

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский университет ИТМО»**

Физико-технический мегафакультет
Инженерно-исследовательский факультет

РЕФЕРАТ

по дисциплине **«Введение в профессиональную деятельность»**

**ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В УСКОРИТЕЛЯХ С
ПОМОЩЬЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Выполнил
студент группы № В5108
Федоров Вячеслав Васильевич

Проверил
доцент, канд. техн. наук
Чертов Александр Николаевич

Санкт-Петербург
2021

Содержание

| | Стр. |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Диагностика пучков заряженных частиц | 4 |
| 1.1 Задачи диагностики | 4 |
| 1.2 Свойства пучков заряженных частиц | 4 |
| 1.3 Важные свойства синхротронного излучения | 6 |
| Глава 2. Измерение поперечного профиля пучка | 8 |
| 2.1 Люминофорный экран | 8 |
| 2.2 Многооборотный профилометр | 10 |
| 2.2.1 Фотоэлектронный умножитель | 11 |
| 2.2.2 Многоанодный ФЭУ | 12 |
| Глава 3. Измерение продольных размеров пучка | 14 |
| 3.1 Камера-обскура | 14 |
| 3.2 Стрик-камера | 15 |
| Заключение | 18 |
| Список литературы | 19 |

Введение

Ускорители заряженных частиц бывают двух типов: линейные и циклические. Линейные ускорители используются в основном как источники электронов и жесткого рентгеновского излучения в медицинских целях и в промышленности. Также они являются обязательным звеном в физике высоких энергий. Линейные ускорители являются источниками и предускорителями электронов для больших циклических ускорителей и коллайдеров. Циклические ускорители позволяют получать синхротронное излучение, которое широко применяется в промышленности и в науке. В свою очередь, коллайдеры — это единственная возможность проводить эксперименты физики элементарных частиц и физики высоких энергий.

На данный момент времени ускорители функционируют на пределе технических возможностей человечества. Для их правильной работы нужна регулярная настройка и корректировка параметров по результатам измерений. В данной области науки нужны современные методы диагностики, при этом, эти методы преимущественно должны быть бесконтактными и не влиять на исследуемый объект.

Существует множество разновидностей методов для диагностики пучков заряженных частиц. В данном реферате представлен обзор оптических методов диагностики пучка заряженных частиц. Рассмотрены физические принципы работы оптических датчиков пучка.

Глава 1. Диагностика пучков заряженных частиц

Сначала рассмотрим задачи диагностики и преимущества оптических методов диагностики, затем кратко изложим свойства пучков заряженных частиц и важные свойства синхротронного излучения.

1.1 Задачи диагностики

Человек почти всю информацию об окружающей его природе получает в оптическом диапазоне. Менее десяти процентов приходится на остальные диапазоны. С этой точки зрения все методы диагностики чего-либо относятся к «оптическому» диапазону. Чтобы отделить нужные нам методы, условимся, что под оптическими методами диагностики будем понимать все диагностики, которые при своей работе регистрируют излучение в оптической области спектра.

Оптические методы диагностики применяются в основном для измерения геометрических размеров пучка $\sigma_{x,y,z}$ (см. рис. 1.1), так как другими методами получить поперечные и продольный размеры невозможно. Также оптические методы могут применяться для измерения всех остальных параметров (энергетический разброс, распределение тока, время жизни и др.), однако часто это намного проще измерить другими методами. Подробнее о разнообразии методов и задач диагностики можно прочитать в книге [1].

1.2 Свойства пучков заряженных частиц

Известно, что отдельно взятая частица, обладающая зарядом в отсутствии электрических и магнитных полей, имеющая скорость v , обладает энергией $E = \gamma mc^2$, где $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ — релятивистский фак-

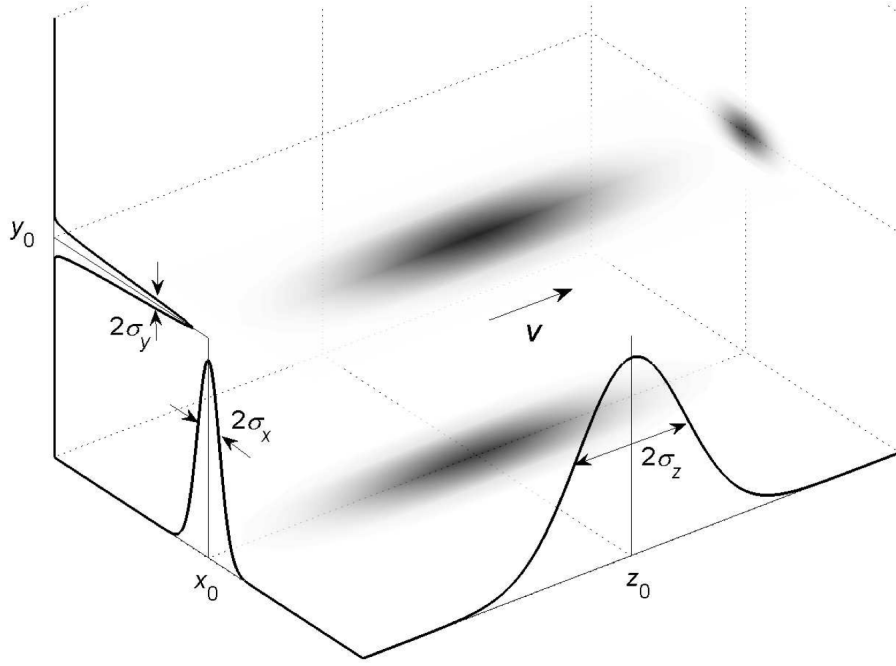


Рисунок 1.1 — Пучок заряженных частиц [1]

тор, m — масса, c — скорость света. Координаты ее записываются векторами: радиус-вектором $\vec{r} = (x, y, z)$ и импульс вектором $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$. В астрофизике и физике ускорителей для удобства используется сопутствующая система координат, представляющая собой отклонения от координат равновесной частицы.

Пучок зараженных частиц следует рассматривать как статистический ансамбль в шестимерном пространств координат и импульсов. А так как число частиц очень велико ($\sim 10^{10}$), нужно перейти к функциям плотности заряда ρ и плотности тока \vec{j} .

Пучок с распределением $\rho(x, y, z)$, движущийся вдоль продольной оси z (рис. 1.1), характеризуется положением центра масс \vec{r}_0 , поперечными размерами σ_x, σ_y и продольным размером σ_z . Полный заряд такого пучка можно вычислить как $q = \iiint \rho d\vec{r}$.

Здесь были приведены лишь некоторые свойства пучков заряженных частиц, более подробно изучить физику пучков можно по любому соответствующему учебнику, например по учебникам [2; 3].

1.3 Важные свойства синхротронного излучения

Синхротронное излучение (СИ) возникает при повороте релятивистских заряженных частиц. В ускорителях СИ возникает в поворотных магнитах. Свойства СИ определяются энергией частиц E и радиусом поворота R в дипольном магнитном поле B . Свойства синхротронного излучения хорошо описаны во многих учебниках и курсах лекций, например в [4]. Особенности СИ:

- параметры излучения точно рассчитываются;
- поляризованное излучение;
- малая угловая расходимость $\approx \gamma^{-1}$;
- широкий спектральный диапазон;
- периодическая временная структура.

На рис. 1.2 схематично изображено СИ, испускаемое релятивистским электроном, движущегося по окружности. В вертикальной плоскости СИ сосредоточено в телесном угле $d\Omega \approx \gamma^{-1}$.

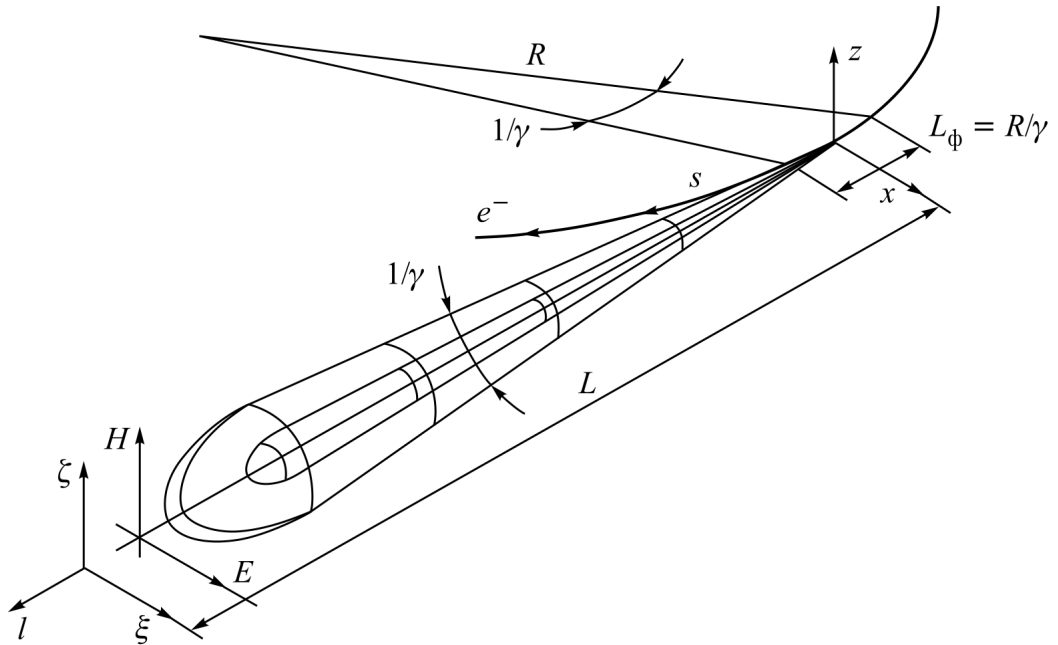


Рисунок 1.2 — Синхротронное излучение релятивистского электрона, движущегося по окружности [1]

Следующие оценки величин СИ являются существенными:

Критическая длина волны λ_c СИ из поворотного магнита R : $\lambda_c = R/\gamma^3 \approx 5.59R(m)/E(GeV)$.

Полная мощность P СИ излучаемая в пределах $\Delta\phi$: $P(kW) = 14.079E^4(GeV)I(A)\Delta\phi/R(m) \approx 5.59R(m)/E(GeV)$.

Дифракционный предел, или пространственное разрешение, равен $d_{min} = \lambda/4\pi\psi_{rms} \approx 40$ мкм для длины волны 5000 А. Фактически возникновение дифракционного предела связано с принципом неопределенности. Для многих установок именно дифракционный предел устанавливает ограничение на точность измерения поперечных размеров пучка в оптическом диапазоне.

Видимый радиальный размер равен $d_r = 0.5R/4\psi_{rms}^2 \approx 100$ мкм для магнита 1 м и длины волны 5000 А.

Длительность импульса СИ, излученного одним электроном равен $\Delta t \approx R/c\gamma^3$ и обычно не превышает 10^{-15} с. Этот интервал определяется разницей во времени движения по орбите между электроном и излучаемым им фотонами (рис. 1.3). Измерение длительности импульса СИ позволяет с хорошей точностью определять длину банча.

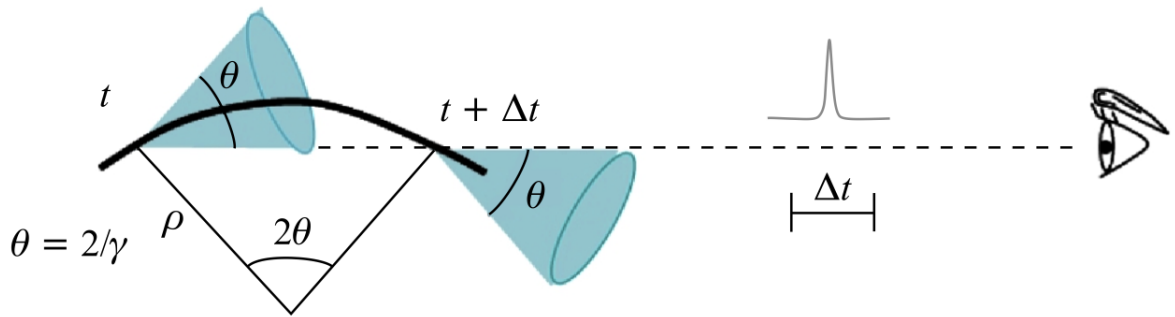


Рисунок 1.3 — Геометрическая интерпретация минимальной длительности импульса [1]

Глава 2. Измерение поперечного профиля пучка

Основной характеристикой пучков заряженных частиц всегда являлась информация о поперечных размерах пучка, о положении его центра масс и о поперечных колебаниях его частиц. Крайне желательно информацию о размерах получать на каждом обороте ультрарелятивистского пучка, т.е. почти непрерывно. В этой главе будут затронуты обязательные для каждого ускорителя архаичные люминофорные экраны и новейшая разработка ИЯФ СО РАН многооборотный профилометр, основанный на ФЭУ.

2.1 Люминофорный экран

Эти устройства являются наиболее доступным средством для измерения параметров пучка и применяются абсолютно на всех ускорителях заряженных частиц. Простейший люминофорный экран — это слой люминофора, специального вещества, которое способно трансформировать энергию в электромагнитное излучение.

Люминесценция на атомарном уровне для каждого люминофора различна, но общую работу люминофора можно разделить на несколько этапов:

- поглощение энергии;
- возбуждение атомов;
- возврат в основное состояние / излучение фотонов.

Схема простого люминофорного экрана показана на рис. 2.1. Люминофорный экран ставится в исходную позицию на пути пучка при помощи дистанционно управляемого привода. В последнее время в большинстве конструкций используется пневматический ввод, достоинством которого является оперативность: время введения экрана в камеру составляет 1-2 с. Для определения параметров пучка наносят координатную сетку на люминофор. Далее, по полученным экспериментальным

зависимостям, например, от величины тока пучка, можно определить такие параметры пучка заряженных частиц, как средние размеры пучка, положения центра масс и др.

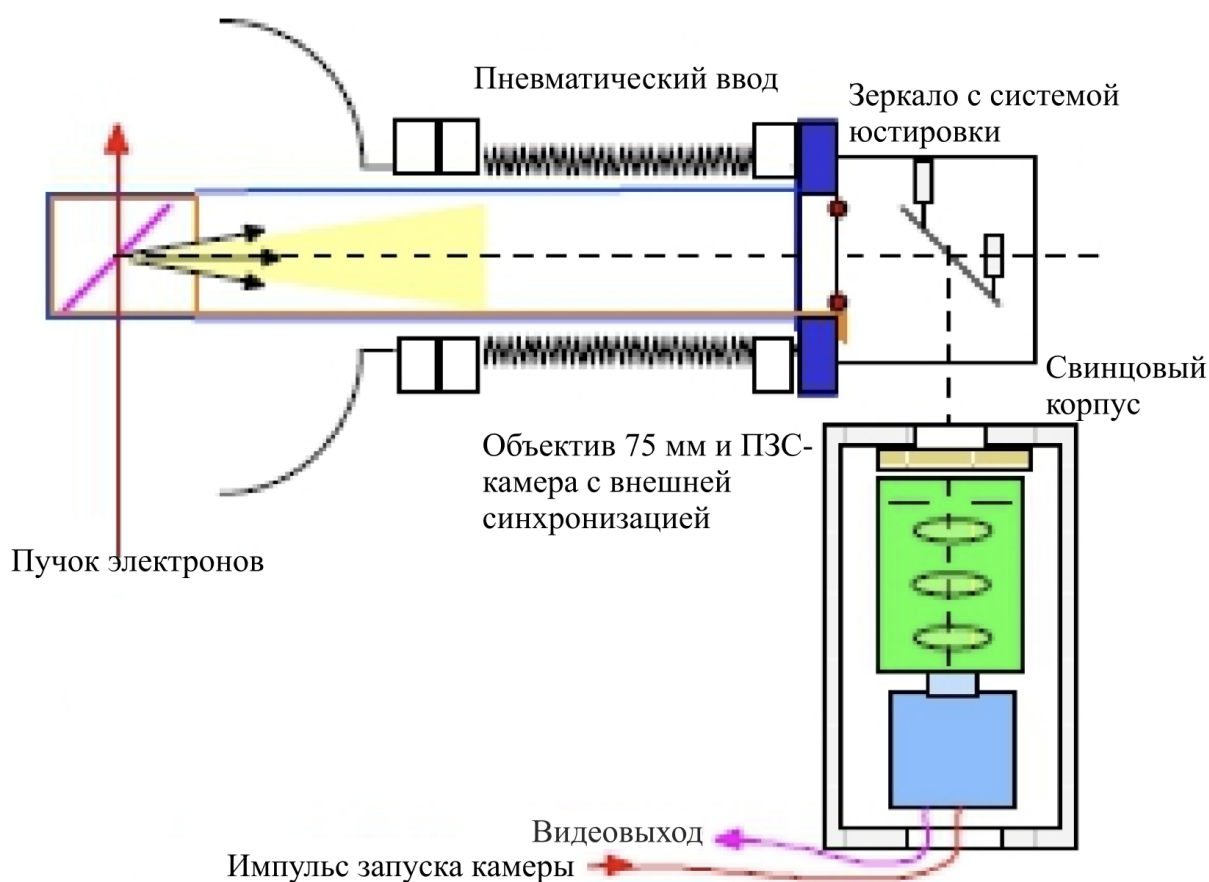


Рисунок 2.1 — Схематическое устройство люминофорного экрана [1]

Люминофоры с удовлетворительной точностью подходят для диагностики пучков с размерами порядка долей миллиметра. Для этого используют оптическую схему с большим увлечением, которая проецирует изображение на сканирующую видеокамеру. В последствии полученные данные обрабатываются на ЭВМ, что позволяет получать распределение частиц пучка с точностью в десятки микрометров.

Люминофорные экраны существуют нескольких видов: порошковые, кристаллические и полимерные.

Порошковые люминофоры. Люминофорный экран изготавливается путем нанесения люминесцентного порошка на металлическую подложку. Разрешение такого люминофора ограничивается средним размером зерна (2-3 мкм), однако из-за многократного рассеяния в веществе обыч-

но составляет несколько десятков микрометров. Время высвечивания таких люминофоров составляет, как правило, несколько миллисекунд.

Кристаллические люминофоры. Наиболее распространенным в последнее время стал иттрий-алюминиевый гранат (YAG:Ce). Ранее был популярен кристалл рубина ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$). Толщина кристалла определяет его пространственное разрешение и чувствительность диагностики. Для кристаллов YAG:Ce достигнуто пространственное разрешение 10 мкм. Время высвечивания кристаллов лежит в диапазоне сотен наносекунд.

Полимерные люминофоры. Люминофорные экраны, изготовленные из органических полимерных материалов, обладают высоким временем излучения в десятки-сотни наносекунд, однако их использование ограничено низкой радиационной стойкостью.

Очевидно, люминофорные экраны относятся к разрушающему виду диагностики, и в этом состоит их основной недостаток. Из-за этого в том числе, люминофорные экраны очень быстро приходят в негодность из-за частых импульсных тепловых нагрузок и радиации. В том числе из строя выходят камеры, которые ведут съемку люминофорного экрана, также со временем темнеют стекла в оптической схеме и т.д. Поэтому здесь еще используются старые, но надежные камеры на основе вакуумных оптико-электронных преобразователей.

Кроме того, предельно достижимое пространственное разрешение как для порошковых люминофоров, так и для кристаллов не лучше 10 мкм.

2.2 Многооборотный профилометр

Зачастую, например, при исследовании разного рода неустойчивостей пучка, можно поступиться пространственным разрешением диагностики в пользу возможности регистрации поперечного профиля распределения частиц на протяжении длительного отрезка времени, вплоть до нескольких сот тысяч оборотов. Для этих целей в ИЯФ СО РАН

был разработан прибор, основанный на многоанодном фотоумножителе (МАРМТ) R59000-00-L16 HAMAMATSU [5].

2.2.1 Фотоэлектронный умножитель

Сверхчувствительным прибором для измерения интенсивности света является фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). ФЭУ преобразуют падающий свет в электрический ток и при этом усиливают сигнал во много сотен раз. Чувствительность ФЭУ близка к предельно возможной. Можно регистрировать отдельные фотоны!

Сочетание высокой чувствительности, низких собственных шумов и широкополосной частотной характеристики обуславливает широкое использование ФЭУ в физике элементарных частиц, ускорительной физике, астрономии и других областях.

Как прибор ФЭУ — это вакуумный объем, в котором содержатся фотокатод, фокусирующий электрод, система динодов, анод (рис. 2.2).

Фотокатод находится на входном окне ФЭУ, что позволяет фотонам, попадающим на него сразу выбивать электроны, которые летят на умножитель (с помощью фокусирующего электрода). Фотоэлектронный умножитель состоит из цепочки динодов. В этой цепочки увеличивается напряжение с каждым динодом. Электроны выбивают из динода вторичные электроны с большей энергией из-за созданного электрического поля между динодами. Такой цикл повторяется много раз, что приводит к колоссальному усилению сигнала. Геометрия динодов выбирается таким образом, чтобы добиться максимального увеличения количества электронов на каждом каскаде, за счет чего достигается большой коэффициент усиления тока электронов. Усиленный электронный поток попадает на анод и генерирует в цепи анода импульс тока, пропорциональный количеству фотонов, попавших на фотокатод.

Для поддержки потенциалов на динодах в несколько киловольт обычно используется один высоковольтный источник и делитель напряжения, основанный на резисторах. Стоит понимать, что к делителю на-

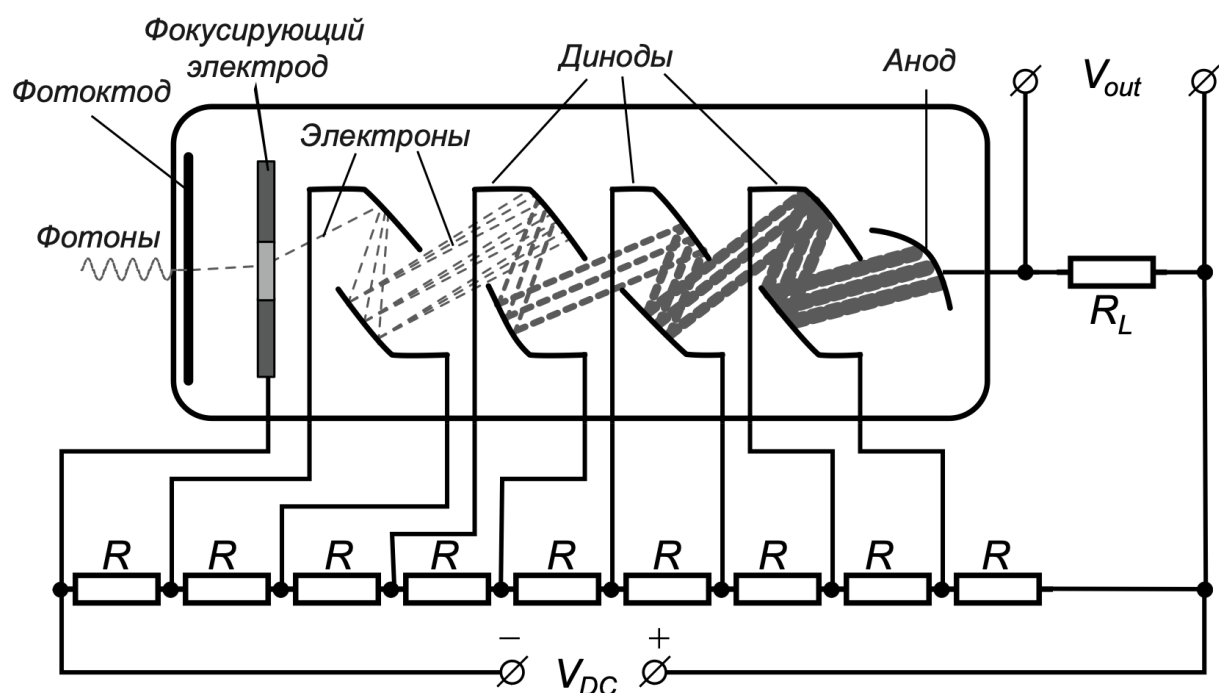


Рисунок 2.2 — Принцип работы ФЭУ [1]

пряжения предъявляются жесткие требования, потому что характеристики делителя напряжения напрямую влияют на ширину полосы прибора.

Из-за высокой чувствительности данные приборы могут использоваться для исследования пучков с малой интенсивностью.

2.2.2 Многоанодный ФЭУ

Ряд интересных задач физики пучков, таких как исследования неустойчивостей, эффектов встречи в коллайдерах, нелинейной динамики пучка и т. д., требуют измерения на каждом обороте как положения центра масс пучка, так и его поперечных размеров. Некоторые эксперименты, например измерение энергетического разброса электронного пучка в циклическом ускорителе, необходимо проводить с пучками малой интенсивности (несколько микроампер) для уменьшения паразитных коллективных эффектов.

Для решения подобных задач в Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН разработан новый прибор для пооборотного измерения по-

перечного распределения интенсивности пучка. В основе прибора — многоанодный фотоэлектронный умножитель (Multianode photomultiplier tube, MAPMT).

Оптическая схема, формирующая на фотокатод изображением пучка, позволяет менять увеличение в пределах от 6 до 20 раз в зависимости от потребностей эксперимента (рис. 2.3).

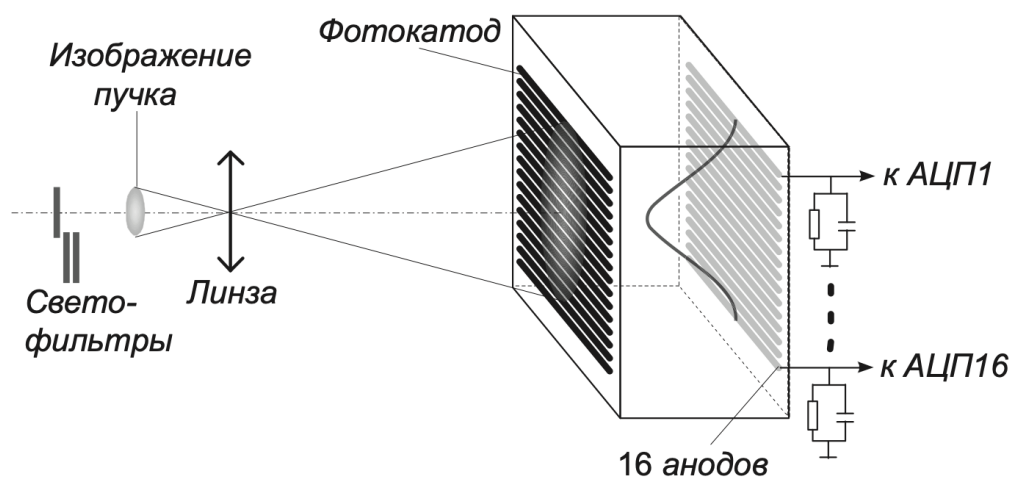


Рисунок 2.3 — Оптическая схема поворотного профилометра [1]

Многоанодный ФЭУ — уникальный прибор, потому что он обладает возможностью собирать информацию о поперечных распределениях пучка на протяжении нескольких сотен оборотов пучка заряженных частиц в ускорителе, а также обладает высокой чувствительностью, позволяющий регистрировать низкоинтенсивные пучки в несколько сотен частиц. Конечно существуют альтернативы в виде дорогой стрик-камеры, которая способна зарегистрировать несколько изображений пучка, или электростатический датчик, но, чтобы добиться удовлетворительной точности нужно минимум восемь электродов, что достаточно дорого и встречается очень редко.

Глава 3. Измерение продольных размеров пучка

При текущей эксплуатации ускорительной техники диагностика должна предоставлять информацию не только о поперечных размерах пучков заряженных частиц, но и о продольном размерах пучков, которые могут иметь в длину порядка несколько сантиметров, что накладывает серьезные ограничения на временную развертку прибора. Она должна превышать предел в 3×10^{-11} с. В тоже время единственным доступным источником информации о продольном размере пучка является высокоэнергетическое СИ поэтому, электронно-оптические приборы должны обладать существенной радиационной и тепловой защитой. В данной главе рассмотрим простой прибор, в основе которого лежит камера-обскура, а также более сложную и дорогую стрип-камеру, задача которой произвести временную развертку пучка заряженных частиц.

3.1 Камера-обскура

Основная мощность синхротронного излучения содержится в рентгеновском диапазоне. Здесь нашли свое применение камеры-обскуры, которые использовались еще в Античности.

На рис. 3.1 изображена стандартный оптический прибор для ускорительной техники, в основе которого лежит камера-обскура.

СИ выводится из камеры через специальное окно, далее, оптическая схема, основанная на камере-обскуры строит изображение на люминофорном экране, которое в свою очередь, регистрируется ПЗС-камерой. Рассматривая схему на рис. 3.1, заметим, что мы можем оценить разрешение прибора. Точечный источник, расположенный на расстоянии d от отверстия, образует пятно на люминофоре, помещенном на расстоянии D за экраном. Следовательно, увеличение камеры-обскуры равно D/d , а ее аппаратная функция (ширина на полувысоте) имеет вид $W = a(1+d/D)$, где a — размер отверстия. Как видно из формулы, разрешение тем луч-

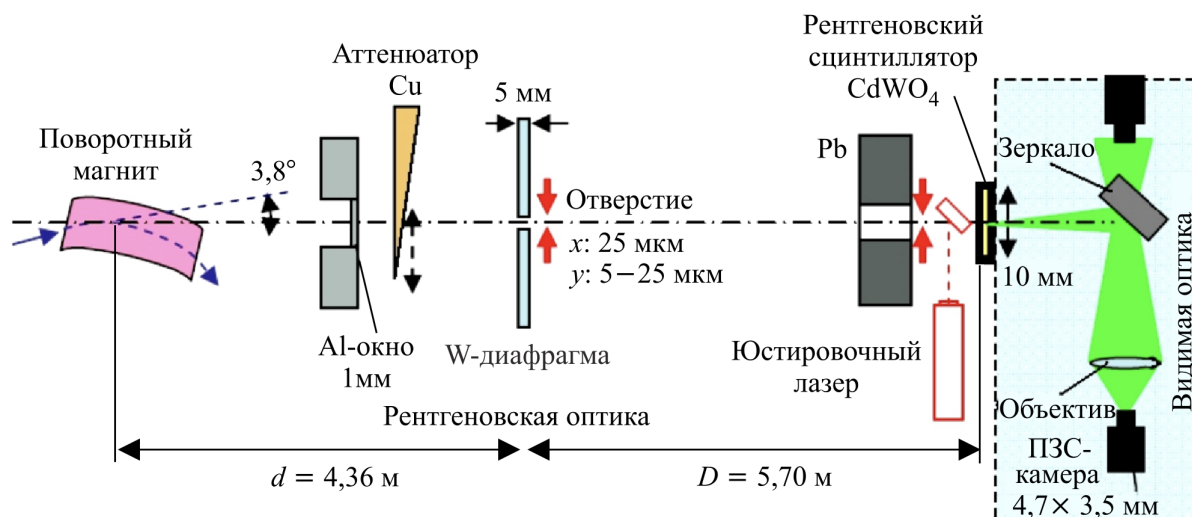


Рисунок 3.1 — Типичное устройство камеры-обскуры в экспериментах с СИ; d — расстояние от пучка до отверстия; D — расстояние между отверстием и люминофором [1]

ше, чем меньше размер отверстия a . Это верно до тех пор, пока можно пренебречь дифракцией, т. е. при соблюдении условия $a > 2\sqrt{\lambda D}$, где λ — длина волны рентгеновского излучения. При дальнейшем уменьшении размеров отверстия разрешение в основном определяется дифракцией.

Чтобы не допустить перенасыщения ПЗС-камеры, в приборе присутствует аттенюатор, которым можно управлять дистанционно. Для увеличения контрастности изображения толщина экрана камеры-обскуры, должна быть как можно меньше.

3.2 Стрик-камера

Стрик-камера (streak camera, от англ. streak - штрих, полоска) - камера со скоростной временной разверткой является очень востребованным инструментом в физике заряженных частиц. Быстрое временное разрешение порядка нескольких пикосекунд и высокая чувствительность являются основными преимуществами данного прибора. Однако, все еще высокая цена не позволяет их использовать повсеместно. Входным сигналом стрик камеры преимущественно является синхротронное излучение. На выходе стрик камера дает двумерное изображение пучков анализ ко-

торого позволяет по лучить информацию о распределении интенсивности и временной структуре входного светового импульса.

Основной принцип работы прибора состоит в скоростной развертке. Рассмотрим устройство стрик-камеры на примере прибора, изображенного на 3.2.

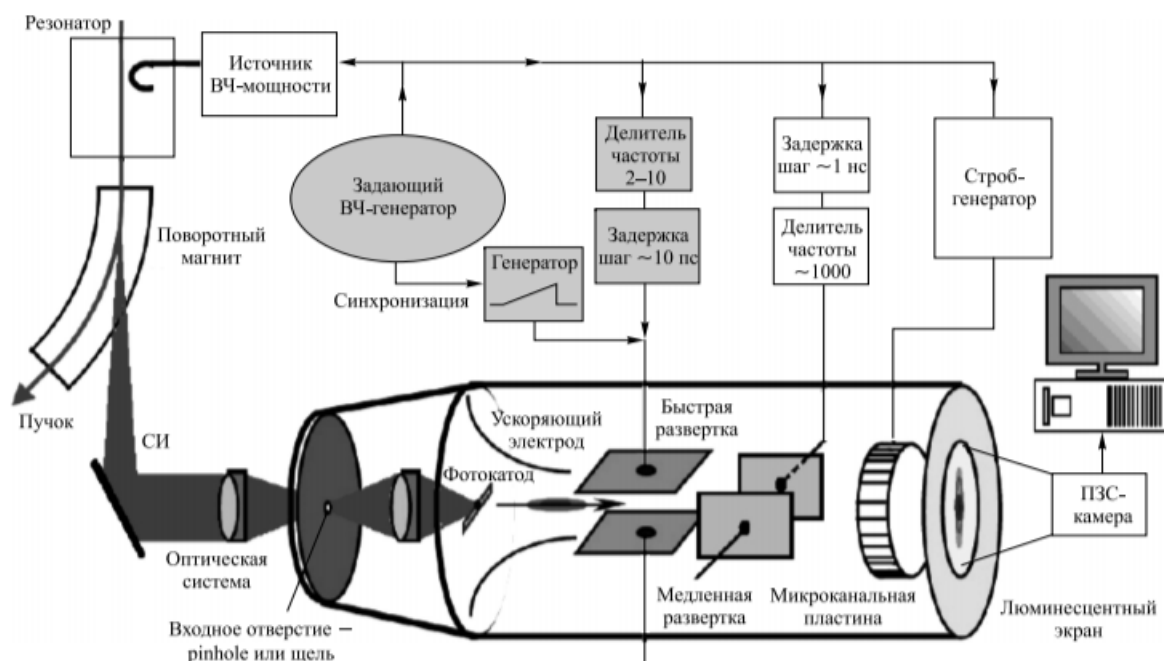


Рисунок 3.2 — Схема стрик-камеры [1]

Короткий (от 10 пс до 1 нс) импульс синхротронного излучения из поворотного магнита проходит оптическую систему и попадает на фотокатод. Фотокатод преобразует падающий свет в пучок электронов, повторяющий временное распределение светового импульса. Электронный пучок после ускорения высоковольтным напряжением проходит через систему отклоняющих электродов. Время нарастания пилообразного импульса развертки порядка длины электронного пучка, что приводит к отклонению частиц пучка по вертикали, пропорциональному продольной координате.

Так получается поперечное распределение частиц. После, происходит стандартное усиление сигнала на микроканальной пластине. И, наконец, поток электронов попадает на люминофор, где интенсивность получившегося светового пятна будет прямо пропорциональна интенсивности электронного пучка. Вертикальное распределение интенсивности изображения пропорционально временному распределению интенсивно-

сти исходного импульса синхротронного излучения, падающего на фото катод. Горизонтальное распределение интенсивности изображения повторяет пространственное распределение импульса СИ. Свет, испускаемый люминесцентным экраном, фокусируется на ПЗС-камере. Оцифрованный сигнал ПЗС камеры передается в управляющий компьютер для последующей обработки [1].

Существует иная разновидность стрик-камеры — это высокочастотная стрик-камера, которая позволяет измерять размеры пучков вплоть до десятых долей микрона. Принцип работы высокочастотной стрик-камеры похож на принцип работы обычной стрик-камеры: продольное распределение пучка уже под действием высокочастотного (ВЧ) электрического поля преобразуется в поперечное распределение, которое в свою очередь проецируется на люминофорный экран. Стоит принять во внимание, что ВЧ-поля естественным образом влияют на пучок заряженных частиц, т.е. высокочастотная стрик-камера — это контактный датчик.

Заключение

С момента появления первых ускорителей заряженных частиц оптические приборы использовались для их диагностики, т.к. обязательным свойством диагностики всегда была бесконтактность, потому что любой контакт при проведении эксперимента исказит свойство изучаемого объекта. На данный момент доступность ПЗС-матриц и АЦП, сделало оптические приборы востребованными и простыми в эксплуатации в диагностике пучка.

Передача информации с минимальными искажениями о параметрах пучка в ЭВМ является главной целью диагностики на данный момент. Сначала, с помощью люминофора, магнитного поля и др. получают электромагнитное излучение от пучка, затем превращают это излучение с помощью оптических схем в удобный формат для исследователя. В результате, остается преобразовать излучение пучка в электрический сигнал с помощью ФЭУ и др., который в последствии можно использовать для обработки на ЭВМ.

Также нужно решать много чисто технических проблем:

- отверстия в вакуумных камерах для вывода синхротронного излучения;
- достаточно жесткие крепления для обеспечения требуемого углового разрешения;
- отсутствие движения воздушных масс;
- охлаждение зеркал.

Вместе с ускорителями заряженных частиц продолжают развиваться и методы их оптической диагностики. В данном реферате были рассмотрены основные разновидности оптико-электронных приборов, которые применяются в области диагностики заряженных частиц. Более подробную информацию о рассмотренных приборах, а также узнать, какие способы диагностики еще существуют, можно найти в книгах [1] и [4].

Список литературы

1. *Смалюк В. В.* Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях // Новосибирск: Параллель. — 2009. — с. 294.
2. *Брук Г.* Циклические ускорители заряженных частиц. Атомиздат // Москва. — 1970. — с. 265.
3. *Мешков И. Н.* Транспортировка пучков заряженных частиц. — Наука. Сиб. отд-ние, 1991.
4. *Кулипанов Г. Н., Скринский А. Н.* Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы // Успехи физических наук. — 1977. — т. 122, № 7. — с. 369—418.
5. New fast beam profile monitor for electron-positron colliders / A. Bogomyagkov [и др.] // Review of scientific instruments. — 2007. — т. 78, № 4. — с. 043305.