К программе курса «Диагностика пучков заряженных частиц»
1-го семестра, 3-го курса, факультета РЭФ

Составил: **Дорохов Виктор Леонидович**

Последняя редакция: **08.12.2025 г.**

План лекций

1. **Место и роль ускорителей заряженных частиц в современном научном эксперименте и в технологии**

   Ключевые понятия: Основные направления применения ускорителей: ядерная физика, физика элементарных частиц, синхротронное излучение (СИ), лазер на свободных электронах (ЛСЭ), дефектоскопия, радиационная химия и т.п.

2. **Краткий исторический обзор развития ускорителей. Ключевые принципы ускорения, физические основы и конструкция ускорителей различных типов**

   Ключевые понятия: ускорители прямого действия; линейные резонансные ускорители; линейные ускорители Видероэ и Альвареца; циклические ускорители; резонансное ускорение; классический циклотрон и его ограничения; синхроциклотрон и его ограничения; синхротрон; индукционное ускорение; бетатрон; микротрон; лазеры на свободных электронах

3. **Движение пучка в ускорителе. Линейное приближение.**

   Ключевые понятия: сопровождающая система координат; уравнения поперечного движения частиц; бетатронные колебания; амплитуда и частота бетатронных колебаний; бетатронное число; бетатронная частота; набег бетатронной фазы; эмиттанс

4. **Измерение параметров пучка. Задачи диагностики пучка.**

   Ключевые понятия: сгруппированный пучок; ток пучка; ключевые задачи диагностики; основные типа датчиков; разрушающая и не разрушающая диагностика; контактные датчики; оптические датчики; электромагнитные датчики; временное и пространственное разрешение; point-spread function (PSF); цилиндр Фарадея; люминофорный экран; датчик на переходном излучении; датчик на основе излучения Вавилова; проволочный вторично-эмиссионный датчик; микроканальный датчик; ионизационный датчик; пучковый датчик; лазерный измеритель профиля

пучка; фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); диссектор; стрик-камера; интерферометр; рентгеновская камера-обскура; волноводный датчик; электростатический датчик; магнитоиндукционный датчик

5. **Цилиндр Фарадея. Люминофорный экран.**

   Ключевые понятия: прохождение заряженных частиц через вещество; ионизационные и радиационные потери; пик Брегга; формула Бете-Блоха, эффективный пробег электронов в веществе; коэффициент отражения частиц; порошковые люминофоры; керамические люминофоры; полимерные люминофоры; монокристаллические сцинтилляторы; гигроскопичность люминофорных материалов; конструкции люминофорных датчиков с люминофором в вакуумном объеме и атмосфере (преимущества и недостатки); пространственное разрешение ограничеваемое материалом люминофорного экрана; время высвечивания люминофора

6. **Датчик на основе переходного излучения**

   Ключевые понятия: угловое распределение интенсивности переходного излучения; спектрально-угловая плотность переходного излучения излучения; особенности поляризации; визуализация поперечного распределения пучка в случае наклонённой мишени; классическая схема датчика; PSF датчика

7. **Датчик на основе излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ)**

   Ключевые понятия: теоретическая модель; спектр и условия возникновения; угол направленности ИВЧ; временное разрешение датчика и его основные ограничения; кпитерии выбора материала датчика

8. **Синхротронное излучение. Монитор поперечного профиля пучка по СИ в видимом диапазоне.**

   Ключевые понятия: теоретическая модель; полная мощность СИ; спектрально угловое распределение и особенности поляризации СИ из поворотного магнита; критическая энергия и критическая длина волны; угловая направленность СИ; классическая схема монитора профиля пучка; фундаментальные огарничения пространственного разрешения; вклад в PSF монитора поперечного профиля глубины резкости, дифракции и изгиба кривой траектории пучка частиц; пределы применимости классического монитора поперечного профиля пучка в видимой области СИ

9. **Электронно оптические преобразователи (ЭОП) в диагностике пучка с использованием излучения в видимом диапазоне.**

   Ключевые понятия: ФЭУ; особенности спектральной чувствительности фотокатодов; временные характеристики сигналов ФЭУ; области применения ФЭУ в диагностике пучков; многоанодный ФЭУ (МФЭУ); профилометр на основе МФЭУ; электронно оптический диссектор; принцип работы диссектора; сканирование

пилообразным напряжением и фазой, особенности подходов; временное разрешение диссектора; стрик-камера; принцип работы стрик-камеры; временное разрешение стрик-камеры; особенности применения диссектора и стрик-камеры в диагностике продольного распределения пучка частиц в ускорителях

10. **Интерферометр на СИ для измерения поперечных размеров пучков. Рентгеновская камера-обскура.**

    Ключевые понятия: предел разрешения диагностик поперечного профиля в видимой области излучения и методы его преодаления; интерферометр с делением волнового фронта; пространственная когерентность; теорема Ван Циттерта-Цернике; видность интерференционной картины; интерферометр Юнга; особенности конструкции интерферометров по СИ; ограничения интерферометрии в видимом диапазоне; измерение вертикального размера с использованием pi-поляризованной составляющей СИ; камера-обскура; коэффициент масштабирования; зависимость PSF от энергии квантов и размеров отверстия в диафрагме; классическая схема построения; материалы ослабителей, их влияние на спектр; устройство и особенности детектора рентгеновского излучения

11. **Принципы построения оптических систем диагностики пучка**

    Ключевые понятия: вывод излучения из вакуумной камеры установки; материал зеркал; нагрев зеркал; особенности покрытий отражающей поверхности зеркал и их влияние на отраженный спектр; материалы окон вывода, их особенности светопропускания; оптические зеркала в атмосфере; светоделители; поляризаторы; оптические фильтры; подходы к анализу изображений

12. **Магнитноиндукционные датчики**

    Ключевые понятия: Лаплас-изображение сигнала; вихревая функция; магнитоиндукционный датчик положения пучка; трансформаторы тока пучка; защита магнитоиндукционных датчиков от магнитных помех

13. **Двухпроводная линия**

    Ключевые понятия: теорема Пойнтинга; огибающая сигнала двухпроводной линии; зависимость сигнала от поперечных координат пучка; релятивистское сжатие полей пучка; полосковый датчик пучка; квазистатические сигналы двухпроводной линии

14. **Электростатические датчики**

    Ключевые понятия: пикап-электрод (pickup-electrode); теорема Шокли-Рамо; потенциальная функция; определение координат пучка; сигналы электростатического датчика положения пучка; линейные пикап-электроды; широкополосные пикап-электроды; типичные схемы обработки сигнала

15. **Диагностика бетатронных колебаний пучка**

Ключевые понятия: уравнение Хилла; измерение бетатронных частот; набег бетатронной фазы; дробная часть бетатронной частоты; спектральный анализ пооборотных измерений; преобразование Фурье; раскачка пучка ударом; резонансная раскачка пучка; контроль инжекции пучка; измерение хроматизма

16. **Измерение энергии пучка**

    Ключевые понятия: магнитный спектрометр; система измерения энергии методом резонансной деполяризации; эффект Тушека; регистрация процесса резонансной деполяризации; система измерения на основе обратного комптоновского рассеяния; спектр обратного комптоновского рассеяния

Материалы для оценки результатов обучения

Темы докладов

1. Задачи диагностики пучка.
2. Измерение параметров пучка в линейных и кольцевых ускорителях.
3. Контактные датчики – обзор.
4. Цилиндр Фарадея.
5. Люминофорный экран.
6. Датчик с использованием переходного излучения.
7. Датчик на основе излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ).
8. Пучковый датчик.
9. Синхротронное излучение и параметры пучка.
10. ФЭУ – применение в диагностике пучков.
11. Диссектор.
12. CCD/CMOS-матрица как инструмент диагностики пучков.
13. Стрик-камера.
14. Рентгеновская камера-обскура.
15. Принципы построения оптических систем диагностики пучка.
16. Электромагнитные датчики.
17. Резонаторные датчики.
18. Волноводные датчики.

19. Двухпроводная линия.
20. Электростатические датчики.
21. Магнитоиндукционные датчики.
22. Диагностика бетатронных колебаний.
23. Измерение эмиттанса.
24. Измерение энергии пучка.

Перечень вопросов к зачету

1. Задачи диагностики пучка.
2. Краткий исторический обзор развития ускорителей.
3. Контактные датчики – обзор.
4. Цилиндр Фарадея.
5. Люминофорный экран.
6. Датчик с использованием переходного излучения.
7. Датчик на основе излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ).
8. Пучковый датчик.
9. Оптические датчики - обзор.
10. Синхротронное излучение и параметры пучка.
11. ФЭУ – применение в диагностике пучков.
12. Диссектор.
13. ПЗС-матрица как инструмент диагностики пучков.
14. Стрик-камера.
15. Рентгеновская камера-обскура.
16. Принципы построения оптических систем диагностики пучка.
17. Электромагнитные датчики.
18. Резонаторные датчики.
19. Волноводные датчики.
20. Двухпроводная линия.

21. Электростатические датчики.

22. Магнитоиндукционные датчики.

23. Диагностика бетатронных колебаний.

24. Измерение эмиттанса.

25. Измерение энергии пучка.

Список литературы

Основная литература

1. Смалюк, Виктор Васильевич. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / В.В. Смалюк; отв. ред. Н.С. Диканский. — Новосибирск: Параллель, 2009. — 293 с.: ил.; 22 см. — ISBN 978-5-98901-063-9.

2. Лебедев, Андрей Николаевич. Основы физики и техники ускорителей: [Учеб. пособие для физ. и инж.-физ. спец. вузов] / А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М: Энергоатомиздат, 1991. — 528 с.: ил. — ISBN 5-283-03971-4.

3. Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. — М., Атомиздат, 1970.

Дополнительная литература

1. Мешков И.Н., Чириков Б.Н. Электромагнитное поле. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2013 г. — Ч.1: Электричество и магнетизм.

2. Москалев В.А., Сергеев В.И., Шестаков В.Г. Измерение параметров пучков заряженных частиц. — М., Изд-во МГУ, 1980 (другое издание: Энергоатомиздат, 1991).

3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. — М.: Мир.