

# Задача астрофизического практикума. Исследование матричного ПЗС приемника.

В. Корнилов

Государственный астрономический ин-т им.П.К.Штернберга

## 1 Введение

### 1.1 Фотоэлектрические приемники оптического излучения

Фотоэлектрические приемники оптического излучения преобразуют падающую на них энергию оптического излучения в электрический сигнал того или иного вида. Этот сигнал далее усиливается, обрабатывается и регистрируется привычными техническими средствами. Любой, в том числе и фотоэлектрический, приемник излучения характеризуется следующими основными параметрами, определяющими его свойства и возможности.

1. Пороговая чувствительность — минимальный поток излучения, который может быть обнаружен на фоне собственных шумов приемника. Эквивалент этого параметра — собственный (внутренний) шум. Измеряется в единицах  $\text{Вт}/\text{Гц}^{1/2}$  или им эквивалентных (например, фотон  $\cdot \text{сек}^{1/2}$ ).
2. Коэффициент преобразования — связывает величину падающего на приемник потока с величиной выходного сигнала. Эквивалентным параметром является чувствительность (спектральная, интегральная, относительная и т.д.). Единицы измерения коэффициента преобразования определяются физическим носителем сигнала.
3. Спектральная характеристика — зависимость коэффициента преобразования от длины волны излучения. Обычно приводится в виде спектральной чувствительности или как зависимость квантовой эффективности от длины волны.
4. Постоянная времени приемника показывает время, необходимое для установления величины сигнала на выходе приемника после изменения величины потока излучения на приемнике.

Используемый далее выходной сигнал может быть пропорциональным не величине потока излучения, а некоторой интегральной (накопленной) величине этого потока. Так или иначе, интегрирование потока происходит всегда, либо в самом приемнике, либо в цепи обработки сигнала, либо на этапе регистрации. Случай, когда накопление происходит в самом приемнике — особый, поскольку позволяет значительно уменьшить вклад шумов электрических цепей усиления и обработки сигнала. Такие приемники выделяются в класс приемников с накоплением сигнала. Для них характерно разделение по времени процессов детектирования оптического излучения и накопления сигнала и процессов считывания сигнала и его регистрации. Заметим, что ПЗС приемники относятся именно к этому классу, а, например, фотоэлектронные умножители — нет.

## 1.2 Приемники изображения

Многие научные задачи требуют измерения не величины светового потока через какое-то сечение, а одно- или двумерного распределения плотности светового потока (т.е. освещенности) в некоторой плоскости. В этом случае говорят о приемниках изображения. Число и размеры участков, в которых измеряется освещенность, определяются конкретной задачей. Если говорить об изображении в обычном смысле, число их весьма велико. Размеры, точнее характерные расстояния между этими участками, связаны с пространственным спектром изображения. Если спектр ограничен сверху, а в реальных оптических системах так оно и есть, то при уменьшении характерных расстояний мы будем иметь все больше и больше информации о структуре изображения, но, начиная с некоторой величины, новой информации уже не будет.

Возможны различные способы организации приемников изображений. Фактически он может состоять из одного светочувствительного элемента, при этом для выполнения своей цели необходим процесс развертки изображения, т.е. поочередное измерение светового потока во всех элементах изображения. Примером такого устройства может служить диссектор. Понятно, что такой способ приема изображения крайне неэффективен, особенно в случае низких световых потоков. При работе в одно-фотонном режиме (режиме счета фотонов), когда с некоторой вероятностью регистрируется каждый квант света, и наличие сигнала на выходе приемника означает это событие, возможно и другое решение. Для этого светочувствительный элемент должен выдавать не только информацию о событии, но и о его месте в пределах рабочего поля. Такие координатно-чувствительные детекторы (много-анодные шифрующие системы, детекторы с резистивным или емкостным анодом и т.п.) также применялись в астрономии.

Многоэлементные приемники изображений, т.е. приемники состоящие из большого числа светочувствительных элементов могут быть организованы разными способами. Первый, тривиальный — каждый элемент имеет свою собственную цепь обработки сигнала и его регистрации. Понятно, что реально это осуществимо при небольшом числе элементов. Такого типа приемники иногда используются в системах адаптивной оптики.

Другой способ может быть реализован, если светочувствительный элемент имеет способность накапливать сигнал в течение некоторого времени и в нужный момент допускать считывание этого сигнала во внешнюю цепь обработки. Именно такой способ реализован в детекторах на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-детекторах). Современные ПЗС приемники изображений близки к идеальным и продолжают развиваться. Считается, что вклад этих приемников в астрономию сравним с вкладом, а может его и превосходит, таких эпохальных явлений как телескоп и фотографическая пластинка.

## 2 Основные сведения о ПЗС приемниках

Приборы с зарядовой связью появились в 1969 г., когда сотрудники Bell Laboratories У.Бойл и Дж.Смит в поисках полупроводникового аналога последовательной памяти для ЭВМ предложили и продемонстрировали экспериментально принцип зарядовой связи. В 2009 г за эту работу они были отмечены Нобелевской премией по физике. Очень быстро стало ясно, что у новых устройств большое будущее и через короткое время появились линейные и матричные фотоприемники, организованные на принципе ПЗС.

Первое астрономическое применение ПЗС произошло в 1975, когда было получено избоб-

ражение планеты Уран в полосе  $8900\text{\AA}$ . Для этих наблюдений был использован 61-дюймовый телескоп университета Аризоны на горе Леммон и макетный образец ПЗС, сделанный Texas Instruments в рамках проекта подготовки аппаратуры для космического запуска, планируемого NASA.

Устройство и принципы работы ПЗС приемников описывались неоднократно, но мы кратко повторим их, чтобы, в первую очередь, пояснить используемые далее понятия. Как известно, любое изображение можно представить в цифровом виде, для чего необходимо ввести понятие элемент изображения. Под элементом изображения (по-английски: picture element, или, сокращенно: **pixel**) или пикселем понимается, с одной стороны, элементарный участок изображения с известным положением на плоскости и известными размерами, а с другой стороны, ассоциированный с этим участком сигнал, пропорциональный зарегистрированному световому излучению и выраженный в некоторых единицах.

Обычно, в элементарном изложении, пикселем также называется светочувствительный элемент или фотоячейка приемника. Это не приводит к трудностям, если изображение жестко привязано к физическому приемнику изображения. Однако, поскольку принцип функционирования ПЗС основан на перемещении изображения в виде накопленного заряда по физическому устройству, может возникать неоднозначность трактовки этого термина. Чтобы избежать этого, в дальнейшем изложении мы будем использовать понятие **пиксель** только применительно к изображению, а элемент приемника будем называть фотоячейкой.

## 2.1 Устройство и принцип работы матричного ПЗС приемника

Приборы с зарядовой связью относятся к изделиям функциональной электроники, т.е. его нельзя представить в виде отдельных обычных электронных элементов. ПЗС приемник выполняет следующие основные функции: поглощение света и генерация фотоэлектронов (внутренний фотоэффект), сбор и хранение фотоэлектронов (заряда) в некой области, перенос накопленных зарядов из одной области в соседнюю и далее. По сути ПЗС — это тонкая пластина очень качественного кремния (для определенности, р-полупроводника), в толще которого и происходит внутренний фотоэффект. Пришедшие фотоны взаимодействуют с кремнием и легко поглощаются, если они обладают подходящей длиной волны (энергией). Кремний имеет ширину запрещенной зоны  $1.14\text{ эВ}$ , так что он хорошо поглощает световые кванты с энергией от  $1.1$  до  $4\text{ эВ}$  (от  $11000$  до  $3000\text{\AA}$ ). Поглощение фотона приводит к освобождению валентного электрона или к его переходу из валентной зоны в зону проводимости. В валентной зоне на месте электрона возникает свободное состояние, во всех отношениях ведущее себя как положительно заряженная частица, которое называют **дыркой**.

В реальном ПЗС кремний по-разному обогащен специальными примесями в разных функциональных областях кристалла, но это на характер поглощения света не влияет, т.к. концентрация примеси очень низка. Возникшие фотоэлектроны диффундируют в так называемую **обедненную зону**, а дырки — уходят в подложку. Обедненная зона, или **канал**, создается подбором потенциалов, приложенных к внешним электродам на поверхности кристалла и дополнительным легированием части приповерхностного слоя кремния. В любом случае потенциал в области канала — положительный (т.е. для электронов — минимум потенциальной энергии, **потенциальная яма**), а толщина этой области составляет несколько микрон. Проводящие электроды, обычно они называются **затворами**, изолированы от кремния слоем диэлектрика — обычно диоксида или нитрида кремния толщиной в доли микрона.

Эти три слоя и образуют так называемый **МОП-конденсатор**, хотя электроды делают не из металла, а из проводящего поликристаллического кремния, прозрачного для видимого света. Предположим, что в устройстве имеется множество затворов и, например, к четным приложен положительный потенциал (накопительный затвор), а к нечетным — нулевой (**изолирующий затвор**). Ясно, что фотоэлектроны под влиянием электрического поля будут диффундировать к ближайшим четным затворам. Таким образом, заряд локализуется в элементарной ячейке и задача сбора и хранения сигнального заряда решена. Для решения задачи переноса добавляется третий затвор, такая трехфазная структура (т.е. на одну фотоячейку приходится 3 затвора) наиболее часто встречается в современных ПЗС приемниках (хотя существуют и двухфазные и четырехфазные устройства). Процесс переноса проиллюстрирован на Рис. 1.

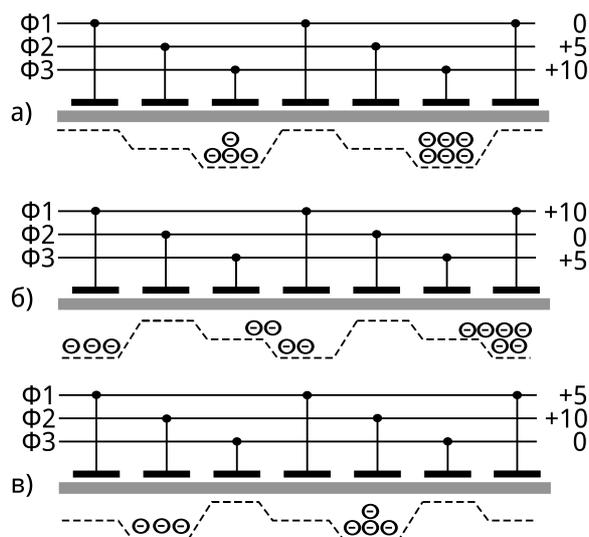


Рис. 1: Процесс переноса накопленных зарядов за три такта в трехфазной структуре

Структура трех затворов формирует ячейку в линейном приемнике или во вспомогательном регистре. В матричном приемнике эти три затвора проложены через всю матрицу и формируют **строку** фотоячеек. На отдельные ячейки строки делится так называемыми **стоп-каналами** — узкими полосками повышенной концентрации примеси, добавляемой в процессе изготовления. Стоп-каналы также проходят через всю матрицу, формируя **колонки** ячеек. Таким образом, каждая ячейка в матрице ограничена с двух сторон стоп-каналами. а с двух других — изолирующим затвором.

Обычно считается, что колонки на матрице расположены вертикально, а строки горизонтально. Перенос зарядов осуществляется по всей матрице одновременно, заряд из каждой ячейки (зарядовый пакет, или связанный с ним элемент изображения) движется внутри своей колонки вниз (или вверх, в зависимости от архитектуры матрицы), переходя из одной строки в другую. Такой процесс называется **вертикальным сдвигом**. Каждый цикл вертикального сдвига приводит к тому, что нижняя строка пикселей (не ячеек) выдвигается во вспомогательный выходной **горизонтальный** регистр, служащий для транспортировки зарядов к выходному узлу считывания.

Горизонтальный регистр также представляет собой линейную ПЗС структуру и управляется своими фазами. Цикл **горизонтального сдвига** приводит к тому, что заряд из

крайней правой (условно) ячейки переносится в выходной узел (выходной усилитель). Горизонтальный сдвиг выполняется последовательно до тех пор, пока все зарядовые пакеты выходного регистра не окажутся считанными. Обычно количество горизонтальных циклов равно числу колонок матрицы.

После завершения считывания выходного регистра вновь выполняется вертикальный сдвиг. Полное число циклов вертикального сдвига равно числу строк в матрице. Например, в процессе считывания ПЗС матрицы размером  $2048 \times 2048$  заряд, накопленный в левой верхней ячейке, будет сдвинут 4096 раз, прежде чем окажется на выходе детектора.

## 2.2 Считывание данных с ПЗС приемника

Хотя считается, что ПЗС приемник типично цифровое устройство, на самом деле большая часть обработки сигнала выполняется в аналоговом виде. Первый этап такой обработки — преобразование заряда очередного считываемого пикселя в напряжение. Эта процедура очень критична к шумам и выполняется в выходном узле матрицы. Выходные узлы практически всех высококачественных ПЗС устройств реализованы похожим способом.

Преобразование величины заряда в напряжение происходит в области так называемой плавающей диффузии. Эта область имеет емкость порядка сотых долей пикофарады и при появлении на ней сигнального заряда  $\Delta Q$  потенциал ее меняется на величину  $\Delta U = \Delta Q / C$ . Далее следует малощумящий высокочастотный буферный усилитель, выход которого выводится наружу для дальнейшей обработки сигнала.

Проблема заключается в том, что перед тем как в область плавающей диффузии поступит очередной зарядовый пакет, старое значение должно быть сброшено. Делается это сигналом сброса, устанавливающим на диффузии некоторое опорное напряжение. Однако значение этого напряжения неизбежно флуктуирует (так называемый установочный или *kTC*-шум) и если с ним не бороться этот шум и будет определять величину шума считывания. Бороться с ним возможно только одним способом, — измерять разность напряжения на выходе после сброса и после поступления сигнального заряда. Этот процесс, называемый **двойной коррелированной выборкой** и позволяет получать низкие значения шума считывания в современных матрицах.

Величина изменения напряжения на выходе ПЗС при изменении сигнального заряда на величину заряда электрона называется выходным коэффициентом преобразования и в современных устройствах составляет несколько  $\text{мкВ}/e^-$ . При такой величине выходное напряжение, соответствующее максимально возможному заряду, накопленному фотоячейкой, составляет примерно 1 вольт. Реальное измерение разности напряжений при двойной коррелированной выборке осуществляется уже вне матрицы с помощью специальных интегрирующих усилителей.

Понятно, что такая аналоговая обработка приводит к тому, что нулевой засветке матрицы соответствует ненулевое напряжение на выходе. Непосредственное преобразование выходного напряжения интегратора производится аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Обычно используются 16-разрядные АЦП, выдающие числовое значение для записи в компьютер. Диапазон выходных значений такого преобразователя составляет 0 – 65535, обычно эти числовые значения называются отсчетами или ADU (аналого-цифровой единицей). При правильных согласованиях всех параметров электроники нулевому значению светового сигнала соответствует малые отсчеты 100–200, максимальному сигналу — 65000. Не нулевое нижнее значение принимается для того, чтобы избежать отрицательных значений из-за

шума считывания и временной нестабильности электроники.

Весь электронный тракт также характеризуется коэффициентом преобразования  $G$ , обычно называемом усилением (gain), хотя по смыслу, это скорее обратная к нему величина. Этот коэффициент показывает сигнальный заряд в электронах, необходимый для изменения выходного числового значения на 1 ADU. В первоклассных ПЗС системах типичные значения усиления  $G$  от 1 до  $10 e^-/ADU$ . С аналого-цифровым преобразованием связан специфический шум — оцифровки или округления, пропорциональный усилению.

### 3 Первичная редукция ПЗС изображений

Поскольку ПЗС приемник по сути аналоговое устройство, его калибровка при помощи специальных измерений очень важный этап в процессе получения предсказуемых данных наблюдений. Мы уже упоминали, что 1) нулевой освещенности матрицы соответствует не нулевое числовое значение на выходе и 2) средняя по фотоячейке чувствительность (квантовая эффективность) различна по матрице от ячейки к ячейке и это различие зависит от длины волны света. От координат в фокальной плоскости телескопа зависит также оптическое пропускание, вплоть до влияния пыли и грязи на близких к фокальной плоскости оптических поверхностях. Далее изложены общие принципы начальной обработки.

#### 3.1 Подложка (bias)

Если в отсутствии освещенности матрицы (чтобы не было фото-сигнала) и при нулевой экспозиции (чтобы не было темнового сигнала) произвести считывание сразу после очистки матрицы, то полученное изображение и называется **подложкой** или смещением (bias). Это изображение содержит информацию 1) о временных и температурных изменениях среднего уровня смещения, 2) о геометрических различиях (узоре) в уровне подложки, 3) о шуме считывания. Часто эти составляющие разделяются и отдельно получают и учитываются.

Для получения среднего (или медианного) уровня подложки достаточно одного кадра изображения или так называемой **закадровой области** (overscan). Закадровая область получается при чтении большего количества строк, чем реально есть в матрице, это может выполняться при получении каждого информационного изображения. Для получения геометрических различий (pattern noise) обычно используется усреднение большого числа кадров подложки с вычтенным из каждого средним по кадру. Вне зависимости от времени накопления информационного кадра из него должен быть вычтен текущий средний уровень подложки и средний узор.

#### 3.2 Плоское поле (flat field)

Вторым важным компонентом калибровочного процесса является **выравнивание чувствительности** матрицы (flat fielding). Для этого используются различным образом полученные изображения плоского поля. Обычно для этого используются светорассеивающие экраны под куполом телескопа, сумеречное или даже ночное небо. Не вдаваясь в детали заметим, что главная проблема которая при этом возникает — соответствие (точнее, несоответствие) спектрального состава излучения, используемых для плоского поля источников, и исследуемых впоследствии объектов. По результатам измерений плоского поля строится

выравнивающая матрица  $K_{i,j}$  — массив размерности ПЗС приемника чисел нормированных в среднем к 1.0 ( $i$  и  $j$  — индекс строки и колонки, соответственно). Разумеется, если вклад темнового сигнала в изображения плоского поля существенен, он должен быть убран. Выравнивающую матрицу необходимо знать с высокой точностью, если необходимы высокоточные результаты астрономических наблюдений.

### 3.3 Базовая редукция

Имея подготовленные подложку  $B_{i,j}$  и выравнивающую матрицу  $K_{i,j}$  мы можем редуцировать любое исходное изображение  $R_{i,j}$ . В полном виде эта процедура выглядит следующим образом:

$$I_{i,j} = K_{i,j} \times ((R_{i,j} - B_{i,j}) - (D_{i,j} - B_{i,j})) \quad (1)$$

где  $D_{i,j}$  — темновой кадр, в предположении, что время накопления информационного и темнового изображений одинаково. Теперь величины  $I_{i,j}$  пропорциональны плотности полной световой энергии полученной за время накопления в соответствующей ячейке ПЗС приемника. Эта величина приписывается к центру пикселя, хотя геометрический и фотометрический центры могут и не совпадать. Величины  $I_{i,j}$  выражены в цифровых единицах  $ADU$ , и для перевода их в число электронов их необходимо домножить на коэффициент преобразования  $G$ .

Определение числа пришедших на элемент изображения фотонов более сложная задача. Она требует знания не только квантовой эффективности  $Q(\lambda)$ , но и знания распределения энергии в спектре источника.

### 3.4 Точность измерений или S/N отношение

В этом разделе под измерением понимается оценка блеска звезды или другого определенного объекта на фоне неба. Все величины предварительно пересчитываются из их числового представления в соответствующее число электронов при помощи усиления  $G$ . В этом случае отношение сигнал-шум (величина обратная относительной точности) дается выражением:

$$\frac{S}{N} = \frac{N_*}{(N_* + n_{px}(N_S + N_D + r^2 + G^2/2))^{1/2}} \quad (2)$$

В этом уравнении под сигналом  $N_*$ , понимается общее количество накопленных от измеряемой звезды электронов. Эта величина может соответствовать одному пикселю или может быть суммой из нескольких пикселей, содержащихся под профилем звезды. Величины  $N_S$  и  $N_D$  — число электронов от фона неба и темнового сигнала в пикселе,  $r$  — шум считывания, а  $n_{px}$  — количество пикселей, занимаемых объектом. Член  $G^2/2$  учитывает ошибку оцифровки. В этом уравнении не включена ошибка определения фона, чтобы ее учесть необходимо величину  $n_{px}$  домножить на  $(1 + n_{px}/n_S)$ , где  $n_S$  — число пикселей при определении фона.

Оценка потенциальной точности измерений — важный этап в обработке астрономических изображений, позволяющий внести необходимые коррекции в процесс наблюдений чтобы повысить их эффективность.

## 4 Описание задачи

Цель задачи по исследованию ПЗС камеры заключается в определении важнейших параметров любого ПЗС приемника и камеры:

- Получение кадров подложки и их анализ
- Получение темновых кадров и оценка скорости термогенерации
- Получение кадров при равномерном освещении детектора
- Изучение косметических особенностей матрицы
- Определение коэффициента преобразования камеры и оценка величины шума считывания
- Проверка линейности ПЗС камеры

### 4.1 Установка для исследования ПЗС камеры

Установка для исследования ПЗС камеры предназначена для того, чтобы обеспечить пространственно однородную и заданную освещенность на поверхности ПЗС детектора. Она изображена на Рис. 2. Дополнительно обеспечивается отсутствие посторонней засветки и возможность освещения синим, зеленым и красным светом, моделируя тем самым работу в  $B$ ,  $V$ , и  $R$  фотометрических полосах.

Установка состоит из основного корпуса в нижней части которого размещен управляемый излучатель света. Для предотвращения бликов от внутренних стенок трубы корпуса, выше излучателя находится отсекающий, который не допускает попадания света на стенки корпуса. Поскольку излучатель расположен на расстоянии 35 см от ПЗС детектора размером 8 мм, то геометрический фактор ослабления света пренебрежимо мал, большее значение имеет неоднородность в индикатрисе излучения используемого светодиода. Для усреднения излучения по направлениям применяется дополнительный рассеиватель из двух, расположенных друг за другом, матовых стекол.

Излучатель, также как и ПЗС камера, подключены к компьютеру через последовательный интерфейс на основе физического интерфейса RS485. Такой же интерфейс используется в задаче практикума по исследованию фотоэлектронного умножителя, только, в отличие от той установки, обмен происходит на скорости 2 Мбит/с вместо 115 Кбит/с. Кабель интерфейса подключается к параллельному порту компьютера через специальный конвертер.

Питание установки осуществляется постоянным напряжением +12 Вольт от стандартного блока питания. Штеккер блока включается в гнездо на корпусе камеры.

### 4.2 ПЗС камера

В задаче исследуется специальная ПЗС камера, изготовленная в 2005 году студентом А.Шугаровым в качестве курсовой работы. В этой камере применен ПЗС детектор производства отечественного предприятия “НПП Электрон-Оптроник” — ISD029AP. Основные характеристики этого детектора приведены в таблице.

Архитектурно ISD029AP представляет собой полнокадровую матрицу выполненную по технологии “виртуальная фаза” с двухфазным вертикальным управлением. Эта технология подразумевает наличие непокрытого затворами участка ячейки, что позволяет прибору чувствовать УФ излучение.

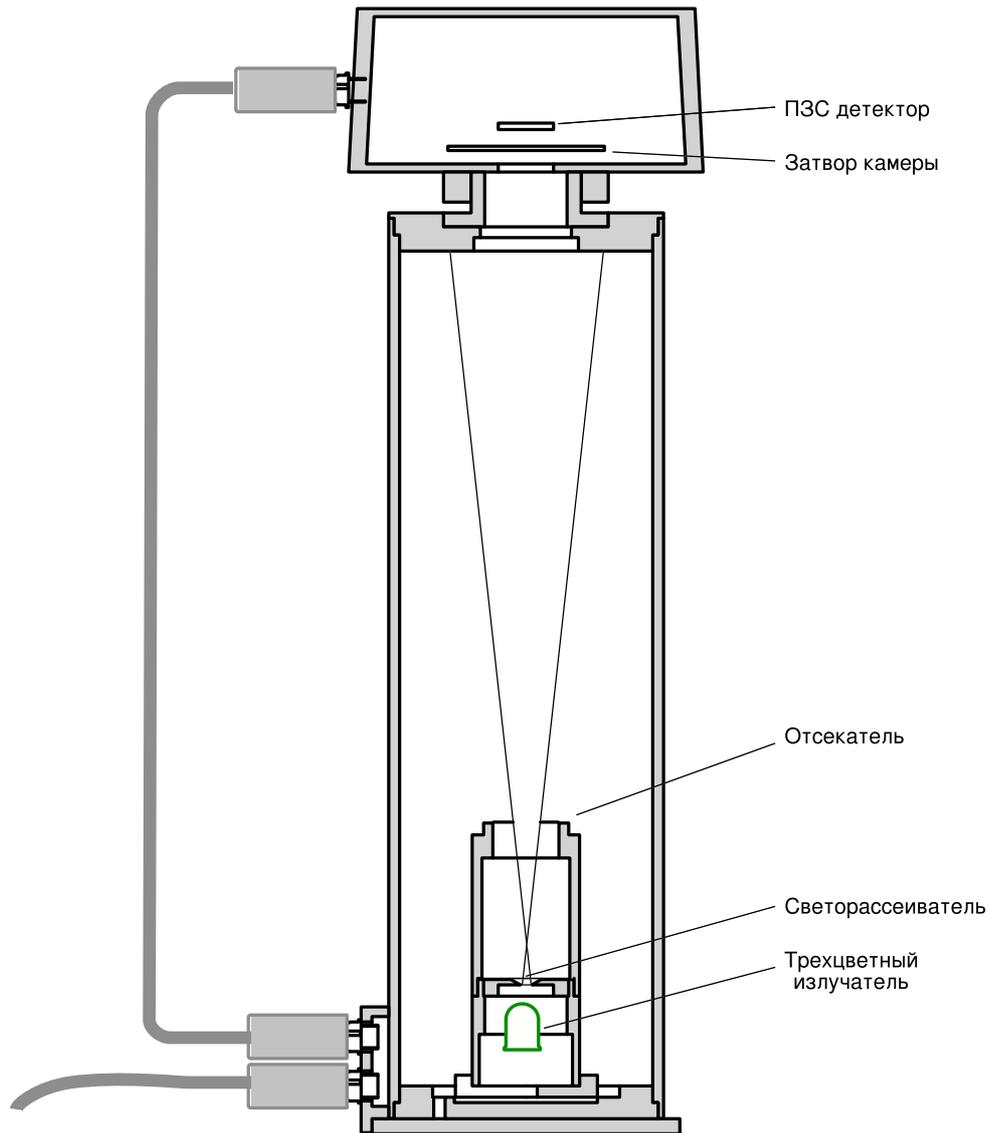


Рис. 2: Устройство установки для исследования ПЗС камеры

Сам ПЗС детектор находится в герметическом корпусе со встроенным 2-х ступенчатым термоохладителем Пелтье и покрыт сверху покровным стеклом. Для охлаждения корпуса камеры на ней установлен вентилятор.

В камере встроен простой затвор, автоматически открывающийся при старте экспозиции. Хотя его быстродействие достаточно велико, однако следует помнить, что при экспозициях около 1 с и меньше, влияние продолжительности открывания и закрывания уже заметно.

Считывание данных с камеры, после окончания экспозиции, занимает примерно 11 с. При этом одновременно выполняются сдвиги заряда и его оцифровка и передача данных короткими пакетами по 30 байт. При не очень холодном детекторе, на кадре подложки виден градиент отсчетов, вызванных термогенерацией в течении считывания.

Таблица 1:

| Параметр                                   | Типичное значение      |
|--|------------------------|
| Фоточувствительная область                 | $8.2 \times 8.2$ мм    |
| Формат детектора                           | $512 \times 512$ ячеек |
| Размер ячейки                              | $16 \times 16$ мкм     |
| Заряд насыщения                            | 130 000 электронов     |
| Шум считывания                             | 6 электронов/пиксель   |
| Темновой сигнал (при $-40^\circ\text{C}$ ) | 5 электронов/пиксель/с |

Внешний вид камеры показан на Рис. 3.

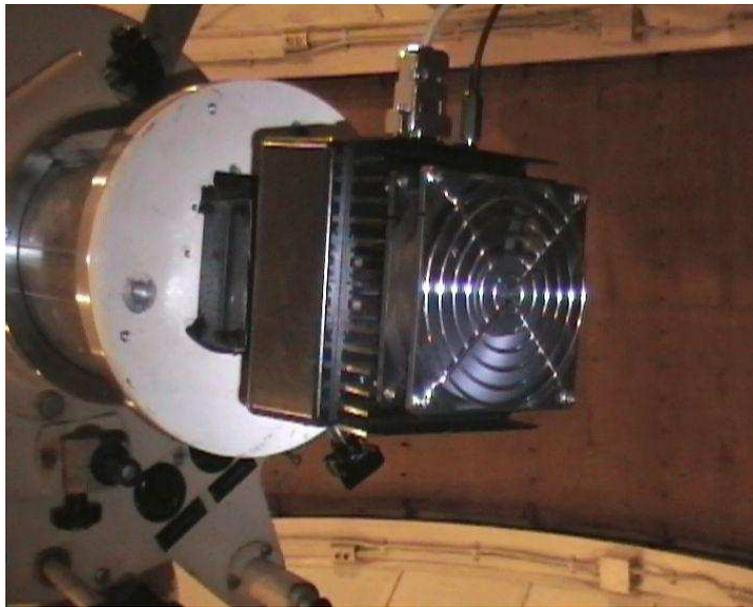


Рис. 3: ПЗС камера на 300-мм телескопе-рефракторе во время эксперимента

### 4.3 Утилита для работы с установкой

Для управления работой установки и запуска экспозиций используется простая утилита под операционной системой GNU/Linux, она называется `ccdrr` и запускается из рабочей директории пользователя командой `ccdrr`. Утилита воспринимает несколько простейших инструкций из командной строки. Для выполнения описываемой задачи достаточно следующих команд

- `i` — инициализация программы;
- `t dd` — установка температуры охлаждения матрицы. Температура `dd` должна быть числом от 0 до -50 и представляет собой **разность** температуры матрицы и окружающего воздуха;

- `t?` — запрос текущей температуры матрицы для контроля ее состояния;
- `c N F` — установка цвета и яркости источника излучения. Индекс цвета `N` может быть 1 для синего, 2 для зеленого, 3 для красного цвета. Интенсивность `F` в условных единицах меняется от 0 до 255. Ноль соответствует выключенному излучателю;
- `e dd` — установка экспозиции `dd` камеры в миллисекундах, для получения кадра подложки нужно установить `dd = 0`;
- `m` — выключение автоматического открывания затвора камеры при старте экспозиции. Используется для получения темновых кадров;
- `a` — отмена предыдущего режима;
- `f` — запуск экспозиции. Время старта выводится на экран. После окончания экспозиции кадр будет считан из камеры и записан в рабочую директорию в формате FITS.

## 5 Порядок выполнения задачи

Включение установки производится подключением блока питания к электрической сети. Вращение вентилятора служит показателем того, что с напряжением все в порядке. При старте камера начинает автоматически охлаждаться. Поскольку охлаждается она быстрее чем нагревается, рекомендуется сразу же запустить утилиту `ccdr`, инициализировать её и установить температуру  $-10^{\circ}$ . При изменении уровней охлаждения следует иметь ввиду, что температура детектора стабилизируется примерно за 10 – 15 минут. Этот процесс можно контролировать при помощи соответствующего запроса.

На другой консоли компьютера запустить программу для просмотра и обработки изображений в формате FITS. рекомендуется использовать пакет MIDAS Южной европейской обсерватории. Краткое описание доступно в некоторых задачах практикума. Для просмотра изображения `101118_0001.fits` можно выполнить

```
Midas 011> LOAD/IMAG 101118_0001.fits
Midas 012> VIEW/IMAG 101118_0001.fits
```

### 5.1 Получение кадров подложки и темновых кадров

После выхода камеры на температурный режим, снять 2 – 3 кадра подложки, затем отключить автоматический режим открывания затвора и установить нужную экспозицию для получения темновых кадров (подбирается опытным путем исходя из реальной скорости термогенерации). Снять 2 – 3 кадра темнового изображения. Снимать несколько кадров всегда нужно обязательно, чтобы отфильтровать кадры со случайными событиями типа космических лучей.

Установить температуру  $-30^{\circ}$ . После выхода температуры детектора на постоянный уровень, повторить описанные выше действия, меняя экспозицию для темновых изображений если надо. Затем то же самое делается для температуры  $-50^{\circ}$ .

### 5.2 Оценка скорости термогенерации

Скорость термогенерации оценивается для каждой температуры по разности темнового кадра и кадра подложки. Разностный кадр требуется разделить на экспозицию и усреднить в области размером порядка  $100 \times 100$ , где нет косметических особенностей. Полученные

данные нанести на график как зависимость от температуры и найти параметры  $A$  и  $B$  аппроксимирующей функции:  $y = Ae^{Bx}$ .

### 5.3 Получение и анализ световых кадров плоского поля

Дальнейшие эксперименты выполняются при охлажденной до  $-50^{\circ}\text{C}$  ПЗС матрице. Напомним, что на самом деле это температурный перепад по отношению к комнатной температуре. Нужно перевести затвор камеры в автоматический режим и включить источник зеленого света со средней интенсивностью. Интенсивность излучения нужно подобрать, руководствуясь соображением, чтобы при экспозиции в 3 минуты уровень сигнала по полю кадра нигде не превышал бы 65 тысяч цифровых единиц, но и не была бы значительно ниже, чтобы не ухудшать статистику.

Получить не менее 3 кадров подложки, чтобы гарантировать на них отсутствие значимых спорадических событий. Проверку выбросом можно делать анализируя разность смежных кадров.

Далее, начиная с экспозиции в 1 с и изменяя экспозицию примерно вдвое каждый раз, получить для каждой экспозиции не менее 3 световых кадров. Таким образом должна быть получена серия для примерно 8 – 10 экспозиций, покрывающая полностью динамический диапазон ПЗС камеры.

Внимательно визуально проинспектировать изображения и описать замеченные косметические и систематические явления. Выбрать область размером примерно  $100 \times 100$  пикселей, свободную от явных косметических дефектов для последующей обработки.

### 5.4 Определение коэффициента преобразования камеры и шума считывания

Для каждой экспозиции (включая кадры подложки) выбрать два лучших кадра и получить их разность. Например

```
Midas 016> COMPUT/IMAG d_bias = 101118_0003.fits - 101118_0002.fits
Midas 017> COMPUT/IMAG d1000 = 101118_0005.fits - 101118_0004.fits
```

Для каждого кадра определить средний уровень сигнала в пределах выбранной области изображения. Для разностного кадра определить дисперсию отсчетов в пределах той же области. Для этого можно использовать

```
Midas 018> STATIS/IMAG d_bias [@100,@100:@200,@200]
```

Имейте ввиду, что данная команда выдает не дисперсию, а стандартное отклонение, его нужно возвести в квадрат.

После завершения обработки всего набора данных постройте зависимость полученной дисперсии от среднего уровня светового сигнала. Для этого из среднего уровня кадров плоского поля нужно вычесть средний уровень подложки. Точка, соответствующая дисперсии разностного кадра подложки, будет находиться на  $x = 0$ . Все точки на кривой должны расположиться на прямой линии. Этот факт следует из предположения, что дисперсия светового сигнала пропорциональна самому сигналу, если число зарегистрированных фотоэлектронов подчиняется закону распределения Пуассона.

Провести линию линейной регрессии  $y = a + bx$  через полученные точки. Наклон этой кривой  $b = 2/G$  однозначно определяется коэффициентом преобразования  $G$  ( $e^-/ADU$ ) и, соответственно:

$$G = 2/b. \quad (3)$$

Зная коэффициент преобразования нетрудно получить значение шума считывания  $r$  в электронах ( $e^-$ ):

$$r = G\sqrt{a/2}. \quad (4)$$

Нетрудно догадаться, что фактор 2 появился в этих формулах, потому что мы анализировали дисперсию разностного кадра, которая вдвое больше дисперсии отсчетов одного кадра.

Полученные значения шума считывания сравните с паспортными данными для ПЗС-детектора, приведенными в Табл.1.

## 5.5 Оценка линейности ПЗС камеры

Под линейностью ПЗС камеры понимается линейный отклик на полную световую энергию, полученную детектором за время накопления. Для ее оценки можно использовать полученные ранее значения среднего уровня светового сигнала с разными экспозициями. Единственное предположение в таком методе исследования линейности заключается в том, что интенсивность излучения источника света не меняется в течение эксперимента.

Постройте и объясните зависимость среднего сигнала в электронах от времени экспозиции. Оцените относительную величину отклонения от идеальной линейной зависимости.

## 5.6 Исправление неоднородности поля

Перед тем как проверять возможность исправления неоднородности чувствительности матрицы, вычтите из всех световых кадров кадр подложки. Первый этап проверки — нужно выбрать кадр с уровнем сигнала не меньше 30 – 40 тысяч ADU, но в области линейности. Вычислить среднее значение *mean* по кадру и разделить кадр на это среднее значение.

```
Midas 021> COMPUT/IMAG correction = 101118_0003.fits / mean
```

Это и будет кадр плоского поля, на который нужно будет делить все остальные световые кадры.

```
Midas 022> COMPUT/IMAG image1 = 101118_0023.fits / correction
```

Проверить качество выравнивания на изображениях, полученных с той же экспозицией, и на изображениях, полученных с другими экспозициями. Дополнительно нужно получить изображения с другим цветом освещения, с синим и с красным. Проверить пригодность полученного корректирующего кадра для выравнивания в других спектральных диапазонах.

## Список литературы

- [1] Howell, Steve B., Handbook of CCD Astronomy, Cambridge, U.K. ; New York : Cambridge University Press, 2000