

На правах рукописи

Шарафутдинов Алексей Фердаусович

Диагностика электронных пучков низких  
энергий по оптическому переходному  
излучению

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск, 2004

Работа выполнена в государственном научном учреждении  
“Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском  
политехническом университете”.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Потылицын А.П.

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
Рыжов Виктор Васильевич,  
ИСЭ СО РАН  
доктор физико-математических наук,  
Таратин Александр Михайлович,  
ОИЯИ, г. Дубна

**Ведущая организация:** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН  
(г. Москва)

Защита диссертации состоится:   ноября 2004 года в 15 часов на заседании  
Диссертационного Совета Д 212.269.05 Томского политехнического  
университета по адресу:  
634050, г. Томск, пр. Ленина 2а, ГНУ "НИИ ЯФ при ТПУ"

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
Томского политехнического университета.

Автореферат разослан    октября 2004 года.

Ученый секретарь  
Диссертационного Совета,  
кандидат физико-математических наук

Кононов В.К.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

В настоящее время в мире строится новое поколение ускорителей заряженных частиц, имеющих субмиллиметровые размеры пучка, увеличенную стабильность и многократно улучшенную эффективность ускорения. Это продиктовано современными требованиями к качеству ускорителей, которые планируется использовать как источники синхротронного излучения 5-го поколения и в качестве источников для лазеров на свободных электронах. Для подобных ускорителей необходимо разработать методы диагностики, позволяющие не только отслеживать параметры пучка, но и добиваться заданных характеристик, что заставляет использовать методы, позволяющие измерять заданный параметр как минимум в 10 раз лучше, чем это необходимо для ускорителей с фиксированной мишенью или накопительных колец. При этом точность существующих методов зачастую недостаточна либо цена их реализации для заданных параметров пучка слишком высока. Все это заставляет искать новые физические принципы, на которых можно построить необходимую диагностическую аппаратуру.

Измерение параметров пучков низких энергий ( $E_e < 20$  МэВ) становится актуальным в последнее время в связи с широким распространением ускорительной техники в народном хозяйстве. Такие ускорители широко используются, например, в качестве источников излучения для диагностики материалов. Так же такие ускорители широко используются и в медицине. Во всех случаях предъявляются жесткие требования к качеству и стабильности получаемого пучка частиц. Поэтому необходимо разрабатывать методы диагностики, которые с одной стороны, позволяли бы контролировать параметры пучка с приемлемой точностью, а с другой, были относительно дешевыми, чтобы не увеличивать цену конечной установки.

Электроны низких энергий также могут быть использованы в качестве модельных частиц при проектировании методов диагностики для ускорителей тяжелых частиц, например протонов, поскольку характеристики электромагнитного излучения частиц определяется, как правило, Лоренц-фактором частицы. Например, переходное излучение для электрона с энергией 10 МэВ будет точно таким же, как для протонов с энергией  $\sim 20$  ГэВ, и методы измерений в обоих случаях будут одинаковыми.

Одним из таких новых методов измерения параметров пучков заряженных

частиц является использование оптического переходного излучения (ОПИ). Это излучение возникает при пересечении заряженной частицей границы раздела двух сред и зависит только от Лоренц-фактора частицы и ее направления [7]. Этот факт позволяет использовать данное излучение для целей диагностики как положения и сечения электронного пучка [8, 9], так и его угловой расходимости [10, 11].

### **Цель диссертационной работы**

- Создание модели, описывающей влияние угловой расходимости начального электронного пучка на форму ориентационной зависимости ОПИ.
- Экспериментальная проверка созданной модели и обоснование нового метода измерения угловой расходимости электронного пучка.
- Разработка и создание установки, позволяющей измерять ориентационные зависимости ОПИ, профиль и положение единичных макроимпульсов электронов низких энергий, с длительностью в несколько микросекунд.
- Создание установки, позволяющей измерять угловое распределение ОПИ, возникающего под действием макроимпульса электронов низких энергий, с длительностью в несколько микросекунд.

### **Научная новизна работы**

1. Разработана методика измерения угловой расходимости пучка заряженных частиц низких энергий ( $E < 10$  МэВ) путем измерения ориентационной зависимости выхода оптического переходного излучения.
2. Создана экспериментальная установка, позволяющая измерять ориентационные, поляризационные и угловые характеристики ОПИ, а также измерять поперечный профиль электронного пучка с энергией 6,1 МэВ.
3. Впервые измерены ориентационные зависимости оптического переходного излучения для электронов с энергией 6,1 МэВ и экспериментально доказана работоспособность предложенной методики.

4. Достигнутая чувствительность позволила впервые измерить профиль единичного макроимпульса электронов с энергией 6,1 МэВ, а также угловое распределение ОПИ от этого макроимпульса, имеющего длительность несколько микросекунд и интенсивность  $10^{12}$  частиц.

### **Практическая значимость**

Результаты настоящей работы имеют практическое применение для создания станций мониторинга пучков заряженных частиц низких энергий. Аналитические формулы, полученные в настоящей работе, позволяют определить угловую расходимость пучка заряженных частиц низких энергий путём измерения угловых зависимостей оптического переходного излучения. Простота и дешевизна предложенного метода измерений позволяет быстро и без особых затрат внедрить его как на уже построенных, так и на вновь строящихся ускорителях. В работе предложен унифицированный метод, позволяющий измерять как размеры и сечение пучка заряженных частиц, так и его угловую расходимость. Это позволяет строить станции для измерения эмиттанса пучка частиц в реальном времени, что является одним из важных требований для нового поколения ускорителей.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментальная установка и методика изучения свойств излучений, возникающих в различных средах под действием электронного пучка с энергией 6,1 МэВ
2. Результаты измерений угловых и ориентационных зависимостей оптического переходного излучения, возникающего в алюминиевой мишени под действием пучка электронов с энергией 6,1 МэВ. Экспериментальное исследование поляризационных свойств этого излучения.
3. Аналитические формулы и методика измерений угловой расходимости начального пучка частиц путем измерения отношения глубины центрального минимума углового распределения оптического переходного излучения к максимуму этого распределения.
4. Экспериментальное исследование влияния угловой расходимости начального электронного пучка на форму ориентационной зависимости оптического переходного излучения от электронов с энергией 6,1 МэВ.

5. Результаты экспериментальных измерений сечения электронного пучка с энергией 6,1 МэВ на основе оптического переходного излучения, генерируемого за один импульс микротрона.
6. Результаты экспериментальных измерений угловой зависимости оптического переходного излучения генерируемого электронами с энергией 6,1 МэВ в течении одного макроимпульса длительностью несколько микросекунд и интенсивностью  $\sim 10^{12}$  электронов.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих симпозиумах и совещаниях:

- Международный симпозиум Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-01), оз. Ая, Россия, 2001 г.
- Международный симпозиум Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-03), г. Томск, Россия, 2003 г.
- Международный симпозиум Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, г. Томск, Россия, 2001 [5]

Результаты работы обсуждались на следующих семинарах:

- Университет Йоханеса Гуттенберга, коллаборация X1, г. Майнц, Германия, 2001 г.
- Научный семинар кафедры Прикладной физики ТПУ.

### **Публикации**

Основные результаты работы опубликованы в статьях [1, 2, 3, 4, 5, 6].

### **Структура и содержание диссертационной работы**

**Диссертация состоит из** введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы; содержит 87 страниц, 58 рисунков, 5 таблиц. Список литературы содержит 45 ссылок.

**Во введении** рассмотрены существующие методы диагностики ускоренных пучков заряженных частиц, приведен обзор работ по проблеме, состояние исследований к моменту начала работы. Основное внимание

уделено использованию оптического переходного излучения для целей диагностики и сравнение с другими методами. Приведено обоснование необходимости проведения дальнейших исследований, постановка задачи для диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дано описание свойств переходного излучения, а также возможности использования этого излучения для целей диагностики пучков заряженных частиц низких энергий.

Переходное излучение возникает когда заряженная частица пересекает границу раздела двух сред с различной диэлектрической проницаемостью [?]. Излучение возникает как вперед, вдоль импульса движения частицы, так и назад, под углом зеркального отражения к границе раздела сред.

Спектрально-угловые характеристики излучения могут быть получены путем точного решения уравнений Максвелла, описывающих поля излучения и движение частицы вблизи границы раздела двух сред. Точное решение для случая наклонного падения было получено Пафомовым в работе [7].

Спектрально-угловое распределение переходного излучения зависит от скорости заряженных частиц и оптических свойств среды, выраженных через диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$ . Для реальных материалов диэлектрическая проницаемость является конечной комплексной величиной и описывает как отражение, так и поглощение излучения в среде, которые для каждого материала имеют свою зависимость от энергии излучения.

Если устремить значение  $\varepsilon$  к бесконечности, то формулы для спектрально-угловой плотности будут описывать случай, когда частица пересекает границу раздела между вакуумом и идеальным проводником.

На рисунке 1 показано угловое распределение компоненты переходного излучения, поляризованной в плоскости отражения, с длиной волны 550 нм для электронов энергии 6,1 МэВ ( $\gamma = 12.9$ ) от идеально проводящей мишени ( $\varepsilon = \infty$ ) и алюминиевой мишени ( $\varepsilon = -43,84 - 12,82i$ ). Как видно из приведенного рисунка различия между этими двумя случаями начинаются только для углов наблюдения близких к  $\frac{\pi}{2}$ . В остальном эти две кривые совпадают. Это позволяет в дальнейших выкладках использовать более простые формулы для случая идеально проводящей мишени.

Как видно на рисунке переходное излучение имеет два характерных максимума  $I_{-max}$  и  $I_{+max}$ , а также провал между ними –  $I_{min}$ . Провал находится точно под углом отражения (если представить заряженную частицу в виде потока виртуальных фотонов, то генерируемое переходное излучение назад можно рассматривать как отражение этих фотонов от зеркальной поверхности мишени), а максимумы сдвинуты на расстояние

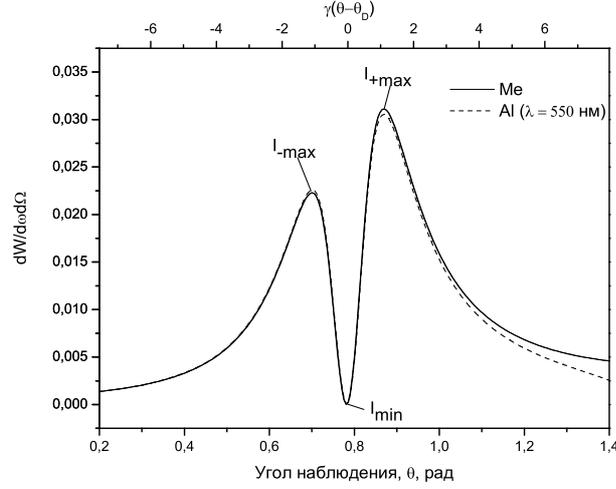


Рис. 1: Угловая зависимость параллельной компоненты ОПИ для алюминиевой и идеальной мишени

$\gamma^{-1}$  от минимума. Этот факт позволяет измерять угловые характеристики начального пучка частиц. В самом деле, для одной частицы, падающей на мишень под углом, отличным от  $\frac{\pi}{4}$  к поверхности мишени, мы должны наблюдать смещение положения пиков и минимума между ними в угловом распределении переходного излучения. Для ансамбля частиц положение пиков и минимума будет прежним, изменится только ширина пиков, а также глубина провала. Величиной, характеризующей угловую расходимость пучка частиц, может быть выбран параметр описывающий “контраст” между минимальным значением в провале и максимальным значением интенсивности углового распределения ОПИ:

$$R = \frac{I_{min}}{\frac{1}{2}(I_{-max} + I_{+max})} = \frac{2I_{min}}{I_{-max} + I_{+max}} \quad (1)$$

Так как максимумы расположены под углом  $\gamma^{-1} \ll 1$  к направлению зеркального отражения, то используя новые угловые переменные:  $\theta_x = \theta - \psi$ ,  $\theta_y = \sin \varphi \sin \psi$ , где  $\psi$  – угол, под которым электроны падают на мишень,  $\theta_x, \theta_y \ll 1$ , мы можем записать выражения, описывающие спектрально-угловое распределение ОПИ в следующем виде:

$$I_{\parallel}(\theta_x, \theta_y) = \frac{\alpha\beta^2}{\pi^2} \frac{\theta_x^2 + \theta_x(\gamma^{-2} - \theta_x^2 + \theta_y^2) \tan \psi}{(\gamma^{-2} + \theta_x^2 + \theta_y^2)^2 (1 - \theta_x \tan \psi)^2}, \quad (2)$$

$$I_{\perp}(\theta_x, \theta_y) = \frac{\alpha\beta^2}{\pi^2} \frac{\theta_y^2 (1 - \theta_x \tan \psi)}{(\gamma^{-2} + \theta_x^2 + \theta_y^2)^2 (1 - \theta_x \tan \psi)^2}, \quad (3)$$

$$I(\theta_x, \theta_y) = I_{\parallel}(\theta_x, \theta_y) + I_{\perp}(\theta_x, \theta_y) = \frac{\alpha\beta^2}{\pi^2} \frac{\theta^2 + \theta_x(\gamma^{-2} - \theta^2) \tan \psi}{(\gamma^{-2} + \theta^2)^2(1 - \theta_x \tan \psi)^2}, \quad (4)$$

$$\theta^2 = \theta_x^2 + \theta_y^2, \quad (5)$$

Вводя безразмерные переменные  $t_x = \gamma\theta_x$ ,  $t_y = \gamma\theta_y$ ,  $t^2 = t_x^2 + t_y^2$  и пренебрегая членами порядка  $\gamma^{-2}$  выражение 4 можно записать в более простом виде:

$$\frac{d^2W}{dt_x dt_y} = \frac{\alpha\gamma^2}{\pi^2} \left[ \frac{t^2}{(1+t^2)^2} + \frac{t_x \tan \psi}{\gamma(1+t^2)} \right] = \frac{\alpha\gamma^2}{\pi^2} \Lambda(t_x, t_y, \gamma, \psi). \quad (6)$$

Влияние угловой расходимости начального пучка на форму регистрируемого углового распределения ОПИ наиболее просто исследовать на модельном примере. Предположим, что угловое распределение пучка заряженных частиц, падающих на мишень, можно описать равномерным распределением:

$$F_e(\Delta_x, \Delta_y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sigma^2}, & \text{если } \Delta_x^2 + \Delta_y^2 \leq \sigma^2, \\ 0, & \text{если } \Delta_x^2 + \Delta_y^2 > \sigma^2, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  – углы влета частиц в мишень относительно направления среднего импульса, в единицах  $\gamma^{-1}$ ,  $\sigma$  – параметр, характеризующий угловую расходимость пучка в тех же единицах.

Для расчета влияния угловой расходимости пучка на угловое распределение ОПИ необходимо вычислить свёртку выражений 6 и 7:

$$\Lambda_{\sigma}(t_x, t_y) = \int \int F_e(\Delta_x, \Delta_y) \cdot \Lambda(t_x + \Delta_x, t_y + \Delta_y) d\Delta_x d\Delta_y. \quad (8)$$

Интегрируя выражение (8) аналитически, мы получим:

$$\Lambda_{\sigma}(t_x, t_y) = \frac{1}{2\sigma^2} \left( \frac{1+t^2-\sigma^2}{\sqrt{D}} - 1 + 2 \ln \frac{1+\sigma^2-t^2+\sqrt{D}}{2} \right), \quad (9)$$

где  $D = (1+t^2)^2 + 2\sigma^2(1-t^2) + \sigma^4$ .

Для случая  $\sigma \ll 1$  это выражение можно упростить, опуская члены выше второго порядка по  $\sigma$ :

$$\Lambda_{\sigma}(t_x, t_y) = \frac{1}{(1+t^2)^2} \left[ t^2 + \sigma^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{3t^2}{(1+t^2)^2} \right) \right]. \quad (10)$$

Приведенные выражения справедливы для детектора, имеющего бесконечно малый размер, что практически недостижимо в реальных

измерениях. Конечная апертура детектора будет вносить свой вклад в величину минимума в угловом распределении ОПИ. Для оценки этого вклада предположим, что детектор имеет круглую форму с угловой апертурой  $\delta$ , выраженной в единицах  $\gamma^{-1}$ . После этого необходимо выражение для углового распределения ОПИ проинтегрировать по апертуре детектора.

$$Y(t_x, t_y) = \int \int \Lambda_\sigma(t_x + \delta_x, t_y + \delta_y) d\delta_x d\delta_y, \quad (11)$$

где  $\delta_x^2 + \delta_y^2 < \delta^2$  и  $t_x, t_y$  – угловые координаты центра детектора. Для случая  $\delta \ll 1$  и  $\sigma \ll 1$  возможно найти приближительную формулу, описывающую влияние обоих параметров – конечной апертуры детектора и угловой расходимости пучка на форму угловой зависимости ОПИ. Для этого в выражение (11) необходимо подставить выражение (10) и разложить его по степеням  $\delta$ . Отбрасывая степени больше 2, мы можем получить следующее выражение для критерия  $R$ , выражающего контраст между минимумом и максимумом в угловом распределении ОПИ:

$$R \approx 2(\delta^2 + \sigma^2) \quad (12)$$

Приведенные формулы описывают влияние угловой расходимости начального электронного пучка на форму углового распределения ОПИ, которое генерируется этим пучком, и могут быть использованы для определения величины угловой расходимости пучка электронов как путем измерения угловой зависимости ОПИ так и путём измерения его ориентационной зависимости. Однако в связи с тем, что для определения величины контраста нет необходимости измерять всю угловую зависимость, можно ограничиться измерением выхода ОПИ всего в трех точках, что позволяет измерять угловую расходимость пучка любой энергии и на любой установке, даже если невозможно провести измерения полного углового распределения ОПИ.

**Во второй главе** приведено описание экспериментальной установки и методика измерений характеристик оптического переходного излучения, возникающего под действием электронов низких энергий. Исследования оптического переходного излучения проводилось на установке, построенной на основе микротрона-инжектора синхротрона “Сириус”, ускоряющего электроны до энергии 6,1 МэВ.

Для этого на тракте инжекции синхротрона был установлен поворотный магнит, который направлял электроны в вакуумную камеру экспериментальной установки как это показано на рисунке 2.

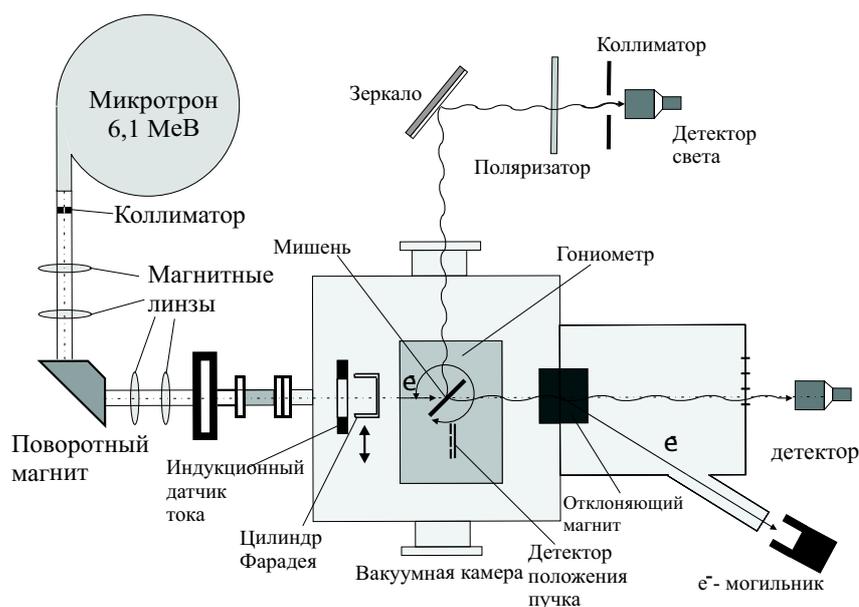


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

На тракте транспортировки электронов от микротрона до камеры рассеяния установлены 2 пары квадрупольных линз, позволяющих сфокусировать электронный пучок. В камере рассеяния установлены средства контроля положения – люминесцентный экран и тока пучка – индукционный датчик, а также гониометр для вращения и перемещения мишеней.

Для измерения свойств оптического переходного излучения в гониометр устанавливалась алюминиевая мишень, которая могла вращаться вокруг оси, перпендикулярной пучку. Под углом 90 градусов к направлению движения пучка устанавливался детектор оптического излучения, который представлял собой фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-30. Дополнительно перед детектором располагалась шторка, перекрывающая только оптическое излучение и служившая для измерения уровня фона. Перед детектором также устанавливался поляризатор, предназначенный для измерения поляризационных свойств оптического переходного излучения. Детектор излучений был закреплен неподвижно. Для измерения угловых свойств ОПИ производилось вращение мишени вокруг горизонтальной оси, и производилась измерение выхода излучения в каждой точке ориентации мишени. Данная зависимость названа ориентационной зависимостью ОПИ в отличие от угловой зависимости, когда мишень остается в фиксированном по отношению к падающему пучку положении, а перемещается детектор.

Используя теоретические формулы для расчета переходного излучения можно легко показать, что для ОПИ “назад” эти две зависимости

эквивалентны, отличаются только по ширине в два раза. Это факт позволяет проводить относительно простое измерение ориентационной зависимости для получения той же информации о свойствах ОПИ, что и достаточно громоздкий эксперимент по измерению угловых зависимостей.

Созданная экспериментальная установка позволяет изучать излучение, возникающее в различных направлениях – прямо вперед, по движению частиц, назад, под малыми углами к направлению импульса частиц а также в стороны. Это позволяет проводить широкий спектр экспериментов по изучению свойств излучений возникающих в различных материалах под действием пучка заряженных частиц низких энергий.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментального измерения ориентационной зависимости оптического переходного излучения, полученные на созданной экспериментальной установке, а также зависимость влияния угловой расходимости начального электронного пучка на форму этой зависимости.

В первом разделе главы приведены результаты измерения угловых свойств переходного излучения путем измерения его ориентационной зависимости. На рисунке 3 приведено экспериментальное измерение ориентационной зависимости ОПИ.

Из этого измерения мы видим, что ориентационная зависимость излучения имеет два максимума и минимум между ними при угле ориентации мишени 45 градусов к начальному импульсу электронного пучка, при этом максимумы расположены на расстоянии  $0,5\gamma^{-1}$  от положения минимума, что для электронов с энергией 6,1 МэВ составляет 2,5 градуса. Измеренное излучение является поляризованным. На приведенном рисунке кривой 1 показана компонента, поляризованная вдоль плоскости отражения, кривой 2 – компонента излучения, поляризованная перпендикулярно первой. Сравнивая эти зависимости с теоретически предсказанной кривой, показанной на рисунке 1, мы можем с уверенностью утверждать, что измеренное нами излучение действительно

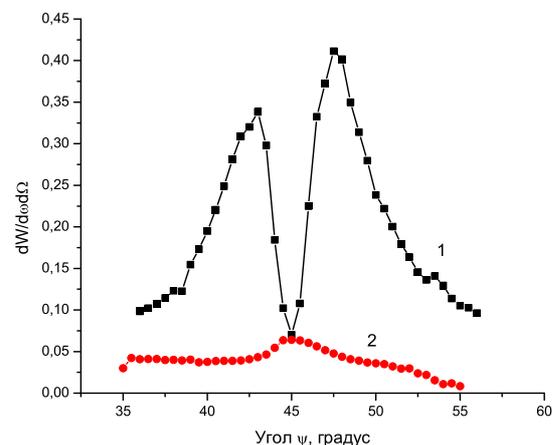


Рис. 3: Экспериментальное измерение ориентационной зависимости ОПИ. Кривая 1 – параллельная поляризация, кривая 2 – перпендикулярная поляризация

является переходным излучением.

Во втором разделе главы приведено экспериментальное исследование влияния угловой расходимости начального электронного пучка на форму ориентационной зависимости ОПИ. В связи с тем, что на нашей установке не предусмотрено средств, контролирующих угловую расходимость пучка, мы измеряли влияние поперечных размеров пучка на форму ОЗ. При этом, мы исходили из следующих соображений. Если в небольших пределах изменять размер пучка с помощью только одной магнитной линзы и только по одной координате, то пропорционально уменьшению его размера должна увеличиваться угловая расходимость пучка по этой координате, поскольку эмиттанс пучка остаётся постоянным.

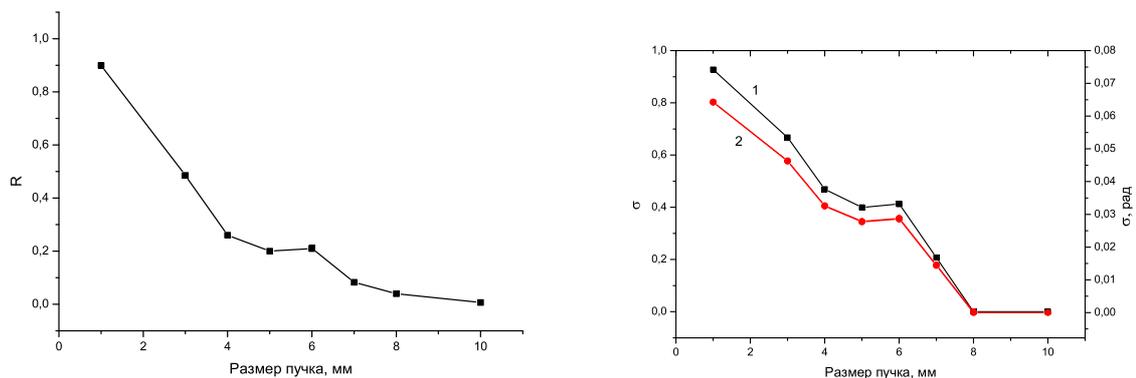
Измерения проводились в несколько этапов. В начале, используя только одну магнитную линзу, на люминофоре устанавливался фиксированный размер пучка. Затем на пучок устанавливалась мишень и проводилось измерение ориентационной зависимости ОПИ. После этого, на пучок снова устанавливался люминофор, с помощью той же линзы, размер пучка изменялся по одной координате, и снова проводилось измерение ОЗ. При этом размер пучка по другой координате оставался прежним.

Ориентационные зависимости были измерены для различных размеров пучка. Измерения показали, что, как и предсказывает теория, глубина центрального минимума в угловом распределении ОПИ уменьшается с уменьшением размера пучка, т.е. с ростом угловой расходимости начального электронного пучка. Величина контраста  $R$  характеризующего глубину минимума в угловом распределении для различных размеров пучка показана на рисунке 4а. А на рисунке 4б показана рассчитанная на основе этого контраста угловая расходимость начального электронного пучка, выраженная в единицах  $\gamma^{-1}$ .

Таким образом, экспериментально доказано, что имеется возможность использовать оптическое переходное излучение для целей диагностики угловой расходимости начального электронного пучка низких энергий, даже в тех случаях, когда использование методов измерений с интерферометром является неприменимым.

**В четвертой главе** приведено описание экспериментальной установки и измерений профиля одного импульса населенностью  $10^{12}$  электронов, ускоренных до энергии 6,1 МэВ. Именно такой импульс генерируется за один цикл ускорения микротрона, используемого в качестве ускорителя на нашей экспериментальной установке.

Методы с использованием люминесцентных экранов не подходят



(а) Зависимость величины контраста  $R$  от горизонтального размера пучка

(б) Зависимость величины угловой расходимости начального пучка от горизонтального размера пучка, кривая 1 расчет по формуле для круглого пучка, кривая 2 – по формуле для плоского пучка.

Рис. 4: Зависимость величины контраста  $R$  ОЗ ОПИ и угловой расходимости пучка от его размеров

в случае малых размеров пучков, так как видимый размер может значительно превышать реальный. Это происходит из-за особенностей свечения таких экранов, когда свечение частиц люминофора вызывается не только падающим на экран пучком, но и вторичным излучением возникающим в материале экрана. Это вторичное излучение как правило является изотропным, имеет большую интенсивность и засвечивает большое скопление частиц люминофора вокруг места прохождения начального пучка.

В то же время, переходное излучение возникает на границе раздела двух сред, когда её пересекает электрон. При этом излучает сама среда, которая поляризуется под действием поля заряженной частицы, а затем возвращается в свое первоначальное состояние путем излучения электромагнитных волн. В отличие от люминофора, размер “светящейся” области на мишени при прохождении через неё отдельного электрона определяется длиной волны и апертурой оптической системы и, как правило, не превышает нескольких микрон. Эти свойства излучения позволяют использовать ОПИ для измерения профиля пучка частиц.

В нашей установке для измерений сечения пучка частиц использовалась видеокамера, предназначенная для систем видеонаблюдений, и специально разработанная оптическая система. Основной трудностью при измерениях сечения пучка с использованием ОПИ для электронов низких энергий является широкий конус, в который излучается основная доля энергии этого излучения. Это заставляет делать объективы больших диаметров

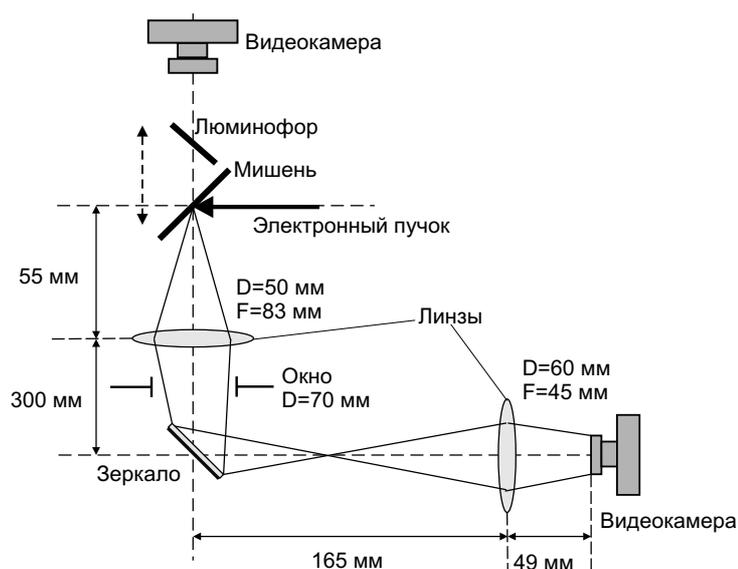


Рис. 5: Схема оптической системы для измерения сечения сгустка электронов

и располагать их близко к источнику излучения. В таких условиях стандартные объективы, которыми комплектуются видеокамеры и которые часто применяются для измерения размеров пучка по люминофору не пригодны. Это вынуждает нас изготовить специальную оптическую систему.

Схематическое изображение оптической системы с рассчитанными параметрами приведено на рисунке 5.

В основе системы лежит видеокамера FUM-930, имеющая чувствительность 0,01 люкс. Как показывает расчет, проведенный в главе, этой чувствительности достаточно для подобного рода измерений.

Измерение пятна ОПИ проводилось в два этапа. Вначале на место мишени выставлялся люминофор, изображение которого выводилось с помощью дополнительной видеокамеры на экран. Поверхность люминофора расчерчена сеткой. Расстояние между горизонтальными линиями сетки составляет 2 мм, между вертикальными – 5 мм. Наблюдая изображение на люминофоре, и используя магнитную систему фокусировки, настраивался пучок, имеющий заданные размеры. Изображение пучка на люминофоре фотографировалось и после оцифровки записывалось на диск для дальнейшей обработки. После этого на место люминофора устанавливалась мишень и производилось наблюдение пятна ОПИ через построенную для этих целей оптическую систему. Сигнал с видеокамеры можно было наблюдать на экране монитора и записать на диск в форме, удобной для дальнейшей обработки на компьютере, например, для построения профиля пучка.

На рисунке 6 приведена фотография пятна ОПИ, генерируемого в алюминиевой мишени пучком, имеющим размеры на люминофоре  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup>. Фотография представляет собой распределение плотности излучения ОПИ на мишени за один импульс микротрона длительностью 4 мкс. Из правил оптики и особенностей генерации ОПИ эта фотография будет эквивалентна распределению плотности электронов в пучке, падающем на мишень, в результате чего и генерируется ОПИ. Измерение пятна ОПИ позволяет

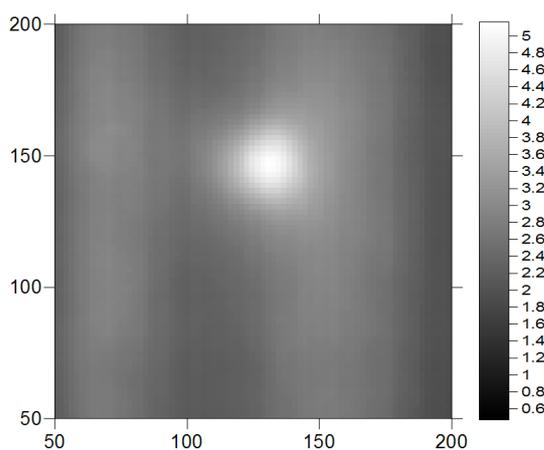


Рис. 6: Фотография пятна ОПИ для пучка  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup>

видеть профиль пучка. На рисунках 7 и 8 показано, соответственно, горизонтальное и вертикальное сечение пятна ОПИ. Оба сечения проведены через центр пятна.

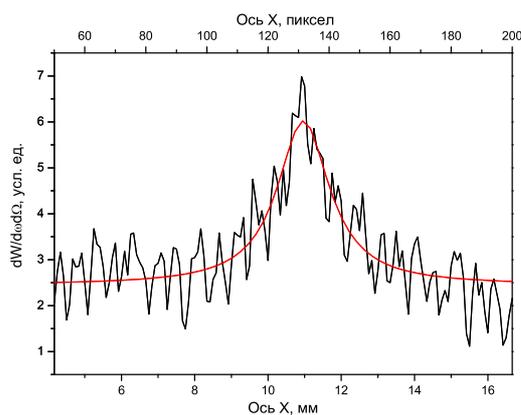


Рис. 7: Горизонтальное сечение пятна ОПИ для пучка  $2 \times 2$  мм<sup>2</sup>.

Оба сечения аппроксимированы кривой распределения Гаусса, позволяющей оценить ширину пика. Полная ширина на полувысоте для горизонтального сечения составляет 20,8 пиксель или 1,7 мм. Для

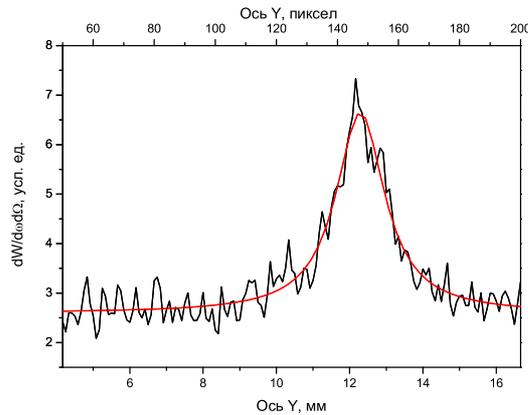


Рис. 8: Вертикальное сечение пятна ОПИ для пучка  $2 \times 2 \text{ мм}^2$ .

вертикального – 19,4 пиксель или 1,6 мм. Разрешение оптической системы было определено заранее путем фотографирования линейки, расположенной в плоскости мишени. Для построенной оптической системы оно составляет 12 пикселей/мм.

Таким образом, построенная нами система позволяет измерять размеры пучка электронов с энергией 6,1 МэВ на основе регистрации оптического переходного излучения. При этом для измерений применялась относительно дешёвая и широко распространённая камера для видеонаблюдений. Как было показано, такая камера может быть с равным успехом применена как для наблюдений за поперечными размерами пучка на люминофоре, так и для измерения сечения пучка с использованием ОПИ. Например, подобные измерения были опубликованы в работах [8, 9]. Однако в этих измерениях применялись специализированные видеокамеры, а также суммирование излучения по нескольким импульсам или за какой-то промежуток времени, при этом измерения для одного импульса короткой длительности не проводились. Нами показана возможность измерения сечения пучка для одного импульса микротрона, длительностью 4 мкс и населённостью  $10^{12}$  электронов.

**В пятой главе** описано измерение угловых распределений ОПИ с использованием оптической системы, построенной для измерения сечения электронного пучка. Если эту оптическую систему сфокусировать на бесконечность, т.е. поместить в её фокус детектор излучения, то мы сможем наблюдать угловое распределение источника излучения, расположенного на мишени. Дополнительно в системе было предусмотрено измерение поляризации углового распределения ОПИ. Для этого после последней

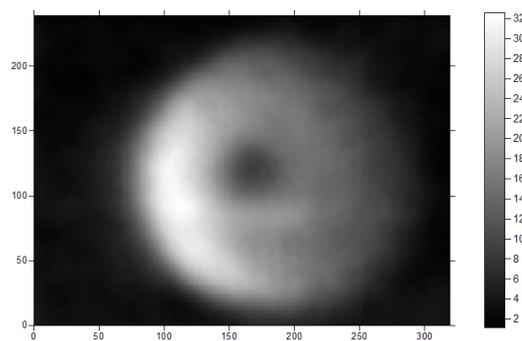
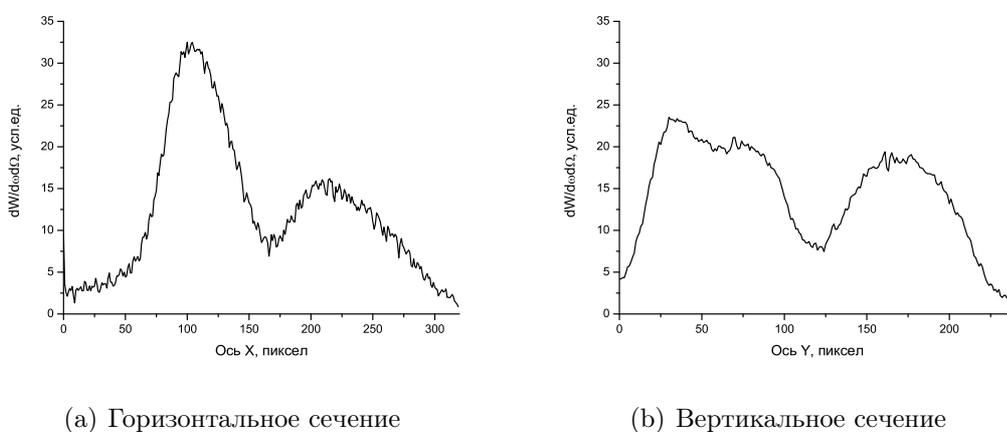


Рис. 9: Фотография углового распределения ОПИ



(a) Горизонтальное сечение

(b) Вертикальное сечение

Рис. 10: Сечение углового распределения показанного на рисунке 9

линзы непосредственно перед ПЗС-матрицей видеокамеры размещался поляризатор.

На рисунке 9 показано угловое распределение ОПИ для электронного пучка, имеющего выставленные по люминофору размеры  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>, измеренное за один импульс микротрона длительностью 4 мкс.

На рисунке 10 в качестве примера показаны вертикальное и горизонтальное сечения полного углового распределения (рис. 9) проведенные через его центр (167-й пиксель по горизонтали, 117-й пиксель по вертикали).

Из приведенных рисунков видно, что в перпендикулярно поляризованной компоненте излучения есть некий артефакт на правом пике, а несимметрия пиков в параллельно поляризованной компоненте излучения слишком велика. Подобная деформация в угловом распределении возможна из-за недостаточно точного положения линз относительно оси оптической системы. В связи с тем, что в системе используются короткофокусные линзы, смещение одной из них на несколько миллиметров приведет к деформации

изображения. К сожалению, на построенной установке две линзы не могли двигаться в горизонтальном направлении, и настроить оптическую систему точнее, чем это было сделано, не представляется возможным.

На приведенных сечениях видно, что минимум в угловом распределении переходного излучения не достигает нуля. Такое поведение минимума в угловом распределении ОПИ обусловлено только влиянием угловой расходимости начального пучка электронов.

Для определения угловой расходимости пучка необходимо найти значение величины  $R$ , введенной в выражении (1). Это значение для параллельно поляризованной компоненты будет характеризовать горизонтальную расходимость начального пучка электронов, а для перпендикулярной – вертикальную.

Сводные параметры электронных пучков, для которых была измерена угловая расходимость, приведены в таблице 1. Угловая расходимость в этой таблице дана как в безразмерных единицах, так и в радианах.

Таблица 1: Значения параметров пучков электронов измеренные с использованием ОПИ

H, мм	V, мм	$\sigma_H$	$\gamma\sigma_H$ , рад	$\sigma_V$	$\gamma\sigma_V$ , рад
2	2	0,441	0,037	0,497	0,042
3	3	0,466	0,039	0,458	0,038
4	10	0,665	0,055	0,630	0,053

Большая величина угловой расходимости для пучка, имеющего размеры  $4 \times 10$  мм<sup>2</sup>, объясняется тем, что для получения такого размера пучка, пришлось настраивать все 4 магнитные фокусирующие линзы. Это привело к сильной деформации пучка еще до поворотного магнита и, как следствие, к увеличению его угловой расходимости.

Основываясь на полученных результатах, можно утверждать, что используя достаточно простую оптическую систему и дешевую видеокамеру созданная установка позволяет:

1. регистрировать угловую зависимость ОПИ для электронов с энергией 6,1 МэВ, а также ее компоненты поляризации по отдельности;
2. проводить измерения углового распределения ОПИ и обеих его компонент поляризации для сгустков частиц населенностью  $10^{12}$  электронов, имеющих энергию 6,1 МэВ;
3. определять угловую расходимость начального электронного пучка, анализируя форму поляризации компонент ОПИ.

В связи с тем, что для измерения угловой зависимости ОПИ использовалась аналогичная оптическая система, как и для измерения профиля пучка электронов, эти два измерения можно совместить. Для этого необходимо построить такую диагностическую станцию, которая могла бы одновременно наблюдать как размер пучка, так и угловую зависимость ОПИ, генерируемого этим пучком. Это возможно, например, с использованием двух видеокамер и полупрозрачного зеркала, разделяющего оптическое переходное излучение между ними. При этом оптическая система одной из камер должна быть сфокусирована на мишень, для измерения размера и сечения пучка, а для второй камеры – на бесконечность для измерения углового распределения ОПИ. Такая система позволит измерять размер пучка и его угловую расходимость в режиме реального времени, что позволит быстро настраивать пучок с необходимыми параметрами. Использование простой оптики позволит сделать такую станцию диагностики достаточно дешевой для установки ее на ускорители, массово применяемые в народном хозяйстве.

## Основные результаты работы

1. Разработана и создана установка, изготовлен комплекс измерительной аппаратуры, а также создано программное обеспечение, предназначенные для экспериментального исследования свойств оптического переходного излучения и параметров электронного пучка посредством ОПИ.
2. Предложена методика измерения угловой расходимости электронного пучка на основе измерений ориентационной зависимости (ОЗ) ОПИ. Теоретически и экспериментально показано влияние угловой расходимости пучка электронов на форму ОЗ переходного излучения.
3. Впервые проведены измерения ориентационных зависимостей ОПИ для электронного пучка с энергией 6,1 МэВ. Показано, что форма ОЗ совпадает с предсказанной теоретически, изучены поляризационные свойства ОПИ. На основе экспериментальных результатов получена информация об угловой расходимости электронного пучка.
4. Проведены измерения сечения электронного пучка энергии 6,1 МэВ с помощью ОПИ и оптической системы с использованием видеокамеры для охранных систем видеонаблюдения типа FUM-930. Показана

возможность измерения профиля электронного пучка за каждый макроимпульс.

5. С использованием построенной оптической системы впервые проведены прямые измерения угловых зависимостей ОПИ для электронов с энергией 6,1 МэВ от одного макроимпульса интенсивностью  $\sim 10^{12}$  электронов. Измерена поляризация в угловом распределении ОПИ, и показано влияние угловой расходимости начального электронного пучка на форму углового распределения ОПИ

## Список литературы

### Список основных публикаций по теме диссертации

- [1] Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, Б.Н. Калинин, Г.А. Саруев, А.Ф. Шарафутдинов, Диагностика электронных пучков низких энергий на основе оптического переходного излучения – Известия ТПУ, том 307, №2, 2004
- [2] B.N. Kalinin, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, O.V. Chefonov, A.N. Aleinik, G.A. Saruev, W. Wagner, A. Sharafutdinov, Low-energy electron-beam diagnostics based on the optical transition radiation – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 201, 2003
- [3] А.Н. Алейник, М.Ю. Андреяшкин, Б.Н. Калинин, П.В. Каратаев, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, Г.А. Саруев, А.Ф. Шарафутдинов, Экспериментальная установка для исследования поляризационного тормозного излучения в оптическом и рентгеновском диапазонах на 6 МэВ микротроне – Известия высших учебных заведений. Физика, №3, 2001
- [4] Г.А. Науменко, А.Н. Алейник, А.С. Арышев, Б.Н. Калинин, П.В. Каратаев, А.П. Потылицын, Г.А. Саруев О.В. Чефонов, А.Ф. Шарафутдинов, Оптическое поляризационное излучение релятивистских электронов в проводящих мишенях – Известия высших учебных заведений. Физика, №9, 2002
- [5] B.N. Kalinin, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, O.V. Chefonov, A.N. Aleinik, G.A. Saruev, A. Sharafutdinov, Free electron laser in a millime-

ter wavelength region on the base of Smith-Purcell radiation – KORUS-01 proceedings, 2001

- [6] A.N. Aleinik, A.S. Aryshev, B.N. Kalinin, G.A. Naumenko, A.P. Potylitsyn, G.A. Saruev, O.Yu. Malakhovskii, E.A. Manastyrev, A. Sharafutdinov, Coherent Diffraction Radiation of a 6-MeV Microtron Electron Beam – JETP Letters, Vol. 76, No. 6, 2002, pp 337-340

## **Список цитируемой литературы**

- [7] В.Е. Пафомов, Излучение заряженной частицы при наличии границ раздела – Труды ордена Ленина физического института им. П.Н. Лебедева, том XLIV, 1969
- [8] А.Н. Ермаков, Б.С. Ишханов, В.И. Шведун и др., Измерение параметров пучка электронов с использованием оптического переходного излучения – Приборы и техника эксперимента, №4, 2001.
- [9] D. Giove, C. De Martinis, G. D’Auria, M. Ferianis, C. Rossi, A. Variola, Optical transition radiation measurements on the ELETTRA linac, EPAC-98 proceedings, 1998
- [10] M.-A. Tordeux, J.Papadacci, A new OTR based beam emittance monitor for the linac of lure – Proceedings of EPAC, 2000.
- [11] L.Wartski, S.Roland, J.Lasalle, M.Bolore, G.Filippy, Interference phenomenon in optical transition radiation and its application to particle beam diagnostics and multiple-scattering measurements – Journal of applied physics, Vol. 46, Is. 8, 1975.