



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНЫЙ ПАРК

Образовательный ресурсный центр по направлению физика

Е. О. Филатова, А. С. Конашук

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

**Учебно-методическое пособие
(описание лабораторной работы)**

Рецензенты: д. ф.-м. н., профессор А.А. Павлычев, к. ф.-м. н., доцент А.А. Пастор

Рекомендовано к печати Ученым советом физического факультета СПбГУ (выписка из протокола № 9 от 15.11.2016 г.)

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов СПбГУ естественно-научных направлений обучения. Оно может быть полезно также учащимся и преподавателям средних и средне-специальных учебных заведений.

Лабораторная работа выполняется на оборудовании Образовательного ресурсного центра по направлению физика Научного парка СПбГУ (<http://researchpark.spbu.ru>).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	1
1. Взаимодействие рентгеновских лучей с веществом.	2
2. Квантовая теория рассеяния рентгеновских лучей.	5
3. Si PIN детектор.	10
4. Техника безопасности.....	12
5. Описание установки.....	13
6. Порядок выполнения работы.	15
6.1. Измерение спектра падающего излучения.	15
6.2. Калибровка энергочувствительного детектора.....	16
6.3. Измерение спектра рассеянного излучения при разных углах рассеяния (30°-140°).....	18
6.4. Исследование эффекта Комптона без энергочувствительного детектора по изменению пропускания медного фильтра.	18
7. Обработка данных и содержание отчета.	21
8. Примерная структура отчета.....	23
9. Контрольные вопросы.	24

Введение

Эффект Комптона – это один из механизмов рассеяния рентгеновских и гамма фотонов при взаимодействии с веществом, при котором происходит изменение длины волны фотонов. Целью работы является повторение исторического опыта Артура Комптона, первооткрывателя эффекта, названного его именем, на современном техническом уровне. При выполнении работы вы изучите само явление неупругого рассеяния (эффекта Комптона), а также познакомитесь с работой энергочувствительного Si PIN детектора. Для большего понимания принципа энергочувствительности предлагается повторить изучение эффекта Комптона с помощью неэнергочувствительного счетчика Гейгера, используя изменение пропускной способности медного фильтра в зависимости от длины волны излучения.

1. Взаимодействие рентгеновских лучей с веществом.

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между УФ- и гамма-излучением в пределах длин волн от 10^2 до 10^{-3} нм (или с энергией фотонов $\hbar\omega$ от 10 эВ до нескольких МэВ; $\omega = 2\pi\nu = 2\pi c / \lambda$ – частота излучения). Характер взаимодействия излучения с веществом коренным образом различается в коротковолновой и длинноволновой областях указанного диапазона. В коротковолновом диапазоне излучение (с длиной волны $\lambda < 0,4 \text{ \AA}$) обладает высокой проникающей способностью, в то время как длинноволновое излучение ($\lambda > 10 \text{ \AA}$) сильно поглощается в воздухе ($1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ нм}$).

При прохождении рентгеновских лучей через вещество они взаимодействуют с атомами вещества. При этом могут происходить одновременно несколько процессов: рентгеновское излучение может рассеиваться на атомах вещества, а может поглощаться, существуют также комбинированные явления неупругого и аномального рассеяния. Известны три основных механизма взаимодействия рентгеновского излучения с веществом:

1. истинное поглощение, т.е. исчезновение фотона (фотоионизационное поглощение);
2. рассеяние, т.е. изменение первоначального направления фотона;
3. рождение электронно-позитронных пар.

В процессе фотоионизационного *поглощения* налетающий рентгеновский фотон полностью передает свою энергию связанному атомному электрону, освобождая его из атома (т.е. происходит ионизация атома).

В результате *рассеяния фотона* атомами поглощающего материала его энергия (а значит, и длина волны) может либо сохраняться (*упругое рассеяние*), либо частично передаваться веществу (*неупругое рассеяние*).

Упругое (когерентное) рассеяние происходит, когда энергия фотона недостаточна для выбрасывания электрона из атома (томсоновское рассеяние). Между рассеянным и падающим излучением в этом случае имеются

определенные фазовые соотношения, и рассеянная волна может интерферировать с падающей волной (брэгговская дифракция).

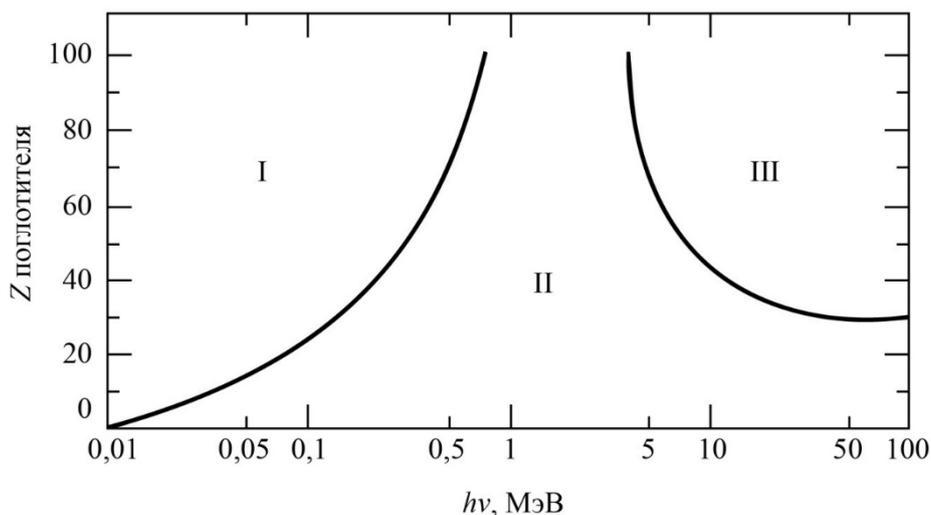


Рис. 1. Сравнительная диаграмма относительных вкладов различных типов взаимодействия в зависимости от энергии фотона и атомного номера Z поглотителя. Область I – преобладание фотоэффекта; область II – преобладание рассеяния; область III – преобладание рождения электронно-позитронных пар.

В результате *неупругого (некогерентного) рассеяния* возникает излучение со слегка увеличенной длиной волны, которое не зависит от первоначальной длины волны фотона, и определяется только углом, на который отклоняется фотон (эффект Комптона). Часть энергии электромагнитной волны в этом случае передается одному из электронов атома. Неупругое рассеяние имеет место на внешних слабо связанных электронах атомов. В результате столкновения фотона с таким электроном последний выбрасывается из атома. Соотношение вкладов когерентно и некогерентно рассеянного излучений зависит от угла рассеяния и атомного номера рассеивающего элемента.

В случае, когда энергия фотона превышает удвоенную энергию покоя электрона $E = 2m_0c^2 = 1,022$ МэВ, фотон может поглотиться с образованием электрона и позитрона. Этот процесс называется *рождением пар*.

В зависимости от энергии излучения и от поглощающего материала преобладающим является один из перечисленных трех процессов: фотоионизационное поглощение, рассеяние или рождение пар (см. рис. 1).

Как видно из рис. 2, при увеличении энергии рентгеновского излучения основным механизмом взаимодействия фотонов с веществом становится некогерентное (комптоновское) рассеяние.

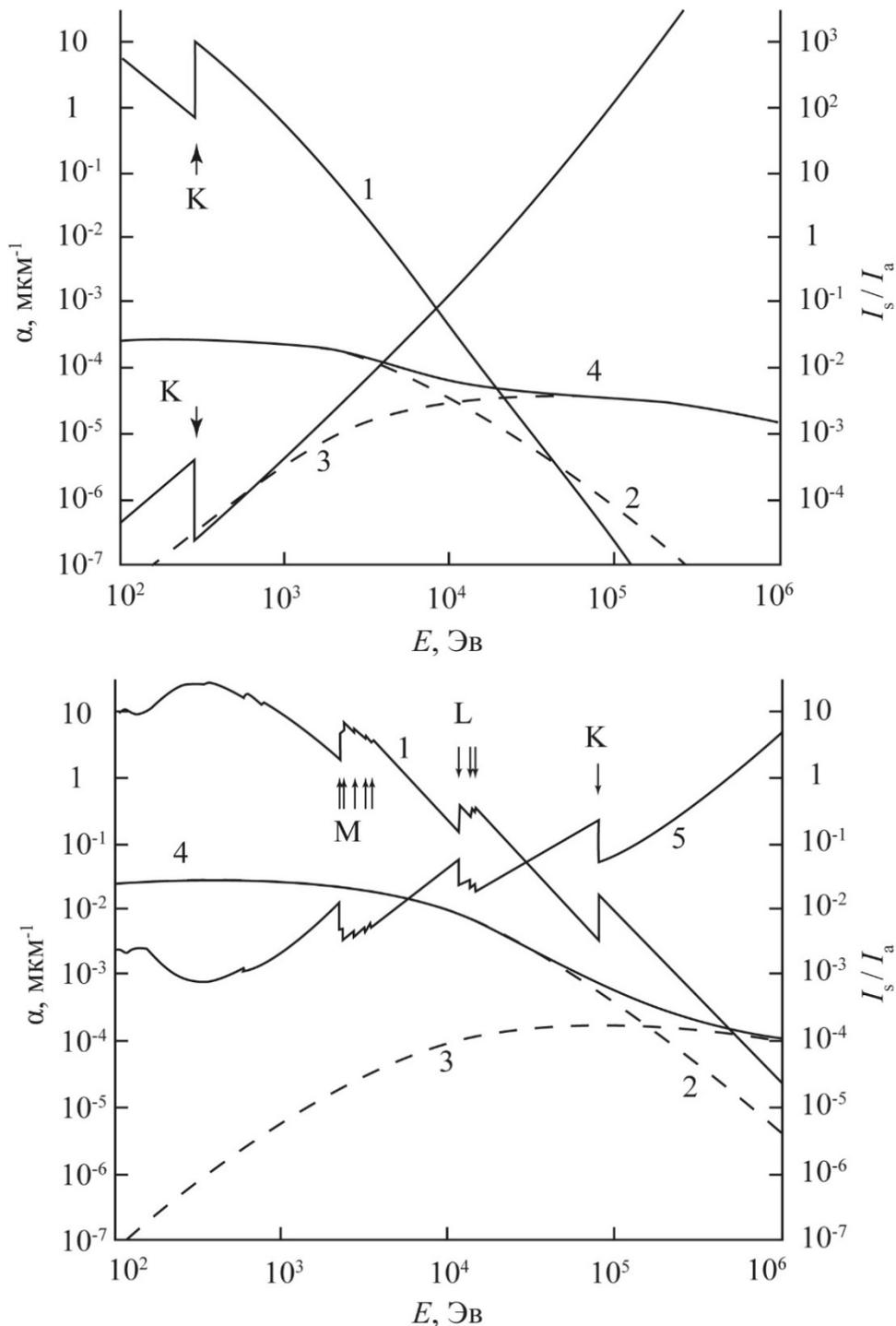


Рис. 2. Линейные коэффициенты ослабления для рассеяния α и поглощения рентгеновского излучения в углероде (верхний рисунок) и золоте (нижний рисунок): 1 – поглощение, 2 – когерентное рассеяние, 3 – некогерентное рассеяние, 4 – суммарное рассеяние, 5 – отношение интенсивностей рассеянного (I_s) и поглощенного излучения (I_a). Стрелками указаны положения скачков поглощения К-, L- и М-уровней.

2. Квантовая теория рассеяния рентгеновских лучей.

Рассеяние жестких рентгеновских и γ -лучей в веществе относится к числу явлений, в которых отчетливо проявляется двойственная природа излучения. Согласно классическим представлениям, длины волн рассеянных и первичных лучей совпадают. Тем не менее, изучая рассеяние жесткого рентгеновского излучения на телах, состоящих из легких атомов (графит, парафин и т.д.), Артур Комптон обнаружил, что в рассеянном излучении наряду с исходной длиной волны λ , появляется смещенная линия с длиной волны $\lambda' > \lambda$ (рис. 3). Изменение длины волны $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ в длинноволновую область спектра при рассеянии получило название комптоновского смещения, а само явление – эффекта Комптона (1923 г.). В 1927 г. А. Комптон получил Нобелевскую премию по физике «за открытие эффекта, названного его именем».

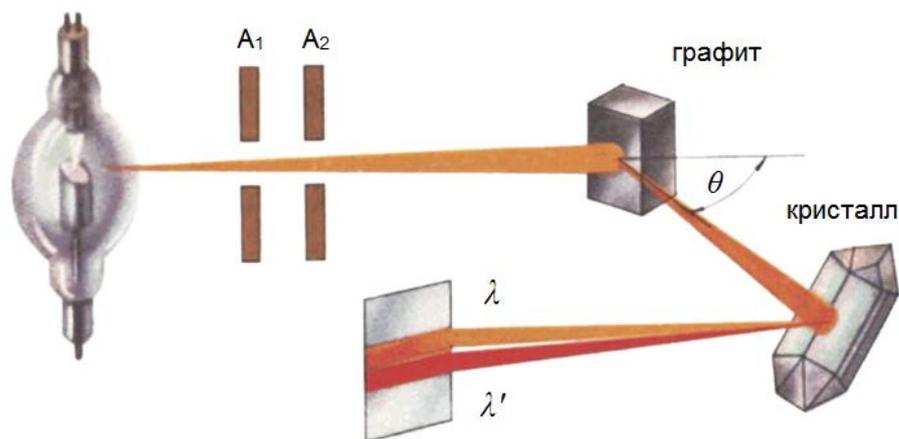


Рис. 3. Схема опыта, проведенного А. Комптоном.

На рис. 3 приведена схема эксперимента, проведенного А. Комптоном. Монохроматическое излучение рентгеновской трубки через диафрагмы A_1 и A_2 направлялось на рассеиватель, вещество, которое состояло из легких элементов. В первом опыте, проведенным А. Комптоном, использовался графит. Рассеянное излучение попадало на рентгеновский спектрограф, состоящий из кристалла, на котором происходила дифракция, и ионизационной камеры, фиксирующей дифрагированные рентгеновские кванты. По углу

дифракции ψ определялась длина волны, которая изменялась (увеличивалась) при увеличении угла рассеяния θ (рис. 4).

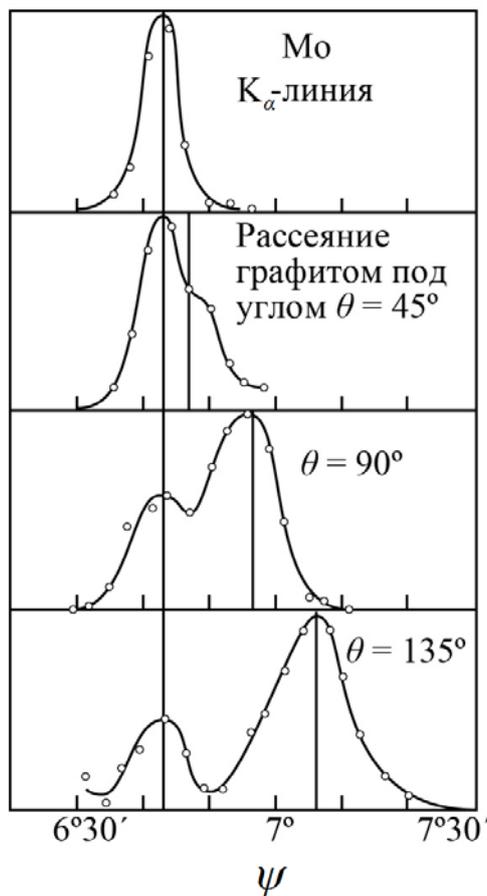


Рис. 4. Результаты измерений на графите при различных углах рассеяния θ для K_{α} -линии молибдена ($\lambda = 0,0712695$ нм). Верхний рисунок показывает форму линии исходного излучения.

Исследование спектра рассеянного излучения позволило А. Комптону выявить следующие закономерности формирования спектра. Было установлено, что изменение длины волны при комптоновском рассеянии не зависит от состава рассеивающего тела и длины волны падающего излучения λ , а определяется лишь углом θ рассеяния излучения. При возрастании атомного номера рассеивателя интенсивность несмещенной линии возрастает, а интенсивность смещенной линии падает. Классическая теория не смогла объяснить закономерности комптоновского рассеяния. Они были поняты только на основе квантовой теории.

В легких веществах, с которыми проводил исследования А. Комптон, энергия связи электрона с атомом мала по сравнению с энергией, передаваемой ему рентгеновским квантом при столкновении. Эта энергия тем больше, чем больше угол рассеяния. В легких атомах энергией связи электрона внутри атома при всех углах рассеяния можно пренебречь и считать все электроны свободными. Тогда одинаковость комптоновского смещения для различных веществ становится очевидной. Все сказанное делает понятным основное допущение теории, согласно которой, рассеивающее вещество состоит только из свободных электронов, а индивидуальные особенности вещества никак не учитываются. Подобное допущение возможно только для легких атомов. В случае внутренних электронов тяжелых атомов учет энергии связи электронов усложняет классические формулы, описывающие комптоновский эффект. Для видимого света ($\hbar\omega$ всего 2–3 эВ) в веществе нет электронов, которые можно было бы считать свободными, и эффект не наблюдается. (Пока природа явления не была понята, поиски продолжались.)

Итак, *комптоновское рассеяние* – это рассеяние на свободном электроне отдельного фотона. Пусть на первоначально покоящийся свободный электрон падает фотон с энергией $E = \hbar\omega = hc / \lambda$ (h – постоянная Планка, ω – частота электромагнитной волны, λ – её длина волны, c – скорость света) и импульсом $p = \hbar\omega / c = h / \lambda$. В результате столкновения с покоящимся электроном, фотон сообщает ему некоторую кинетическую энергию $E_{\text{кин}}$, равную:

$$E_{\text{кин}} = E - E_0 = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2(1 / \sqrt{1 - \beta^2} - 1),$$

где E – полная энергия электрона после столкновения, E_0 – энергия покоя, $\beta = v / c$, m_0 – масса покоящегося электрона, m – масса движущегося электрона.

Обратим внимание на то, что в уравнении использовано выражение для полной (в релятивистском смысле) энергии электрона, т.е. фактически предусмотрена зависимость массы электрона от скорости. Это принципиальный момент. Действительно, энергия электрона до столкновения

равна m_0c^2 , а его импульс равен нулю. Поскольку второй «участник» процесса соударения – фотон – всегда ультрарелятивистская частица, движущаяся со скоростью света c , электрон в процессе комптоновского рассеяния с участием рентгеновского кванта приобретает столь большой импульс отдачи, т.е. его скорость возрастает настолько, что необходимо применение соотношений теории относительности.

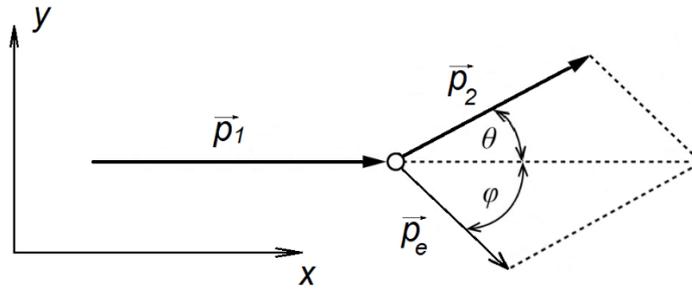


Рис. 5. Схема, поясняющая рассеяние отдельного фотона с энергией $E = \hbar\omega_1 = hc / \lambda_1$ на свободном покоящемся электроне.

Движение электрона после столкновения с фотоном совершается с импульсом $p_e = mv$, где v – скорость электрона. Поскольку при взаимодействии этих двух частиц должны выполняться законы сохранения энергии и импульса, очевидно, что после столкновения фотон будет распространяться по новому направлению с уменьшенной энергией и импульсом. Можно записать уравнения, выражающие законы сохранения энергии и импульса. По закону сохранения энергии:

$$\frac{hc}{\lambda_1} = \frac{hc}{\lambda_2} + E_{\text{кин}} = \frac{hc}{\lambda_2} + m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right). \quad (1)$$

По закону сохранения импульса имеем для составляющих по оси x :

$$\frac{h}{\lambda_1} = \frac{h}{\lambda_2} \cos \theta + \frac{m_0 v \cos \phi}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (2)$$

Для составляющих по оси y :

$$0 = \frac{h}{\lambda_2} \sin \theta + \frac{m_0 v \sin \phi}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (3)$$

Из уравнений (1–3) можно получить уравнение, позволяющее определить изменение длины волны фотона при рассеянии в следующем виде:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta). \quad (4)$$

Из (4) видно, что для нулевого угла рассеяния не происходит изменения длины волны (энергии фотона), тогда как для лобового столкновения (для угла рассеяния $\theta = \pi$) достигается максимальная передача энергии электрону, а рассеянный фотон приобретает минимальную энергию. Величина $h / m_0 c$ называется комptonовской длиной волны электрона (λ_c), ее численное значение равно $h / m_0 c = 2,4263 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 2,4263 \text{ пм}$. Это длина волны фотона с энергией, равной $m_0 c^2$ – энергии покоя электрона. Существует комptonовская длина волны для протона, нейтрона и других элементарных частиц. Она также определяется выражением $h / m_0 c$, если в нем массу электрона заменить на массу соответствующей частицы. Комptonовская длина волны является важным параметром в квантовой теории поля. Частица с массой m , локализованная в области с характерным размером порядка λ_c , имеет квантовомеханическую неопределенность в энергии не менее mc^2 и, таким образом, в данной области возможно кратковременное самопроизвольное формирование пар частица-античастица. Формирование пары частица-античастица, происходящее за время порядка λ / c , характерное для рассеяния света с длиной волны λ при $\lambda \leq \lambda_c$, и обуславливает комptonовское рассеяние фотона с уменьшением его энергии.

Следует особо подчеркнуть, что электрон, на котором происходит рассеяние фотона, в рассматриваемой теории предполагается неподвижным. Если же электрон движется, то при столкновении он может передать свою кинетическую энергию фотону, а сам остановиться. Такой процесс сопровождается уменьшением длины волны фотона, а соответствующий тому эффект обратным эффектом Комптона.

3. Si PIN детектор.

Энергочувствительный детектор (ЭЧД) позволяет измерять не только интенсивность, но и энергию рентгеновских лучей. Амплитуда импульсов напряжения на выходе ЭЧД пропорциональна энергии рентгеновских квантов, а частота следования импульсов – количеству зарегистрированных (в единицу времени) квантов.

Главным компонентом ЭЧД является Si PIN фотодиод, охлаждаемый посредством элемента Пельтье для уменьшения тока утечки и, следовательно, темновых шумов. PIN диод состоит из монокристалла кремния с низколегированным *i*-слоем с собственной проводимостью толщиной около 150 мкм между *p*- и *n*-слоями, ЭЧД схематично изображен на рис. 6. В обедненной области происходит поглощение кванта рентгеновского излучения посредством многократного фотоэффекта с переизлучением. В конечном счете, число электронно-дырочных пар N , образовавшихся в *i*-области, оказывается пропорциональным энергии поглощенного фотона:

$$N = h\nu / E ,$$

где E – ширина запрещенной зоны (3,8 эВ для кремния).

К электродам фотодиода прикладывается постоянное напряжение смещения обратной полярности (запирающее диод), благодаря чему созданные электроны и дырки движутся в противоположных направлениях, не успевая рекомбинировать, и порождают импульс тока в цепи питания диода. Заряд Q , протекший во внешней цепи, пропорционален N и, следовательно, $h\nu$.

В целом, принцип работы фотодиода напоминает ионизационную камеру, только не с газом, а с твердым полупроводником между электродами. Однако в PIN детекторе подвижность положительных и отрицательных носителей отличается всего лишь в несколько раз, благодаря чему отсутствует характерная для газовых детекторов зависимость амплитуды сигнала от места образования носителей (в газе скорости дрейфа ионов и электронов различаются на 3 порядка). Но недостатком данного типа детекторов является

низкое энергетическое разрешение, что не позволяет разрешать близко лежащие линии, относящиеся к основной и смещенной линиям.

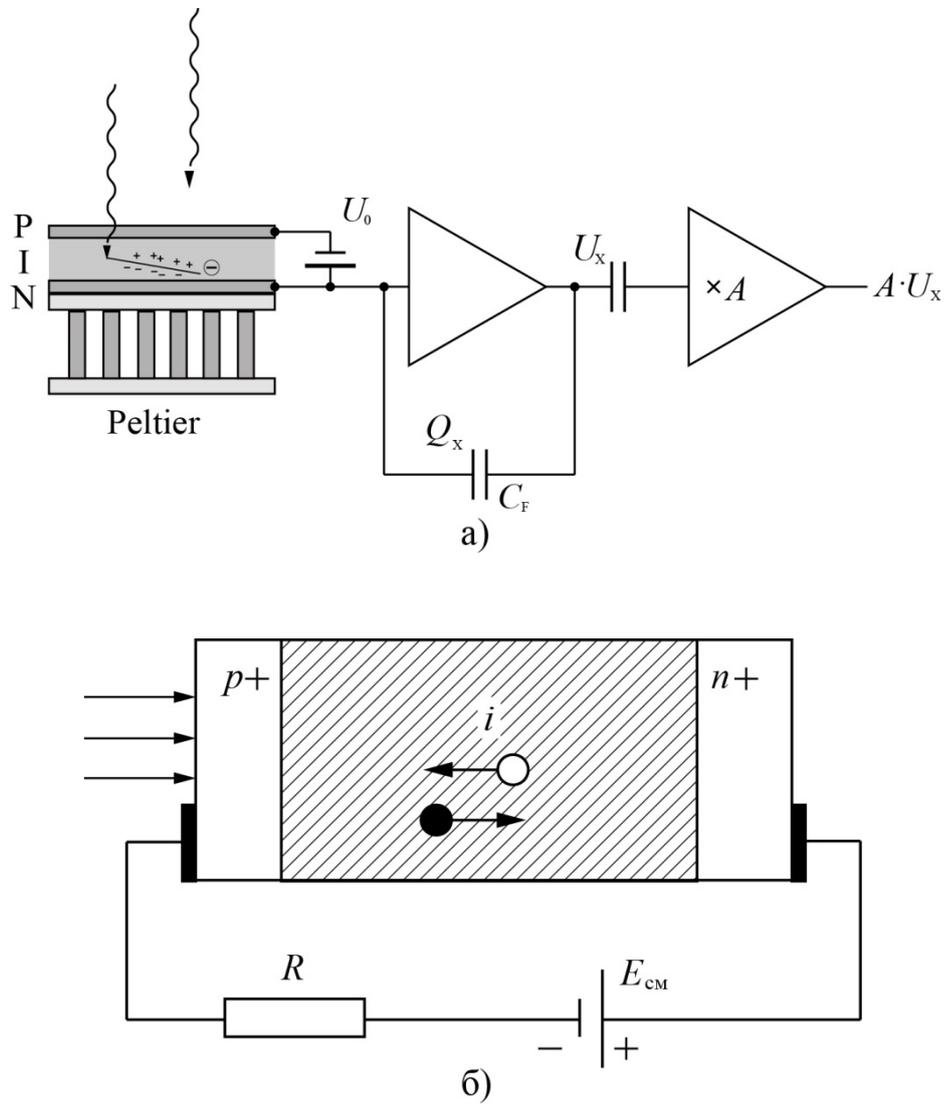


Рис. 6. а) – схематичное изображение Si PIN (p-i-n-переходы) детектора; б) – фотодиод с PIN структурой.

4. Техника безопасности.

Внутри прибора при включенном высоком напряжении мощность дозы излучения представляет серьезную угрозу для здоровья. Радиатор рентгеновской трубки находится под высоким напряжением, что так же представляет опасность.

В связи с этим, перед подачей высокого напряжения на анод трубки необходимо убедиться в том, что обе дверцы из свинцового стекла **закрыты**. В процессе измерений обе эти дверцы так же обязательно должны оставаться **закрытыми**.

Следует избегать перегрева трубки, для этого в процессе работы следите за тем, чтобы вентилятор **все время работал**. В случае его отключения немедленно выключите установку и обратитесь к инженеру лаборатории.

При возникновении любых подозрений в некорректной работе установки (таких как посторонние шумы, запахи и прочего) **немедленно выключите** установку и обратитесь к инженеру лаборатории.

Следует избегать **одновременного** прикосновения к корпусу установки и любому металлическому массивному предмету (такому как батарея, водопроводные трубы, корпуса других установок и т.д.).

Категорически запрещается, находясь в лаборатории, принимать пищу.

5. Описание установки.

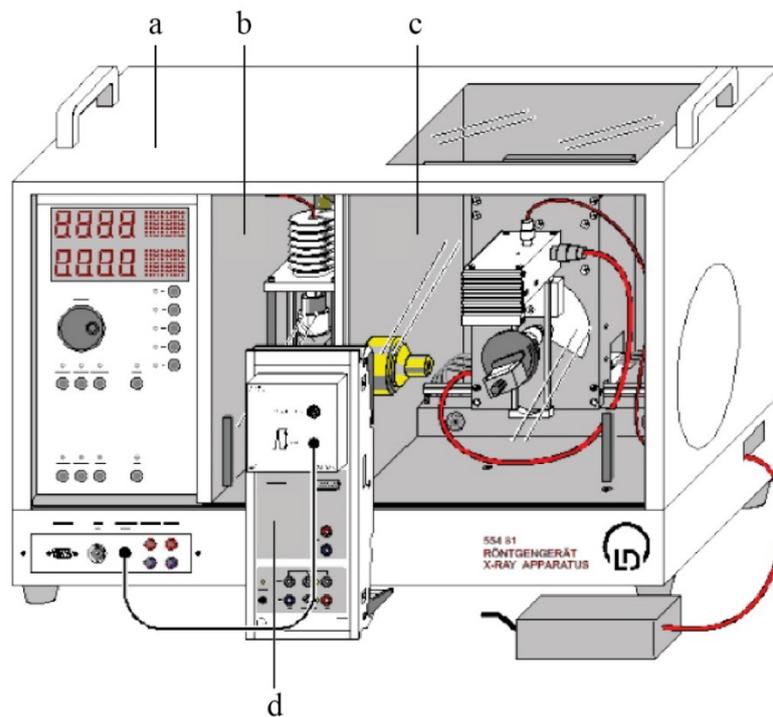


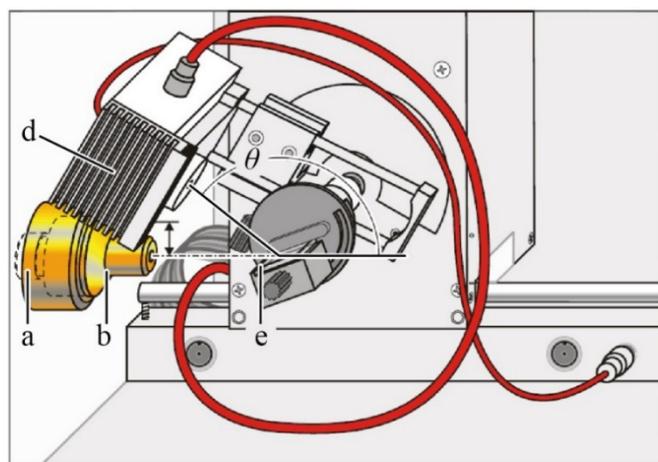
Рис. 7. Общий вид установки.

На рис. 7 представлено изображение установки, которая состоит из следующих основных частей:

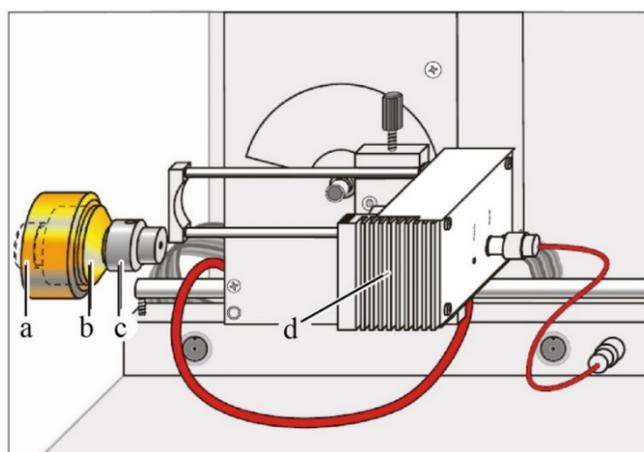
- Блок управления установкой (a);
- Рентгеновская трубка (b);
- Рабочая камера (c);
- Устройство для связи с компьютером (d).

Рентгеновская трубка является источником излучения. Она состоит из запаянной лампы, в которую помещен катод (источник электронов) и анод (молибденовый в данной работе). На трубку подается высокое напряжение, которое ускоряет электроны, эмитированные катодом вследствие термоэлектронной эмиссии, и они попадают на анод, в результате чего создается тормозное и характеристическое рентгеновское излучение.

Величина высокого напряжения и ток эмиссии задаются с помощью блока управления установкой.



а)



б)

Рис. 8. Изображение рабочей камеры при измерении рассеянного излучения (а) и падающего (б).

Рабочая камера более подробно представлена на рис. 8. Излучение входит в камеру через коллиматор (b) с выходом в виде отверстия, который формирует узкий направленный пучок. На коллиматор можно устанавливать со стороны рентгеновской трубки фильтр-поглотитель (a) для фильтрации спектрального состава падающего излучения, а также апертуру (c) со стороны рабочей камеры для ограничения ширины пучка и, тем самым, его интенсивности.

На пути падающего излучения устанавливается рассеивающая мишень на столике (e). Излучение, рассеянное под определенным углом θ относительно направления падающего излучения, регистрируется с помощью энергочувствительного Si PIN детектора (d). Угол поворота детектора и угол поворота мишени задаются на блоке управления.

6. Порядок выполнения работы.

Данная работа состоит из двух частей. В первой части для исследования эффекта Комптона используется энергочувствительный Si PIN детектор.

Необходимо:

1. Подобрать оптимальные параметры работы трубки и измерить спектр падающего излучения.
2. Провести калибровку рабочей шкалы детектора с номерами каналов n_A в шкалу энергий фотонов E_A . Для этого измеряется спектр флуоресценции оцинкованной железной пластины, для которой известны положения характеристических линий Fe K_α (6,40 кэВ) и Zn K_α (8,64 кэВ).
3. Подобрать оптимальные параметры работы трубки и измерить спектр рассеянного излучения при нескольких углах рассеяния.

6.1. Измерение спектра падающего излучения.

Подготовительные операции.

Откройте дверцу рабочей камеры и снимите столик для установки мишени. Установите детектор на 0° .

Возьмите из выдвижного ящика в основании установки коллиматор с круглым отверстием. Наденьте на него циркониевый фильтр со стороны рентгеновской трубки, а также апертуру с узким отверстием со стороны рабочей камеры. Красные метки на апертуре должны располагаться вертикально. Поместите коллиматор в его рабочее положение и закройте дверцу камеры.

Включите установку. Откройте программу «CASSY Lab» и выберите пункт «Показать настройки» в панели инструментов «Окно». В появившемся справа меню пройдите путь: CASSYs / Sensor-CASSY 2 / Вход A₁ (Адаптер-MCA, 524058).

Проставьте галочки в пунктах:

- Скорость счета R_A – *скорость счета.*
- Энергия E_A – *шкала энергий фотонов.*
- Канал n_A – *шкала номеров канала.*
- Число событий N_A – *число зарегистрированных фотонов с той или иной энергией.*

Установите параметры измерения:

- 1024 канала.
- Отрицательные импульсы.
- Фактор «-3».
- Измерение автоматически.
- Длительность 300 с, интервал 1 с.

Оценка мгновенной скорости счета.

Задайте анодное напряжение 35 кВ и ток эмиссии около 0,1 мА. Подайте напряжение, начните измерение нажатием клавиши F9. Прервать измерение можно повторным нажатием клавиши F9.

Медленно передвигайте детектор и найдите его истинное нулевое положение по максимуму скорости счета R_A . Оно может быть отличным от 0°, найдите поправку. Следите за тем, чтобы скорость счета не превышала значения 200–300 имп./с, при необходимости измените ток эмиссии.

Измерение спектра падающего излучения.

Удалите предыдущее черновое измерение и измерьте спектр падающего излучения. По завершении измерения **отключите анодное напряжение.**

6.2. Калибровка энергочувствительного детектора.

Si PIN детектор непосредственно измеряет число событий N_A в зависимости от номера канала n_A . Чтобы установить однозначное соответствие

между номерами каналов и энергией фотонов E_A , необходимо провести процедуру калибровки.

Откройте дверцу рабочей камеры и снимите апертуру. Установите столик и поместите на него оцинкованную железную пластину. Закройте дверцу камеры.

Задайте угол мишени 45° и поверните детектор на 90° . Установите анодное напряжение 35 кВ, ток эмиссии 1 мА.

Подайте анодное напряжение и запустите измерение.

По завершении измерения **отключите анодное напряжение**.

В окне «Калибровка энергии» выберите пункт «Глобально для всех спектров на этом входе».

Запишите в окна «Энергия» эталонные значения энергий для Fe K_α линии (6,40 кэВ) и Zn K_α линии (8,64 кэВ).

Определите положение линий Fe K_α и Zn K_α в шкале n_A (см. рис. 9) с помощью команды «центр пика» в контекстном (выпадающем) меню. Выделите контур линии после нажатия данной команды. Энергетическое положение линии и ее ширина будут указаны в нижнем левом углу программы.

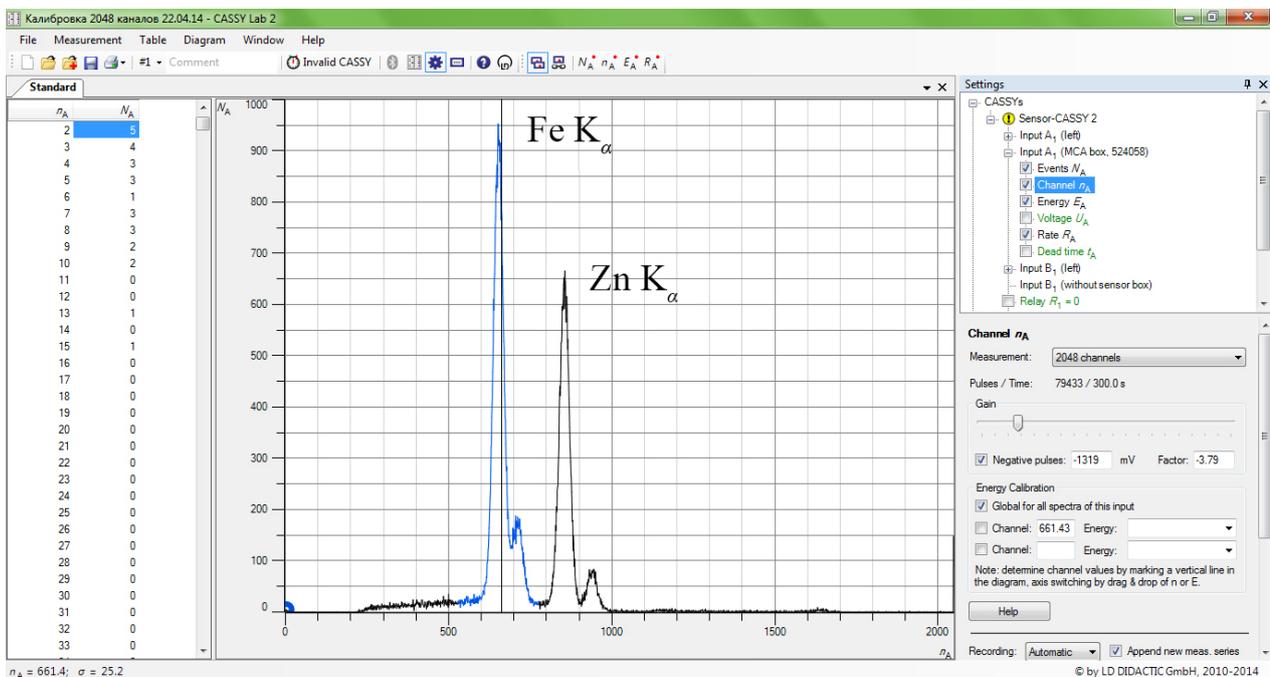


Рис. 9. Калибровочный спектр флуоресценции оцинкованной железной пластины, представленный для определения положения линий Fe K_α и Zn K_α .

6.3. Измерение спектра рассеянного излучения при разных углах рассеяния (30°-140°).

Установите на столик плексиглаговую мишень и установите угол мишени 20°. Детектор поверните на угол 30°.

Убедитесь в том, что скорость счета R_A не превосходит значения 200–300 имп/с во всем рабочем диапазоне углов рассеяния. Для этого:

- Выставьте анодное напряжение 35 кВ и ток эмиссии 1 мА.
- Подайте анодное напряжение и начните измерение нажатием клавиши F9.
- Медленно изменяйте угол детектора в пределах 30°–140° и следите за скоростью счета R_A .
- При необходимости уменьшите ток эмиссии.
- Завершите черновое измерение.

Проведите измерение спектра рассеянного излучения при пяти разных углах рассеяния в диапазоне 30°–140°. Учитывайте угловую поправку, найденную при измерении спектра падающего излучения.

Не забудьте **отключить анодное напряжение** по завершении измерений.

6.4. Исследование эффекта Комптона без энергочувствительного детектора по изменению пропускания медного фильтра.

Во второй части работы предлагается исследовать эффект Комптона с помощью счетчика Гейгера, который не обладает энергочувствительностью, используя зависимость коэффициента пропускания медного фильтра от длины волны падающего излучения. Эта часть работы делается на такой же установке, в которой необходимо с помощью инженера лаборатории поменять детектор и заменить коллиматор, либо на другой установке с уже установленным счетчиком Гейгера.

Вид рабочей камеры изображен на рис. 10. Медный фильтр можно устанавливать как на выходную щель коллиматора, так и на детектор, как показано на рис. 10.

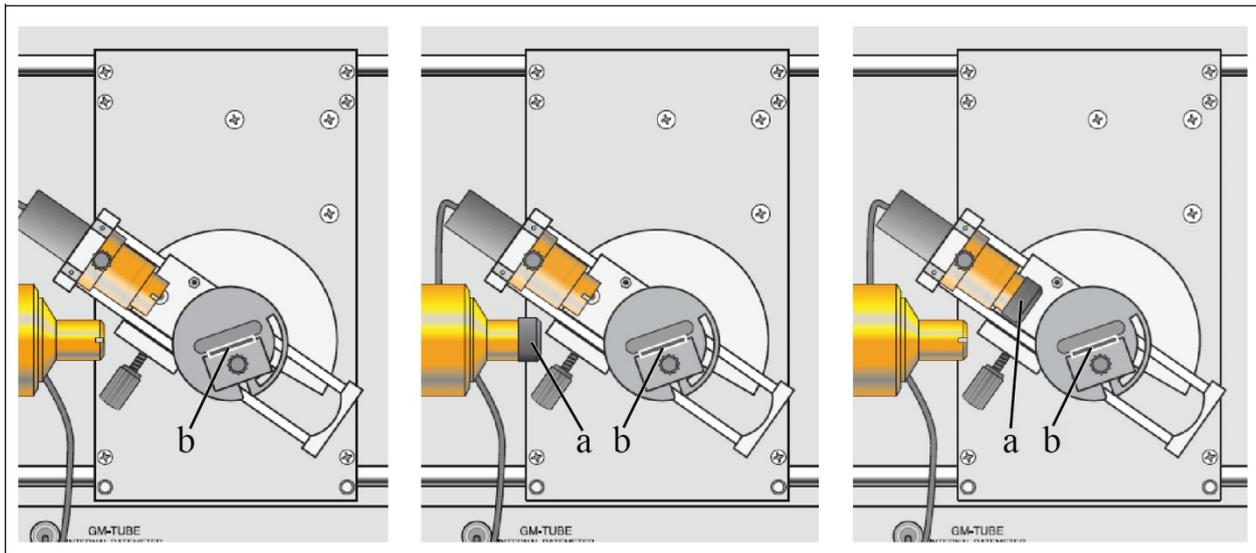


Рис. 10. Изображение рабочей камеры при использовании счетчика Гейгера. Медный фильтр (a) можно устанавливать как на выходную щель коллиматора, так и на детектор; b – столик с алюминиевой мишенью.

Поменяйте с помощью инженера лаборатории детектор. Удалите из рабочей камеры коллиматор и поставьте вместо него щель, надев на нее со стороны трубки циркониевый фильтр. Закрепите алюминиевую мишень на столике. Установите угол цели 20° , а детектор поверните на угол, самый больший из использованных вами в первой части работы.

Откройте программу «X-ray apparatus». В окне «Settings» (кнопка ) выберите режим измерения «Sensor» и задайте диапазон измерения $\beta_{\min} = 140^\circ$ и $\beta_{\max} = 140,1^\circ$ (если вы использовали в первой части работы угол 140°). Шаг измерения $\Delta\beta = 0,1$. То есть во всех последующих измерениях будет всего две точки. Из них нужна только первая. Поэтому, как только закончится измерение первой точки, измерение нужно будет прерывать. Это чисто техническая особенность программы (не позволяет осуществить измерение в одной точке). Задайте с помощью программы анодное напряжение 35 кВ и ток эмиссии 1 мА.

Проведите измерения:

1. Измерение R_0 : задайте время экспозиции $\Delta t = 60$ с и осуществите измерение без медного фильтра.
2. Измерение R_1 : наденьте Cu фильтр на выходную щель; задайте время экспозиции $\Delta t = 600$ с и осуществите измерение R_1 .
3. Измерение R_2 : переставьте Cu фильтр на детектор и осуществите измерение R_2 с той же экспозицией $\Delta t = 600$ с.
4. Измерение фонового значения шума R : отключите анодное напряжение; фильтр оставьте на детекторе; проведите измерение фонового значения шума с экспозицией $\Delta t = 600$ с.

7. Обработка данных и содержание отчета.

Приведите в отчете измеренный вами спектр флуоресценции оцинкованной железной пластины в шкале n_A и в шкале E_A . Объясните письменно, как вы провели калибровку энергетической шкалы детектора, и в чем суть этой калибровки.

Приведите в отчете измеренные вами спектры в режиме рассеяния и в прямом пучке на одной энергетической шкале. Определите энергетические положения линии $Mo K_{\alpha}$, измеренной в прямом пучке и при рассеянии на разные углы. Для этого правой кнопкой мыши вызовите контекстное (выпадающее) меню и воспользуйтесь командой «Центр пика» («Calculate peak center»). Выделите контур линии. Положение и ширина данной линии будут указаны в нижнем левом углу окна программы.

Постройте экспериментальную зависимость сдвига длины волны от угла рассеяния фотонов ($\Delta\lambda$ от $1 - \cos\theta$) и сравните ее с теоретической. Какие выводы можно сделать? Приведите их в отчете.

Формула для пропускания медного фильтра может быть записана как:

$$T_{Cu} = \exp\left[-a\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^n\right].$$

В данной формуле используется нормированная на $\lambda_0 = 1 \text{ \AA}$ длина волны λ , а безразмерные величины $a = 7,6$ и $n = 2,75$ зависят от вещества (медь в данном случае).

Вычислите значения пропускной способности медного фильтра для падающего излучения (T_1) и для рассеянного (T_2) по формулам:

$$T_1 = \frac{R_1 - R}{R_0 - R}; T_2 = \frac{R_2 - R}{R_0 - R}.$$

И вычислите сдвиг длины волны рассеянного излучения $\Delta\lambda$ по формуле:

$$\Delta\lambda = 100 \text{ пм} \left[\left(\frac{-\ln(T_2)}{a} \right)^{1/n} - \left(\frac{-\ln(T_1)}{a} \right)^{1/n} \right],$$

где $a = 7,6$ и $n = 2,75$.

Обязательно определите статистическую ошибку при определении $\Delta\lambda$ по пропусканию медного фильтра. Вычислите $\Delta\lambda$, измеренную для того же угла рассеяния, но с помощью энергочувствительного детектора. Сравните оба эти значения с теоретическим значением. Какое из них ближе к теоретическому значению? Какой способ измерения лучше и почему? Влияет ли как-то на результат низкое энергетическое разрешение энергочувствительного детектора?

8. Примерная структура отчета.

1. Цель работы, конкретная постановка задачи, априорные ожидания.
2. Расчетные формулы с указанием единиц измерения и введение всех используемых обозначений.
3. Схема установки.
4. Описание процедуры проведения эксперимента, таблицы и графики первичных результатов измерений.
5. Обработки экспериментальных данных, таблицы и графики результатов эксперимента.
6. Обсуждение результатов.
7. Выводы по работе.

9. Контрольные вопросы.

1. Какие существуют основные механизмы взаимодействия рентгеновского излучения с веществом?
2. Что такое эффект Комптона?
3. Наблюдается ли эффект Комптона для видимого света?
4. В чем физический смысл комптоновской длины волны электрона?
5. Что измеряет энергочувствительный детектор? Как он работает?
6. Как можно наблюдать неупругое рассеяние с помощью счетчика Гейгера, считающего просто количество фотонов безотносительно их энергии?
7. Зачем нужно при измерении спектра падающего излучения выбирать ток эмиссии примерно в десять раз меньший, чем при измерении спектра рассеянного излучения?
8. В чем физический смысл энергетической калибровки Si pin детектора?
9. Изменяется ли ширина линии для разных углов рассеяния, если да, то с чем это связано?
10. Наблюдаете ли вы в процессе измерения несмещенную компоненту?