИФВЭ, Протвино, 1992), на рабочем совещании коллаборации LHCB (CERN, Женева, Швейцария, 1996), а также на научных семинарах NIKHEF (Амстердам, Нидерланды), TRIUMF (Ванкувер, Канада), Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL, Аплтон, США), Стенфордского центра линейных ускорителей (SLAC, Стенфорд, США).

Публикации Основные результаты диссертации опубликованы в 72 научных работах.

Объем диссертации Диссертация содержит 172 страницы, в том числе 60 рисунков и 274 наименований литературы.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выполненной работы и сформулированы основные направления исследования. Кратко рассмотрено содержание диссертации.

В первой главе диссертации излагаются физические основы действия ондуляторов. Приводится трактовка оздгуляторного излучения как излучения быстро движущегося осциллятора. Рассматривается условие дипольности ондуляторного излучения. Обсуждается использование специальных систем отсчета для изучения ондуляторного излучения. Описываются интерференционные явления в ондуляторе. Обсуждаются главные свойства ондуляторного излучения и их связь с траекторией движения частиц в ондуляторе. Рассматривается динамика релятивистских заряженных частиц в плоском, квадрупольном и спиральном ондуляторе. Особое внимание уделяется связи поперечного и продольного движения.

Во второй главе в рамках классической электродинамики развивается теория ондуляторного излучения. Выводятся аналитические выра-

жевля, определяющие зависимость спектрально-угловых и поляризационных характеристик излучения в ондуляторе от вида и поперечных размеров траектории частицы на одном периоде ее колебаний.

В общем случае спектрально-угловое распределение энергии излучения в ондуляторе с большим числом элементов периодичности ($K \gg 1$) можно представить в виде суммы излучений отдельных гармоник

$$\frac{d^2\mathcal{E}}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^2 c} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{|\mathbf{a}_k(\omega, \theta, \varphi)|^2 \sin^2(\pi K \sigma_k)}{\Omega^2 \sigma_k^2}, \quad (1)$$

где вектор

$$\mathbf{a}_k = \frac{\Omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\Omega} \mathbf{a}(t) e^{ik\Omega t} dt,$$

$$\mathbf{a}(t) = [\mathbf{n}[(\mathbf{n} - \beta)\dot{\beta}]](1 - \mathbf{n}\beta)^{-2} \exp\left[-\frac{i\omega}{c}(\mathbf{n}_x x + \mathbf{n}_y y + \mathbf{n}_z \delta z)\right],$$

$$\sigma_k(\omega, \theta) = \Omega^{-1}[\omega(1 - \mathbf{n}_z \beta_{||}) - k\Omega],$$

$\dot{\beta} = \partial\beta/\partial t$ - ускорение, $\mathbf{n}_x = \sin\theta \cdot \cos\varphi$, $\mathbf{n}_y = \sin\theta \cdot \sin\varphi$, $\mathbf{n}_z = \cos\theta$, θ - полярный угол, образованный п с осью ондулятора z , φ - азимутальный угол, образованный проекцией п на плоскость x, y с осью x . Вектор $\mathbf{a}_k(\omega, \theta, \varphi)$ определяет зависимость характеристик излучения от вида и поперечных размеров траектории частицы на одном периоде ее колебаний.

Для ультрарелятивистского движения можно записать частоту излучения k -й гармоники ω_k в виде

$$\omega_k = \frac{2k\Omega\gamma^2}{1 + (p_1^2/2) + \theta^2\gamma^2} \quad (\theta \ll 1, \quad \gamma \gg 1). \quad (2)$$

Частота излучения данной гармоники достигает максимума под нулевым углом. Здесь $p_1^2/2$ - среднее значение квадрата приведенного импульса частицы. Для плоского ондулятора оно равно

$$\frac{p_1^2}{2} = \frac{\alpha_m^2 \gamma^2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{eH_m \lambda_0}{2\pi m c^2} \right)^2,$$

а для спирального

$$\frac{p_1^2}{2} = \alpha_m^2 \gamma^2 = \left(\frac{eH_m \lambda_0}{2\pi m c^2} \right)^2,$$

здесь H_m — амплитуда магнитного поля ондулятора, λ_0 его период. Заметим, что при каналировании частиц в кристалле параметр

$$p_{\perp} = \left(\frac{2eU_0\gamma}{mc^2} \right)^{1/2}$$

растет с ростом энергии частиц; здесь $U_0 \sim gd^2/2$ - межплоскостной потенциал, d - ширина канала. Отметим, что при работе на накопительном кольце, где энергии электронов фиксирована, тонкую подстройку частоты заданной гармоники можно осуществлять путем небольшого варьирования H_m , например, за счет изменения высоты зазора ондулятора на постоянных магнитах.

Исследуется дипольное ондуляторное излучение. Рассматривается влияние длины ондулятора на спектр излучения. Показана высокая степень монохроматичности излучения в ондуляторе с большим числом элементов периодичности. Проводится теоретический анализ свойств излучения в плоском ондуляторе с поперечным магнитным полем, величина которого гармонически изменяется вдоль оси ондулятора. Исследуются спектральные и угловые распределения линейно-поляризованного излучения основной и высших гармоник.

Так, показано, что вдоль оси ондулятора испускаются только нечетные ($k = 2p + 1$) гармоники излучения, спектрально-угловая энергия которых в максимуме линии ($\omega = \omega_{(2p+1),m}$, $\vartheta = 0$) составляет

$$\frac{d^2 \mathcal{E}_{2p+1}}{d\omega d\Omega} = \frac{K^2 e^2 \gamma^2}{c} F_{2p+1}(p_{\perp}),$$

$$F_{2p+1}(p_{\perp}) = \frac{(2p+1)^2 p_{\perp}^2}{[1 + (p_{\perp}^2/2)]^2} [J_p((2p+1)\kappa) - J_{p+1}((2p+1)\kappa)]^2, \quad (3)$$

где J_p - функция Бесселя порядка p , $\kappa = p_{\perp}^2 / \{4[1 + (p_{\perp}^2/2)]\}$. Эта полученная нами формула в настоящее время широко используется для практических расчетов характеристик источников ондуляторного излучения.

Выполнено компьютерное моделирование угловых и спектральных характеристик ондуляторного излучения для наиболее интересных частных случаев. Рассматривается изменение с ростом поля в ондуляторе спектрального распределения, при условии, что $K \gg 1$. При оптимальном значении поля в ондуляторе ($p_{\perp} \approx 1$; рис. 1 а) ширина "линии"

первой гармоники на полувысоте составляет $\sim 25\%$ полной ширины, энергия излучения на второй гармонике достигает $\sim 30\%$, а на третьей $\sim 15\%$ энергии излучения в максимуме первой гармоники. При дальнейшем увеличении магнитного поля доля излучения, приходящаяся на высшие гармоники, возрастает. На рис. 1 б приведено спектральное распределение излучения для $p_{\perp} = 2.0$. В отличие от распределения под нулевым углом, здесь максимум в спектре приходится на первую гармонику. Осуществлен предельный переход к ондулятору с сильными магнитными полями - виглеру.

Для генерации циркулярно поляризованного электромагнитного излучения предложена конструкция спирального ондулятора, в котором создается периодически вращающееся при движении вдоль оси ондулятора поперечное магнитное поле. Исследуется излучение в таком ондуляторе. Обсуждаются характеристики излучения с левой и правой круговой поляризацией. Рассматриваются условия оптимальной генерации.

Выводятся количественные соотношения, позволяющие оценить характерные значения основных параметров источников ондуляторного излучения. Выполняются оценки предела применимости классического рассмотрения и обращается внимание на ряд квантовых аспектов ондуляторного излучения.

Таким образом, проведен всесторонний теоретический анализ свойств ондуляторного излучения, который позволили определить физические характеристики источников ондуляторного излучения, выгодно отличающие его от синхротронного излучения. Исследована зависимость спектральных, угловых и поляризационных характеристик излучения от амплитуды электромагнитного поля в различных типах ондуляторов. Исследовано влияние диафрагмирования на свойства излучения. Рассмотрено имеющее непосредственное отношение к излучению электронов и позитронов при каналировании в кристаллах излучение в квадрупольных электрическом и магнитном полях при периодическом движении в них релятивистских заряженных частиц.

В третьей главе исследуется излучение пучка частиц в ондуляторе. Рассматриваются зависимости углового распределения, ширины спектральной линии, поляризационных свойств излучения от параметров электронного пучка. Анализируется связь между размерами диафрагмы и

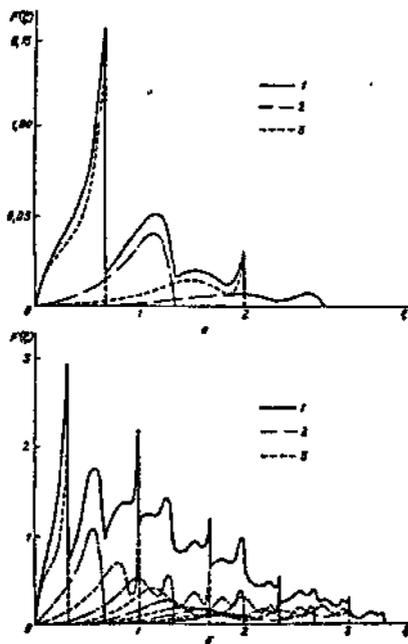


Рисунок 1: Спектральное распределение излучения в плоском ондуляторе при $p_{\perp} = 1,0$ (а) и при $p_{\perp} = 2,0$ (б). 1 — суммарное излучение, 2 — излучение на четных гармониках, 3 - излучение на нечетных гармониках

спектральными характеристиками выделяемого ею излучения. Исследуется зависимость спектральной яркости источников ОИ от параметров электронного пучка. Формулируются условия генерации спонтанного когерентного ондуляторного излучения и требования, предъявляемые к формированию используемых электронных сгустков. Определяется степень пространственной когерентности ондуляторного излучения. Описываются индуцированные процессы в ондуляторе, в том числе в лазерах на свободных электронах.

Аналитически и методом численного моделирования исследована связь характеристик ондуляторного излучения с параметрами излучающих пуч-

ков. Разработана методика использования ондуляторного излучения для измерения параметров пучков заряженных частиц, таких как эмиттанс, поперечные размеры и угловые расходимости.

В четвертой главе обсуждаются возможности ондуляторов, как источников электромагнитного излучения. Приводятся характеристики электронного синхротрона "Пахра", на котором были выполнены экспериментальные исследования, приведенные в настоящей диссертации. Он имеет следующие параметры: максимальная энергия $E_m = 1300$ МэВ, магнитная структура синхротрона состоит из четырех элементов периодичности ($N = 4$), угол поворота траектории в магнитном секторе $\theta_M = 90^\circ$ ($\theta_M = 2\pi/N$), радиус равновесной орбиты в магнитном секторе $R = 400$ см, используется слабая фокусировка, показатель спада магнитного поля $n = 0.51$, длина каждого из четырех прямолинейных промежутков $l = 190$ см, частоты радиальных и вертикальных бетатронных колебаний равны соответственно $\nu_x = 0.802$ и $\nu_z = 0.819$, частота повторения магнитных циклов $f = 50$ Гц. Частота ускоряющего высокочастотного напряжения $f_{\text{вч}} = 55$ МГц. Инжекция электронов осуществляется в прямолинейный промежуток с помощью септум-магнита, инжектором служит микротрон на энергию $E_{in} = 7$ МэВ. Используется многооборотная инжекция в течение 4 мксек.

Характерной особенностью синхротрона "Пахра" является наличие сравнительно длинных прямолинейных промежутков. Это делает удобным размещение на орбите синхротрона специального оборудования, такого как ондуляторы, вводной и выводные септум-магниты, различные датчики для наблюдения за пучком. Мощные токовые полюсные обмотки позволяют изменять показатель спада магнитного поля и тем самым смещать частоты бетатронных колебаний в широких пределах. Приводится описание конструкции градиентной и октупольной токовых обмоток, лежащих на полюсах магнитов синхротрона сверху и снизу его вакуумной камеры. Эти обмотки позволяют создавать на орбите синхротрона магнитные поля, требуемые для резонансной раскачки радиальных бетатронных колебаний. В градиентной обмотке используется примерно равномерное распределение ее проводников по поверхности полюса. Последовательное соединение проводников осуществляется с помощью определенным образом чередующихся внутренних и наружных по отношению к

магнитному зазору обратных проводников. На один ампер тока в обмотке в центре рабочей области возбуждался градиент $\partial H_z / \partial x = 0.524 \text{ Э/см}$.

В октупольной обмотке, формирующей на орбите кубическое магнитное поле, ток в центральных проводниках течет в противоположном направлении относительно тока в остальных проводниках, расположенных на периферии рабочей области. Приводятся радиальные зависимости формируемого этой обмоткой поля и его градиента. Один ампер тока возбуждал в центре рабочей области октупольное поле $\partial^3 H_z / \partial x^3 = 0.0445 \text{ Э/см}^3$. Резонансная третья азимутальная гармоника кубической нелинейности создается путем изменения направления тока в секторах обмотки на противоположное при переходе между соответствующими квадрантами.

В диссертации приводится описание разработанных и изготовленных малоапертурных импульсных отклоняющих септум-магнитов оригинальной конструкции, которые используются на синхротроне "Пахра" для ввода и вывода частиц. Они в значительной мере определяют эффективность работы синхротрона. Характерной особенностью таких магнитов является наличие тонкой внешней токовой шины, обеспечивающей достаточно малую величину рассеянного поля вне апертуры этого магнита, тогда как в его зазоре создается квазиоднородное магнитное поле, достаточное для отклонения частиц на заданный угол. Разработанные нами магниты имеют секционированную структуру. Первый септум-магнит состоит из четырех магнитных блоков, разделенных тремя медными кронштейнами. Блоки набраны из листов электротехнической стали. Прямоугольная апертура листов имеет высоту 1.2 см и ширину 3.5 см. Толщина внешней токовой шины 0.1 см. Используется пассивная схема охлаждения тонкой токовой шины. Длина магнита 42 см. Результаты магнитных измерений показали, что относительная величина рассеянного поля на расстоянии 0.1 - 6.0 см от внешней токовой шины не превышает 2 % от поля в зазоре сердечника. Магнит рассчитан на максимальный ток 800 А, при этом напряженность магнитного поля в зазоре - 800 Э.

Второй более мощный септум-магнит составлен из четырех таких же магнитных блоков, что и первый. Однако его внешняя токовая шина имеет продольные каналы для охлаждения водой. Ее толщина составляет 0.5 см. Максимально достижимое поле в зазоре этого магнита - 4000 Э.

Разработанная технология была использована при изготовлении аналогичного магнита для системы инъекции синхротрона "Пахра". Этот магнит состоит из трех стандартных секций магнитопровода и двух клиновидных кронштейнов. При длине 30 см и ширине апертуры 2.8 см он обеспечивает изгиб траектории электронов с энергией 7 МэВ на угол 25°.

Описываются различные типы и особенности магнитных ондуляторов, а также характеристики существующих источников ондуляторного излучения на синхротронах и накопителях.

Синхротрон "Пахра" стал первым циклическим ускорителем, с орбиты которого было получено ондуляторное излучение. Ондулятор выполнен в виде ферромагнитной гребенки с размещенными в ее пазах проводниками тока, ориентированными перпендикулярно оси электронного пучка. Период ондулятора λ_0 был выбран равным 4 см, число элементов периодичности N было выбрано равным 20. Магнитное поле создается одновитковой плоской обмоткой, содержащей нечетное число последовательно соединенных параллельных проводников, ориентированных перпендикулярно оси пучка. Для охлаждения в токовой обмотке имеется внутренний канал, по которому пропускается вода под большим давлением. Ферромагнитная гребенка набрана из тонких листов электротехнической стали, которым с помощью штамповки придана требуемая форма. Листы собраны в пакет и склеены между собой с помощью эпоксидной смолы. Питание обмотки ондулятора импульсное. Максимальная амплитуда тока $J = 8$ кА, длительность плоской вершины импульса 2 мс, частота следования 50 Гц. Ондулятор помещен в специальный короб, который составляет единое целое с крышкой вакуумного бака, который размещен в прямолинейном промежутке синхротрона. Рабочая область синхротрона и ондулятор разделены тонкой металлической фольгой.

Нами предложена конструкция спирального ондулятора. Такой ондулятор представляет систему, состоящую из двух одинаковых соосных соленоидов, смещенных относительно друг друга на половину шага намотки $\lambda_0/2$. С одного конца обмотки соленоидов соединены последовательно, а источник питания подключен с другого конца, что создает токи в соленоидах противоположного направления. При такой коммутации обмоток на оси ондулятора создается поперечное винтовое магнитное поле, у которого направление вращения вектора совпадает с направлением на-

мотки соленовдов.

Предложен, изготовлен и испытан на синхротроне "Пахра" универсальный спиральный ондулятор, в котором вид поляризации электромагнитного излучения может легко перестраиваться. Конструктивно такой ондулятор состоит из двух концентрично расположенных спиральных ондуляторов, вставленных один в другой. Период этих ондуляторов был выбран равным 9.6 см, число элементов периодичности было выбрано равным 10. Внутренний радиус внутреннего ондулятора - 4.5 см, а внешнего - 6.3 см, толщина образующих спирали проводников 1.0 см, а их ширина - 3.1 см. Эти проводники образованы из трех проводников квадратного сечения с отверстием для охлаждающей воды. Спирали каждого из ондуляторов на одном конце соединены проводящими полукольцами, а на другом соответствующим образом подсоединены к токоподводящим проводниками.

Для генерации интенсивного потока циркулярно-поляризованных квазимонохроматических фотонов высокой энергии на электрон-позитронном коллайдере в области взаимодействия встречных пучков предложено установить спиральный ондулятор. Показано, что энергия фотонов, возникающих в результате обратного комптоновского рассеяния ондуляторного излучения одного из пучков на частицах встречного пучка, гораздо больше, а их спектральное распределение значительно уже, чем при использовании комптоновского рассеяния лазерных фотонов.

В пятой главе описывается экспериментальное изучение динамики поперечных размеров электронного пучка в синхротроне "Пахра". Достоверную информацию о параметрах циркулирующего на орбите пучка необходимо иметь как для проведения работ по генерации и исследованию ондуляторного излучения так и для работ по осуществлению медленного вывода электронов из синхротрона. Использовалось быстрое фотографирование с помощью синхротронного излучения. Описывается созданная экспериментальная установка, представлены оптическая схема эксперимента и методика его проведения. Основное содержание эксперимента составляло измерение среднеквадратичных амплитуд радиальных и зертикальных колебаний электронов методом скоростного фотографирования поперечного сечения пучка с последующим фотометрированием. Исследования проводились в режиме ускорения электронов до энергии 670

МэВ. Наблюдаемый пучок имеет в сечении типичную овальную форму, в определенной фазе цикла приближающуюся к круговой, что обусловлено, по-видимому, близостью частот вертикальных и горизонтальных (радиальных) бетатронных колебаний. Полученные в результате фотометрирования распределения частиц в сечении пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях с хорошим приближением можно считать гауссовскими. Вертикальный размер уменьшается в основном по адиабатическому закону; незначительное ($\sim 5\%$) влияние в соответствии с расчетами оказывает радиационное затухание колебаний. Эти же два эффекта характерны и для радиальных колебаний; помимо этого в конце цикла ускорения несомненное влияние на радиальный размер оказывают квантовые флуктуации излучения. В результате радиальный размер сначала также уменьшается, достигает минимума при энергии ~ 540 МэВ, а затем увеличивается. Измеренные размеры ускоренного пучка характеризуются следующими величинами дисперсий: $\sigma_x = 2.8 \pm 0.15$ мм, $\sigma_z = 2.3 \pm 0.15$ мм.

Для интерпретации опытных данных было выполнено математическое моделирование, в котором задавались различные начальные условия. В целом расчетные кривые удовлетворительно описывают ход экспериментальных зависимостей. Совместный анализ расчетных и экспериментальных данных позволил определить соотношение между амплитудами бетатронных и радиально-фазовых колебаний. В результате было показано, что при малых энергиях решающий вклад в радиальный размер пучка вносят синхротронные колебания. На основании расчетов сделаны оценки продольных размеров и энергетического разброса электронных сгустков. Проведенная оценка характерных продольных размеров сгустка в конце цикла ускорения дала $(\overline{A_i^2})^{1/2} = 29.1$ см, (временная протяженность сгустка $(\overline{T_0^2})^{1/2} = 0.97$ нсек), что соответствует энергетическому разбросу $((\Delta E)^2/E^2)^{1/2} = 2.4 \cdot 10^{-4}$. Результаты этих измерений позволили приступить к решению чрезвычайно серьезной и важной проблемы медленного вывода ускоренного пучка электронов.

Разработан новый метод расчета замкнутой орбиты в циклическом ускорителе. Знание положения замкнутой орбиты и обеспечение ее стабильности является существенным условием для эффективной работы как синхротронов так и накопительных колец. Вычисление замкнутой

орбиты сводится к определению на произвольно выбранном азимуте θ собственного вектора \mathbf{Y}_{co} полной матрицы перехода M_{syn} для кольца синхротрона и трассировки с этим вектором искомой орбиты. Предложен эффективный алгоритм нахождения собственного вектора. Собственный вектор \mathbf{Y}_{co} находится в результате итерационной процедуры. Первоначально произвольно с помощью вектора \mathbf{Y}_{in} задается исходное положение частицы на фазовой плоскости и прослеживается ее движение на заданном азимуте θ на протяжении определенного числа оборотов N . Число оборотов N зависит от частот бетатронных колебаний ν_x, ν_y . Оно выбирается таким, чтобы точки на фазовой плоскости, которые отображают движение частицы на выбранном азимуте, заполняли фазовый эллипс почти что полностью. После вычислений получается набор $\{\mathbf{Y}_{in}\}_k$, где $k = 1, 2, \dots, N$, из N векторов, соответствующих прохождению через этот азимут на каждом обороте. Затем находятся компоненты нового вектора \mathbf{Y}_{mn} , которые являются средним арифметическим компонент векторов $\{\mathbf{Y}_{in}\}_k$. Компоненты полученного таким образом нового вектора \mathbf{Y}_{mn} последовательно сравниваются с соответствующими компонентами начального вектора \mathbf{Y}_{in} . Если по крайней мере одна из разностей превосходит заданный для этих вычислений допуск δ , вычисления продолжают снова, только теперь в качестве начального принимается новый вектор \mathbf{Y}_{mn} . Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока собственный вектор \mathbf{Y}_{co} не будет определен с необходимой точностью. После этого нахождение мгновенной орбиты сводится к определению траектории такой частицы, чье начальное состояние описывается собственным вектором \mathbf{Y}_{co} полной матрицы перехода M_{syn} . Этот метод может быть реализован с любой программой, используемой для трассировки частиц. Проведены вычисления замкнутой орбиты с учетом данных магнитных измерений азимутального распределения ведущего магнитного поля синхротрона. Разработан оптимальный способ коррекции магнитного поля синхротрона "Пахра", позволяющий значительно уменьшить искажения замкнутой орбиты.

Описывается теоретическое и экспериментальное исследование нелинейной динамики частиц и медленный вывод электронов из синхротрона "Пахра" на нелинейном резонансе радиальных бетатронных колебаний четвертого порядка. Обсуждаются методы формирования необходимых

резонансных условий и эффективного заброса частиц в отклоняющие септум-магниты. Выполнено численное моделирование процесса вывода электронов, позволившее выбрать основные параметры системы вывода и оптимальный режим ее настройки. Вывод осуществлялся после ускорения электронов до энергии 670 МэВ. На рис. 2 показано изменение во времени циркулирующего в синхротроне тока (сигнал с пикап-электродов)

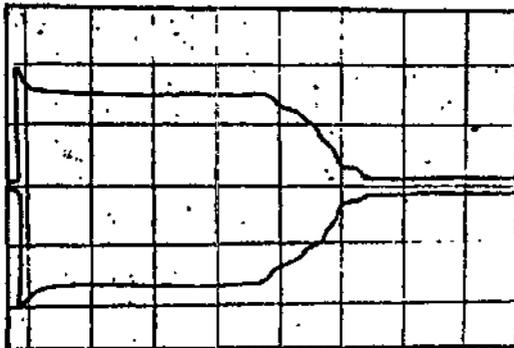


Рисунок 2: Зависимость циркулирующего в синхротроне тока от времени (сигнал с пикап-электродов) в режиме медленного вывода электронов, одно дел. - 2 мсек.

дов) в режиме медленного вывода электронов. Токи в градиентной и октупольной обмотках составляли $I_{\Delta n} = 4.4 \text{ A}$, $I_{\Sigma 3} = 20 \text{ A}$ соответственно. Эта зависимость очень чувствительна к величине и форме тока $I_{\Delta n}$, который подбирался таким образом, чтобы получить наиболее пологий спад циркулирующего по орбите тока во время вывода. Типичная длительность вывода составляла 2-3 мсек. Как видно из рисунка 2, из рабочей области синхротрона выводится более 80 % частиц. Видные на рисунке характерные ступеньки скорее всего обусловлены проявлением синхробетатронных резонансов. Пучок выводится из синхротрона через тонкое алюминиевое окно (толщина $\sim 1 \text{ мм}$). На выходе из окна пучок имеет в поперечном сечении эллиптическую форму с вертикальной осью 0.6 см и горизонтальной - 1.2 см. Обсуждается радиальная дефокусировка и вертикальная фокусировка электронного пучка при его движении в рас-

сеянном магнитном поле синхротрона.

Выведенный пучок используется в настоящее время в ряде экспериментов, в том числе и в исследовании радиационных эффектов в кристаллах.

В шестой главе приводятся результаты экспериментальных исследований ондуляторного излучения, выполненных на синхротроне "Пахра".

Изучение свойств ОИ и измерения с его использованием существенно отличаются от измерений, проводимых с обычными источниками света. Ограниченный доступ к экспериментальной установке требует тщательной и надежной предварительной юстировки оптических элементов измерительных систем относительно пучка излучения. Режим работы ускорителя или накопителя (энергия частиц, эмиттанс пучка и т. д.) устанавливается с учетом заданного спектрального диапазона, требуемых значений интенсивности и временных характеристик излучения. Временная структура импульса ОИ определяется режимом работы ондулятора и числом сгустков на орбите.

Описываются первые наблюдения ондуляторного излучения на прямых электронных пучках, выполненные в середине прошлого века. Так как в этих работах использовалось только одно прохождение пучка через ондулятор, полученная интенсивность ондуляторного излучения была невелика. Если поместить ондулятор в прямолинейном промежутке синхротрона или накопителя, то за счет использования многократного прохождения частиц через ондулятор интенсивность (средняя) ондуляторного излучения может быть повышена на несколько порядков.

Описываются первые эксперименты по наблюдению излучения электронов в ондуляторе, установленном на прямолинейном участке орбиты циклического ускорителя. Эксперименты были выполнены нами на синхротроне ФИАЦ "Пахра". Приводится схема эксперимента. Излучение выводится из вакуумной камеры ускорителя через кварцевый иллюминатор. Плоскость ондулятора удалена от плоскости равновесной орбиты на 25 мм. Ускоренные электроны подвигались к нему до расстояния $y \sim 1.5$ см радиальной составляющей магнитного поля, создаваемой самим ондулятором. Величина этого смещения регулировалась посредством небольшого изменения градиента ведущего магнитного поля синхротрона с помощью полюсных обмоток. При токе в обмотке ондулятора, равном 3 кА, полученному смещению пучка синхротрона соответствует ампли-

туда магнитного поля ондулятора 360 Э.

Условия нашего эксперимента были выбраны таким образом, чтобы ондуляторное излучение попадало в оптический диапазон волн. Ондуляторное и синхротронное излучение регистрировалось в диапазоне длин волн 2000- 5900 Å с помощью фотопластинок, которые размещались перпендикулярно оси прямолинейного промежутка на расстоянии 440 см от центра ондулятора. Монохроматичность излучающих электронов достигалась своевременным выключением высокочастотного напряжения на ускоряющем резонаторе синхротрона. Представлены первые фотографии ондуляторного излучения от циркулирующих в синхротроне электронов. Энергия электронов составляла 175 МэВ.

Из предварительного анализа фотографий следовало, что интенсивность ондуляторного излучения в единичном интервале углов вблизи оси ондулятора в несколько раз превышала соответствующую интенсивность синхротронного излучения.

"В одном из наших опытов максимальная энергия ускоренных электронов была выбрана 100 МэВ с тем, чтобы фоновое синхротронное излучение лежало в инфракрасной области вне области чувствительности фотопластинки. Фотография, полученная в таком опыте, показывает, что наблюдается снимок только ондуляторного излучения, которое представляет собой узконаправленный световой луч.

В оптической области спектра спектрально-угловые характеристики излучения регистрировались в фокальной плоскости объектива, установленного на пучке ОИ. Такая редакция эксперимента позволила исключить влияние размеров электронного пучка на результаты измерений.

Эксперименты, выполненные на синхротроне "Пахра" при фиксированной длине волны (длина волны $\lambda_{\phi} = 3850 \text{Å}$ выделялась ультрафиолетовым светофильтром с относительной полосой пропускания $\Delta\lambda/\lambda_{\phi} = 4.4\%$), показывают, что вид угловых распределений существенно изменяется с энергией электронов. В экспериментах на синхротроне "Пахра", значение параметра поля ондулятора $p_{\perp} = 0.1$, что соответствует дипольному излучению.

Общий характер пространственного распределения излучения (в поперечном сечении) показан на рис. 3 для $E = 158$ МэВ. Сплошными

линиями здесь изображены линии одинаковой интенсивности. Этот рисунок доказывает, что излучение основной гармоники сосредоточено в двух областях, имеющих в сечении фасолевидную форму и симметрично ориентированных относительно горизонтальной плоскости, что согласуется с выводом о виде азимутальной зависимости углового распределения ОИ, испускаемого в плоском ондуляторе. В условиях эксперимента плоскость колебаний частиц в ондуляторе ориентирована горизонтально, и соответственно с этим максимум интенсивности ОИ лежит в вертикальной плоскости. Своеобразные поляризационные характеристики излучения элек-

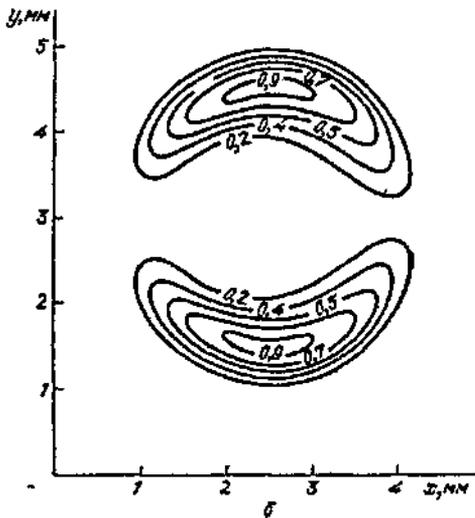


Рисунок 3: Пространственное распределение ОИ при $E=158$ МэВ, $\lambda_{\phi} = 3850 \text{ \AA}$; масштаб: 1 мм соответствует угловому интервалу 0,5 мрад

тронов в плоском ондуляторе исследовались в оптическом диапазоне д тин волн. Ка. синхротроне "Пахра" с помощью поляроидной пленки были получены фотографии распределения \parallel и \perp компонент поляризации первой гармоники ОИ. Параллельный компонент ОИ имеет два максимума, расположенных вблизи вертикальной плоскости (дипольное распределение), а в угловом распределении перпендикулярной компоненты ОИ выдс ля-

ются четыре симметричных максимума (квадрупольное распределение). Наблюдаемая картина углового распределения в первой гармонике ОИ тождественна теоретически ожидаемому мгновенному угловому распределению ОИ.

Ондуляторное излучение обладает той характерной особенностью, что его спектральные свойства зависят от угла наблюдения. Нами исследовался спектр излучения, распространяющегося вдоль оси ондулятора, где интенсивность излучения наибольшая. Использовалась круглая диафрагма, расположенная на продолжении оси ондулятора. Эксперименты выполнены при энергии электронов $E = 143.3$ МэВ, угловой размер диафрагмы был выбран оптимальным и составлял $\Delta\vartheta_{\text{д}} = 0.8$ мрад ($\Delta\vartheta_{\text{д}} = K^{-1/2} = 0.22$). Полученные экспериментальные результаты приведены на рис. 4, где они изображены точками. Результаты теоретического расчета, выполненного для параллельного пучка электронов, показаны на этом же рисунке пунктирной кривой. Справа от максимума экспериментальные точки отклоняются от этой кривой в сторону более длинных волн. В расчеты были внесены поправки на угловой разброс электронного пучка ($\sigma_e = 0.44$ мрад). С учетом этих поправок пунктирная кривая трансформируется в сплошную кривую, которая хорошо совпадает с данными эксперимента. Полуширина измеренного спектра составляет ~ 8 %, тогда как для параллельного пучка она составила бы 5 %. Максимум спектрального распределения приходится на длину волны $\lambda = 2610 \text{ \AA}$. Для бесконечно малой диафрагмы ($\Delta\vartheta_{\text{д}} \ll K^{-1/2}$) этот максимум должен бы приходиться на длину волны $\lambda_m = 2534 \text{ \AA}$. Смещение максимума вызвано конечным размером используемой диафрагмы. В описываемых опытах использовался спектрограф ИСП-28. Положение максимума спектра измерялось с точностью $\sim 1\%$. Измерения, выполненные при фиксированной энергии электронов с помощью обычных спектральных приборов, позволили с хорошей точностью определить форму спектрального распределения излучения. Спектральное распределение полной (проинтегрированной по всем углам) интенсивности ОИ при полях, близких к оптимальным, исследовалось в широком спектральном диапазоне в том числе в ВУФ-области и в рентгеновской области в целом ряде работ. Наблюдается квазилинейчатый характер спектра излучения, распределение которого весьма близко по форме к расчетным кривым, приведенным на

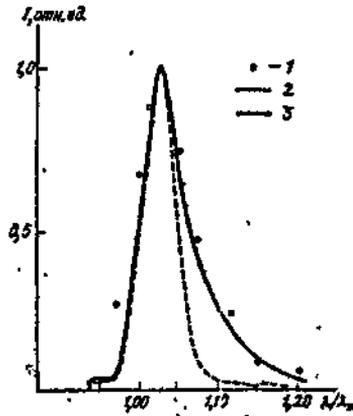


Рисунок 4: Спектральное распределение первой гармоники ондуляторного излучения электронов при энергии $E=143.3$ МэВ, размере диафрагмы $\Delta\theta_D = 0.225$. 1 - эксперимент, 2 - расчет для параллельного пучка, 3 - расчет для пучка с угловым разбросом ($\sigma_e = 0.44$ мрад)

рис. 1, а. Интересно отметить, что наблюдаемая в экспериментах на ондуляторах форма интегрального спектра излучения имеет много общего со спектрами излучения ультррелятивистских позитронов, возникающего при их каналировании в кристаллах. Амплитуда первой гармоники излучения при некоторой (оптимальной) энергии частиц достигает максимальной величины. Этого и следовало ожидать, поскольку в том и другом случае мы имеем дело с периодическим движением быстрых заряженных частиц.

Волны по выходе из ондулятора обладают свойством пространственной когерентности. Впервые на это явление было указано в одной из наших работ. Последующее экспериментальное подтверждение было сделано на накопителе ВЭПП-2М.

В настоящее время в ряде лабораторий ведутся работы по созданию генераторов когерентного ондуляторного излучения в оптической области спектра (ЛСЭ). Отдельные результаты этих работ частично отражены в диссертации. Так описывается генерация когерентного ОИ, которая была

получена с помощью оптического клистрона на целом ряде электронных накопительных колец.

Наряду с созданием оптических генераторов когерентного ОИ на накопителях интенсивно ведутся поиски новых способов повышения эффективности ЛСЭ на линейных электронных ускорителях. В частности, широко обсуждается схема ЛСЭ с восстановлением (рекуперацией) энергии электронного пучка

В последнее время в связи с созданием протонных ускорителей на сверхвысокие энергии (сотни ГэВ) выяснилось, что для определения важных геометрических параметров пучков может быть использовано магнитотормозное излучение протонов. Очевидно, что использование синхротронного излучения здесь не очень эффективно, поскольку даже при столь высоких энергиях оно лежит в далекой инфракрасной области спектра, где регистрация излучения весьма затруднена.

Однако, используя ондулятор, можно получить излучение протонов, лежащее в более коротковолновой области спектра, поддающейся изменению. Это впервые было осуществлено на протонных и антипротонных пучках коллайдера в ЦЕРНе.

В седьмой главе исследуются свойства излучения заряженных частиц в неоднородных краевых полях магнитных секторов циклических ускорителей и накопителей. Интерес к этому излучению обусловлен с одной стороны созданием источников ондуляторного излучения, а с другой - перспективами его использования для целей диагностики электронных и протонных пучков. В последнее время этому излучению уделяется повышенное внимание также в связи с работами по созданию мощных источников инфракрасного излучения. Для расчета характеристик излучения развивается общий подход, основанный на широком использовании соображений симметрии. Выводятся общие выражения для спектрально-углового распределения излучения для симметричного относительно центра промежутка распределения магнитного поля. Качественно рассматривается процесс формирования излучения. Исследуется временная структура биполярных импульсов излучения. Рассматривается приводящая к модуляции спектрально-угловых распределений интерференция импульсов излучения из торцов ограничивающих промежутков магнитов синхротрона. Показана зависимость глубины этой модуляции от азимутального

относительно оси промежутка угла наблюдения.

Исследуется пространственное распределение полного излучения и различных компонент его поляризации. Предсказана кольцевая структура в пространственном распределении излучения. Проведено сравнение излучения в накопителях электронов и протонов. Отмечено существенное различие спектрально-угловых распределений в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Показано, что спектр синхротронного излучения восстанавливается при переходе к большим горизонтальным углам наблюдения.

Свойства излучения существенным образом зависят от характера распределения магнитного поля вдоль траектории частицы $\mathbf{F}(\mathbf{s}) = \mathbf{H}(\mathbf{s})/H_m$, где $\mathbf{H}(\mathbf{s})$ - величина ведущего поля на траектории, H_m - максимальное значение поля в зазоре магнита, \mathbf{s} - смещение вдоль траектории. Функция $\mathbf{F}(\mathbf{s})$ плавно меняется от 0 в центре промежутка до 1 внутри магнитного сектора. Движение в области прямолинейного промежутка характеризуется углом θ_i , образованным вектором скорости частицы с осью промежутка. Для ультрарелятивистских частиц достаточно ограничиться рассмотрением области, в которой выполнено условие $\theta_i \ll 1$.

В общем случае отличие $\mathbf{F}(\mathbf{s})$ от 1 приведет к значительному искажению импульса излучения по сравнению с обычным синхротронным, а именно: при введении области, свободной от магнитного поля ($L_0 \neq 0$), импульс синхротронного излучения расщепляется на два и эти импульсы, разнесенные во времени, начинают интерферировать между собой. Показано, что переход к общеизвестным формулам для синхротронного излучения в однородном магнитном поле может быть осуществлен, если в общих формулах положить $\mathbf{F}(\mathbf{s})$ тождественно равной единице, $\theta_i = \mathbf{s}/R_0$, а длину промежутка L_0 равной нулю. В результате проведенного качественного исследования удалось объяснить ряд ранее полученных экспериментальных данных.

* Обсуждается типичное пространственное распределение магнитного поля на краю поворотного магнита. Для описания реального распределения этого поля используется характеристическая параметризация. Рассматриваются закон движения электрона в таком поле и форма импульса электромагнитного излучения, возникающего при этом движении. Полученная приближенная аналитическая формула позволяет значительную

часть вычислений проделать аналитически, а для численного расчета оставить лишь однократное интегрирование. Приводятся результаты выполненного для синхротрона "Пахра" численного моделирования угловых и спектральных распределений излучения.

Описывается экспериментальное исследование спектрально-угловых характеристик излучения, испускаемого релятивистскими электронами вблизи оси симметричного промежутка синхротрона при введении в промежуток дипольного магнитного поля.

Теоретическое исследование излучения релятивистских электронов в дипольном магнитном поле, когда полный угол отклонения частицы α мал по сравнению с характерным углом излучения $1/\gamma$ ($\alpha \ll 1/\gamma$), где $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $\beta = v/c$, v - скорость частицы, показало, что свойства этого излучения существенно отличны от свойств синхротронного излучения ($\alpha \gg 1/\gamma$).

Форма импульса излучения в заданном направлении повторяет характер изменения магнитного поля вдоль ее траектории, а его длительность $\Delta t = (L/c)(1 - \beta \cos \theta)$, где L - область действия поля, θ - полярный угол в направлении наблюдения, отсчитываемый относительно оси промежутка. Если область действия магнитного поля имеет резкие границы, т.е. вблизи края поля $\frac{L}{H_m} \frac{\partial H}{\partial z} \gg 1$, где H_m - амплитуда поля, z - направление движения частицы, то в спектрально-угловом распределении интенсивности излучения будет наблюдаться последовательность минимумов и максимумов.

Приводятся результаты наших экспериментов по исследованию излучения электронов в дипольном магнитном поле. Эксперименты выполнены на синхротроне "Пахра". Энергия электронов изменялась вплоть до 850 МэВ. В наших опытах требуемое магнитное поле формировалось в плоскопараллельном промежутке ускорителя с помощью двух прямоугольных обмоток длиной $L = 100$ см. Область нарастания магнитного поля составляла ~ 10 см. Возбуждаемое обмотками на орбите синхротрона магнитное поле ориентировано параллельно плоскости орбиты. Поле возбуждалось импульсным током трапецеидальной формы с длительностью фронта ~ 1 мсек и плоской вершиной ~ 2 мсек. Стабилизация тока на плоской вершине обеспечивалась с точностью не хуже 0,3 %.

При выбранной ориентации возбуждаемого магнитного поля вектор

поля излучения электронов направлен преимущественно перпендикулярно плоскости орбиты синхротрона (π - компонента). Выделение в наших опытах π - компоненты излучения позволило существенно уменьшить фон от СИ. Угловое распределение интенсивности излучения электронов исследовалось фотографическим способом. Фотоматериалы размещались в фокальной плоскости объектива. Излучение на фиксированной длине волны выделялось интерференционным светофильтром ($\lambda_{\phi} = 5040 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda/\lambda_{\phi} = 2,2\%$). Импульсный ток в обмотках включался при достижении электронами максимальной энергии ($E_m = 850 \text{ МэВ}$), что практически исключало изменение энергии электронов во время излучения в поле обмотки. Амплитуда магнитного поля составляла $H_m = 26,6 \text{ Э}$. При этом радиус кривизны траектории электронов составляет $\sim 1 \text{ км}$. Как показывают фотографии, включение этого поля приводит к излучению вдоль оси промежутка узкого луча видимого света. Угловая расходимость этого луча составляет около 1 мрад .

Зависимость интенсивности излучения под нулевым углом ($\theta = 0$) от энергии электронов исследовалась нами с помощью ФЭУ-93. Энергия излучающих электронов изменялась путем перемещения импульса возбуждаемого обмоткой магнитного поля в цикле ускорения. В диапазоне энергии от 400 до 600 МэВ эта зависимость носит колебательный характер. Для энергий, превышающих 600 МэВ , интенсивность излучения монотонно нарастает. Положение максимумов и минимумов интенсивности излучения находится в удовлетворительном согласии с теорией.

В результате проведенного исследования показано, что излучение электронов, обусловленное введением дипольного магнитного поля в прямолинейный промежуток синхротрона, обладает в длинноволновой области спектра высокой интенсивностью и направленностью, а также рядом других привлекательных для практических применений особенностей.

В восьмой главе развивается теория движения положительно заряженных частиц при каналировании в изогнутых кристаллах. Рассматриваются условия отклонения пучка частиц. Показано, что для заданного радиуса изгиба кристалла R_0 в канал будут захватываться частицы с энергией ϵ , меньшей критической $\beta\epsilon < \beta_c\epsilon_c = (4eU_0R_0)/d$, где $\beta = v/c$, v - скорость частицы, U_0 - значение потенциала на границе канала, d - расстояние между кристаллографическими плоскостями. Введен пока-

затель изменения электрического поля в канале $n = (2R_0/d)\epsilon_c/\epsilon$. Отмечается, что в реальных условиях всегда $n = R_0/x_0 \gg 1$. Показано, что наличие неоднородного электрического поля в канале приводит к возникновению поперечных (бетатронных) колебаний частиц относительно равновесной орбиты. Смещение этой орбиты относительно центра канала составляет $x_0 = d\epsilon/2\epsilon_c$. Найдена граница устойчивого радиального движения частиц, которая определяет максимально допустимую амплитуду бетатронных колебаний a_m . Указан соответствующий этой амплитуде максимальный угол $x'_m = (dx/dl)_m$, образованный траекторией с равновесной орбитой. Показано, что частицы с большими углами захватываться в канал не будут. Анализ поперечного движения каналированных частиц впервые выполняется на фазовой плоскости $x, (R_0/\sqrt{n})x'$ (см. рис. 5). Это позволяет выделить области устойчивого и неустойчивого движе-

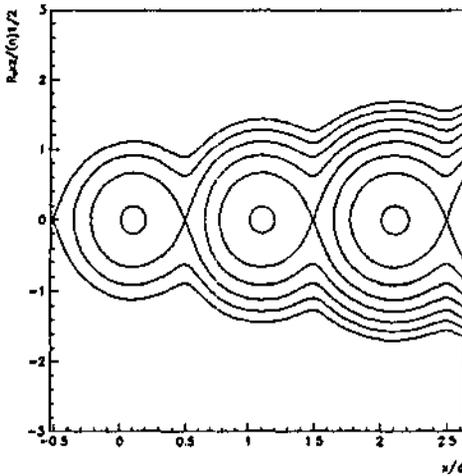


Рисунок 5: Фазовые траектории частиц, ханалирующих в изогнутом кристалле

ния. Так устойчивое движение частиц в этих координатах представляется окружностями $(x-x_0)^2 + (R_0x'/\sqrt{n})^2 = a^2$, радиус которых a зависит

от начальных условий. Области устойчивого и неустойчивого движения разделяются сепаратрисой - фазовой траекторией, на которой $\mathbf{a} = \mathbf{a}_m$. Частицы, не захваченные в-режим каналирования, совершают неустойчивое движение, переходя из канала в канал и двигаясь в каждом канале по дугам окружностей большого радиуса. В результате они отклоняются на меньшие углы, чем захваченные в канал частицы. Исследуется зависимость эффективности захвата частиц в изогнутые каналы от параметров пучков.

Приводятся примеры использования изогнутых кристаллов для вывода протонных пучков на крупнейших синхротронах и накопительных кольцах. Экспериментальные данные подтверждают развитую в диссертации качественную картину движения частиц в изогнутых кристаллах. Так, наблюдались две фракции частиц. Одна из них отклоняется на полный угол изгиба кристалла, а вторая испытывает отклонение на значительно меньшие углы.

Для фокусировки вторичных частиц — родителей нейтрино - предложена конструкция кристаллического горна, состоящего из набора изогнутых кристаллов, размещенных аксиально симметрично относительно оси первичного пучка. Длина кристаллов по пучку увеличивается по мере удаления их от оси пучка. Каждый из кристаллов захватывает малую часть вылетающих из ядерной мишени вторичных частиц. Выходящие из мишени под большими углами частицы проходят в изогнутом кристалле больший путь в результате чего отклоняются на большие углы, что и обеспечивает фокусировку пучка.

Рассматривается новый вид излучения, сопровождающий каналирование в изогнутых кристаллах. Первоначально обсуждаются особенности излучения частиц при движении в прямом канале. Если $\theta_{ch}\gamma \ll 1$, где $\theta_{ch} = \sqrt{2eU_0/(mc^2\gamma)}$ — критический угол каналирования, то излучение каналирующих частиц носит дипольный характер. Для кристалла кремния, например, это условие выполнено, если энергия позитронов $\epsilon \ll 5$ ГэВ. Для позитронов сверхвысокой энергии ($\epsilon \geq 100$ ГэВ) справедливо обратное неравенство $\theta_{ch}\gamma \gg 1$. Спектр излучения в этом случае близок по форме к спектру синхротронного излучения, максимум которого приходится на характерную частоту $\omega_m \simeq 6ceU_0\gamma^2/(dmc^2)$. Поскольку частота излучения ω_m определяется максимальным электрическим полем

канале, то очевидно, что при выполнении условия $\theta_{ch}\gamma \gg 1$ изгиб кристалла не может существенно изменить характерную частоту излучения ω_m . Основное отличие сводится к тому, что в изогнутом канале среднее электрическое поле на траектории частицы отлично от нуля. Вследствие чего в изогнутом канале излучение частиц с малыми амплитудами бетатронных колебаний становится заметным и определяется радиусом изгиба кристалла.

Как показано в диссертации, характеристики излучения, сопровождающего каналирование частиц в изогнутых монокристаллах, зависят от отношения периода колебаний частиц λ_0 к R_0/γ — длине, на которой формируется излучение ультррелятивистской заряженной частицы при ее движении по окружности радиуса R_0 . С увеличением энергии период колебаний частицы λ_0 растет как $\gamma^{1/2}$, а длина формирования излучения падает как γ^{-1} . Можно найти энергию $\tilde{\gamma}$, при которой $\lambda_0 = R_0/\tilde{\gamma}$. Если $\gamma = \tilde{\gamma}$, где $\tilde{\gamma} = (2eU_0 R_0^2 / \pi^2 d^2 m c^2)^{1/3}$, период колебаний частицы совпадает с длиной формирования излучения. Отметим, что $\tilde{\gamma}$ зависит от массы излучающей частицы как $m^{-1/3}$. В общем случае излучение представляет собой определенную комбинацию ондуляторного и синхротронного излучения. Представляет интерес рассмотреть особенности излучения в двух предельных случаях.

Если период колебаний частицы λ_0 много меньше длины формирования излучения, т. е. выполнено условие $\lambda_0 \ll R_0/\gamma$ или, $\gamma \ll \tilde{\gamma}$, излучение носит квазиондуляторный характер; число эффективных элементов периодичности такого квазиондулятора можно оценить как: $N_{эф} = R_0/(\gamma\lambda_0)$. Очевидно, что с уменьшением радиуса изгиба кристалла R_0 , приводящим к соответствующему уменьшению $N_{эф}$, монохроматичность излучения отдельной частицы уменьшается.

Если выполнено противоположное условие $\lambda_0 \gg R_0/\gamma$, или $\gamma \gg \tilde{\gamma}$, излучение носит синхротронный характер, а его интенсивность и спектральный состав определяются характером изменения электрического поля на траектории частицы.

Проводится численная оценка граничного значения $\tilde{\gamma}$ для изогнутого кристалла с $R_0 = 100$ см. Для -плечных параметров (кристалл кремния плоскость (ПО)): $2eU_0 = 60$ эВ, $d = 2 \cdot 10^{-8}$ см. Для позитронов получено: $\tilde{\gamma}_{e^+} = 6.7 \cdot 10^4$, граничная энергия $\tilde{E}_{e^+} = 34,2$ ГэВ. Период поперечных

колебаний позитронов при этом составит $\lambda_{0e^+} = 14.9 \cdot 10^{-4}$ см. Соответственно для протонов: $\tilde{\gamma}_p = 5.4 \cdot 10^3$, $\tilde{\mathcal{E}}_p = 5060$ ГэВ, $\lambda_{0p} = 182 \cdot 10^{-4}$ см.

Полная интенсивность электромагнитного излучения зависит как от положения \mathbf{x}_0 равновесной орбиты, так и от амплитуды осцилляций. Излучение сопровождается потерей энергии частицы и, как следствие, смещением равновесной орбиты к центру канала. Рассматривается закон изменения энергии для частиц с малыми и большими амплитудами бетатронных колебаний. Исследовано влияние излучения частицы на ее движение в канале. В дальнейшем это новое направление исследований получило развитие в работах целого ряда других авторов.

Классические формулы справедливы, если энергия испускаемых фотонов $\hbar\omega_m$ много меньше энергии позитронов, т. е. если $\chi_c = E_c\gamma/H_0 \ll 1$, где $H_0 = m^2c^3/e\hbar = 4.41 \cdot 10^{13}$ Э ($E_0 = 1.32 \cdot 10^{16}$ В/см), $E_c = (4U_0)/d$ максимальное электрическое поле в канале. Для позитронов с энергией $\mathcal{E} = 250$ ГэВ в кремнии $\chi_c \simeq 0.24$ и становятся существенными квантово-механические поправки к теории синхротронного излучения. В частности, для определения энергии фотонов следует использовать точную квантовую формулу. Если $\chi_c \ll 1$, то изменение спектральных свойств излучения незначительно, а роль квантовых поправок в основном сводится к изменению функции распределения частиц по энергии и углу.

Исследуются поляризационные явления, сопровождающие каналирование позитронов высокой энергии в изогнутых кристаллах. Радиационные квантовые эффекты приводят к зависимости интенсивности излучения от ориентации спина частиц относительно плоскости движения. В диссертации это обстоятельство предлагается использовать для разделения по спинам позитронов высокой энергии при пропускании их через изогнутые кристаллы. Проведена качественная оценка возникающего эффекта. Получены выражения для средней энергии частиц $\langle \mathcal{E} \rangle_\zeta$ с различной ориентацией ζ спина, которую они имеют после прохождения кристалла. Различие между $\langle \mathcal{E} \rangle_{\zeta=+1}$ и $\langle \mathcal{E} \rangle_{\zeta=-1}$, и приводит к тому, что среди частиц с энергией \mathcal{E}_0 , преобладают частицы со спином одного знака, что и ведет к возникновению поштризации пучка.

Рассмотрение радиационной самополяризации быстрых частиц в изогнутых кристаллах обобщено на случай частиц с большими амплитудами бетатронных колебаний. Для таких частиц ($\mathbf{a} \sim d/2 - \mathbf{x}_0$) на протя-

жении одного периода колебаний электрическое поле существенно изменяется. Приведены выражения, показывающие зависимость равновесной степени и обратного времени поляризации от амплитуды колебаний частиц при условии, что $a^2 \gg x_0^2$.

В качестве примера рассматривается излучение позитрона с энергией $\epsilon = 250$ ГэВ в изогнутом с радиусом изгиба $R_0 = 200$ см канале (110) кремния, длина кристалла $l = 2$ см. Характерные параметры в этом случае: $\epsilon_c = 1250$ ГэВ, $x_0 = 0.2(d/2)$, $x'_m = 1.2 \cdot 10^{-5}$. Если угловой разброс в пучке $x'_0 \simeq x'_m$, то эффективность захвата в канале $\chi_c \simeq 0\%$. Критические частоты излучения: для частиц с малыми амплитудами колебаний $\hbar\omega_m = 9$ ГэВ; с большими - $\hbar\omega_m = 45$ ГэВ.

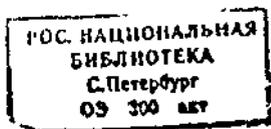
Частицы с малыми амплитудами колебаний ($\chi_0 = 4.5 \cdot 10^{-2}$) теряют на излучение около половины своей энергии, после этого они могут быть разделены по спину с помощью поворотного магнита. Степень поляризации примерно для половины частиц может достигать $\sim 20\%$. Энергия частиц с большими амплитудами ($\chi_c = 5\chi_0 = 0.22$), уменьшается более чем в десять раз, равновесная степень поляризации $\zeta = 0.89$.

В Заключении диссертации сформулированы полученные в ней основные результаты.

Основные результаты

1. Впервые проведен всесторонний теоретический анализ свойств ондуляторного излучения, который позволил определить физические характеристики источников ондуляторного излучения, выгодно отличающие его от синхротронного излучения. Исследована зависимость спектральных, угловых и поляризационных характеристик излучения от амплитуды электромагнитного поля в различных типах ондуляторов. Показана высокая степень монохроматичности излучения в ондуляторе с большим числом элементов периодичности. Рассмотрена генерация излучения на основной и высших гармониках. Исследовано влияние диафрагмирования на свойства излучения.

2. Развита общий подход к расчету спектрально-углового распределения излучения релятивистских заряженных частиц в неоднородных маг-



нитных полях прямолинейных промежутков синхротронов и накопителей. Исследованы процесс формирования излучения и его интерференция. Предсказана кольцевая структура в пространственном распределении излучения. Впервые выполнено численное моделирование характеристик излучения в реальном магнитном поле. Объяснен ряд ранее наблюдавшихся экспериментальных данных.

3. Предложена конструкция спирального ондулятора, в котором создается периодически вращающееся при движении вдоль оси ондулятора поперечное магнитное поле. В таком ондуляторе генерируется циркулярно поляризованное электромагнитное излучение. Аналитически и численными методами исследованы поляризационные и спектрально-угловые свойства этого излучения. Теоретически исследовано излучение в плоском магнитном ондуляторе. Выполнено компьютерное моделирование угловых и спектральных характеристик ондуляторного излучения. Осуществлен предельный переход к ондулятору с сильными магнитными полями - виглеру.

4. Рассмотрено излучение в квадрупольных электрическом и магнитном полях при периодическом движении в них релятивистских заряженных частиц. Это излучение имеет непосредственное отношение к излучению электронов и позитронов при каналировании в кристаллах.

5. Впервые в мировой практике осуществлена генерация и выполнено наблюдение в видимой области спектра излучения релятивистских электронов в ондуляторе, установленном в прямолинейный промежуток циклического ускорителя - синхротрона. Продемонстрирована пространственная монохроматичность ондуляторного излучения. Экспериментально исследованы спектральные и угловые распределения его интенсивности в видимой и ультрафиолетовой областях спектра при энергии электронов от 100 до 200 МэВ. Подтверждена высокая степень поляризации ондуляторного излучения.

6. Разработан и изготовлен импульсный электромагнитный ондулятор с периодом - 4 см и числом элементов периодичности - 20, специально предназначенный для установки на орбиту электронного синхротрона "Пахра". Предложен, изготовлен и испытан на синхротроне "Пахра" универсальный спиральный ондулятор, в котором вид поляризации электромагнитного излучения может легко перестраиваться.

7. Аналитически и методом численного моделирования исследована связь характеристик ондуляторного излучения с параметрами излучающих пучков. Разработана методика использования ондуляторного излучения для измерения параметров пучков заряженных частиц, таких как эмиттанс, поперечные размеры и угловые расходимости.

8. Впервые осуществлена генерация интенсивного узконаправленного излучения в длинноволновой области спектра путем введения в прямолинейный промежуток синхротрона "Пахра" импульсного дшгального магнитного поля. Экспериментально исследованы спектрально-угловые и энергетические характеристики излучения релятивистских электронов в таком поле. Энергия электронов изменялась вплоть до 850 МэВ.

9. Развита теория движения положительно заряженных частиц при каналировании в изогнутых кристаллах. Впервые с помощью анализа поперечного движения каналированных частиц на фазовой плоскости определены области устойчивого и неустойчивого движения. Исследована зависимость эффективности захвата частиц в изогнутые каналы от параметров пучков. Для фокусировки вторичных частиц - родителей нейтрино - предложена оригинальная конструкция кристаллического горна, состоящего из набора изогнутых кристаллов, размещенных аксиально симметрично относительно оси первичного пучка.

10. Исследован новый вид излучения, сопровождающий каналирование положительных заряженных частиц в изогнутом кристалле. Рассмотрена связь его характерных частот с параметрами траектории частицы. Установлено, что на длине кристалла в несколько сантиметров полные потери энергии на излучение при каналировании позитронов сверхвысоких энергий могут составлять половину и более от начальной энергии частицы. Результаты выполненного в диссертации исследования радиационных эффектов, сопровождающих каналирование позитронов высокой энергии в изогнутых кристаллах, позволяют надеяться на получение позитронных пучков высокой энергии со степенью поляризации 10-20 %.

11. Для генерации интенсивного потока циркулярно-поляризованных квазимонохроматических фотонов высокой энергии на электрон-позитронном коллайдере в области взаимодействия встречных пучков предложено установить спиральный ондулятор. Показано, что энергия фотонов, возникающих в результате обратного комптоновского рассеяния ондулятор-

ного излучения одного из пучков на частицах встречного пучка, гораздо больше, а их спектральное распределение значительно уже, чем при использовании комптоновского рассеяния лазерных фотонов.

12. Впервые осуществлен медленный вывод частиц из синхротрона с использованием нелинейного резонанса радиальных бетатронных колебаний четвертого порядка. Выполнено обоснование, расчет, проектирование и сооружение системы медленного вывода электронов из синхротрона "Пахра". Проведены теоретические и экспериментальные исследования нелинейной динамики процесса резонансной раскачки колебаний и эффективности заброса электронов в отклоняющие септум-магниты, позволившие оптимизировать параметры системы. Вывод устойчиво осуществляется в диапазоне энергий 250-680 МэВ.

13. Разработаны малоапертурные секционированные импульсные отклоняющие септум-магниты с малыми рассеянными магнитными полями. Выполнено исследование их характеристик на макетах и изготовлены рабочие образцы, которые надежно работают в течение многих лет на синхротроне "Пахра" в условиях высокого вакуума и жестких радиационных условиях. Разработанная конструкция позволяет создавать септум-магниты с тонкими внешними токовыми шинами и магниты изогнутой формы.

Развит и осуществлен на синхротроне "Пахра" оригинальный метод формирования градиентного и октупольного поля в рабочей области синхротрона, позволяющий регулировать его показатель поля и вносить соответствующую нелинейность в широком диапазоне энергий. Для этих целей используются специальным образом скоммутированные мощные полюсные обмотки.

14. Проведено экспериментальное изучение динамики поперечных размеров электронного пучка в синхротроне "Пахра". Использовалось скоростное фотографирование с помощью синхротронного излучения. Показано, что пучок имеет в сечении форму, близкую к круговой. Для интерпретации опытных данных было выполнено математическое моделирование. На основании расчетов сделаны оценки продольных размеров и энергетического разброса электронных сгустков.

Развит новый метод расчета замкнутой орбиты в циклическом ускорителе. Ее вычисление сводится к определению собственного вектора пол-

ной матрицы перехода для кольца синхротрона и трассировки с этим вектором искомой орбиты. Предложен эффективный алгоритм нахождения собственного вектора. Разработан оптимальный способ коррекции магнитного поля синхротрона "Пахра".

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в работах

- [1] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. Исследование излучения релятивистских частиц в ондуляторах. - Препринт ФИАН СССР N 23. - Москва, 1972.
- [2] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. Об излучении релятивистских частиц в ондуляторах // ЖТФ. 1972. Т. 42. N 9. С. 1921-1926.
- [3] Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А. Возможность вывода частиц из синхротрона на резонансе четвертого порядка // Кр. сообщ. физ., ФИАН СССР. 1972. N 1. С. 18.
- [4] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. О влиянии продольного движения электронов на спектр излучения в ондуляторе // Крат, сообщ. по физике ФИАН. 1972. N 8. С. 47 - 50.
- [5] Башмаков Ю.А. О влиянии дополнительных нелинейностей на динамику частиц при медленном выводе. // Кр. сообщ. физ., ФИАН СССР. 1972. N 11. С. 47.
- [6] Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А. Динамика частиц при медленном выводе из синхротрона "Пахра" на резонансах $3/4$ и $2/3$. - Препринт ФИАН СССР N 105. - Москва, 1972.
- [7] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А. др. Синхротронное и ондуляторное излучение электронного ускорителя ФИАН "Пахра" // Труды 3-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - М.: Наука, 1973. Т. 1. С. 39-42.

- [8] Артемьева З.Л., Башмаков Ю.А., Шорин К.Н., Яров А.С. Методика прецизионных измерений частот бетатронных колебаний в режиме медленного вывода частиц из синхротрона. //Крат, сообщ. по физике ФИАН. 1973. N 2. С. .
- [9] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. К теории ондуляторного излучения // ЖТФ. 1973. Т. 43. N 10. С. 2126-2132.
- [10] Башмаков Ю.А., Шорин К.Н. Динамика частиц при параметрическом резонансе в синхротроне. // Кр. сообщ. физ., ФИАН СССР. 1974. N. . С. .
- [11] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. Ондуляторное излучение. // Синхротронное излучение. Труды ФИАН СССР. 1975. Т. 80. М.: Наука, С. 100-125.
- [12] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. Устройство для преобразования энергии заряженных частиц в поляризованное электромагнитное излучение. - Материалы Всесоюзной конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей". Томск, 1975. С. 212-213.
- [13] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Бессонов Е.Г., Головин А.С, Черенков П.А. Магнитный ондулятор для синхротрона "Пахра". - Материалы Всесоюзной конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей". Томск, 1975. С. 214-215.
- [14] Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Карпов В.А., Писарев В.Е., Шорин К.Н. Отклоняющий септум-магнит. - Материалы Всесоюзной конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей". Томск, 1975. С. 8-9.
- [15] Башмаков Ю.А. Исследование фазовых траектории вблизи нелинейных резонансов. - Материалы Всесоюзной конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей". Томск, 1975. С. 7-8.

- [16] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. Генерация циркулярно-поляризованного электромагнитного излучения // ЖТФ. 1976. Т. 46. N 11. С. 2392-2397.
- [17] Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Карпов В.А., Писарев В.Е., Шорин К.Н. Отклоняющий магнит. Описание изобретения к авторскому свидетельству N555790.
- [18] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. О тормозном излучении релятивистских электронов в кристалле. - Всесоюзное совещание по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. 8-ое. Москва, 1976. Труды 1977. Изд. МГУ, С. 266.
- [19] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. Устройство для получения поляризованного электромагнитного излучения. - Описание изобретения к авторскому свидетельству N 538508 и Бюлл. Изобр. и Тов. знаков, 1976, N 45, с.213.
- [20] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г., Говорков Б.Б. Применение спирального ондулятора для получения пучка электронов высокой энергии с малой примесью адронов на протонных ускорителях. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. N 11, с.487.
- [21] Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. Об излучении поляризованных гамма-квантов высокой энергии электрон-позитронными пучками, движущимися в периодическом магнитном поле. // 5-ое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 5-7 октября 1976 г.). Аннотации докладов, М., 1976, с.115.
- [22] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г., Говорков Б.Б. Использование спирального ондулятора на электронных пучках высокой энергии протонных синхротронов для разделения частиц и получения квазимонохроматических фотонов // Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. - Серпухов, 1977. Т. 2. С. 124.
- [23] Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. Метод получения поляризованных фотонов высокой энергии на установках со встречными пучками //

Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. - Серпухов, 1977. Т. 2. С. 118-123.

- [24] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Бессонов Е.Г., Черенков П.А. Ондюлятор как источник электромагнитного излучения. Препринт ФИАН СССР N 139. - Москва, 1977 (англ.), препринт ФИАН СССР N 13. - Москва, 1978.
- [25] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Бессонов Е.Г., Черенков П.А. Наблюдение ондуляторного излучения на синхротроне "Пахра" // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 26. N 7. С. 225-229.
- [26] Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Карпов В.А., Писарев В.Е., Шорин К.Н. Отклоняющий септум-магнит // ПТЭ. 1977. N 3. С. 21.
- [27] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Бессонов Е.Г., Лифшиц А.М., Михайлин В.В., Черенков П.А. Экспериментальное исследование спектрального и углового распределения интенсивности ондуляторного излучения // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. N 11. С. 625.
- [28] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Бессонов Е.Г., Черенков П.А., Лифшиц А.М., Михайлин В.В. Экспериментальное исследование свойств ондуляторного излучения на синхротроне "Пахра" // Труды 6-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна: ОИЯИ, 1979. - Т. 2. С. 221-223.
- [29] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г., Говорков Б.Б. Излучение поляризованных квазимонохроматических гамма-квантов ультрарелятивистскими электронами в поперечном периодическом магнитном поле // Ядерная физика. 1978. Т. 27. N 4. С. 971-975.
- [30] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Бессонов Е.Г. Особенности излучения электронов в ондуляторах с большими полями. // Труды 6-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна: ОИЯИ, 1979. - Т. 2. С. 216-219.

- [31] Башмаков Ю. А. Вопросы излучения релятивистских заряженных частиц в периодических полях ондуляторов. Автореферат диссертации ... канд. физ.-мат. наук. - М.: ФИАН СССР. 1979.
- [32] Alferov D.F., Bashmakov Yu.A., Belovintsev K.A., Bessonov E.G., Cherenkov P.A. The undulator as a source of electromagnetic radiation // Part. Acceler. 1979. V. 9. P. 223-236.
- [33] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А. и др. Источники ондуляторного излучения. Теория, эксперимент, применения // УФН. 1979. Т. 128, С. 177-180.
- [34] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Черенков П.А. Экспериментальное исследование пространственной монохроматичности ондуляторного излучения // ДАН СССР. 1980. Т. 252, С. 1106-1110.
- [35] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А. Измерение параметров пучков заряженных частиц по ондуляторному излучению. - Тр. 7-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна ОИЯИ, 1981. - Т. 2. С. 130-135.
- [36] Башмаков Ю.А., Карпов В.А., Яров А.С. Экспериментальное исследование электронного пучка в синхротроне "Пахра". Препринт ФИАН СССР N 231. - Москва, 1981.
- [37] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А. Излучение релятивистских электронов в слабом магнитном поле с резкими границами // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. N 1. С. 15-19.
- [38] Bashmakov Yu.A. Radiation and spin separation of high energy positrons in bent crystals // Rad. Eff. 1981. V. 56. P. 55-59.
- [39] Alferov D.F., Bashmakov Yu A., Cherenkov P.A. Experimental study of spectral-angular features of relativistic electron emission in undulators // Rad. Eff. 1981. V. 56. P. 47.
- [40] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Михайлин В.В., Лифшиц А.М., Лерман А.А., Черенков П.А. Измерение спектрального распределения интенсивности ондуляторного излучения // ДАН СССР. 1981. Т. 256. С. 574-577.

- [41] Alferov D.F., Bashmakov Yu.A. Relativistic-electron radiation caused by introducing a weak magnetic field in the synchrotron's straight section. Collaborative research in synchrotron radiation, Proc. UK-USSR Seminars held at Darsbery Laboratory, November, 1982, J.B.West ed., Darsbery Laboratory, 1984. P. 12-15.
- [42] Bashmakov Yu.A., Bessonov E.G. On certain features of particle radiation in natural undulators - crystals // Rad. Eff. 1982. V. 66. P. 85-94.
- [43] Башмаков Ю.А. Излучение и разделение по спинам позитронов высокой энергии в изогнутых кристаллах // Тр. ФИАН СССР. 1983. Т. 143. С. 49-56.
- [44] Алексеев В. И., Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А. и др. Работы по исследованию и использованию синхротронного и ондуляторного излучения на синхротроне "Пахра": Препринт ФИАН СССР. N 186. - Москва, 1983.
- [45] Башмаков Ю.А., Карпов В.А., Яров А.С. Динамика электронного пучка в синхротроне с быстрым магнитным циклом. ЖТФ, 1984, Т.54, N5, с.905-911 .
- [46] Башмаков Ю.А., Карпов В.А. О формировании мгновенной орбиты в синхротроне. Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна: ОИЯМ, 1985. - Т. 2. С. 190-193.
- [47] Башмаков Ю.А., Карпов В.А., Яров А.С. Оптическая диагностика электронного пучка на синхротроне "Пахра" // ПТЭ. 1984. N 6. С. 30-33.
- [48] Башмаков Ю.А. К теории синхротронного излучения в неоднородных магнитных полях. - Препринт ФИАН СССР N 96. - Москва, 1985.
- [49] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А. Спектрально-угловые характеристики излучения пучка релятивистских заряженных частиц в ондуляторе I // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 3. С. 829-834.

- [50] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А. Спектрально-угловые характеристики излучения пучка релятивистских заряженных частиц в ондуляторе II // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 6. С. 1090-1098.
- [51] Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А. О влиянии углового разброса пучка на усиление лазера на свободных электронах//КЭ. 1985. Т. 12. С. 1926-1931.
- [52] Башмаков Ю.А. Синхротронное излучение из магнита с прямолинейными промежутками // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 3. С. 515-520.
- [53] Башмаков Ю.А. Формирование магнитного поля для медленного вывода электронов из слабофокусирующего синхротрона. - Препринт ФИАН СССР N 338. - Москва, 1986.
- [54] Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Карпов В.А., Вывод электронов из синхротрона "Пахра" на резонансе четвертого порядка // Труды 11-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна: ОИЯИ, 1988. - Т. 2. С. .
- [55] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Черенков П.А. Излучение релятивистских электронов в магнитном ондуляторе // УФН. 1989. Т. 157. С. 389-436.
- [56] Башмаков Ю.А. Формирование мультипольных магнитных полей для медленного вывода электронов из слабофокусирующего синхротрона на резонансе четвертого порядка // ПТЭ. 1989. №6. С. 44-47.
- [57] Bashmakov Yu.A., Belovintsev K.A., Karpov V.A. An extraction of electrons from a synchrotron on fourth- order resonance. EPAC'90, Nice, June 12-16,1990, Proc. 2nd European Particle Accelerator Conf., Editions Frontieres, V.2, P. 1601-1603.
- [58] Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Карпов В.А., Медленный вывод электронов из синхротрона "Пахра". - Препринт ФИАН СССР N231. - Москва, 1991.
- [59] Bashmakov Yu.A., Karpov V.A. Evaluation of the synchrotron closed orbit. PAC'91, San Francisco, May 6-9, 1991, Proc. 1991 IEEE Part. Accel. Conf., 1991. V. 3. P. 1681-1683.

- [60] Bashmakov Yu.A., Phase trajectory analysis at the nonlinear resonances. PAC'91, San Francisco, May 6-9, 1991, Proc. 1991, IEEE Part. Accel. Conf., 1991. V. 3. P. 1684-1686.
- [61] Башмаков Ю.А. Пучки заряженных частиц: наблюдение, диагностика и коррекция // УФН. 1991. Т. 161. С. 205-209.
- [62] Bashmakov Yu.A. Synchrotron radiation of electrons in the edge magnetic fields of storage rings // Rev. Sci. Instrum., 1992. V. 63. N. 1. P. 343-346.
- [63] Bashmakov Yu.A. Numerical Technique for Solving of Nonlinear Dynamics Equations. Bulletin of the American Physical Society, Program of the 1993 Particle Accelerator Conference, May 1993, V. 38. N. 4.
- [64] Bashmakov Yu.A., Karpov V.A. Magnetic Pulsed Septa for the Synchrotron "Ракига". MT-13, Victoria, Canada, September 20-24, 1993 // IEEE Transactions on Magnetics. V. 30. No. 4. Part II. 1994. P. 2597-2599.
- [65] Bashmakov Yu.A. Radiation and spin separation of high energy positrons by bent crystal. " High energy spin physics, Eleventh International Symposium, Bloomington, In 1994, K.J.Heller, S.L.Smith eds., AIP Conf. Proc. V. 343. P. 312-316 (AIP, New York, 1995)
- [66] Bashmakov Yu.A., Karpov V.A. Investigation of Particle Dynamics at Fourth Order Nonlinear Resonance. Bulletin of the American Physical Society, Program of the 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators, May 1995, V. 40. N. 3. P. 1238.
- [67] Bashmakov Yu.A. Dynamics of Positively Charged Particles in Bent Crystals. Bulletin of the American Physical Society, Program of the 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators, May 1995, V. 40. N. 3. P. 1239.
- [68] Bashmakov Yu.A. Polarization phenomena at high energy positrons channeling in bent crystal. European Research Conference on Nuclear

Physics: Polarization in Electron Scattering. P.M.Nomikos Conference Center, Santorini, Greece, 12-17 September 1995, P. 64.

- [69] Bashraakov Yu.A. Polarization effects at high energy positrons channeling in bent crystal. XIV International Conference on Particles and Nuclei, 22 - 28 May 1996. Abstracts, section 2, P. 649.
- [70] Bashmakov Yu. A. Synchrotron radiation in inhomogeneous magnetic fields. EPAC'98, Stockholm, 22-26 June, 1998, Proc. 6th European Particle Accelerator Conf., Editions Frontieres, P. 565-567.
- [71] Bashmakov Yu. A. Crystal horn for neutrino beam formation. EPAC 2000, Vienna, 26 to 30 June 2000, 7th European Particle Accelerator Conf. A Europhysics Conf. Proc. - Edit. Board: Laclare J.-L., Mitarof W., Petit-Jean-Genaz Ch., Poole J., Regler M. Austrian Academy of Sciences Press. P. 2225-2227.
- [72] Bashmakov Yu.A., Karpov V.A. Synchrotron closed-orbit computation. IOAP 2000, 6th International Computational Accelerator Physics Conf., September 11-14, 2000, Darmstadt, Program and Abstracts, P. 118.

№ - 8250

3

350

Подписано в печать 15.04.2004 г.
формат 60x84/16. Заказ № 40. Тираж 100 экз. П.л. 3.0
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика.
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 132 51 28