

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ушакова Наталья Петровна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изучение закона изменения интенсивности синхротронного
излучения при прохождении через вещество**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18310

Научный руководитель:

Гольденберг Борис Григорьевич

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Симонов Андрей Артёмович

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019 г.

Оглавление

Аннотация.....	3
Введение.....	4
1. Основная часть.....	
1.1 Теоретическая часть.....	5
1.2 Экспериментальная часть.....	
1.2.1 Установка.....	9
1.2.2 Эксперимент.....	11
2. Заключение.....	14
3. Список литературы.....	15

Аннотация

Целью работы является изучение природы синхротронного излучения (СИ) на примере закона Бугера-Ламберта-Бера (изменение интенсивности СИ при прохождении через вещество).

Для этого использовалась установка, созданная для экспериментов по рентгеновской литографии лаборатории института ядерной физики СО РАН – станция LIGA на накопителе ВЭПП-3. Пучок фотонов из накопителя поступает в радиационно-защищённую камеру; она оснащена системой создания и поддержания необходимой газовой среды, внутри размещён комплект высокоточных подвижек, управляемый ЭВМ, обеспечивающий позиционирование и перемещение образцов в пучке СИ. В неё помещался датчик для фиксирования интенсивности синхротронного излучения после прохождения через исследуемые образцы лавсановой и полиимидной плёнки различной толщины с целью проверки степени изменения интенсивности. Ослабление интенсивности излучения при прохождении через слой вещества описывается законом Бугера-Ламберта-Бера. Были измерены значения сигнала детектора для различных поглощающих плёнок, вводимых поочерёдно в пучок СИ перед детектором. Построена и проанализирована зависимость ослабления интенсивности от материала и толщины плёнки.

Введение

Синхротронное излучение было открыто во второй половине XX века на синхротроне, созданном для экспериментов по исследованию элементарных частиц. Синхротрон является одним из новейших источников рентгеновских лучей. Свойства синхротронного широко применяются для исследования структуры и состава вещества.

Данная работа заключается в изучении синхротронного излучения на станции LIGA: на накопителе ВЭПП-3 электроны разгоняют до околосветовых скоростей, при этом они начинают испускать синхротронное излучение во время поворотов за счёт постоянного магнитного поля. Пучки излучения подаются на станцию импульсами длительностью 1 нс с периодом 259 нс, что можно считать непрерывным в большинстве прикладных задач.

В данной работе исследуется лишь малая часть свойств синхротронного излучения: будет изучаться закон изменения интенсивности при прохождении через вещество.

Для эксперимента выбраны полиимидные и лавсановые плёнки разных толщин. Для фиксирования интенсивности по прохождении веществ используется датчик на основе фотодиода: чтобы с его помощью зафиксировать интенсивность, не зависящую от энергии излучения, необходимо понизить энергию фотонов (перейти из рентгеновского в видимый диапазон) с помощью люминофора, а прямой рентгеновский пучок подавляется свинцовым стеклом. Таким образом, будет получено несколько графиков, иллюстрирующих закон изменения интенсивности.

1. Основная часть

1.1 Теоретическая часть

Синхротронное излучение (далее – СИ) – это магнитотормозное электромагнитное излучение, испускаемое релятивистскими частицами во время движения по круговой орбите под действием постоянного магнитного поля. Оно обладает высокой спектральной яркостью в широком диапазоне длин волн, является сильно поляризованным, возникает короткими импульсами и имеет яркость в 10^6 - 10^{20} раз большую, чем излучение рентгеновских трубок, которые до открытия СИ играли (и играют) огромную роль в изучении структуры вещества. Основателем теории СИ является Дж. А. Шотт: в 1912 году он описал поляризационные свойства и угловое распределение электромагнитного излучения электрона по круговой орбите, которое предсказал ещё А. М. Лиенар в 1898 году, наблюдалось же оно только спустя почти пятьдесят лет, причём было обнаружено, что удивительно, почти случайно. [1] На рисунке ниже представлена модель испускания релятивистским электроном СИ при движении по орбите ускорителя.

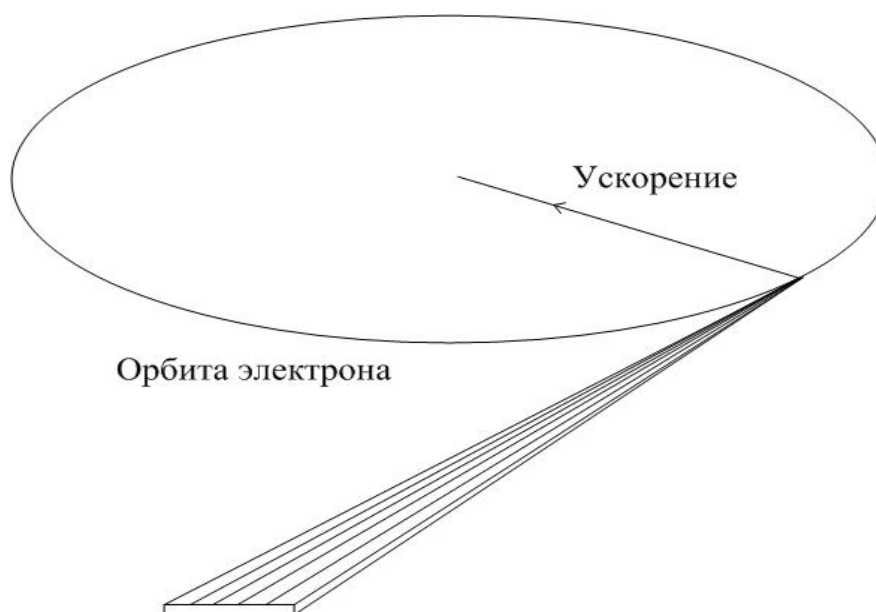


Рис. 1. Пространственное распределение фотонного излучения электрона ($v \sim c$)

Электромагнитные волны, излучаемые релятивистскими электронами, движущимися с околосветовыми скоростями, сами имеют скорость света, что способствует сильному проявлению эффекта Доплера, поведение же частиц подчиняется законам релятивистской электродинамики. СИ проявляет сильную угловую направленность: всё излучение, направленное по касательной к орбите электрона, оказывается сосредоточенным в конусе с углом раствора:

$$\beta \approx \frac{mc^2}{E} \quad (1)$$

Наблюдатель же (рис. 1) видит не точку, которая равна размеру частицы, а участок формирования излучения, поэтому для него СИ выглядит практически плоским веером, который направлен, соответственно, так же. Стоит заметить, что угол расходимости СИ обратно пропорционален лоренц-фактору, то есть излучение сильно коллимировано:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

На релятивистских скоростях как масса зависит от скорости, то есть для наблюдателя она будет равна произведению самой массы на лоренц-фактор, так и длина волны: произойдёт лоренцовское сжатие в γ раз и доплеровский сдвиг частоты в сторону более высоких частот, максимум же приходится на следующую частоту:

$$\omega_{max} = \omega_c * \gamma^3, \quad (3)$$

где

$$\omega_c = \frac{qB}{m} \quad (4)$$

Максимум интенсивности релятивистских электронов придётся на рентгеновский диапазон, в котором интервалы между кратными частотами настолько малы, что спектр СИ можно считать непрерывным.

Немаловажным является тот факт, что одновременно электроном испускается и излучение меньших частот (вплоть до частоты обращения по орбите $\sim 10^6$ Гц, типичное значение длин волн составляет несколько ангстрем).

В данной работе исследуется закон (Бугера-Ламберта-Бера) ослабления интенсивности СИ при прохождении через слой вещества:

$$\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-\mu(\lambda)\rho x}, \quad (5)$$

где $I_0(\lambda)$ – начальная интенсивность, $I(\lambda)$ – интенсивность после прохождения через слой толщиной x , $\mu(\lambda)$ – линейный коэффициент поглощения, ρ – плотность материала.

Для отдельного электрона формула расчёта интенсивности выглядит следующим образом (она и использовалась для расчётов):

$$I_1(\lambda, \psi) = \frac{27}{32} \frac{e^2 c}{\pi^3 R^2} \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^4 \gamma^8 (1 + (\gamma\psi)^2) \left\{ K_{2/3}^2(\xi) + \frac{(\gamma\psi)^2}{1 + (\gamma\psi)^2} K_{1/3}^2(\xi) \right\}, \quad (6)$$

где

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

$$\xi = \frac{\lambda_c (1 + (\gamma\psi)^2)^{3/2}}{2\lambda},$$

R – радиус кривизны орбиты, $K_{1/3}$ и $K_{2/3}$ – модифицированные функции Бесселя второго рода. Используется система СГС. [2]

Рассчитанный по данной формуле для синхротрона ВЭПП-3 (энергия электронов – 2 ГэВ, магнитное поле в точке излучения – 20 кГс, ток – 1 мА) график имеет следующий вид (см. рис. 2). Стоит сказать, что в реальной установке используются бериллиевые фольги (для разделения вакуума в накопителе от атмосферы рабочей камеры) суммарной толщиной 500 мкм. В

соответствии с законом (5) излучение ослабляется фольгами и спектр с учётом этого:

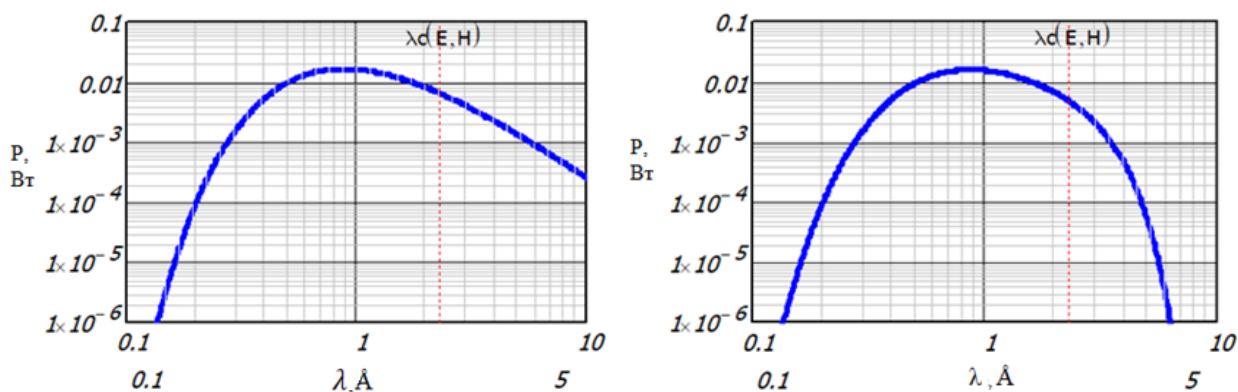


Рис. 2. Мощность СИ в интервале длин волн $d\lambda$ без (слева) и с учётом бериллиевой фольги.

В эксперименте мы поочерёдно вводим перед детектором лавсановую ($C_{10}H_8O_4$) и полиимидную ($C_{22}H_{10}N_2O_5$) плёнки, расчётные графики приведены ниже (соответственно для 50 мкм полиимида, 100 мкм лавсана – красным цветом, 1500 мкм полиимида, 1000 мкм лавсана – зелёным, синим – исходное распределение). Спектральные зависимости коэффициента пропускания материалов взяты с сайта scho.lbl.gov.

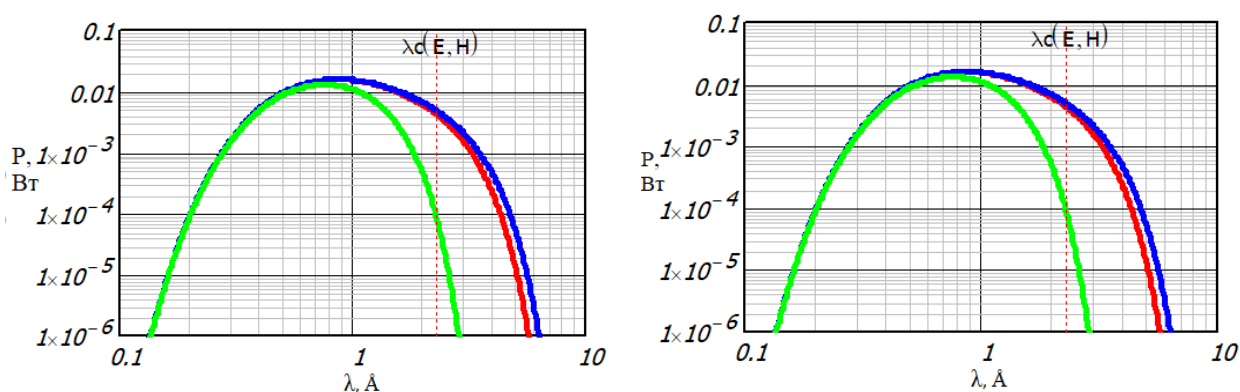


Рис. 3. Мощность СИ в интервале длин волн $d\lambda$ с учётом 50 мкм и 1500 мкм полиимида (слева) и с учётом 100 мкм и 1000 мкм лавсана.

Измеряемым параметром является сигнал с фотодиода, являющийся интегральной характеристикой (за счёт люминофора мы получаем суммарную интенсивность). Мы смотрим на отношение интенсивностей до фильтров и после их прохождения; таким образом имеется возможность сопоставить теоретические расчёты с полученным отношением с помощью непосредственного измерения. Ниже представлен график, который представляет собой экспоненциальную зависимость.

Полиимид d, мкм	50	100		300	500		900		1300		1700	
Лавсан d, мкм			200			700		1100		1500		1900
I/I_0	0,937	0,887	0,8004	0,756	0,672	0,598	0,563	0,511	0,491	0,449	0,437	0,402

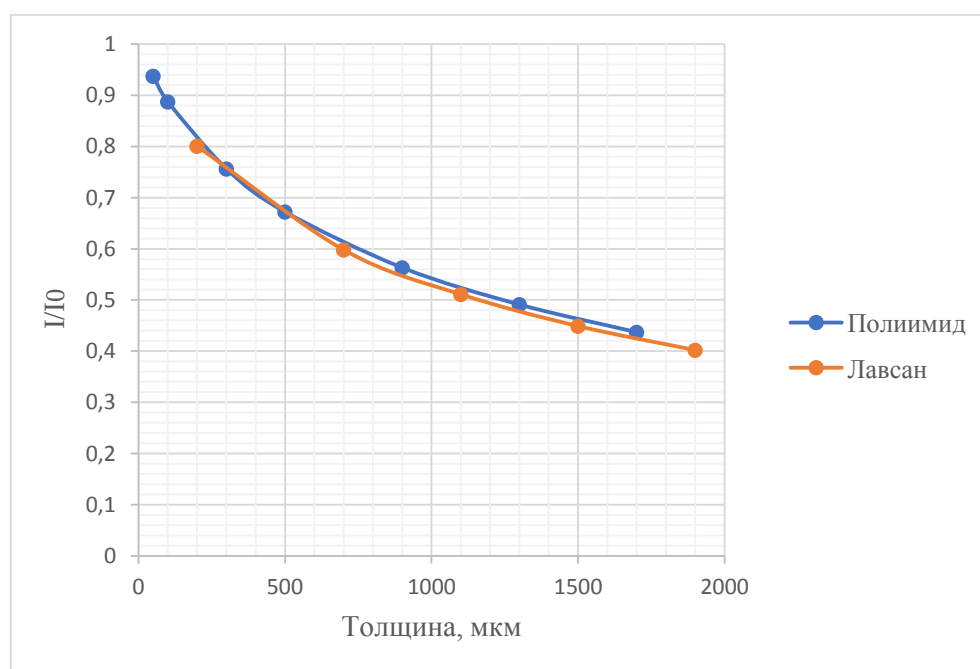


Рис. 4. Расчётная зависимость отношения интенсивностей от толщин полиимидного и лавсанового фильтров.

1.2 Экспериментальная часть

1.2.1 Установка

Эксперимент проводился на станции LIGA на накопителе ВЭПП-3 [3]. В рабочий объём камеры, откачиваемый до давления порядка 10^1 Па, выводится пучок синхротронного излучения. Для начала необходимо было

найти максимум излучения, чтобы проводить эксперимент в постоянных условиях. Для достижения этого была использована подвижная щель, перемещаемая с помощью подвижки №3, и фотодиод, также перемещающийся при помощи подвижки №1 и позволяющий вывести с помощью программы зависимость напряжения, пропорционального интенсивности, от координаты подвижки №2. Таким образом, мы синхронизировали положение диода (точнее, диафрагму диаметром 1 мм на непрозрачном свинцовом экране на диоде) и щели, нашли максимум излучения и, устанавливая рамку с образцами, могли снимать значения напряжения. Ниже представлена итоговая схема установки.

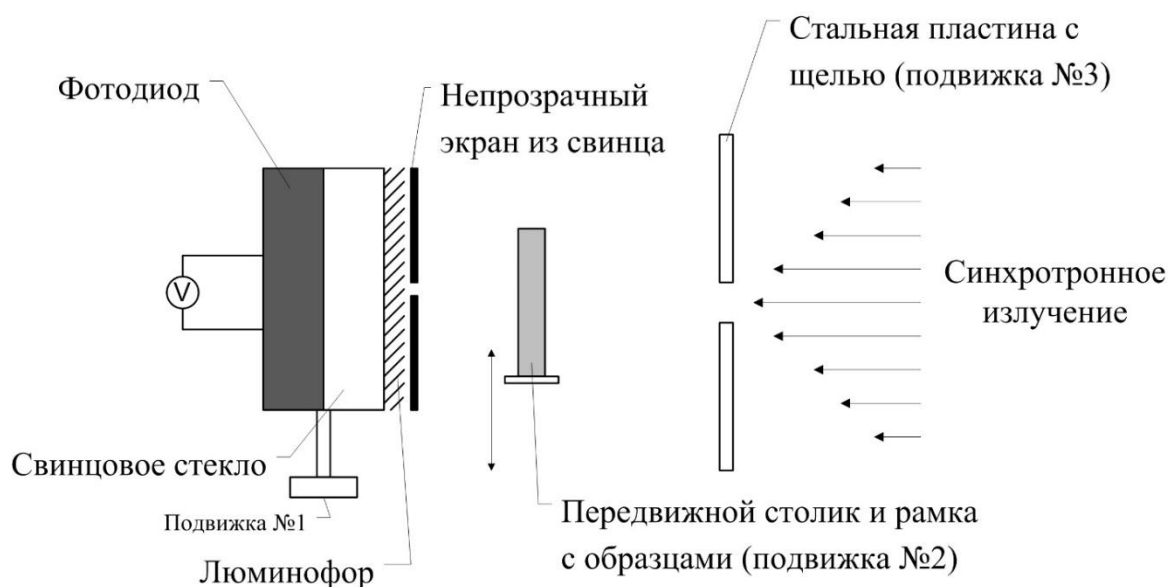


Рис. 7. Схема установки.

В эксперименте использовался фотодиод ФД-24К. Естественно, он не работает с высокоэнергетичным излучением – если бы его поставили на пути пучка, произошли бы перегрузка и радиационные повреждения, поэтому перед ним устанавливается свинцовое стекло толщиной 10 мм, передняя часть пластины из свинцового стекла покрывалась люминофором, который, соответственно, преобразовывал поглощаемую энергию рентгеновского излучения в видимый диапазон. Преобразованное излучение проходило через свинцовое стекло на фотодиод. Фиксируемое фотодиодом значение

напряжения пропорционально интенсивности излучения, и это позволяет довольно легко определить отношение интенсивностей (после и до), зная напряжения. Эффективный ток пучка во время проведения эксперимента сильно менялся не более чем на 5%, поэтому можно считать его постоянным.

После плёнок нужно иметь ослабленный сигнал, достаточный для регистрации. Мы использовали фотодиодный детектор, который был ранее сделан для контроля положения максимума интенсивности пучка на этой станции. По опыту предыдущих работ сигнал с детектора составлял 30-200 мВ, использовалось включение по схеме генерации ЭДС, то есть динамический диапазон небольшой. Если будем использовать пленки с высоким поглощением, то не сможем регистрировать сигнал. Чтобы детектор мог «видеть» как прямой, так и ослабленный пучок, поглощение в пленках должно быть на уровне десятков процентов. Полимерные пленки имеют малое поглощение. Варьируя толщину пленок от 50 до 1500 мкм, можно регулировать ослабление в диапазоне от 1 до 0.4, то есть оставаться в диапазоне работы детектора. А при использовании тех же толщин более тяжелых материалов, например металлов, сигнал будет слишком слабый или понадобится брать фольги толщиной несколько мкм, что технически сложно.

1.2.2 Эксперимент

После того как установка была готова к использованию, то есть были синхронизированы положения фотодиода, рамки с пластинами и щели, перемещаемой оставалась только подвижка с образцами (рамка с набором плёнок разной толщины). Имелась возможность с помощью ЭВМ установить фиксированный интервал перемещения, в конечном счёте получался набор значений, соответствующий напряжению, то есть интенсивности пучка по прохождении через каждую из пяти пластин в рамке. Выполнить задачу удалось только частично ввиду использования фотодиода в интервале вольтамперной характеристики, относящемуся к нелинейному увеличению фототока в зависимости от потока падающего излучения. Мы работали в

области III (см. рис. 9), но не перевели фотодиод в режим фотопреобразователя, который перевёл бы нас в левую часть третьей четверти, где не возникло бы проблем, которые присутствуют ближе к оси игрек: фототок увеличивается нелинейно. В связи с этим при уменьшающемся потоке, что происходило при увеличении толщины плёнок, напряжение всё более нелинейно зависело от потока излучения, в связи с чем результаты получались отличными от теоретических расчётов, к тому же величина измеряемого сигнала оказалась на грани чувствительности детектора. Верность этого предположения подтверждается тем, что при толщинах 50 мкм и 100 мкм полиимидной плёнки измеренные значения близки к расчётным, в то время как при увеличении толщины сказывалось влияние нелинейности ВАХ фотодиода. Ниже представлена вольтамперная характеристика.

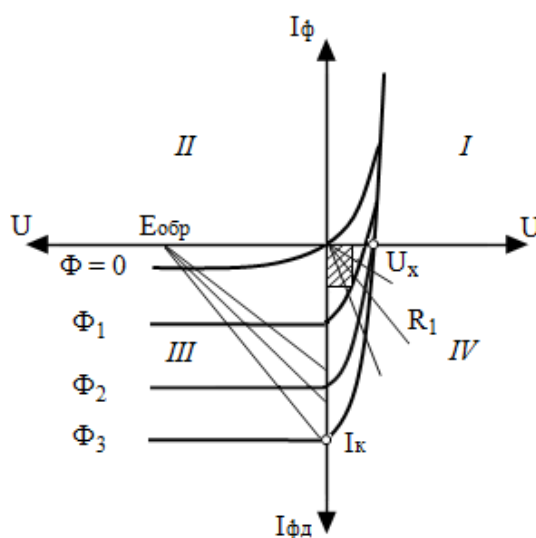


Рис. 9. Вольтамперная характеристика фотодиода.

Полученные данные представлены в следующей таблице:

Полиимид d, мкм	0	50	100		300	500		900		1300		1700	
Лавсан d, мкм	0			200			700		1100		1500		1900
U, мВ	54,4	49,31	48,276	46,3	48,2	45,1	39,5	39,8	34,4	35	31,3	31,7	29,3
I/I0		0,913	0,894	0,857	0,892	0,835	0,731	0,737	0,637	0,648	0,579	0,587	0,543

Значение тока пучка электронов в накопителе – 96 мА, напряжения – 54,4 мВ.

Как можно видеть, различия расчётных значений и полученных имеется, но ровно в той мере, чтобы они подчинялись предоставленному объяснению результатов. Действительно, при увеличении толщины плёнки меняется напряжение на фотодиоде, то есть меняется интенсивность потока излучения: она уменьшается. Соответствующие графики с экспериментальными данными и теоретическими расчётами представлены ниже.

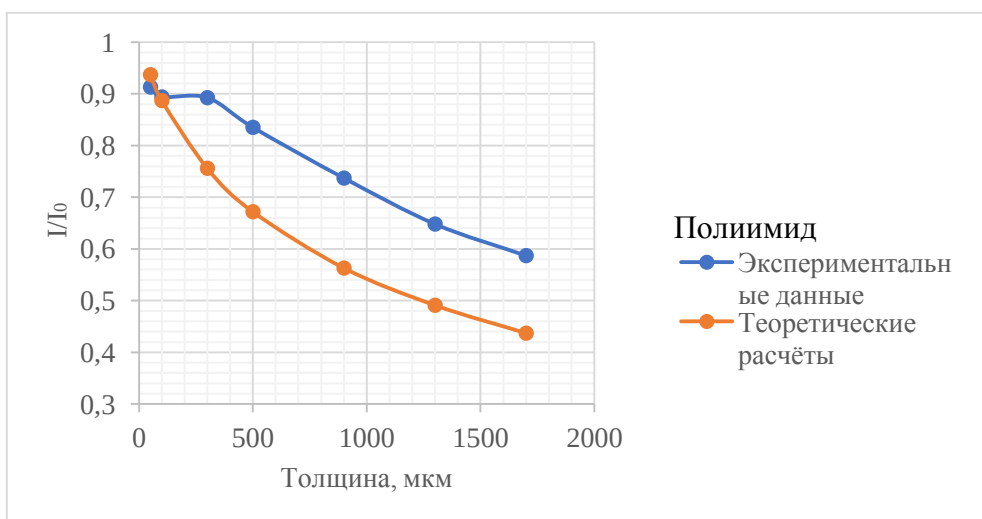


Рис. 10. Сопоставление теории и эксперимента для полиимидов.

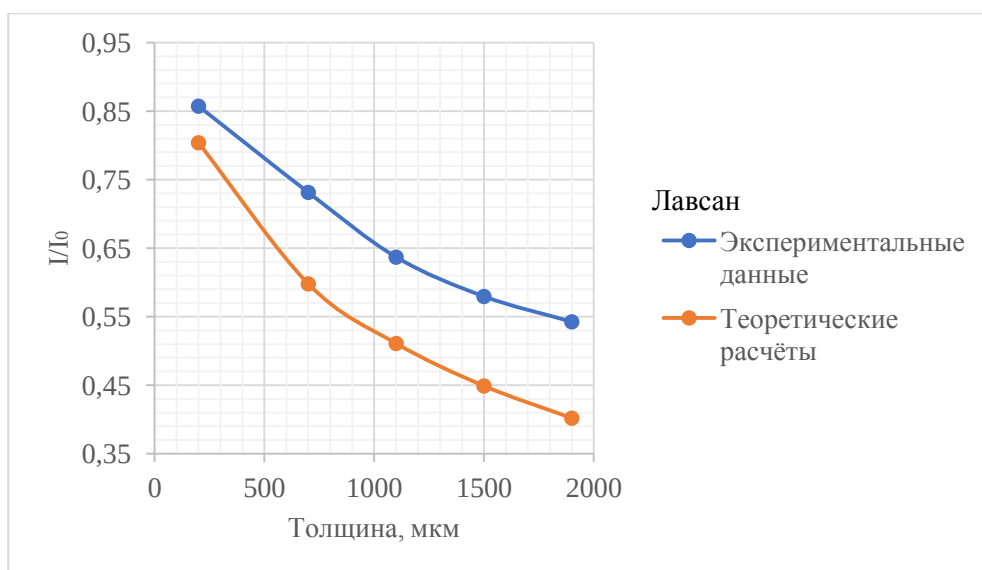


Рис. 11. Сопоставление теории и эксперимента для лавсана.

2. Заключение

В итоге был получен опыт работы с синхротронным излучением, изучены некоторые его свойства, в частности – закон падения интенсивности СИ при прохождении через материал (закон Бугера-Ламберта-Бера), которому и посвящена данная работа. Также изучена работа фотодиодов и применение фотодиодных детекторов в экспериментах с СИ. Несмотря на то что получить точные экспериментальные данные во всём диапазоне не удалось, это, как выяснено, было связано не с неправильностью закона, а с неверным выбором схемы включения детектора, неучётом нелинейной зависимостью напряжения от потока излучения фотодиода и проблемами регистрации слабого сигнала. Можно отметить, что в используемом простейшем варианте подключения без внешнего источника электрической энергии (режим фотопреобразователя) детектор успешно применяется для поиска максимума интенсивности пучка СИ (первоначальное назначение этого детектора на станции), так как в этом случае нелинейность и недостоверность измерения слабых сигналов на краях пучка не учитываются. Поэтому мы ошиблись в выборе схемы включения. Явная тенденция к уменьшению интенсивности свидетельствует о наличии зависимости как таковой. В будущем эта проблема будет решаться, в частности – фотодиод в режим работы фотопреобразователя, чтобы выйти в линейную область его вольтамперной характеристики.

3. Список литературы

1. Г. В. Фетисов. – Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. – Учебное издание. – ФИЗМАТЛИТ, 2007. - М., 672 с.
2. К. Кунц. – Синхротронное излучение. Свойства и применения. – Изд. №2/1059. – Издательство «Мир». – М., 539 с.
3. А. Н. Генцелев, Б. Г. Гольденберг, В. И. Кондратьев. – LIGA-станция на накопителе ВЭПП-3. – // Поверхность. - 2002. - № 9. - С. 30-35.