

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Лапшин Кирилл Андреевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование распределения синхротронного излучения в веществе  
(Закон Бугера – Ламберта - Бэра)**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20302

**Научный руководитель:**

к.т.н. Б.Г. Гольденберг

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2021

## Аннотация

Целью моей работы являлось экспериментальное подтверждение выполнения закона Ламберта-Бугера-Бэра для синхротронного излучения на примере алюминиевой, медной и полиимидной плёнок. Было изучено распределение синхротронного излучения по волновому спектру. Мною были освоены методики обработки экспериментальных данных в программе Mathcad. Рассмотрены виды взаимодействия излучения с веществом. Величина интенсивности синхротронного излучения измерялась при помощи кремниевого фотодиода ВРW34. В ходе эксперимента было подтверждено, что интенсивность синхротронного излучения падает после прохождения через вещество и была доказана экспоненциальная форма закона Ламберта-Бугера-Бэра, но были обнаружены серьёзные расхождения с теорией, которые были объяснены с последующим предложением об улучшении методики эксперимента.

## **Оглавление**

Оглавление	3
Введение	4
Теоретическая часть	4
Описание установки	9
Предварительные расчёты	14
Эксперимент	17
Результаты	18
Заключение	23
Список литературы	24

## **Введение**

Синхротронное излучение – это излучение, испускаемое релятивистскими заряженными частицами при ускоренном их движении по криволинейной орбите. Оно обладает рядом уникальных и полезных свойств: непрерывным спектром от инфракрасной до рентгеновской областей спектра, высокой интенсивностью, острой направленностью, высокой степенью линейной и круговой поляризации. Данные качества делают синхротронное излучение важным, даже незаменимым инструментом исследования в разнообразных областях науки. Так, например, синхротронное излучение используется в кристаллографии, спектроскопии, исследовании катализа, областях биохимии. Из этого следует очевидная важность изучения характеристик этого практически ценного вида излучения, и в данной работе проводится исследование взаимодействия синхротронного излучения с веществом.

## **Теоретическая часть**

Фотоны синхротронного излучения имеют три ярко выраженных вида взаимодействия с веществом: комптоновское рассеяние, т.е. неупругое рассеяние с изменением длины волны луча, рэлеевское рассеяние, т.е. упругое рассеяние на более крупных и тяжёлых по сравнению с электроном неоднородностях, и фотоэффект, т.е. передача фотонами всей своей энергии электронам. В рентгеновском диапазоне преобладающим из этих видов взаимодействия является фотоэффект. В конечном счёте общая энергия и, как следствие, интенсивность пучка фотонов, проходящего через слой вещества, начинают спадать. Уравнение, связывающее изменение интенсивности излучения (в общем случае не обязательно синхротронного излучения) с

длиной пройденного потоком фотонов участка вещества, называется законом Ламберта-Бугера-Бэра:

$$I(\lambda, x) = I_0 e^{-\mu(\lambda)x} \quad (1),$$

где  $I_0$  – интенсивность излучения до попадания в вещество,  $\mu(\lambda)$  – коэффициент поглощения вещества, он учитывает три указанных выше вида взаимодействия фотона с веществом,  $x$  – длина пройденного пучком участка вещества.

Заметим, что коэффициент поглощения – функция, зависящая от длины волны, т.е. одно и то же вещество может поглощать излучения из различных областей спектра в разном количестве. Т.к. в данной работе проводится изучение свойств синхротронного излучения, которое обладает широким волновым спектром, то в будущем мы будем наблюдать, как часть этого спектра поглощается, а часть остаётся почти нетронутой.

Таким образом, для изучения взаимодействия синхротронного излучения с веществом, необходимо знать, каким образом распределяется его интенсивность по спектру.

На данный момент для получения синхротронного излучения используются ускорители-накопители электронов, в том числе и в данной работе. Для отдельного электрона, движущегося с постоянной скоростью по криволинейной орбите, интенсивность излучения [эрг/(с·электрон)] в интервале длин волн  $d\lambda$  и в интервале  $d\psi$  вертикального угла  $\psi$  [1]:

$$I(\lambda, \psi) = \frac{27}{32\pi^3} \frac{e^2 c}{R^3} \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^4 \gamma^8 [1 + (\gamma\psi)^2]^2 \left\{ K_{2/3}^2(\xi) + \frac{(\gamma\psi)^2}{1 + (\gamma\psi)^2} K_{1/3}^2(\xi) \right\} \quad (2)$$

Другие обозначения в данной формуле:

$e$  – заряд электрона,

$E = \gamma mc^2$  – энергия электрона,

$\lambda_c$  – характеристическая длина волны ( $\lambda_c = \frac{4\pi R}{3} \gamma^{-3}$ ),

$K_{2/3}$  и  $K_{1/3}$  – модифицированные функции Бесселя второго рода.

$$\xi = \frac{\lambda_c}{2\lambda} [1 + (\gamma\psi)^2]^{\frac{3}{2}}.$$

Интенсивность синхротронного излучения распределена в пространстве пучка следующим образом: в центре пучка она принимает своё пиковое значение и по мере отдаления от центра по вертикали интенсивность спадает. В этом можно убедиться, построив графики интенсивностей пучка для разных углов, используя формулу (2) и программу Mathcad:

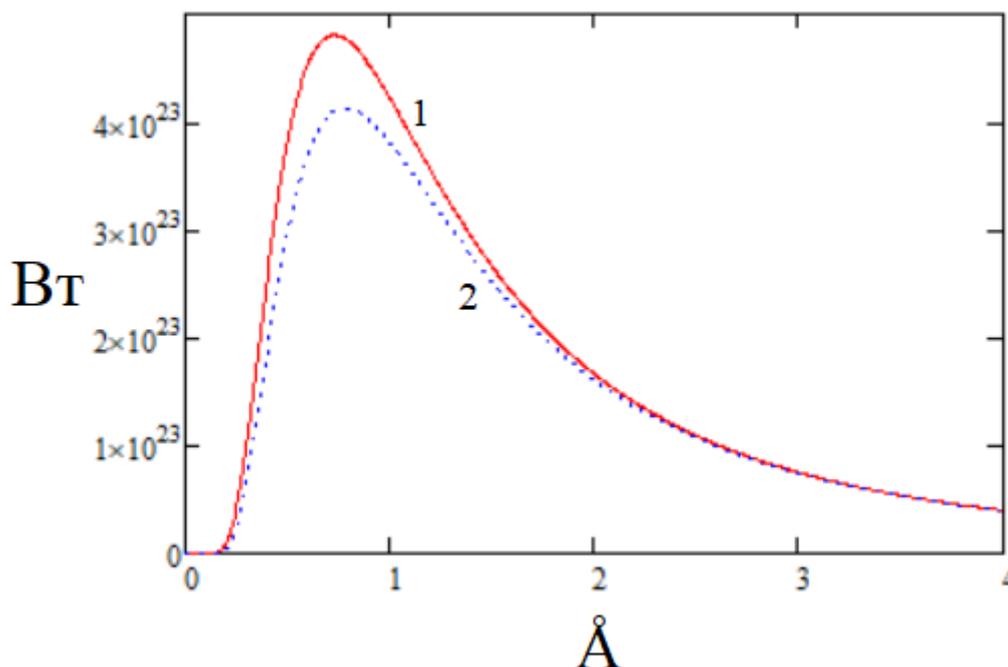


Рис. 1: Распределение интенсивности СИ для: 1 - нулевого вертикального угла, 2 - произвольного вертикального угла в  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ$ .

График также наглядно демонстрирует, что мощность излучения распределена по спектру непрерывно и имеет ярко выраженное пиковое значение для некоторой длины волны.

Если проинтегрировать функцию (2) по длинам волн и по вертикальному углу, то мы получим  $I_0$  из формулы (1).

Назовём функцию  $T(\lambda, x) = e^{-\mu(\lambda)x}$  из формулы (1) пропусканием вещества. Если функцию (2) перед двойным интегрированием умножить на пропускание вещества, то мы получим некую функцию  $I(x)$ , зависящую только от толщины пройденного пучком слоя, причём экспоненциальная зависимость относительно переменной  $x$  для этой функции сохраняется. Выходит, если, изменяя толщину слоя исследуемого вещества и измеряя значения  $I(x)$ , проследить эту зависимость, то выйдет закономерная справедливость закона (1), который мы и хотим подтвердить. Следовательно, наша задача заключается в том, чтобы увидеть экспоненциальную зависимость в функции  $I(x)$ . Также нужно убедиться, что для разных веществ функции  $I(x)$  имеют разные значения в силу разных коэффициентов поглощения этих веществ, использующихся при подсчёте.

Напомним, что формула (2) является выражением интенсивности для одного электрона. В реальности же на накопителе синхротронное излучение испускается некоторым эквивалентным током электронов. Однако если мы будем нормировать  $I(x)$  по  $I_0$ , т.е. искать отношение  $\frac{I(x)}{I_0}$  (3), то этот факт не будет оказывать влияние, т.к. значение отношения (3) одинаково как для одного электрона, так и для нескольких. Это связано с простым сокращением одинаковых коэффициентов перехода от электрона к электронному току. Фактически отношение (3) показывает, какая часть интенсивности синхротронного излучения сохранилась после прохождения пучком слоя

вещества толщиной  $x$  с учётом того, что оно обладает широким волновым спектром, тогда как выражение (1) показывает, как изменяется составляющая интенсивности синхротронного излучения для конкретной длины волны.

Простейший же способ изменения толщины слоя исследуемого вещества - это добавление (или изымание) слоёв этого вещества определённой толщины в пространстве на пути пучка. В данной работе исследуемыми веществами являются алюминий, медь и полиимид. Выбор был сделан в силу доступности фольг из этих веществ и их высоких коэффициентов поглощения, достаточно различных между собой, чтобы можно было проследить разницу между веществами. Тогда целесообразно перейти от функции  $I(x)$  к функции  $I(k)$ , которая зависит уже от числа слоёв фиксированной толщины. Если обозначить толщину одного слоя за  $C$ , а количество слоёв за  $k$ , то формулу (1) можно переписать в виде:

$$I(\lambda, k) = I_0 e^{-\mu(\lambda)kC} \quad (4)$$

Как видим, общий вид функции не изменился, а, значит, все соображения для формулы (1) верны и для формулы (4), следовательно, возможен переход от  $I(x)$  к  $I(k)$  без утери сути поставленной задачи. Тогда пропускание превращается в функцию  $T(\lambda, k) = T^k(\lambda)$ , где  $T(\lambda)$  - функция пропускания для одного слоя фиксированной толщины.

Стоит также заметить, что наличие сторонних, не исследуемых, веществ на пути пучка не влияет на общий вид закона (1), в чём можно убедиться при помощи простого выражения:

$$I(\lambda, x) = I_0 e^{-\mu_1(\lambda)x} e^{-\mu_2(\lambda)x} = I_0 e^{-(\mu_1(\lambda)+\mu_2(\lambda))x},$$

где  $\mu_1(\lambda)$  и  $\mu_2(\lambda)$  - коэффициенты поглощения двух различных веществ.

Из этого следует, что если во время эксперимента на пути пучка постоянно будут расположены некоторые сторонние вещества, то

проверяемый закон (1) оставит прежний экспоненциальный относительно переменной  $x$  вид, а, следовательно, и относительно переменной  $k$  для формулы (4).

## Описание установки

Данная работа выполняется в лаборатории №8 Института ядерной физики имени Г.И.Будкера СО РАН. Синхротронное излучение поступает на установку из электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4.

Характеристики коллайдера: рабочая энергия  $E$  в диапазоне от 1.5 до 5.5 ГэВ (при выполнении работы энергия электронов в накопителе составляла  $E = 4,5$  ГэВ), период обращения пучка электронов  $T = 1.221E-06$  с, радиус поворота в точке излучения  $R = 34.554$  м. [2]

Расстояние от точки излучения синхротронного излучения до установки  $D = 20$  м. На пути у пучка стоит ряд бериллиевых фольг общей толщиной 800 мкм. Они необходимы для разделения областей с разным давлением, поэтому их изъятие невозможно, но их наличие, как было выяснено, не препятствует исследованию.

Установка представляет из себя толстостенную камеру, внутри оснащённую девятью манипуляторами, четыре из которых используются при проведении опыта. Камера герметично закрывается, она необходима для защиты исследователя от радиационного воздействия синхротронного излучения.

Пара манипуляторов держит толстые эльконайтовые пластины, хорошо поглощающие входящее излучение; они используются для вырезания из пучка области с наибольшей интенсивностью. Ширина вырезаемой области составляет приблизительно 1 мм.

Один манипулятор используется для перемещения кассеты с исследуемым образцом (рис. 2). Каждая кассета представляет из себя две скреплённые между собой дюралевые пластины, между которыми помещается пять сложенных друг на друга фольг исследуемого образца одинаковой толщины и длины, но разной ширины (рис. 3). Такая ступенчатая конструкция оптимизирует процесс исследования, поскольку не вынуждает экспериментатора добавлять или вынимать фольги с образцом после каждого снятия данных.



Рис. 2: Манипуляторы и кассета



Рис. 3: Кассета с алюминиевыми фольгами

Манипулятор, расположенный в конце установки, используется для плавного перемещения детектора по вертикальной оси. В данной работе функция перемещения датчика используется только для обнаружения области с наибольшей интенсивностью пучка и дальнейшей установки датчика в обнаруженную область.

Основой датчика (Рис. 4) является *фотодиод* – приёмник оптического излучения, преобразующий падающий на его фоточувствительную область свет в электрический ток. Фоточувствительная область фотодиода представляет из себя кристалл полупроводника с р-п-переходом. В результате воздействия излучения в базе фотодиода (область n-типа) за счёт фотоэффекта образуются свободные носители заряда, устремляющиеся к границе р-п-перехода.

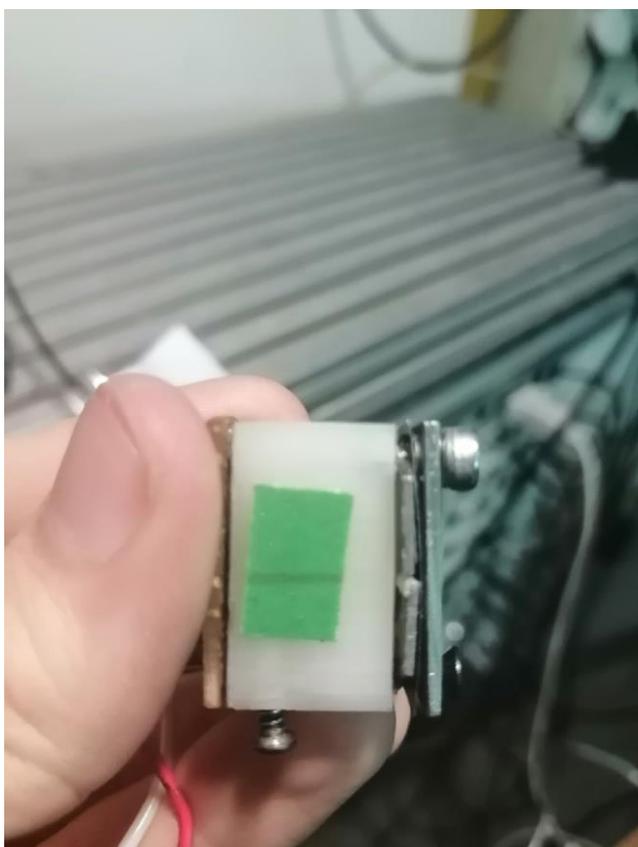


Рис. 4: Датчик, вид сбоку

Существует два вида работы фотодиода: фотогальванический (без внешнего напряжения), когда фотодиод служит источником напряжения, и фотодиодный (с внешним обратным напряжением), когда обеднённая область полупроводника начинает расширяться, что делает фотодиод более чувствительным.

На рисунке 5 схематично представлена вольтамперная характеристика фотодиода.

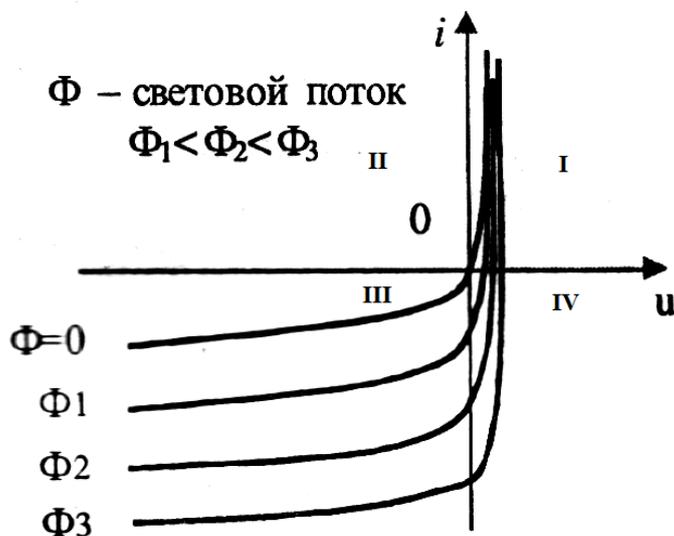


Рис. 5: Вольтамперная характеристика фотодиода.

Зона I – это нерабочая зона фотодиода. При прямой подаче напряжения ток с генератора подавляет ток, создаваемый фотонами.

Зона III соответствует фотодиодному подключению фотодиода. При увеличении интенсивности падающего излучения растёт обратный ток на фотодиоде. Важным качеством такого подключения является то, что значение обратного тока почти не зависит от величины обратного напряжения. Именно поэтому в данной работе фотодиод работает в режиме фотодиодного подключения. Причём мы полагаем, что коэффициент перехода от интенсивности света к обратному току приблизительно линеен, иначе методика измерения не соответствовала бы поставленной задаче.

Зона IV соответствует фотогальваническому подключению фотодиода. На графике видно, что при отсутствии фотодиодного тока и наличии излучения на фотодиоде создаётся напряжение.

Используемый в работе кремниевый фотодиод BPW34 совершенно не оптимизирован для работы с коротковолновым излучением, а рисунок один

как раз показывает, что исследуемое в работе синхротронное излучение имеет коротковолновую основную часть. Облучение фотодиода таким излучением приведёт к его ускоренной деградации.

В целях избежания этой ситуации перед фотодиодом был поставлен *сцинтиллятор* германат висмута (BGO), преобразующий жёсткое излучение рентгеновского спектра в видимый диапазон. Причём и тут мы полагаем, что коэффициент перехода приблизительно линейный по аналогичной причине.

Вообще сцинтилляторы – это вещества, излучающие короткие вспышки люминесценции при прохождении через них частиц ионизирующего излучения. Используемый в данной работе кристалл сцинтиллятора был получен в институте неорганической химии ИХ СО РАН.

Чтобы избежать возможных просвечиваний сцинтиллятора лучом синхротронного излучения между ним и фотодиодом был установлен толстый слой свинцового стекла, пропускающий лучи видимого света, но подавляющий синхротронное излучение.

Кристалл зажимается между двумя танталовыми пластинами, которые также сильно подавляют синхротронное излучение. Толщина кристалла  $\approx 0.1$  мм задает нам вертикальный размер диафрагмы. Не попадающий в сцинтиллятор свет просто вырезается.

Управление манипуляторами и первичная обработка данных производится при помощи специально созданного студентом-магистрантом второго курса НГТУ Гусевым Иваном программного обеспечения.

## Предварительные расчёты

Зная ширину падающего на датчик пучка  $h$  и расстояние от точки излучения до датчика  $D$ , можно найти вертикальный угол для интегрирования формулы (2) по углу. В вырезаемой области пучка интенсивность спадает симметрично от центра к краям вдоль вертикали, из чего следует симметричность пределов интегрирования  $f$  и  $-f$ .

Тогда  $f = \arctg\left(\frac{h/2}{D}\right) \approx \frac{h/2}{D} = 2,5 \cdot 10^{-6}$ .

Толщина одного слоя фольги для каждого из веществ составляет: 15 мкм для меди, 50 мкм для алюминия и 75 мкм для полиимида. Функции пропускания для каждого из этих слоёв продемонстрированы на рисунке 5 в логарифмическом масштабе.

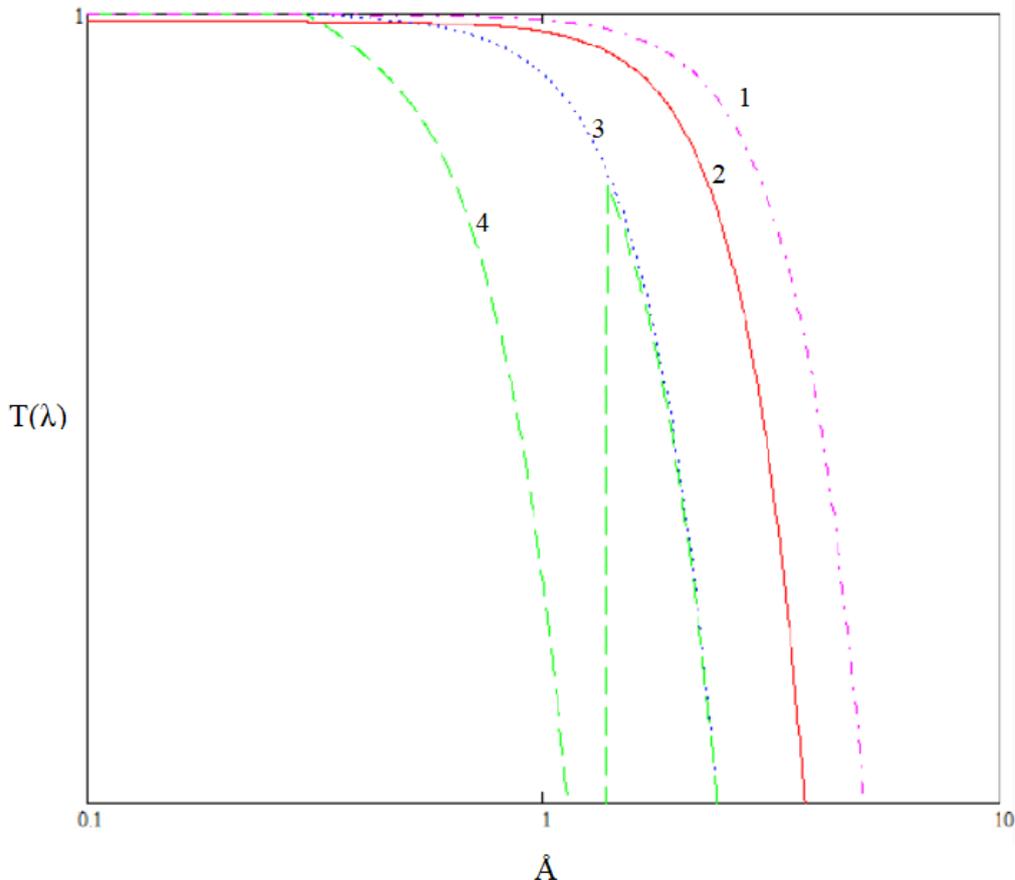


Рис. 6: Пропускание для одного слоя: 1 - полиимида, 3 - алюминия, 4 - меди; 2 - пропускание для суммарного слоя бериллиевых фольг [3]

Теперь проинтегрируем функцию (2) от  $-f$  до  $f$  и умножим на каждую  $T(\lambda)$ , обозначим их за функции 2.1 - 2.5:

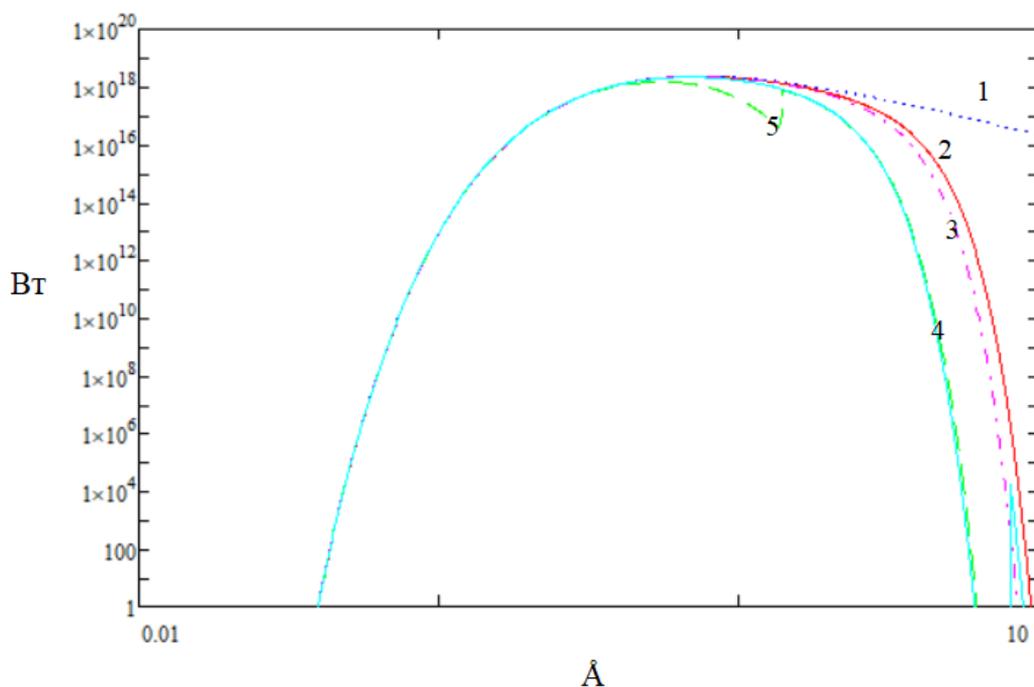


Рис. 7: Распределение интенсивности СИ по спектру для пучка, прошедшего: 2 - бериллиевые фольги, 3 - полиимидную плёнку, 4 - алюминиевую фольгу, 5 - медную фольгу; 1 - распределение для пучка в вакууме.

По рисункам 6-7 видно, что никакой из слоёв не пропускает волны с длиной от десяти ангстрем, поэтому, очевидно, что интегрировать функции по длинам волн оптимальнее всего в пределах от 0 до 10 ангстрем.

В силу того, что в каждом эксперименте пучок проходит через бериллиевые фольги, то целесообразно за  $I_0$  обозначить пучок синхротронного излучения, уже прошедший через них. Причём при дальнейшем интегрировании по длинам волн необходимо умножать функции не только на пропускание исследуемого вещества, но и на пропускание бериллия.

Итак, после интегрирования функций 2.3, 2.4, 2.5 по длинам волн и их нормировкой по  $I_0$  мы получаем следующие зависимости:

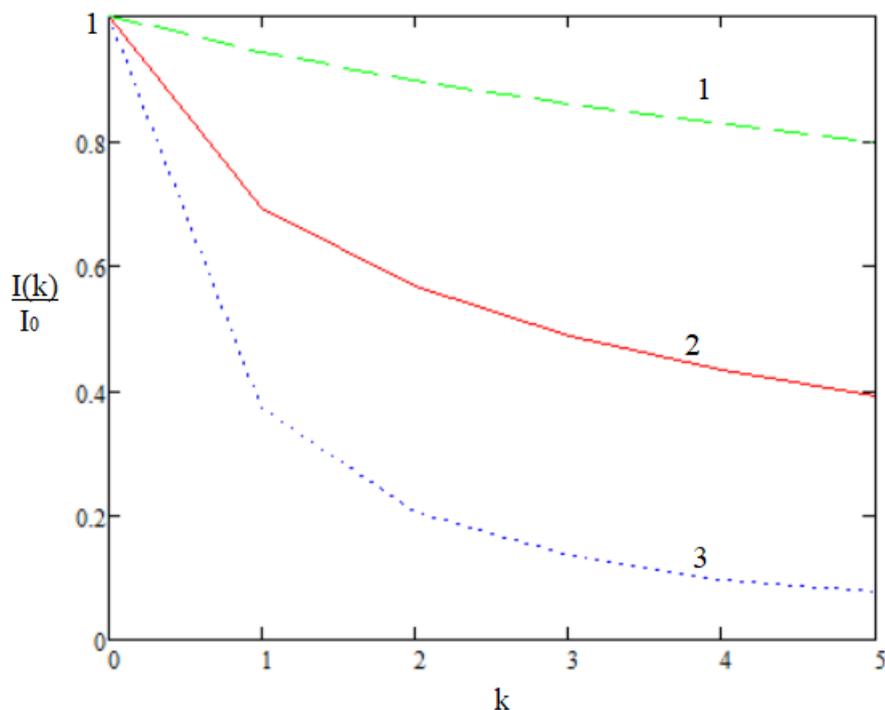


Рис. 8: Теоретический расчёт зависимости нормированной интенсивности СИ  $\frac{I(k)}{I_0}$  от числа слоёв для: 1 – полиимидной плёнки, 2 – алюминиевой фольги, 3 – медной фольги

Как и ожидалось, функции имеют близкий к экспоненте вид и хорошо различимы между собой. Заметно, что из представленных материалов полиимид пропускает синхротронное излучение больше всего, когда медь, напротив, меньше всего.

## Эксперимент

Перед началом опыта камера установки герметично закрывается, после чего в неё с ускорителя-накопителя ВЭПП-4 подаётся синхротронное излучение. Дистанционно управляемый манипулятор перемещает датчик по вертикальной оси для нахождения пикового значения интенсивности пучка. Пара манипуляторов, снабжённая эльконайтовыми пластинами, вырезает из поступающего пучка область, содержащую найденное пиковое значение интенсивности, с целью предотвращения случайного попадания в датчик рассеявшихся по пути фотонов. Манипулятор, снабжённый кассетой с исследуемым веществом, перемещается по вертикальной оси так, чтобы излучение поочерёдно попадало в пять, в четыре и т.д. слоёв вещества. Попадающий в датчик сигнал параллельно оцифровывается и записывается при помощи специально созданной программы. После проведения всех опытов подача синхротронного излучения прекращается и датчик в течении минуты записывает темновой сигнал, который нужно будет учесть при обработке.

## Результаты

После обработки снятых с датчика данных в программе Mathcad построим графики (рис. 9-11):

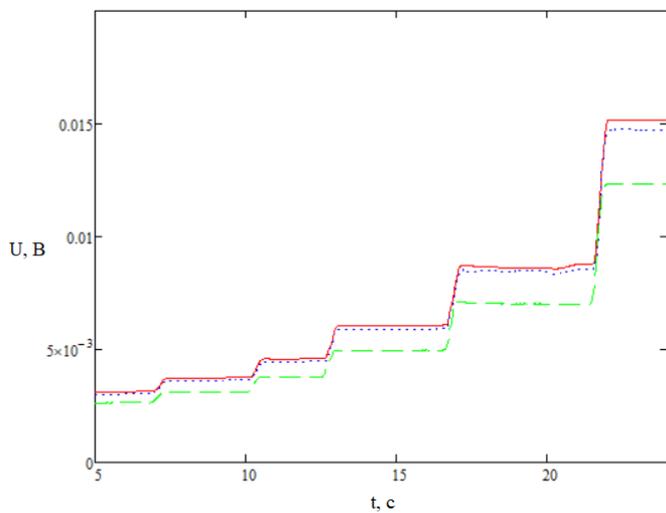


Рис. 9: Три опыта на медных фольгах

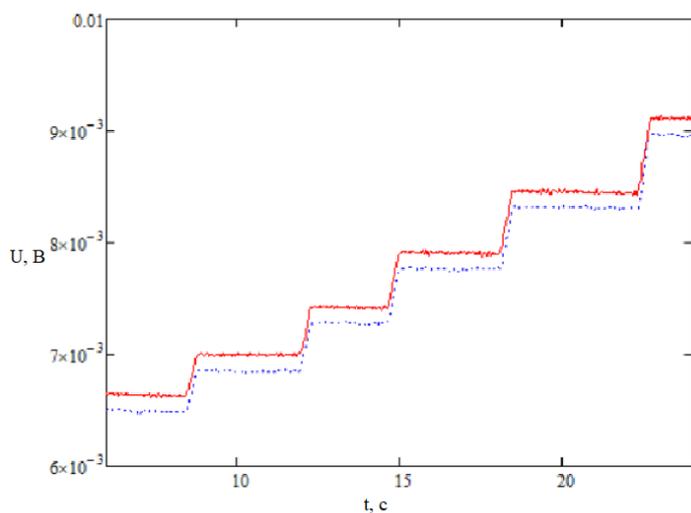


Рис. 10: Два опыта на алюминиевых фольгах

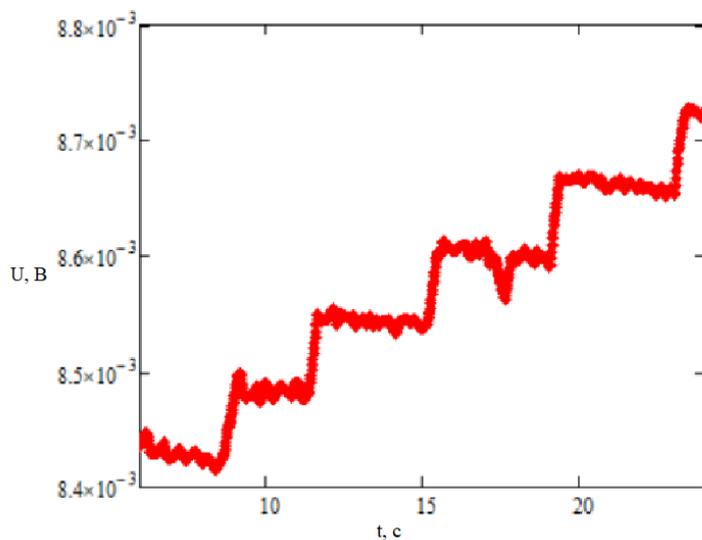


Рис. 11: опыт с полиимидными плёнками.

Горизонтальные участки графиков соответствуют промежуткам времени, когда излучение проходило через участок кассеты с одинаковым числом фольг. Первый, самый низкий, горизонтальный участок соответствует участку кассеты с пятью слоями вещества. Последний, самый высокий, - участку без исследуемого вещества. Скошенные вертикальные линии соответствуют процессу перехода пучка из участка с одним числом фольг в участок с другим числом. Несоответствия между расположениями горизонтальных участков в разных опытах на рисунках 9-10 связано с тем, что со временем эквивалентный ток электронов на ускорителе-накопителе падает, из-за чего падает интенсивность испускаемого синхротронного излучения. Эта разница значений прекратит существовать после нормировки.

Усредняем значение каждого горизонтального участка графика и отнимаем от него среднее значение темнового сигнала. Затем нормируем каждое получившееся значение по среднему значению для участка без исследуемого вещества, чтобы получить функцию  $\frac{I(k)}{I_0}$  для каждого из опытов (рис. 12-14):

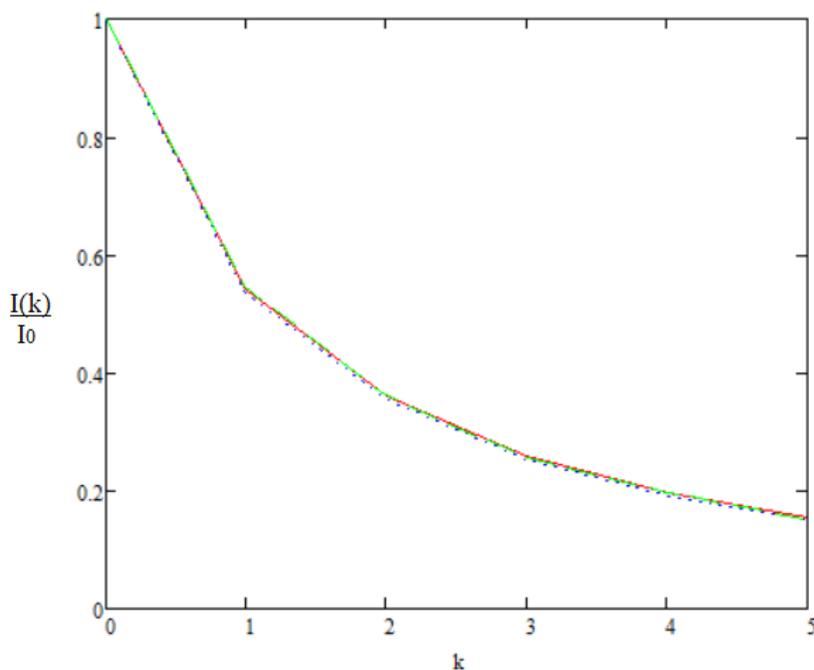


Рис. 12: Практический расчёт нормированной интенсивности СИ  $\frac{I(k)}{I_0}$  для трёх опытов с медью

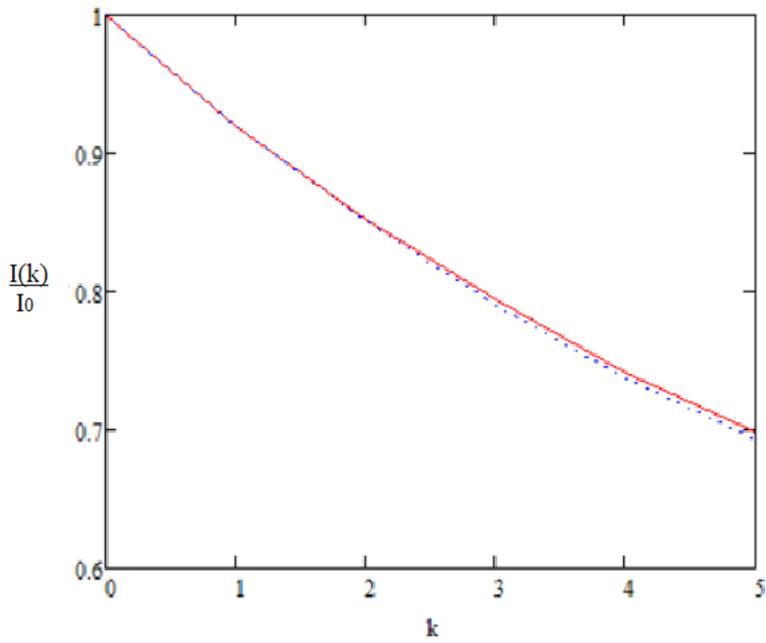


Рис. 13: Практический расчёт нормированной интенсивности СИ  $\frac{I(k)}{I_0}$  для двух опытов с алюминием

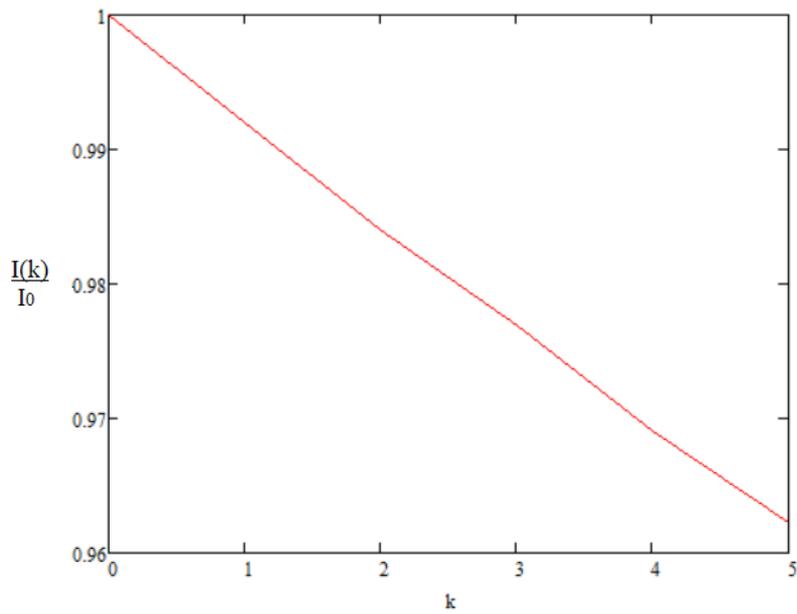


Рис. 14: Практический расчёт нормированной интенсивности СИ  $\frac{I(k)}{I_0}$  для опыта с полиимидными плёнками

В действительности, после нормировки значения интенсивностей для разных опытов с одним веществом приняли близкие значения. Для функций на рисунках 12-13 найдём средние значения нормированной интенсивности для нескольких опытов, после чего сравним с теоретическим расчётом:

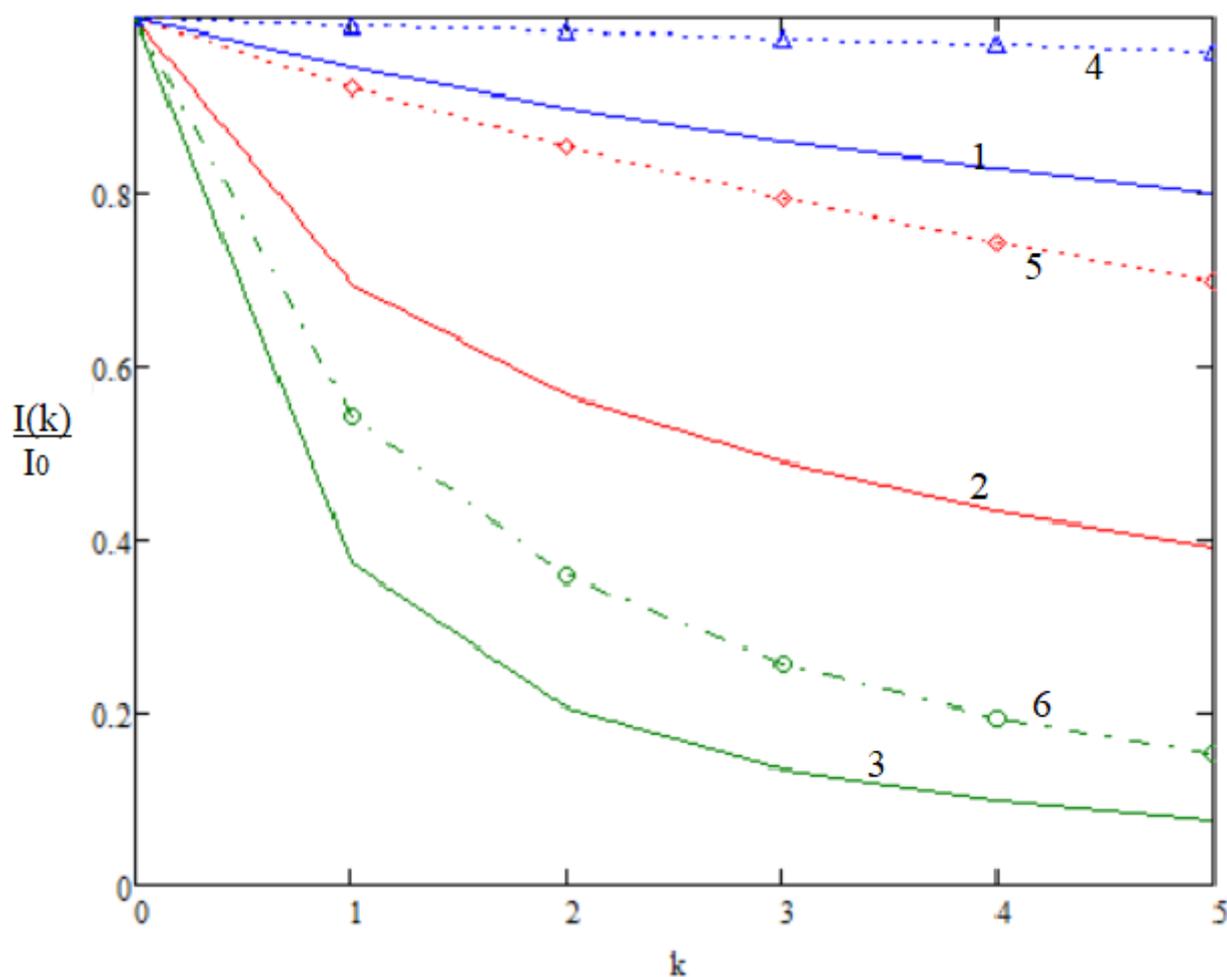


Рис. 15: Сравнение теоретического расчёта и практического. Графики 1-3 соответствуют графикам 1-3 на рис. 8. Графики 4-6 соответствуют практическому результату. Одинаковый цвет соответствует одинаковым веществам.

Как видим, новые функции, хоть и имеют экспоненциальный вид, достаточно сильно разнятся с теорией. Причём заметно, что графики экспериментальных данных расположены выше графиков теоретических данных, т.е. в эксперименте фольги пропускают больше синхротронного излучения, чем предполагалось.

Ошибка заключается неверном положении, что фотоны излучения после рэлеевского и комптоновского рассеиваний не попадают в датчик, а удаляются в окружающее пространство. Данная концепция верна только для случая относительно малого размера датчика и относительно большого расстояния от датчика до кассет с фольгами. В действительности же область облучаемой фольги относительно велика, мы совершенно не знаем, какая часть рассеянного излучения попадает в датчик. Ситуацию усугубляет нетривиальное пространственное расположение интенсивности комптоновского рассеяния: оно неравномерно распределено по сечению.

Самым простым из возможных способов смягчения полученного расхождения в рамках данной работы являлось бы использование дополнительных манипуляторов с эльканайтовыми пластинами, поставленными после кассеты с фольгами. Ими можно было бы вырезать узкую часть выходящего из исследуемого вещества пучка, чтобы снизить шанс попадания в датчик рассеянного излучения.

## **Заключение**

В данной работе мною были изучены важные для практического применения свойства синхротронного излучения: непрерывное распределение интенсивности излучения по волновому спектру, зависимость интенсивности излучения от вертикального угла.

Был экспериментально подтверждён вид закона Ламберта-Бугера-Бэра на примере меди, алюминия и полиимида, но с численными расхождениями от теории. Ошибки, вызвавшие расхождения, были обнаружены, как и был предложен возможный способ уточнения экспериментальных данных.

В ходе работы я также ознакомился с принципами работы полупроводникового фотодиода и сцинтиллятора.

## Список литературы

- [1] Синхротронное излучение. Свойства и применения Автор: К. Кодлинг, В. Гудат, Э. Кох, А. Котани, К. Кунц, Д. Линч, Э. Роу, Б. Зоннтаг, И. Тойозава  
Изд: Мир Год: 1981 Стр: 528
- [2] Официальный сайт ускорительного комплекса ВЭПП-4 Института ядерной физики им. Будкера: <http://v4.inp.nsk.su/vepp4/index.html>
- [3] Официальный сайт центра рентгеновской оптики Национальной лаборатории Лоуренса Беркли: [https://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](https://henke.lbl.gov/optical_constants/)