

Основы радиоактивности



Физика

Современная физика

Природа рентгеновского излучения и его применение



Уровень сложности

твёрдый



Размер группы

2



Время подготовки

45+ Минут



Время выполнения

45+ Минут

PHYWE
excellence in science

Общая информация

Описание

PHYWE
excellence in science

Экспериментальная установка

Большинство применений рентгеновских лучей основано на их способности проходить сквозь вещество. Поскольку эта способность зависит от плотности вещества, становится возможным получение изображений внутренних частей объектов и даже людей. Это находит широкое применение в таких областях, как медицина или безопасность.

Дополнительная информация (1/2)

PHYWE
excellence in science

Предварительные

знания



Предварительные знания, необходимые для этого эксперимента, приведены в разделе "Теория"

Принцип



Лабораторные источники рентгеновского излучения в большинстве случаев являются полихроматическими. Это означает, что спектр источника состоит из диапазона энергии, а не из одного отличительного пика энергии. Данная характеристика сильно влияет на выполняемые рентгеновские измерения. Для оптимального качества изображения особенно важно соотношение количества пикселей на цифровом детекторе и мощности луча.

Дополнительная информация (2/2)

PHYWE
excellence in science

Обучение

цель

Цель этого эксперимента - изучить принципы, лежащие в основе интенсивности луча.



Задачи

1. Определите изменение интенсивности луча.
2. Исследуйте закон обратных квадратов.

Теория (1/14)

PHYWE
excellence in science

Насыщение детектора

При цифровой рентгеновской визуализации рентгеновские фотоны, взаимодействующие с детектором, преобразуются в цифровой сигнал. Такой цифровой детектор состоит из раstra пикселей (элементов изображения), и каждый пиксель можно рассматривать как бакет. При каждом взаимодействии рентгеновского фотона с детектором в пикселе, соответствующем месту взаимодействия фотона, образуется серия электронов. Эти электроны накапливаются в пикселе, постепенно заполняя бакет. Через заданный промежуток времени, "время экспозиции", содержание электронов в пикселе измеряется путем его опустошения. При одинаковой интенсивности рентгеновского излучения более длительное время экспозиции приводит к большему количеству пикселей в бакете.

Каждый цифровой детектор имеет ограниченный размер бакета, который называется "полная емкость" детектора. При достижении этого уровня заполнения дополнительные электроны отбрасываются, так как детектор насыщен. Насыщенный детектор приводит к непоследовательным измерениям, поэтому этого следует избегать.

Теория (2/14)

PHYWE
excellence in science

Калибровка детектора

Каждый цифровой детектор имеет различное и переменное смещение и выходной сигнал, зависящий от пикселя. Во время калибровки эти отклонения будут измерены и использованы при последующем построении изображений.

Даже без включения рентгеновских лучей детектор будет генерировать считываемое значение, отличное от 0, которое называется "темное изображение" или "офсетное изображение". У этого есть несколько причин, основными из которых являются электронное смещение и шум считывания. При определении интенсивности луча I_0 важно вычесть это смещение (I_D) от измеренного значения ($I_{0,M}$).

$$I_0 = I_{0,M} - I_D$$

Теория (3/14)

Другой существующей проблемой является то, что чувствительность каждого пикселя детектора немного отличается, что приводит к широкому разбросу значений I_0 для каждого пикселя. Во время калибровки эти отклонения записываются. После калибровки значение пропускания для каждого пикселя T пересчитывается на основе интенсивности луча для этого пикселя в данный момент времени (I_M), интенсивности луча во время калибровки ($I_{0,M}$) и интенсивности темного тока (I_D) во время калибровки.

$$T = \frac{I_M - I_D}{I_{0,M} - I_D}$$

Если калибровка была выполнена успешно, то после калибровки изображения будут иметь значения серого от 0 до 1.

Теория (4/14)

Генерация рентгеновского излучения и полихроматичность

В источнике рентгеновского излучения электроны ускоряются при определенном напряжении до попадания в материал мишени, где образуется рентгеновское излучение. Электроны генерируются в следствие термоионной эмиссии из нагретого нити на стороне катода. Выпущенные электроны ускоряются по направлению к мишени со стороны анода под действием высокого напряжения, приложенного между катодом и анодом. Амплитуда ускоряющего напряжения соответствует настройкам кВ (от 0 до 35 кВ), установленным на источнике, а величина тока соответствует количеству электронов, которые достигают мишени.

Когда электроны, имеющие одинаковое ускорение (кэВ), бомбардируют мишень, происходит ряд процессов, в результате которых электроны теряют свою энергию из-за удара. В большинстве случаев (99%) кинетическая энергия электронов преобразуется в тепло, но в некоторых случаях они также генерируют тормозное излучение характеристические рентгеновские фотоны. Эти фотоны используются для процесса визуализации.

Теория (5/14)

Тормозное излучение генерируется при замедлении электрона. При торможении кинетическая энергия, которую теряет электрон, передается рентгеновскому фотону. Электрон может потерять часть своей энергии или всю свою энергию. Из-за этого изменения полученные фотоны будут иметь различные энергии, но все они будут меньше максимальной кинетической энергии налетающего электрона (кэВ). Таким образом, спектр рентгеновских фотонов, покидающих источник, будет относительно широким с максимумом, соответствующим ускоряющему напряжению, по этой причине спектр называется полихроматическим, в отличие от монохроматического, когда все фотоны имеют одинаковую энергию.

В дополнение к непрерывному спектру тормозного излучения, взаимодействие падающего электрона с атомами материала мишени может вызвать генерацию характеристических рентгеновских фотонов с определенной энергией.

Спектр, который исходит от источника рентгеновского излучения, представляет собой комбинацию тормозного излучения и характеристических рентгеновских фотонов.

Теория (6/14)

Мощность источника в зависимости от напряжения кВ и силы тока

Интенсивность пучка рентгеновских фотонов определяется различными параметрами, но в целом можно сказать, что интенсивность пучка пропорциональна мощности мишени (P). Мощность мишени соответствует полной энергии электронного пучка, попадающего на мишень, т.е. комбинации ускоряющего напряжения (U) и тока (I).

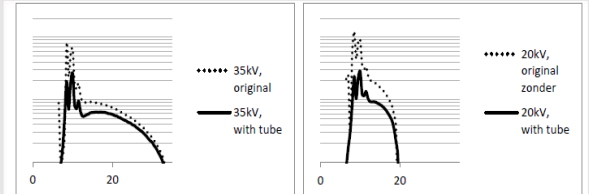
$$I \propto P_{\text{мишень}} (\text{Вт})$$

$$P_{\text{target}} (\text{Вт}) = U(\text{кВ}) \cdot I(\text{мА})$$

Мощность мишени для настроек источника 20 кВ и 0,3 мА такая же, как и для 30 кВ и 0,2 мА.

Теория (7/14)

В действительности интенсивность детектируемого луча не идентична для обеих настроек по нескольким причинам. Одной из основных причин является полихроматичность пучка. Поскольку источник рентгеновского излучения состоит из вакуумной камеры со стеклянной трубкой, сама трубка вызывает значительную фильтрацию, в основном для рентгеновских фотонов с более низкой энергией. Поскольку средняя энергия фотонов в спектре 20 кВ ниже, чем в спектре 30 кВ, большая часть фотонов будет задерживаться трубкой и, таким образом, будет иметь меньшую интенсивность. Это также приводит к тому, что луч имеет более высокую среднюю энергию, чем до его фильтрации, что называется упрочнением луча.

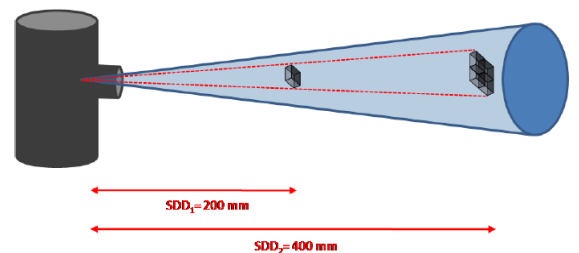


Интенсивность пучка, закон обратных квадратов

Теория (8/14)

Интенсивность луча определяется количеством и энергией рентгеновских фотонов, попадающих в каждый пиксель. Если пиксель, расположенный в определенной позиции (например, $SDD_1 = 200$ мм) измеряет интенсивность I_1 , то интенсивность I_2 в одном и том же пикселе будет в четыре раза меньше, если его расстояние до источника удвоится (например, $SDD_2 = 400$ мм). Причина этого в том, что интенсивность луча пропорциональна поверхности, на которую он проецируется. Размер луча, который попадает на пиксель в первой позиции, может освещать четыре пикселя одинакового размера во второй позиции. Это называется "законом обратных квадратов", поскольку уменьшение интенсивности пропорционально увеличению квадрата расстояния от источника

$$I_2 = \frac{SDD_1^2}{SDD_2^2} \cdot I_1$$



Теория (9/14)

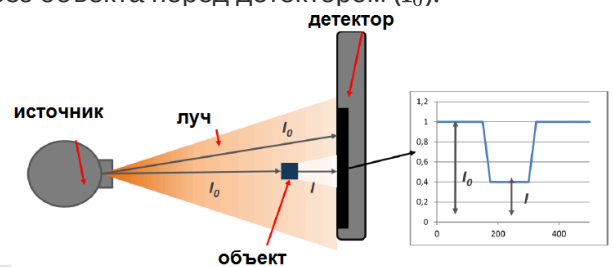
PHYWE
excellence in science

Пропускание и ослабление (затухание)

При рентгеновской визуализации измеряется прохождение или ослабление рентгеновских лучей через определенный объект. В зависимости от настроек источника, луч с определенной интенсивностью I_0 измеряется детектором, когда между источником и детектором нет никаких объектов. Когда на пути луча помещается объект, этот объект ослабляет луч так, что детектор измеряет меньшую интенсивность I вместо I_0 . Оставшаяся интенсивность по сравнению с исходной I_0 называется пропусканием T , которое противоположно ослаблению A объекта. Для откалиброванного детектора интенсивность луча масштабируется до значения от 1 до 0. При $T = 1$ для луча без объекта перед детектором (I_0).

$$T_{\text{obj}} = \frac{I}{I_0} = 1 - A_{\text{obj}}$$

$$A_{\text{obj}} = \frac{I_0 - I}{I_0} = 1 - T_{\text{obj}}$$



Теория (10/14)

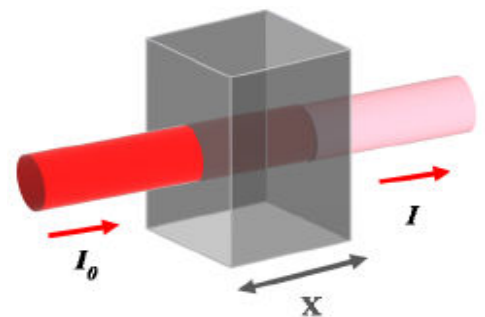
PHYWE
excellence in science

Влияние напряжения кВ и материала

Пропускание определенного объекта (T_{obj}) определяется его химическим составом, плотностью и толщиной, как описано законом Ламберта-Бера:

$$T_{\text{obj}} = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

где μ - линейный коэффициент затухания (1/см) и x - толщина (см). Линейный коэффициент затухания различен для каждого материала и изменяется в зависимости от энергии рентгеновских фотонов. Для одного и того же материала, но с разной толщиной и двумя разными энергиями фотонов E_1 и E_2 , пропускание будет уменьшаться с увеличением толщины и увеличиваться при более высокой энергии. Например, если E_1 выше, чем E_2 , это может выглядеть следующим образом:

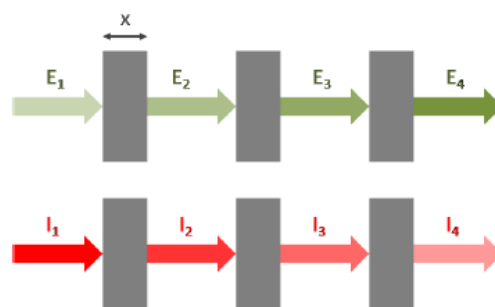


Теория (11/14)

Упрочнение и фильтрация пучка

Полихроматический рентгеновский пучок состоит из рентгеновских фотонов с различной энергией. Поскольку фотоны с более низкой энергией поглощаются быстрее, луч становится более жестким (более высокая средняя энергия) при прохождении через объект.

Если бы луч был монохроматическим, средняя энергия луча не изменилась бы при прохождении через несколько пластин из одинакового материала и одинаковой толщины, а только усилилась бы. Пропускание (T) для каждой из трех пластин по отдельности было бы одинаковым.



Теория (12/14)

$$E_1 = E_2 = E_3 = E_4$$

$$I_1 > I_2 > I_3 > I_4$$

$$T_1 = \frac{I_2}{I_1} = T_2 = \frac{I_3}{I_2} = T_3 = \frac{I_4}{I_3} = e^{-\mu x}$$

Поскольку линейный коэффициент затухания (μ) зависит от энергии, а средняя энергия остается неизменной, то суммарное пропускание (T_{tot}) через три пластины равна произведению трех коэффициентов пропускания:

$$T_{\text{tot}} = \frac{I_4}{I_1} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 = e^{-\mu(3x)}$$

Теория (13/14)

PHYWE
excellence in science

Когда луч полихроматический, средняя энергия луча будет увеличиваться при прохождении через различные пластины:

$$E_1 < E_2 < E_3 < E_4$$

$$I_1 > I_2 > I_3 > I_4$$

$$T_1 = \frac{I_2}{I_1} = e^{-\mu_1 x}$$

$$T_2 = \frac{I_3}{I_2} = e^{-\mu_2 x}$$

$$T_3 = \frac{I_4}{I_3} = e^{-\mu_3 x}$$

Поскольку линейный коэффициент затухания (μ) зависит от энергии и в основном уменьшается с увеличением энергии фотонов. Пропускание для каждой из отдельных пластин будет уменьшаться.

$$\mu_1 > \mu_2 > \mu_3$$

$$T_1 < T_2 < T_3$$

Суммарное пропускание (T_{tot}) через три пластины равно произведению трех коэффициентов пропускания:

$$T_{\text{tot}} = \frac{I_4}{I_1} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 = e^{-(\mu_1 x + \mu_2 x + \mu_3 x)}$$

Теория (14/14)

PHYWE
excellence in science

Если μ_A рассматривается как средний линейный коэффициент затухания для трех пластин, то вычисление толщины одной пластины с силой тока μ_A приведет к завышению толщины, а в случае для более трех пластин приведет к занижению толщины:

$$T_{\text{tot}} = e^{-(\mu_1 x + \mu_2 x + \mu_3 x)} = e^{-3\mu_A x}$$

Если $T_1 = \frac{I_2}{I_1} = e^{-\mu_A x}$, то $x_1 > x_2$, поскольку $\mu_A < \mu_1$

Упрочнение луча не будет увеличиваться линейно, а будет постепенно уменьшаться при увеличении толщины. Поэтому для уменьшения эффекта закалки пучка в процессе визуализации рекомендуется использовать некоторую фильтрацию. Фильтрация приведет к затвердеванию луча перед взаимодействием с образцом. Если фильтрация применяется до калибровки детектора, измеренное пропускание будет более правильным для различной толщины.

Оборудование

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ	09057-99	1
2	XR4 Съёмная рентгеновская трубка Plug-in Cu tube	09057-51	1
3	XR 4.0 XR 4.0 X-ray Рентгеновская компьютерная томография, расширение	09185-88	1

PHYWE
excellence in science

Подготовка и выполнение работы

Подготовка

PHYWE
excellence in science

Присоедините XRIS к его рабочему столу.

Установите цифровой рентгеновский детектор XRIS на направляющую рейку оптической скамьи на расстоянии 25 см. Задняя сторона столика XRIS соответствует его положению на направляющей рейке. Это положение называется SDD "расстояние от источника до детектора" (мм).

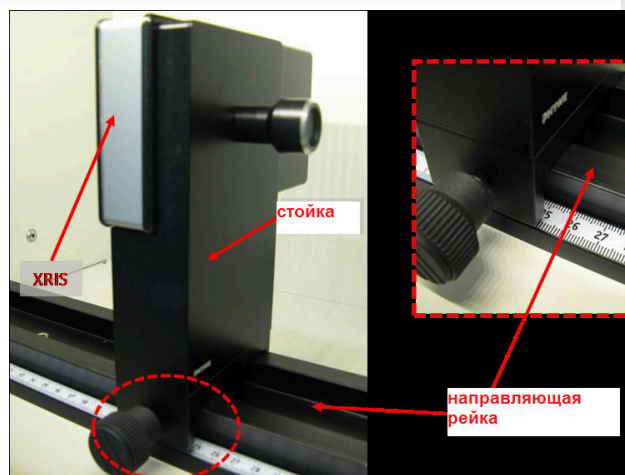


Рис. 1: Установка XRIS

Выполнение работы (1/2)

PHYWE
excellence in science

- Подключите рентгеновскую установку через USB-кабель к USB-порту компьютера (нужный порт рентгеновской установки отмечен на рис. 2).
- Подключите USB-кабель детектора к компьютеру
- Запустите программу `measureCT`. На экране отобразится виртуальная рентгеновская установка, поворотный столик и детектор. Зеленый светодиодный индикатор слева от каждого компонента указывает на то, что его присутствие было обнаружено (рис.3).
- Вы можете изменить высокое напряжение и ток рентгеновской трубки в соответствующих окнах ввода или вручную на установке (рис. 3).
- При нажатии на пиктограмму установки можно получить дополнительную информацию о ней (рис. 3)



Рис. 2: Подключение компьютера

Выполнение работы (2/2)

PHYWE
excellence in science

- Пиктограмма состояния указывает на состояние устройства и может также использоваться для управления устройством, например включения и выключения света или рентгеновских лучей (рис. 3).
- Положение цифрового детектора можно отрегулировать в соответствии с его реальным положением, перемещая пиктограмму XRIS или вводя правильное значение в окно ввода. (Рис. 3).
- Настройки XRIS можно регулировать с помощью окон ввода. Время экспозиции контролирует время между получением двух кадров с детектора, количество кадров определяет, сколько кадров усредняется, а в режиме биннинга усредняется заряд соседних пикселей для уменьшения общего количества пикселей в одном кадре.

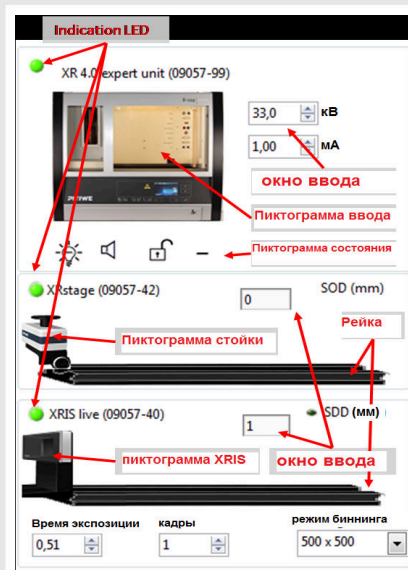


Рис. 3: Часть интерфейса программного обеспечения



Проведение эксперимента

Определение изменения интенсивности луча

- Отрегулируйте настройки XRIS и рентгеновской установки в соответствии с рис. 4 или загрузите конфигурацию из заранее определенного файла СТО 'Эксперимент 3' (см. рис. 5).
- Начните новый эксперимент, дайте ему уникальное имя и введите свои данные (рис. 5). В качестве альтернативы можно также загрузить этот эксперимент с заранее записанными изображениями и открыть это руководство. Правильная конфигурация будет загружена автоматически, но функциональные возможности программы будут ограничены, чтобы избежать перезаписи существующих данных.

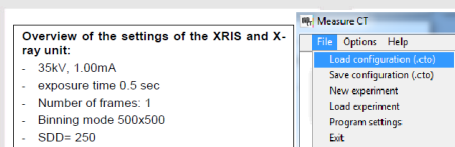


Рис. 4:

Настройки для этого эксперимента (левая панель), а также метод загрузки и корректировки параметров (правая панель)

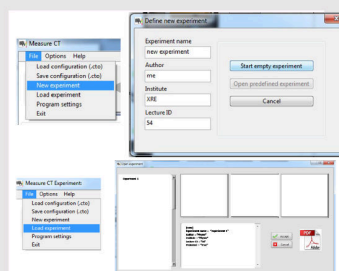


Рис. 5: Как создать новый или открыть существующий эксперимент

Определение изменения интенсивности луча (часть 2) **PHYWE** excellence in science

- Проверьте, не насыщен ли детектор для максимальной мощности (35 кВ, 1 мА) (см. эксперимент 1).
- Выключите источник рентгеновского излучения и подождите пару секунд. Включите режим "Просмотр в реальном времени". Подождите достаточно долго между изображениями, чтобы источник и детектор приспособились к новым настройкам (3 - 5 сек). Отключите режим "Просмотр в реальном времени".
- Сделайте снимок с помощью рентгеновских лучей и сохраните его как DI_500ms в формате tiff.
- Включите рентгеновское излучение.

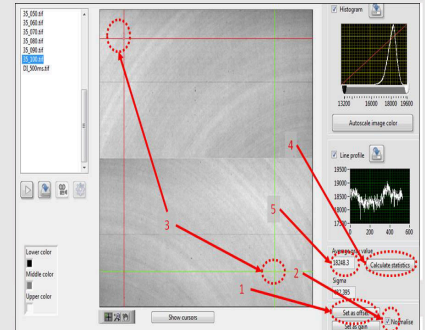


Рис.6: Как нормализовать темновой ток и рассчитать количество пикселей

Определение изменения интенсивности луча (часть 3) **PHYWE** excellence in science

- Сделайте некалиброванные изображения при напряжении 35 кВ, изменяя силу тока с шагом 0,1 А от 0 до 1 мА, сохраните изображения соответствующим образом. Подождите достаточно времени между изображениями, чтобы позволить источнику и детектору приспособиться к новым настройкам.
- Сделайте некалиброванные изображения при напряжении 20 кВ, изменяя силу тока с шагом 0,1 А от 0 до 1 мА, сохраните изображения соответствующим образом.
- Откройте программу просмотра.
- Дважды щелкните изображение DI_500ms, "Установить как офсетное изображение" (см. рис. 6.1) и выполните нормализацию (см. рис. 6.2). Таким образом, темновой ток детектора вычитается из изображений.
- Выберите большую центральную область изображения (см. рис. 6.3), вычислите среднее количество пикселей (среднее значение серого) (см. рис. 6.4 и 6.5) в этой области и запишите его. Повторите это для всех сохраненных изображений.

Определение изменения интенсивности луча (часть 4) **PHYWE** excellence in science

- Занесите результаты в таблицу и рассчитайте мощность для каждого параметра (см. рис. 7).
- Постройте график количества пикселей в зависимости от силы тока (см. рис. 8).
- Постройте график количества пикселей в зависимости от мощности (см. рис.9).

35 kV			20 kV		
current(mA)	power (W)	Intensity(counts)	current(mA)	power (W)	Intensity(counts)
1	35.0	18250	1	20	2531
0.9	31.5	16404	0.9	18	2254
0.8	28.0	14535	0.8	16	1991
0.7	24.5	12613	0.7	14	1711
0.6	21.0	10697	0.6	12	1447
0.5	17.5	8756	0.5	10	1187
0.4	14.0	6827	0.4	8	934
0.3	10.5	4935	0.3	6	688
0.2	7.0	3100	0.2	4	448
0.1	3.5	1430	0.1	2	219
0	0.0	0	0	0	0

Рис. 7: Количество пикселей в зависимости от силы тока и мощности для различных настроек напряжения кВ

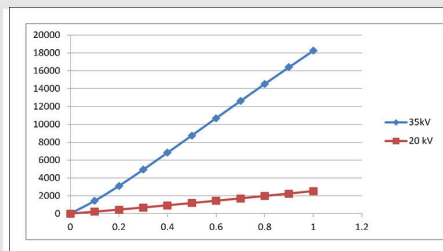


Рис. 8: Количество пикселей в зависимости от силы тока для различных настроек напряжения кВ

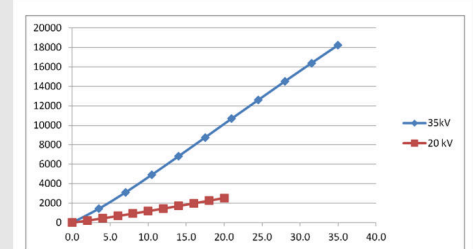


Рис. 9: Количество пикселей в зависимости от мощности для различных настроек напряжения

Исследование закона обратных квадратов

- Переместите детектор в положение SDD= 200.
- Сделайте и сохраните изображение.
- Повторите это для SDD= 250, 300, 350, 400.
- Откройте программу просмотра изображений, сделайте поправку на темновой ток и подсчитайте среднее количество пикселей в относительно большой области (см. рис. б).
- Составьте таблицу и нанесите результаты на график (см. рис. 10).

SDD	counts
200	25927
250	17700
300	12750
350	9188
400	7056

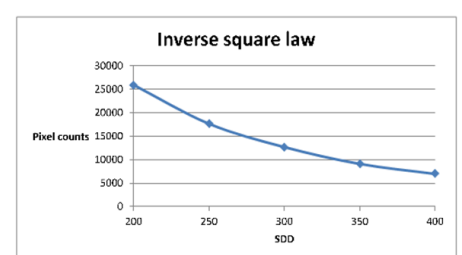


Рис. 10: Количество пикселей в зависимости от SDD для одинаковых значений мощности и напряжения кВ.