

Приемники излучения



Всесоюзный комитет по делам искусства при С.Н.К. СССР

Сюзфот

**ФОТО-ПЛАСТИНКИ
ОРТОХРОМ**

ФАБРИКА №1
СУЩЕВСКАЯ УЛ. 29,
МОСКВА

РАЗМ. **IX**

ШТ. ОТКРЫВАТЬ ПРИ КРАСНОМ СВЕТЕ

Типы детекторов

Интегрирующие детекторы

Накапливают
приходящее излучение
со временем

Пример:

фотографическая
пластинка, ПЗС

Детекторы счета фотонов (PCD)

Реагируют почти на
каждый приходящий
фотон

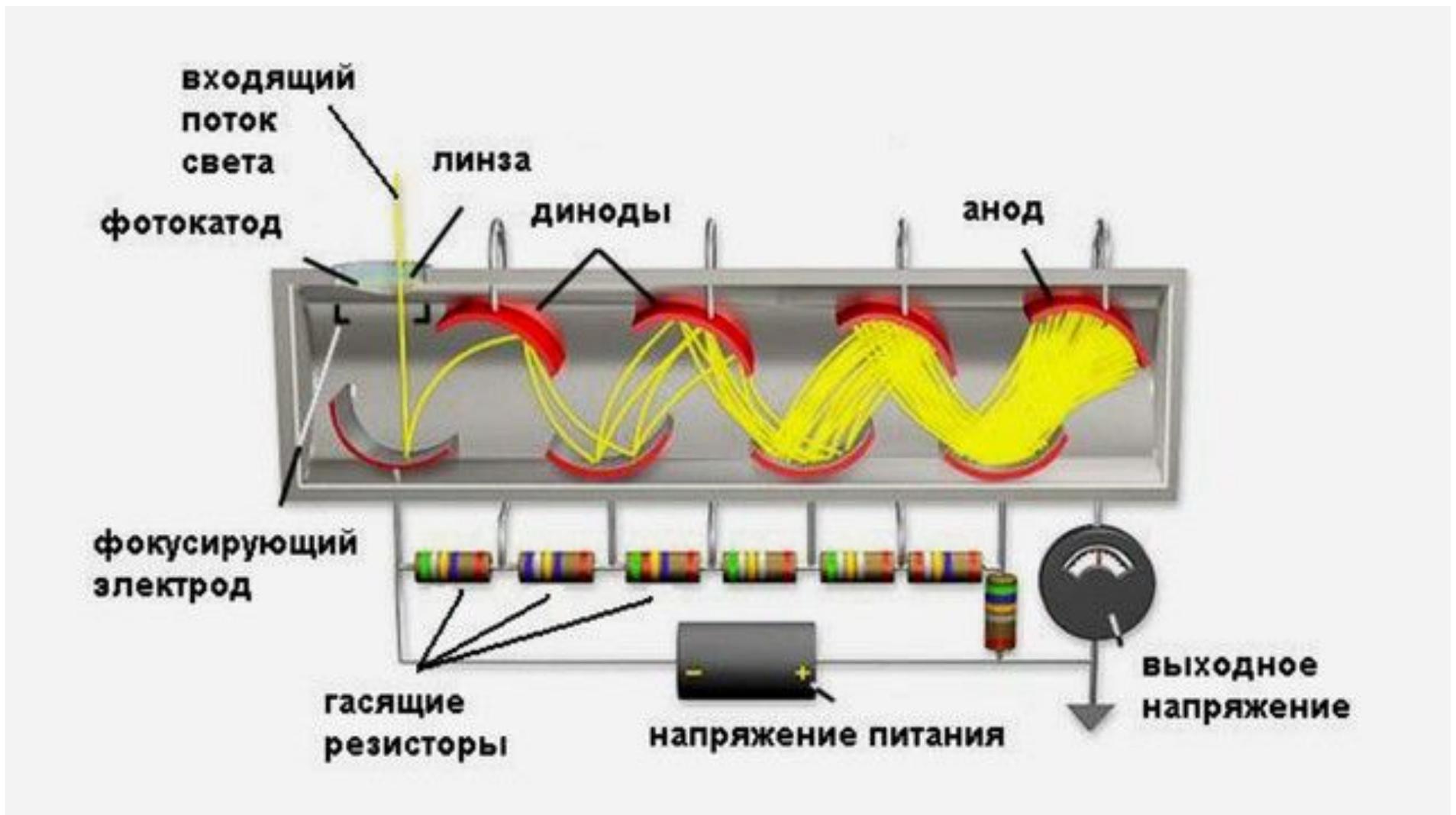
Пример:

фотоумножитель
МСП

Общие свойства детекторов

- Квантовая эффективность
- Частотная характеристика
- Постоянная времени (инерционность)
- Линейность
- Усиление
- Динамический диапазон
- Пороговая чувствительность
- Уровень насыщения
- Чувствительность к космическим лучам
- Функция считывания
- Строение чувствительного слоя
- Однородность чувствительности
- Память
- Размер элемента
- Эффективная фоточувствительная площадь
- Рабочая температура чувствительного слоя
- Шум
- Дробовой шум
- Шум считывания
- Темновой ток
- Фон
-

Фотоумножитель



Применение в спектроскопии: сканирующие спектрографы

Фотоумножитель



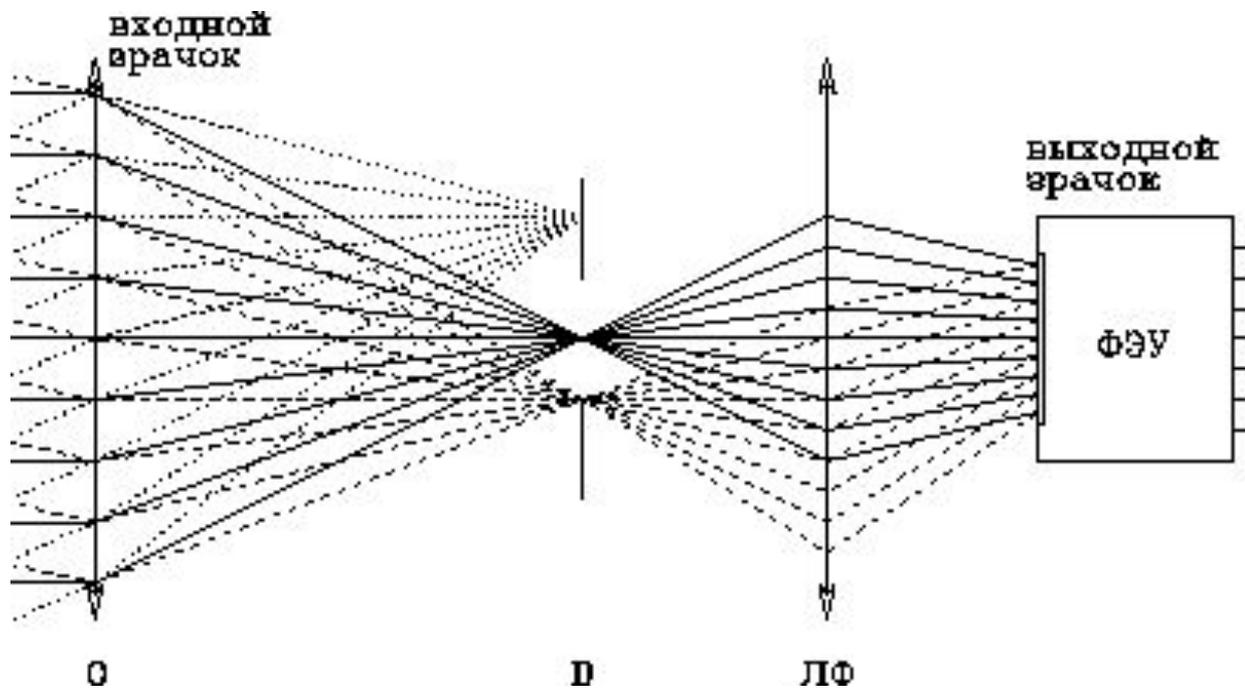
Параметры

- Спектральный квантовый выход или спектральная чувствительность фотокатода — эффективность преобразования энергии фотона в поток фотоэлектронов
 - Режим счета фотонов
 - Красная граница фотоэффекта
- Коэффициент усиления
- Темновой ток
- Неравномерность чувствительности фотокатода

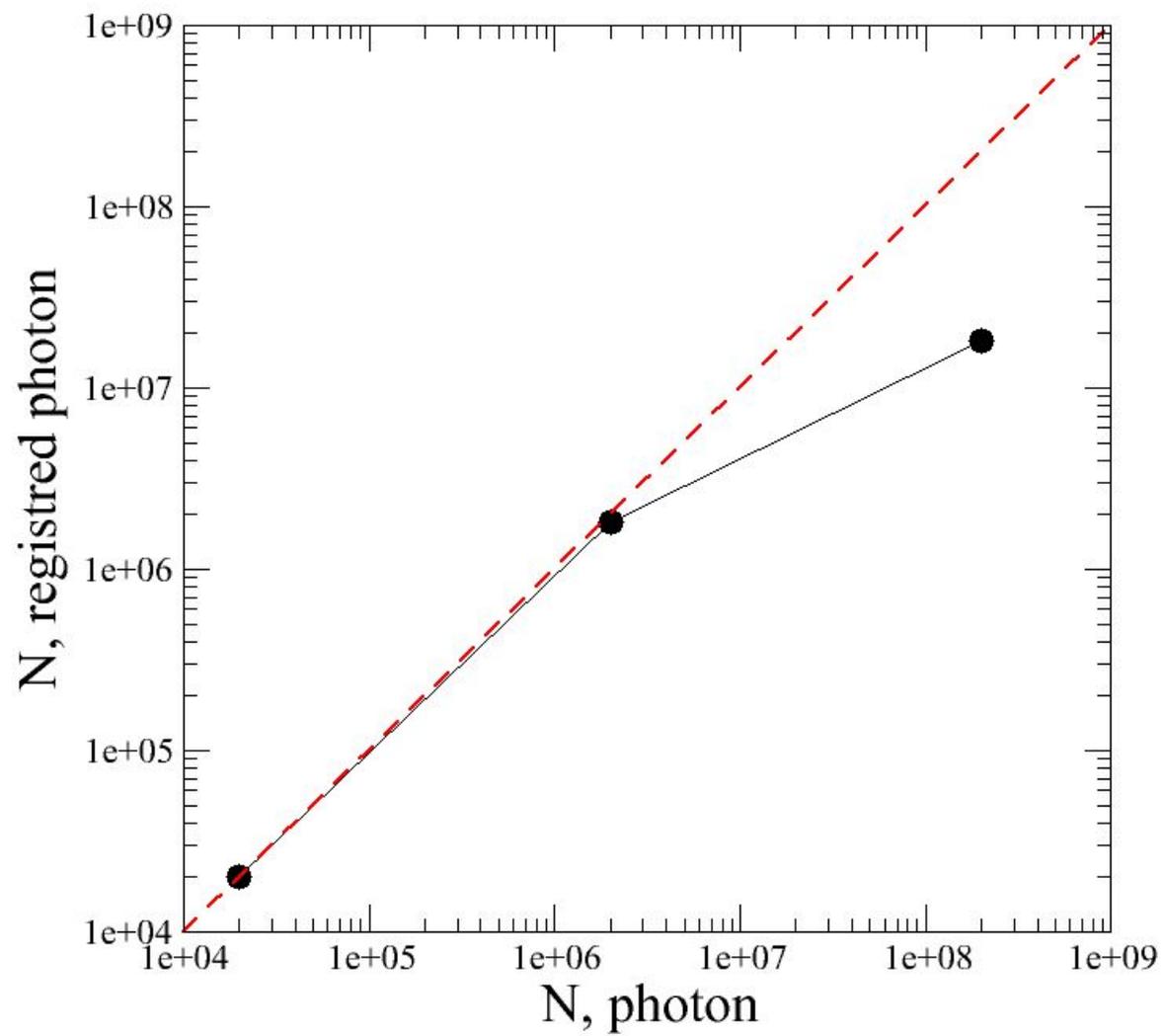
Необходимость равномерной и полной засветки фотокатода - применение линзы Фабри.

Линза Фабри

Равномерная и полная засветка окна фотокатода,
Компенсация сдвига звезды во выходном зрачке

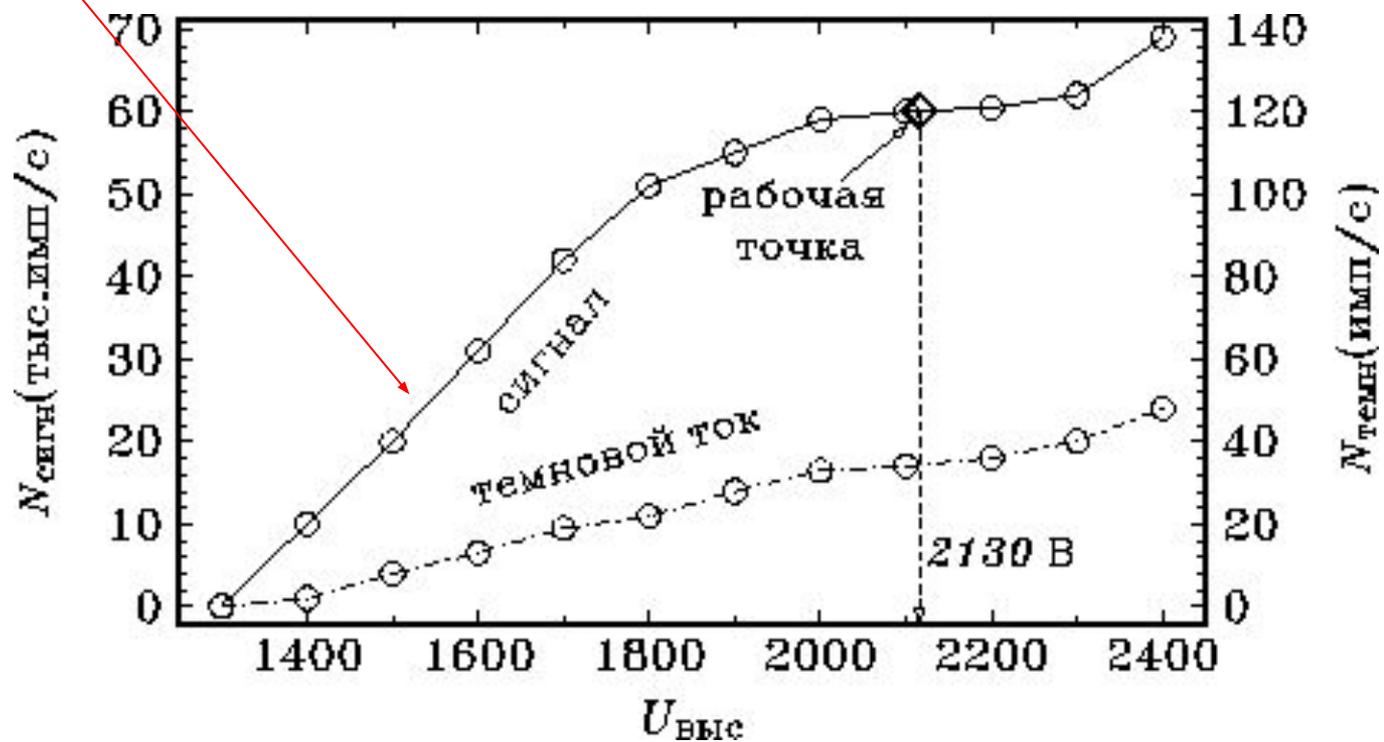


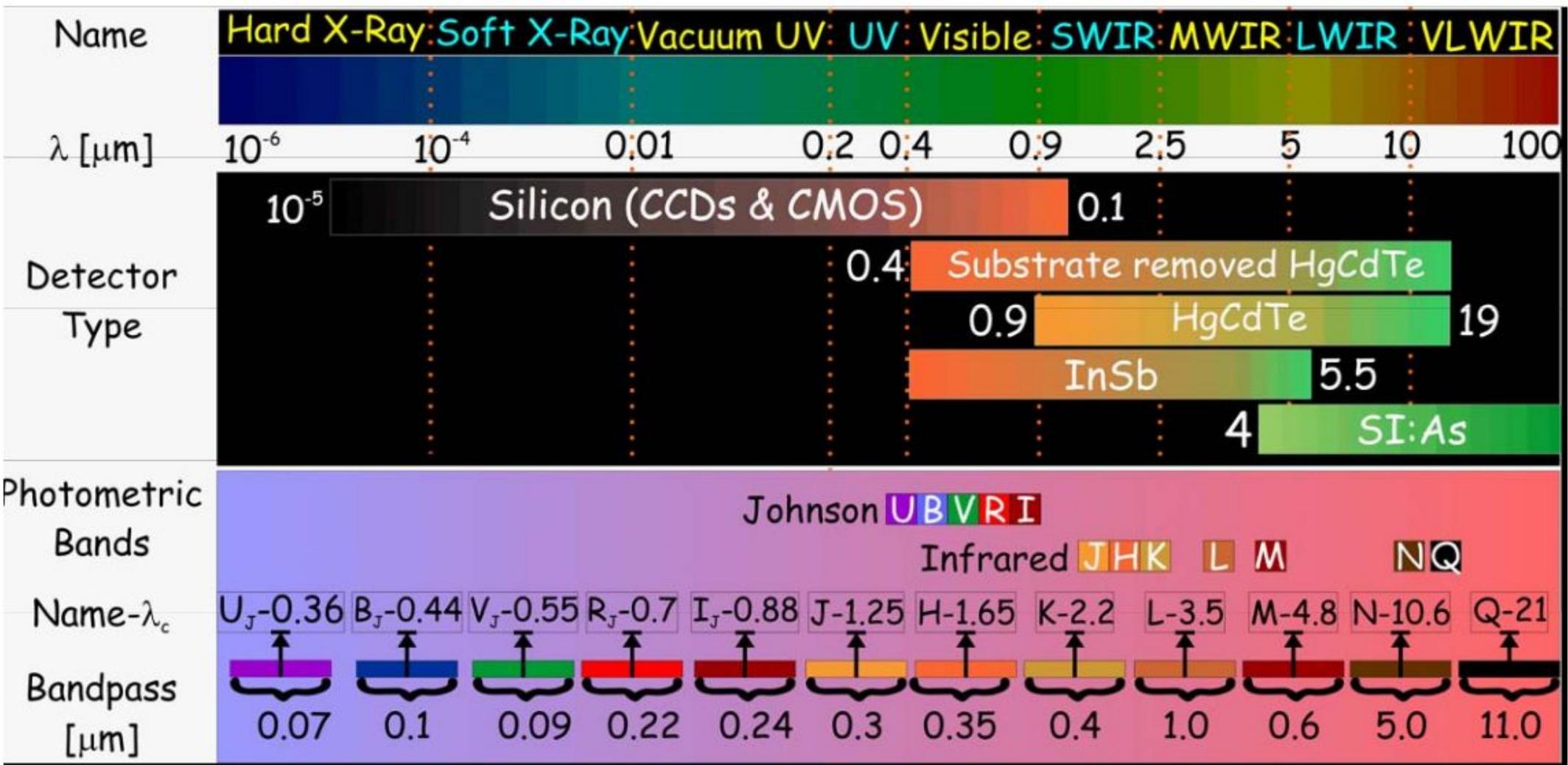
Нелинейность фотоумножителя



Счетная характеристика фотоумножителя

Регистрируются не все фотоэлектроны

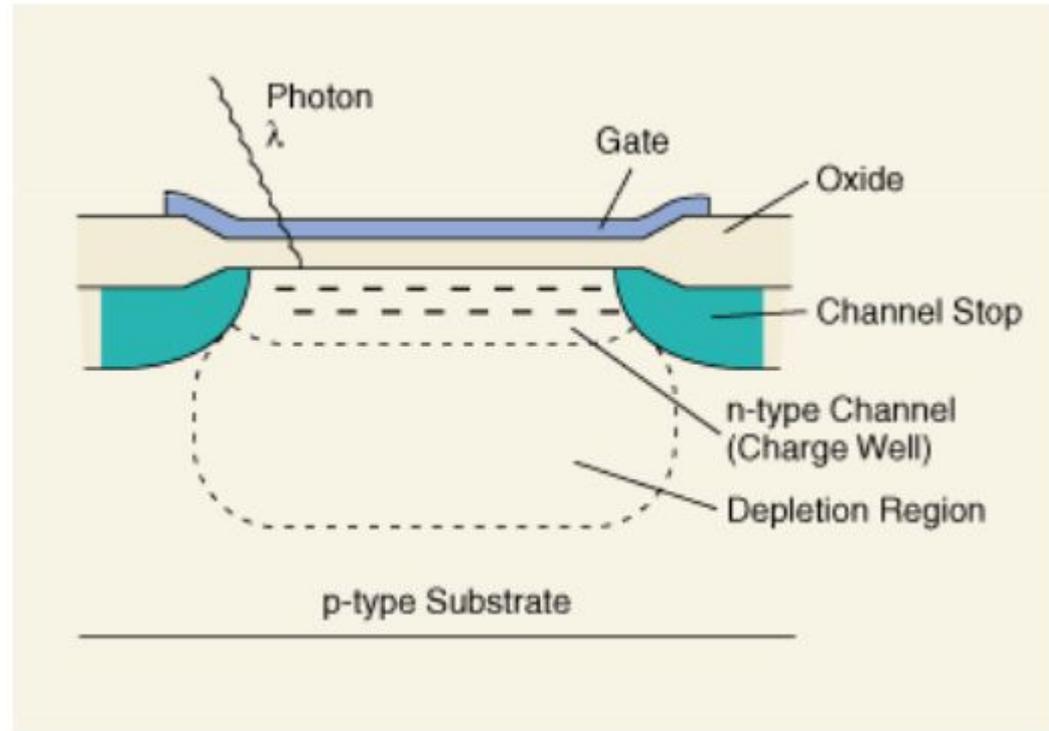


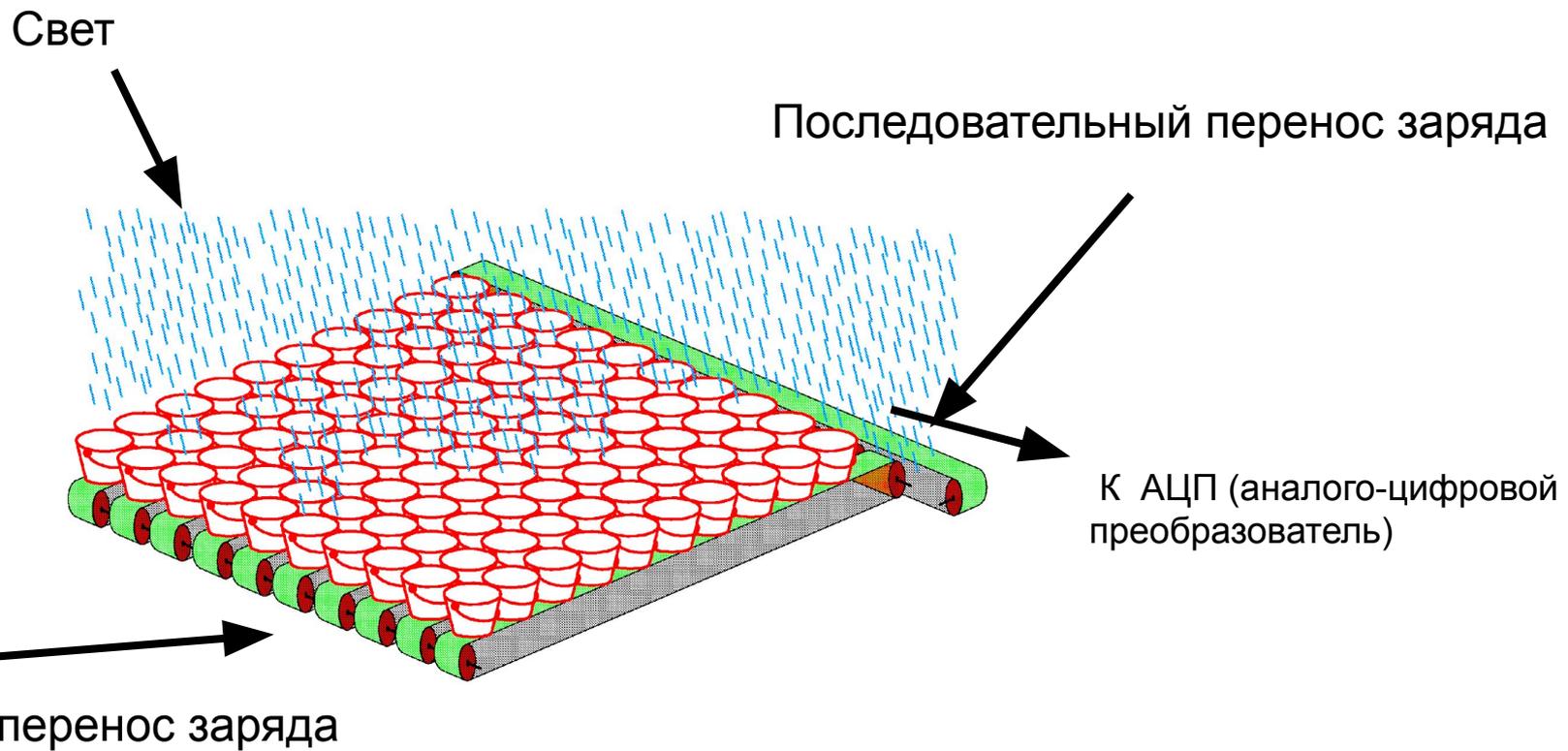


ПЗС-матрица

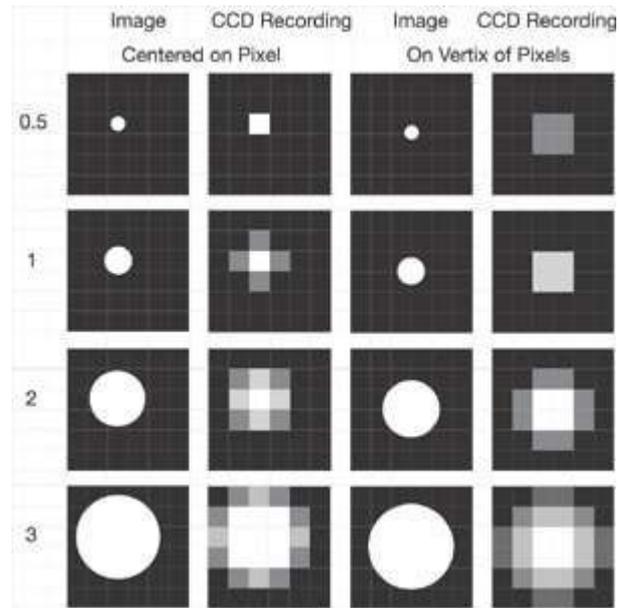
(Уф, оптический диапазон)

- МОП (металл-оксид-полупроводник) или МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структура
- Напряжение на электроде создает потенциальную яму в кремневой пластине
- Фотон выбивает в металле электрон (фотоэффект)
- Электрон захватывается в потенциальную яму
- Электроны накапливаются
- Управляющие сигналы переправляют электроны на выход
- Оцифровка сигнала





Размеры пикселей



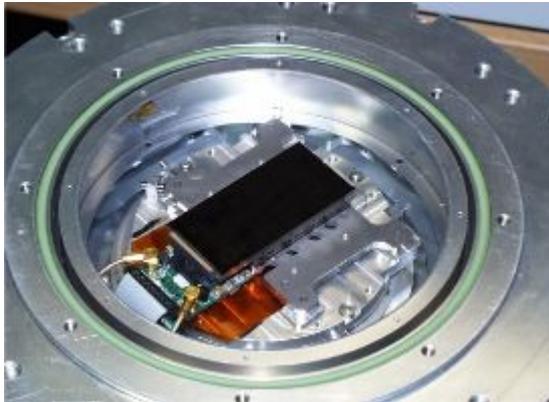
10 ... 30 микрон

Размеры ПЗС

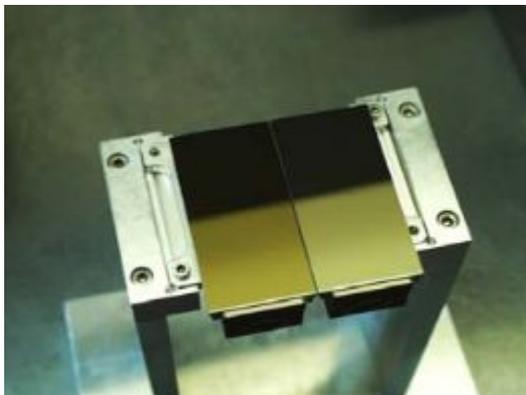
512x512 pix ... 4k x 4k

0.5 ... ~6 см

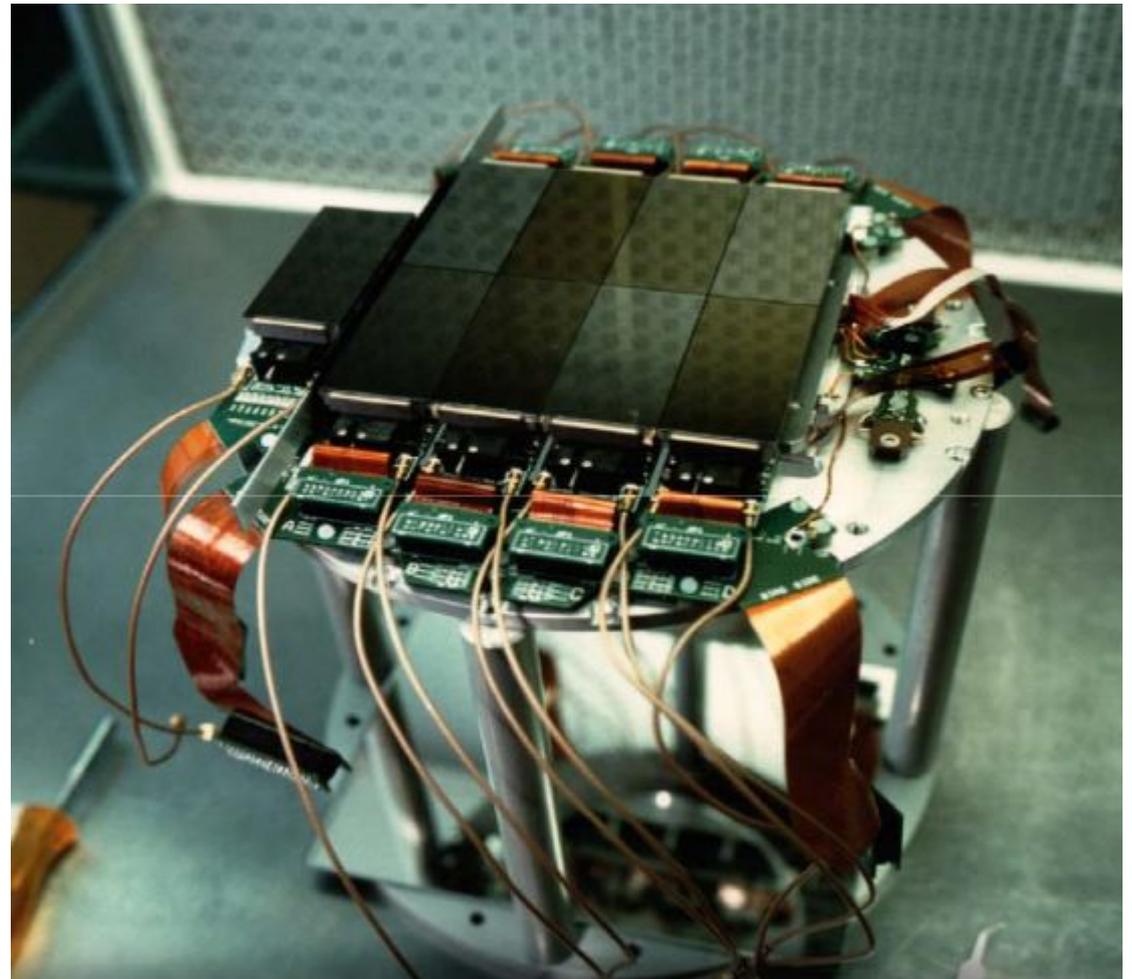
ПЗС матрица 4к x 2к

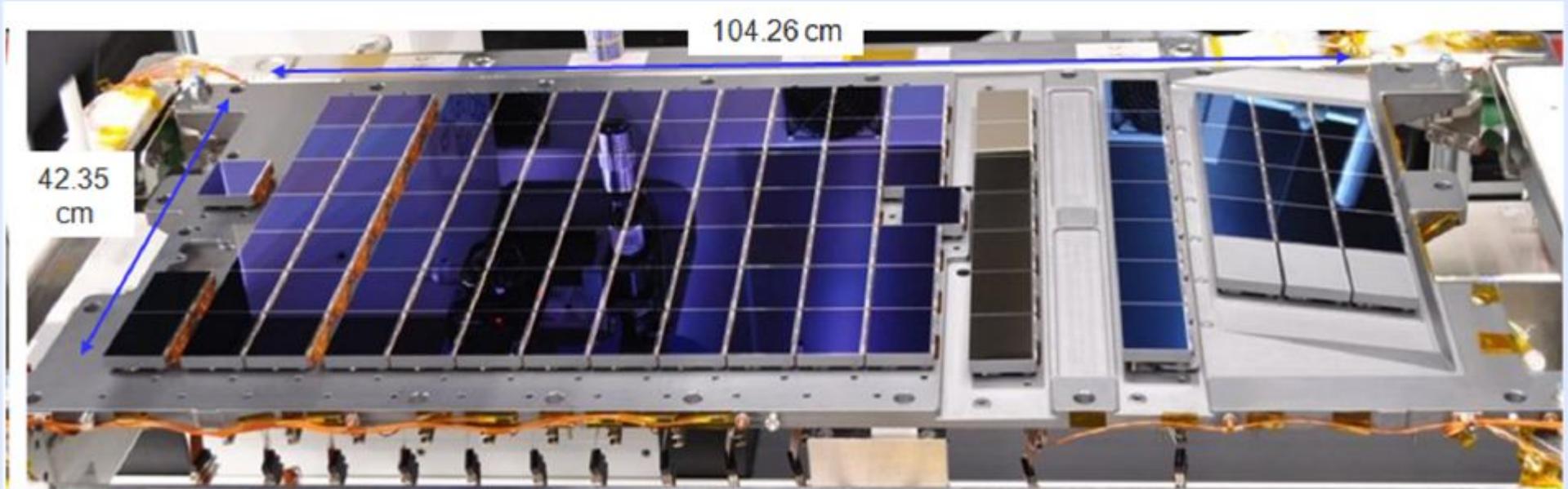
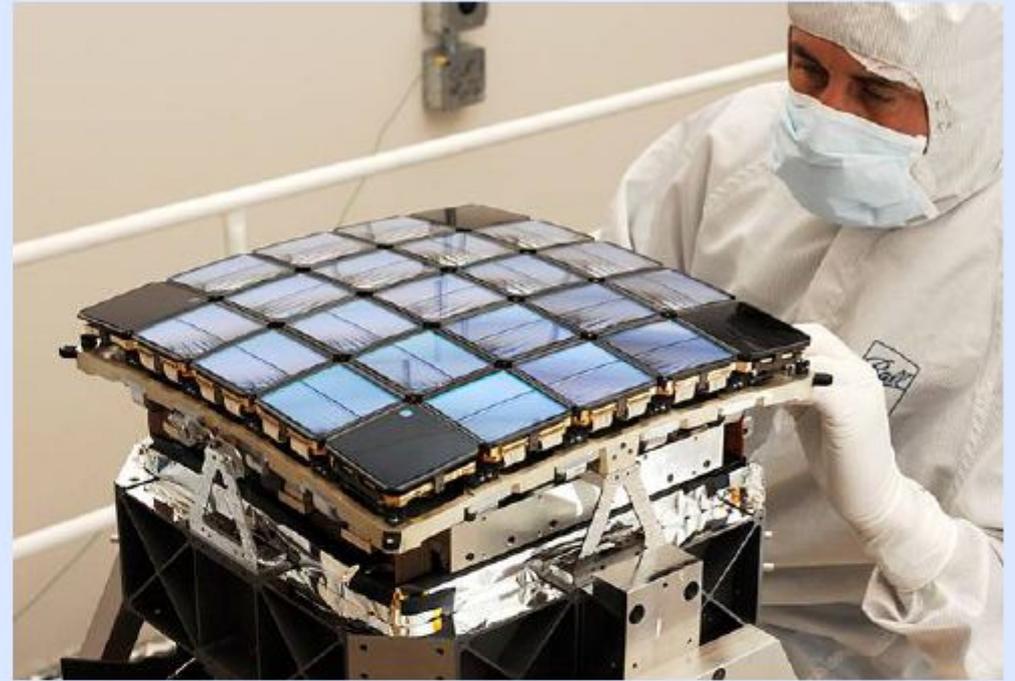
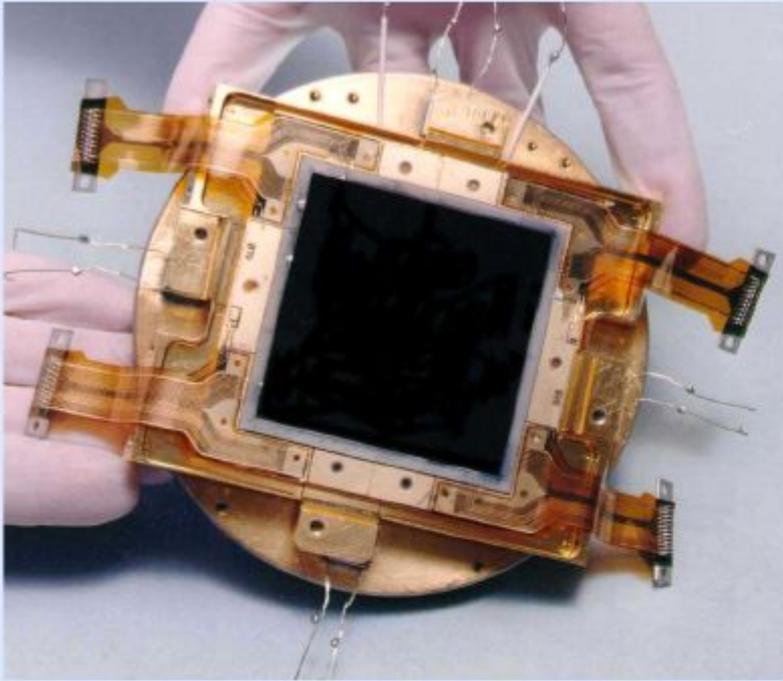


Мозайка из двух ПЗС матриц 4к x 2к



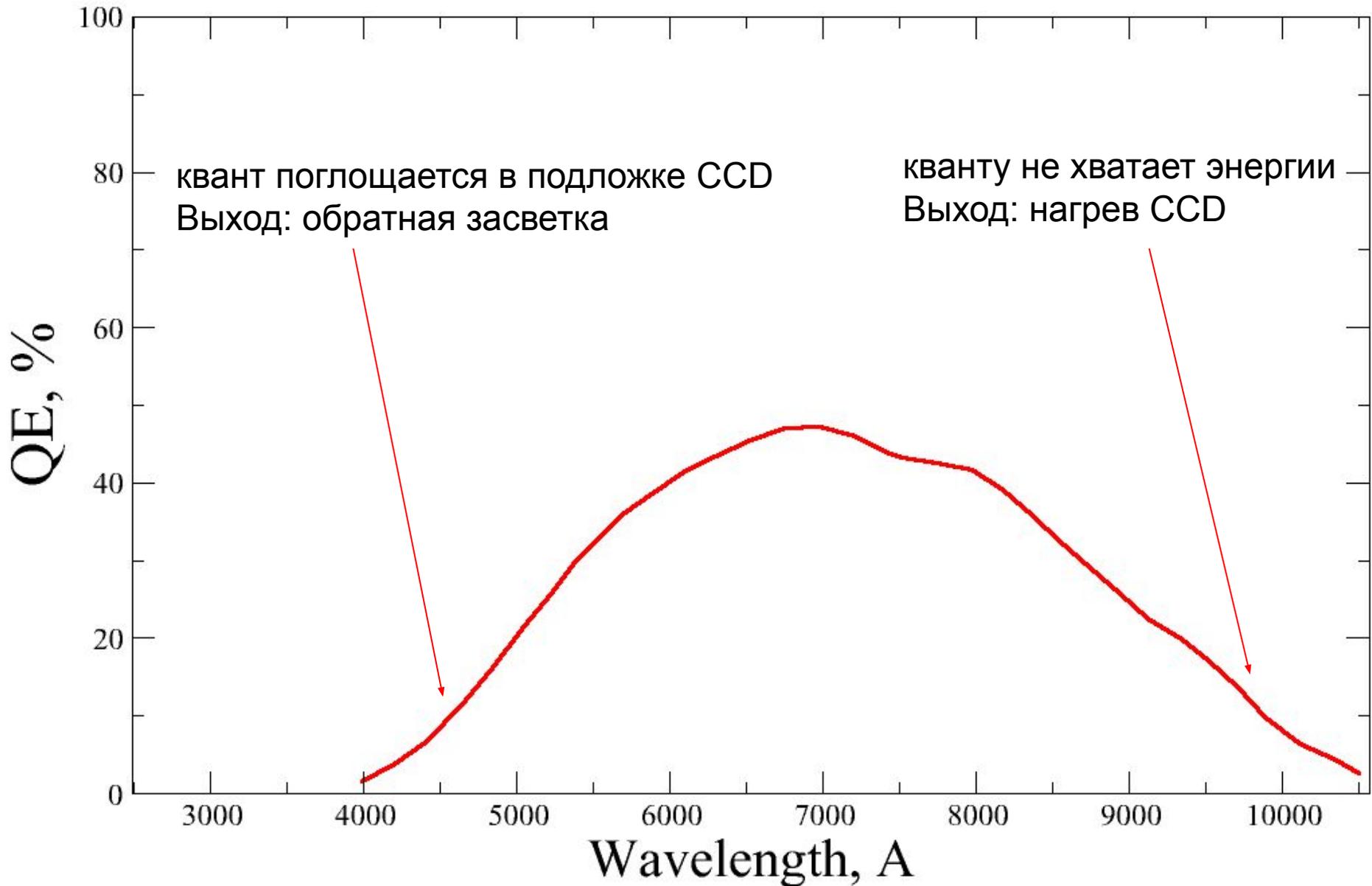
Мозайка из восьми ПЗС матриц 4к x 2к
ESO NTT телескоп, камера WFI
(Wide Field Imager)



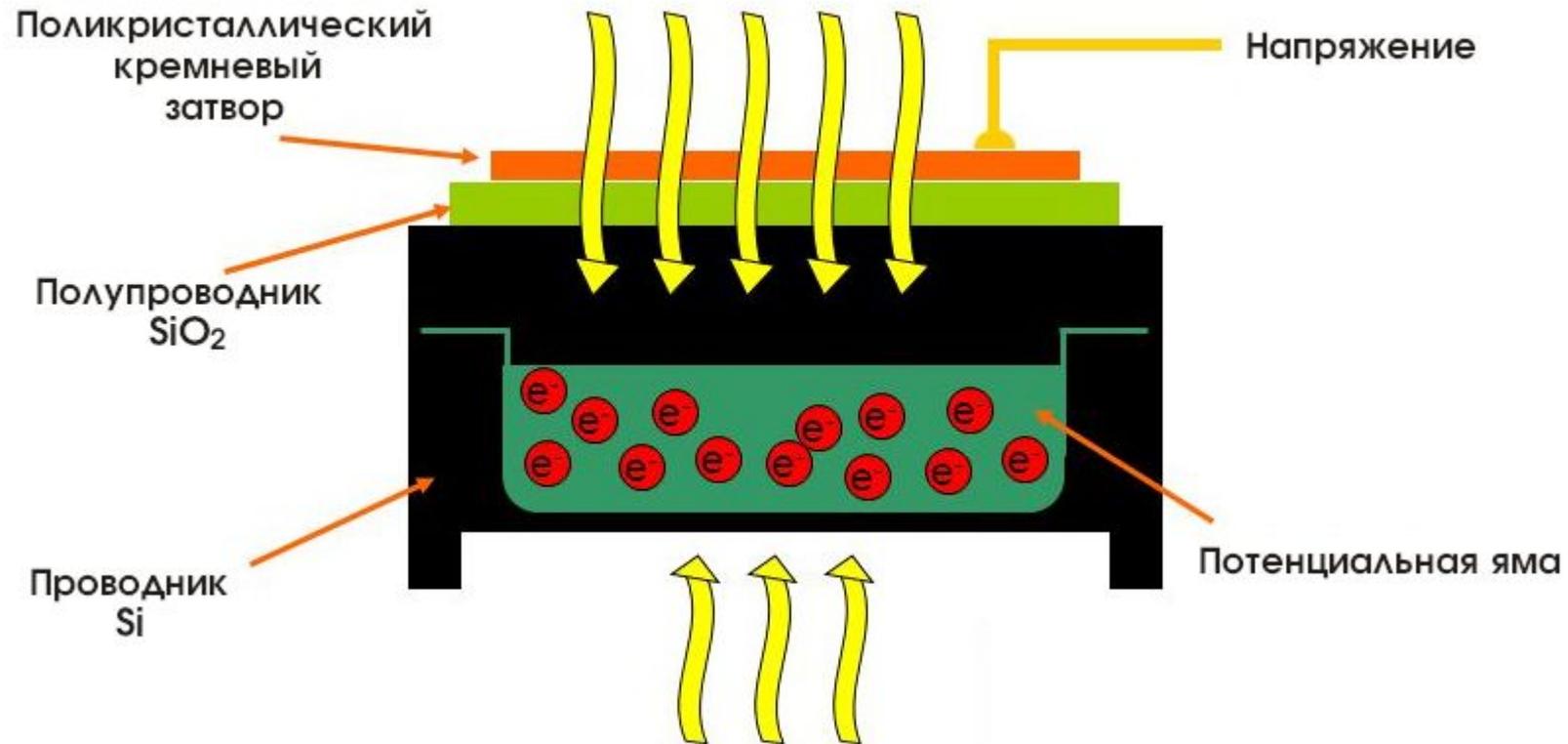


Квантовая эффективность

(световая чувствительность)

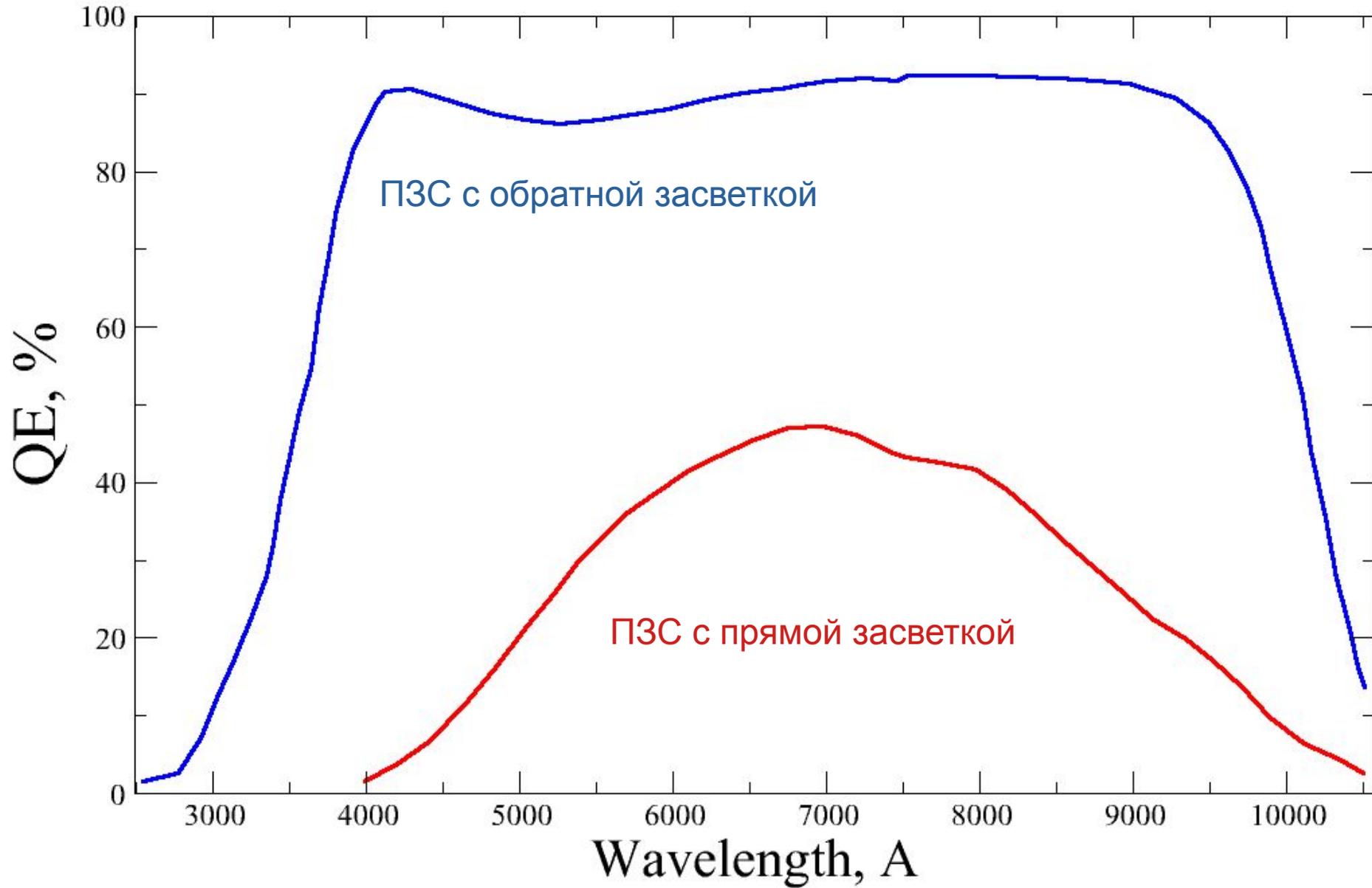


Прямая засветка



Обратная засветка

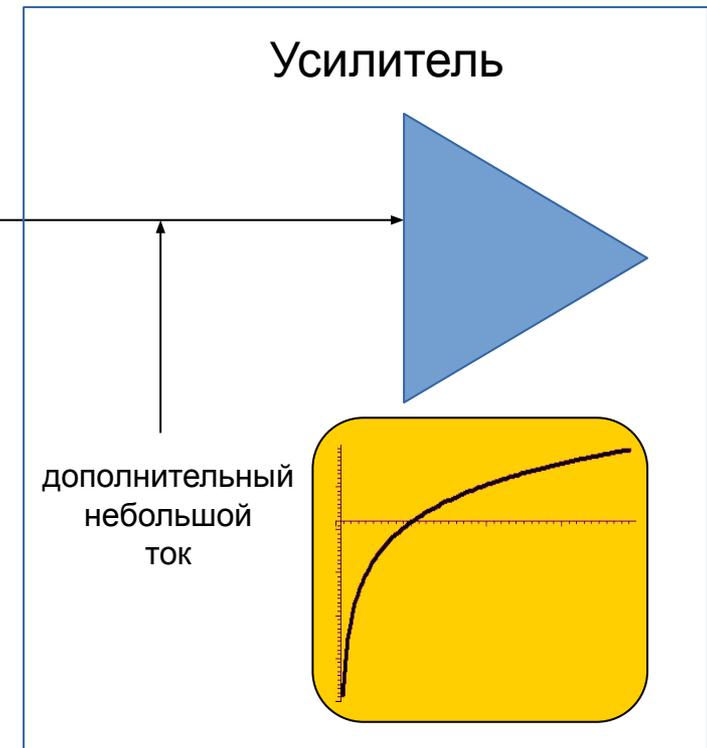
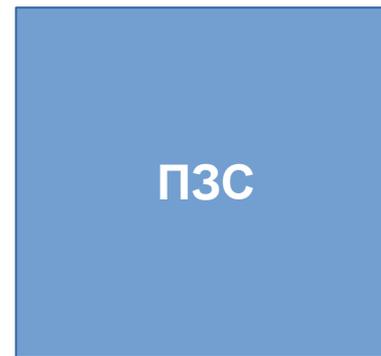
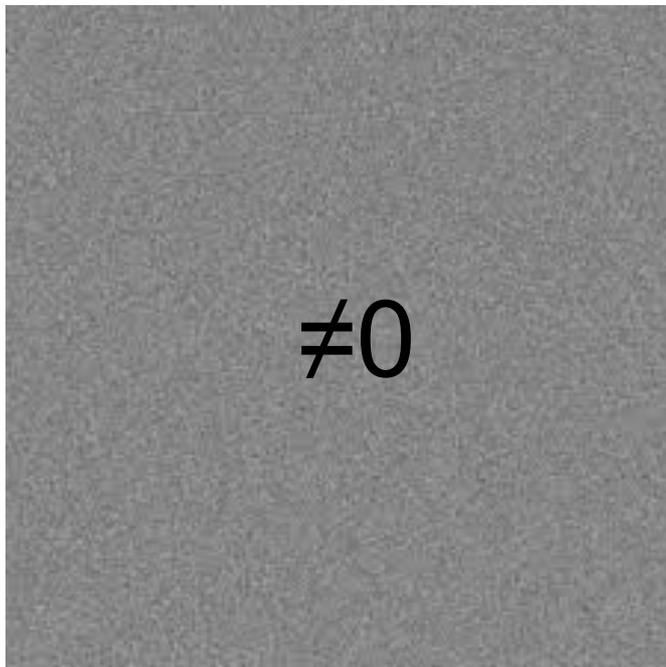
Квантовая эффективность



Усиление сигнала

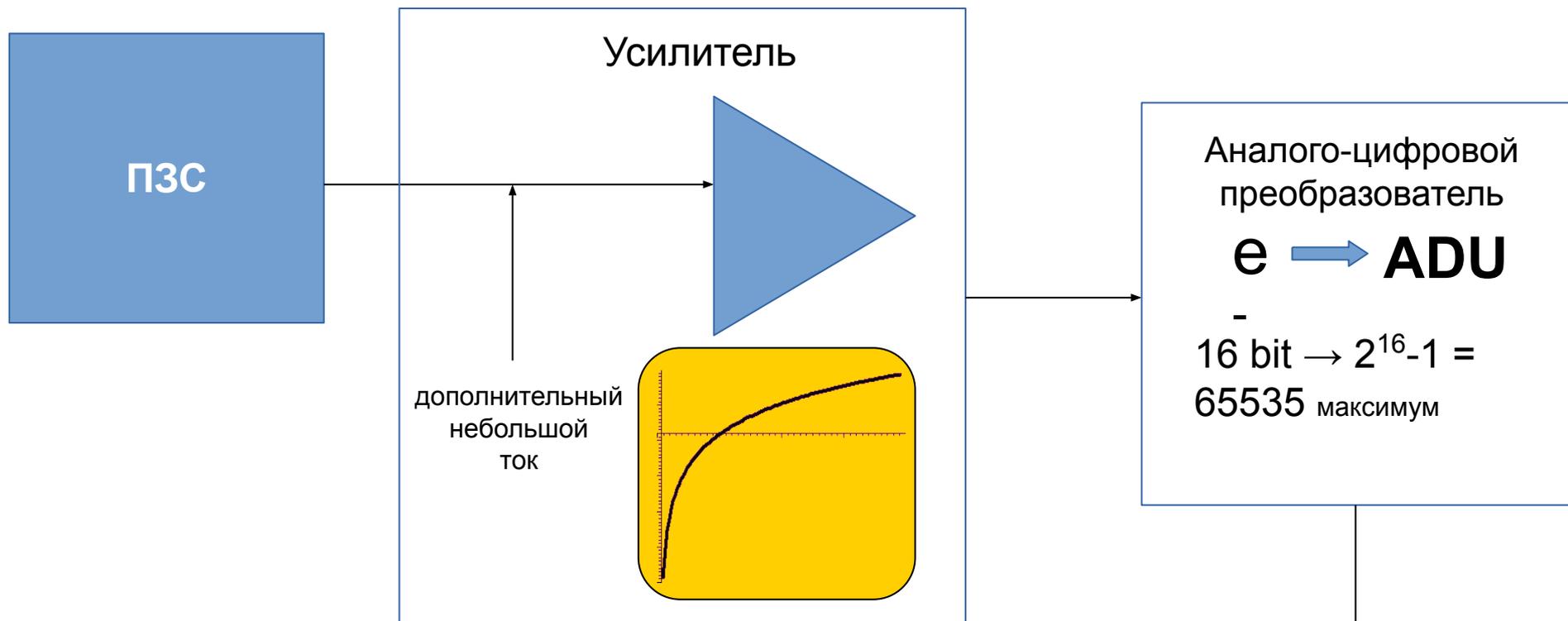
BIAS (сдвиг)

Присутствует на всех кадрах



Усиление сигнала

GAIN



$$[\text{GAIN}] = \text{ADU}/e^-$$

Analog-to-digital unit

$$\text{Inverse GAIN} = 1/\text{GAIN} \rightarrow e^-/\text{ADU}$$



Binning (виртуальные пиксели)

1000 пикселей



1000 пикселей

1k x 1k



Изображение 1000x1000 pix

При слабом сигнале и при использовании небольшого разрешения есть возможность виртуальные пиксели

Binning Options	Combined pixels on the CCD Chip
None	
2 x 2 (4 pixels = 1)	
3 x 3 (9 pixels = 1)	
4 x 4 (16 pixels = 1)	



Изображение 500x500 pix

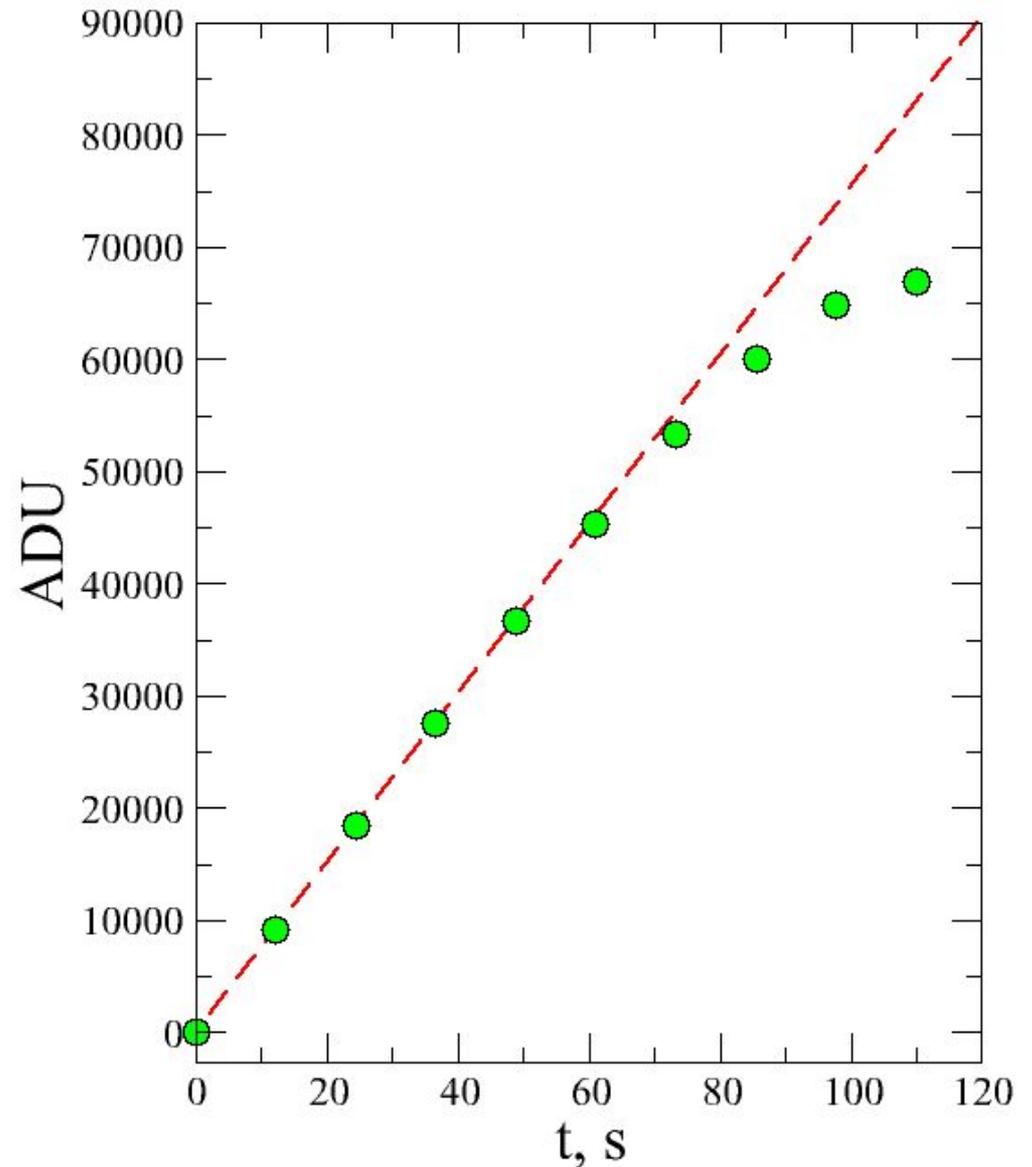


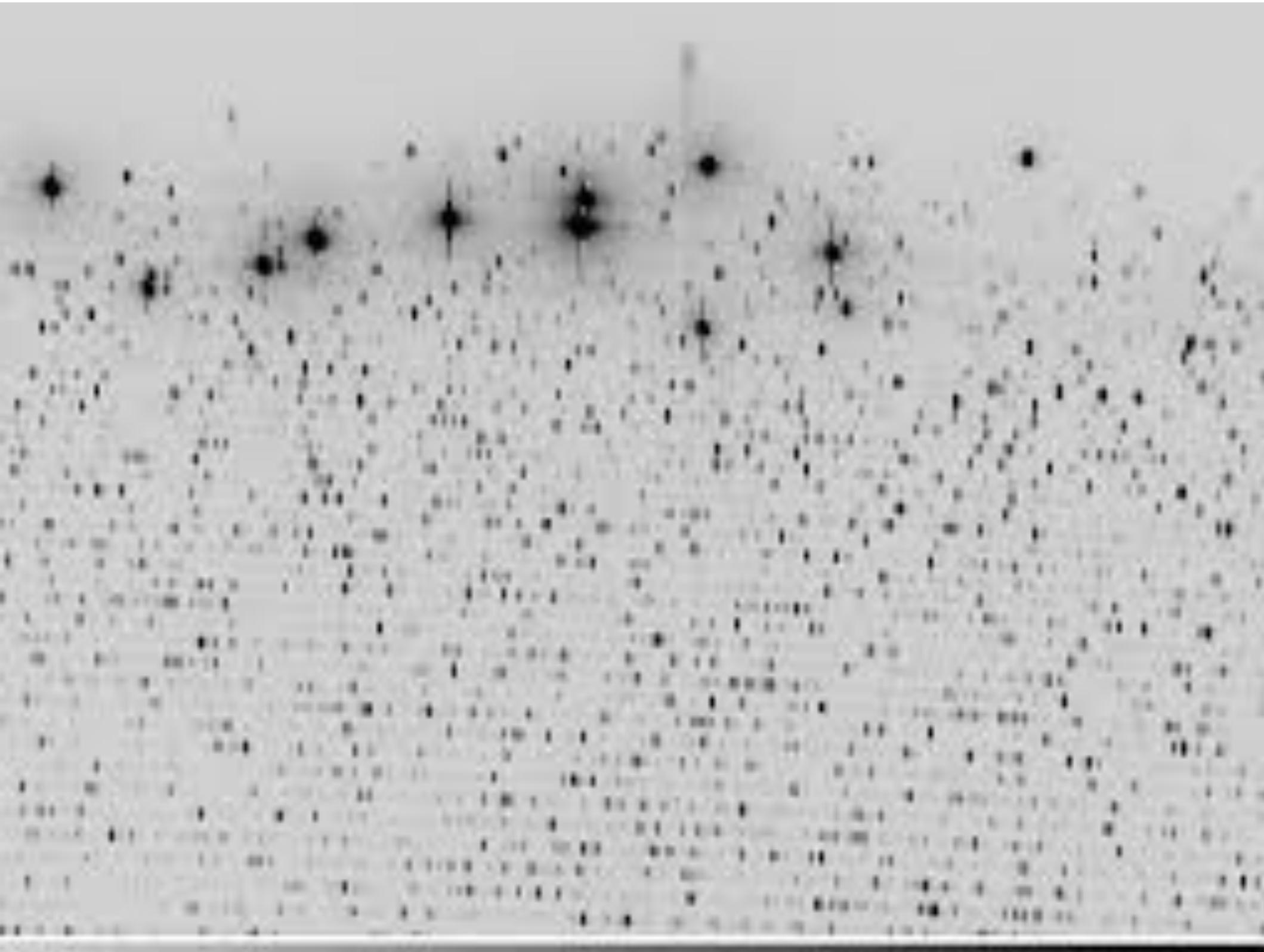
Изображение 250x250 pix

Линейность

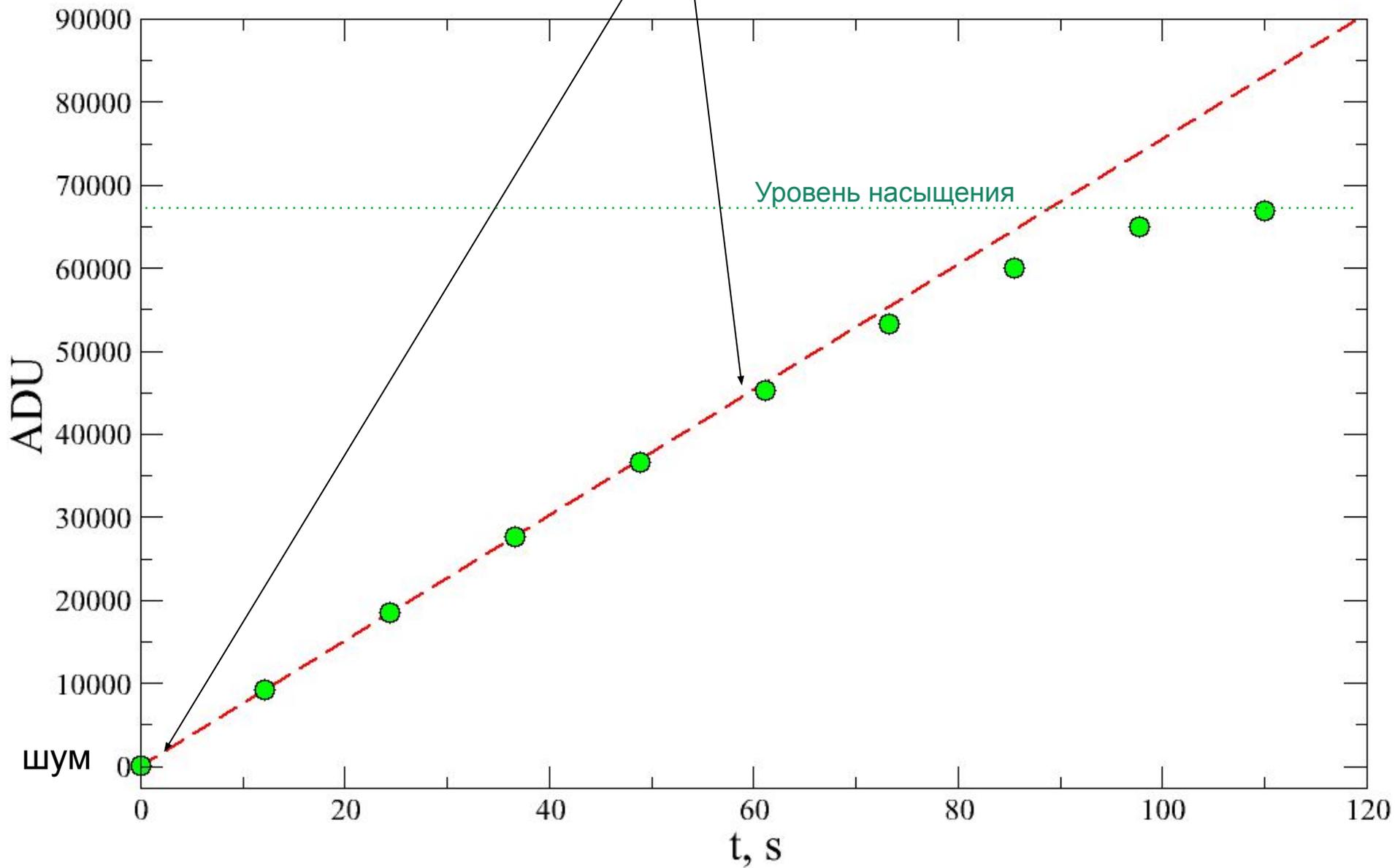
Заполненная ПЗС-матрица - это число электронов, которые могут быть записаны на 1 пиксель (высота энергетического барьера между пикселями).

Типичные величины между $30000e^-$ и $1000000e^-$. Эти значения определяют начало нелинейности ПЗС.



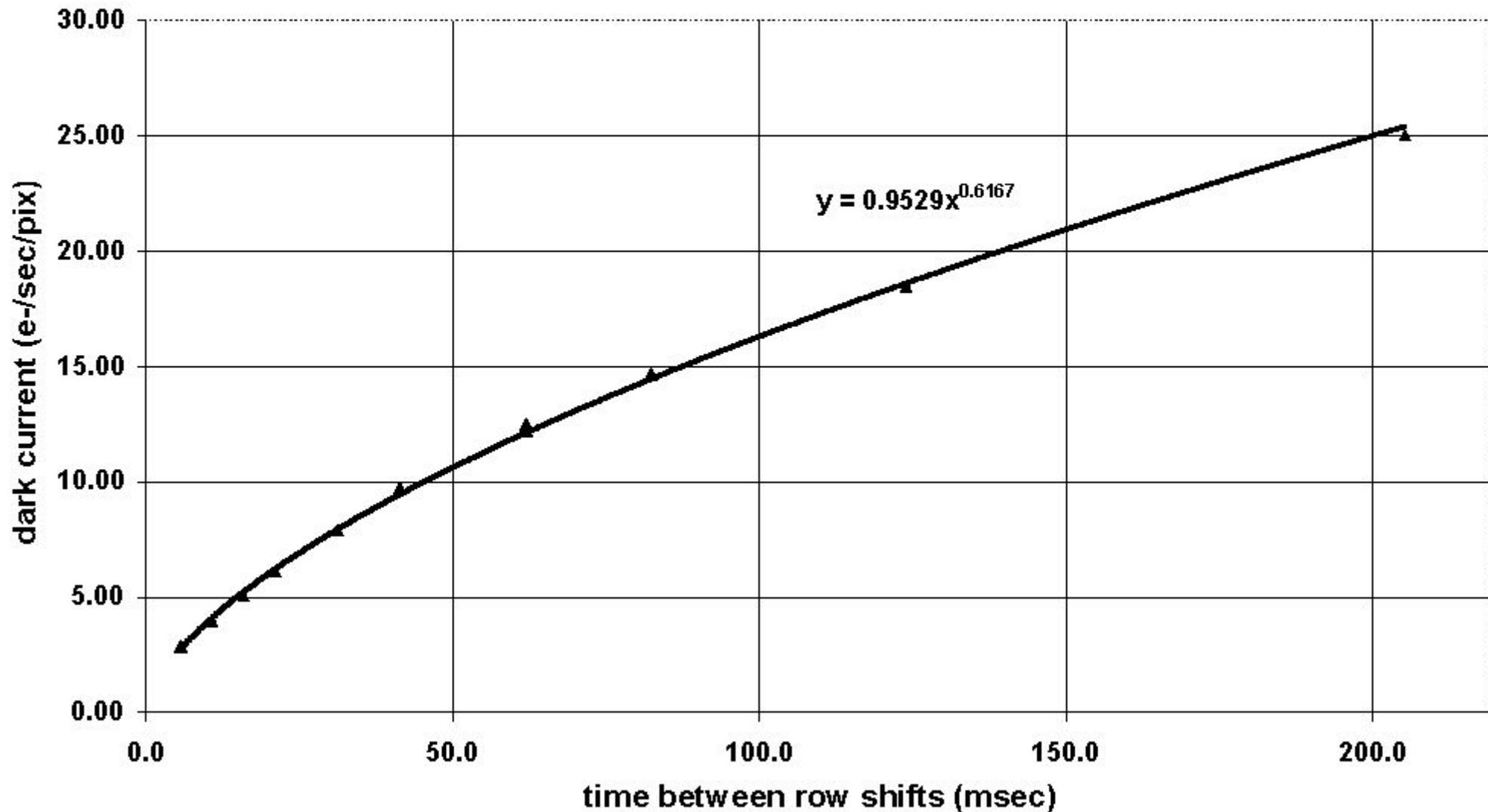


Динамический диапазон



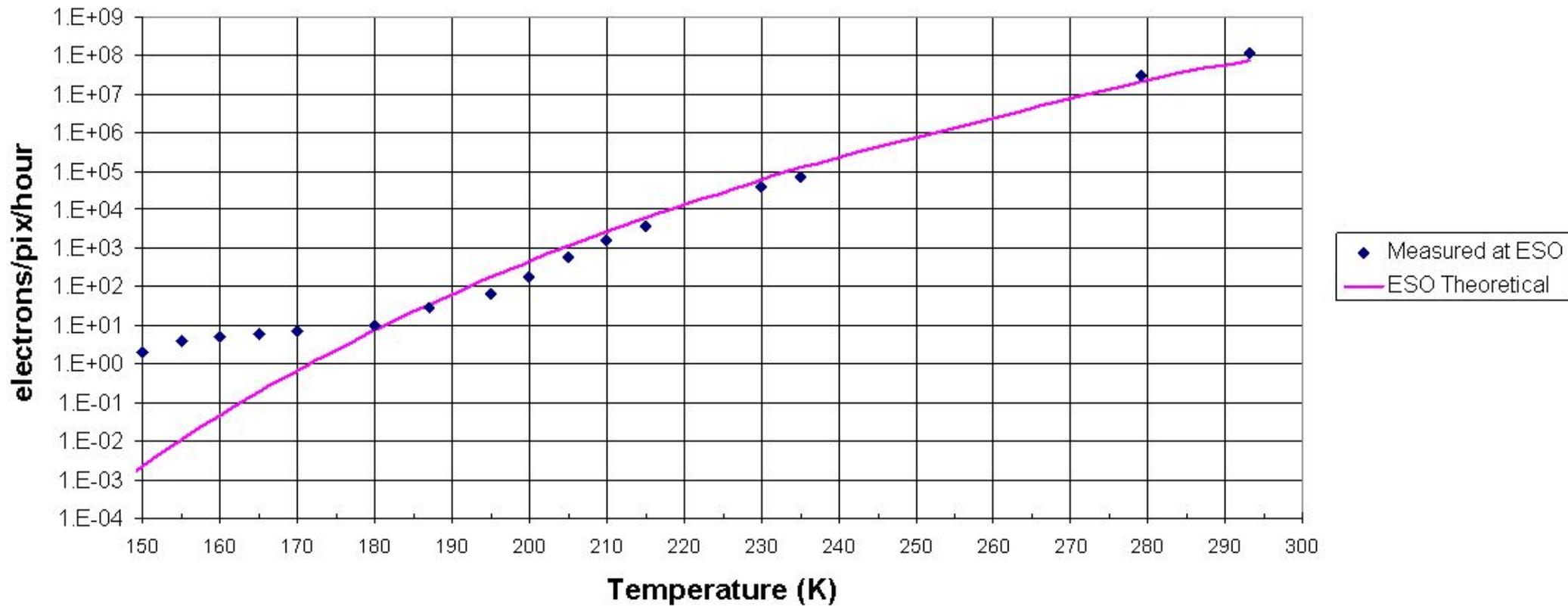
Темновой ток vs время

CCD42-20 NIMO
TDI dark current @-30C



Темновой ток vs температура

Dark Current vs Temp



Учет темнового тока

1. Время экспозиции =
времени съемки

2. **большая трата времени**

3. Совсем не учитывать
из-за малой величины

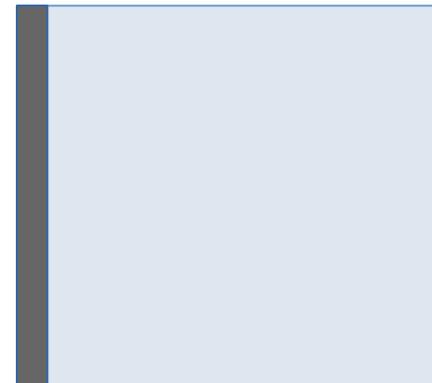
4. **нельзя для слабых
объектов**

2. Время экспозиции \ll
времени съемки

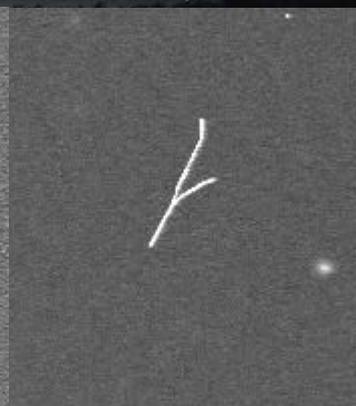
1. **ошибки учета**

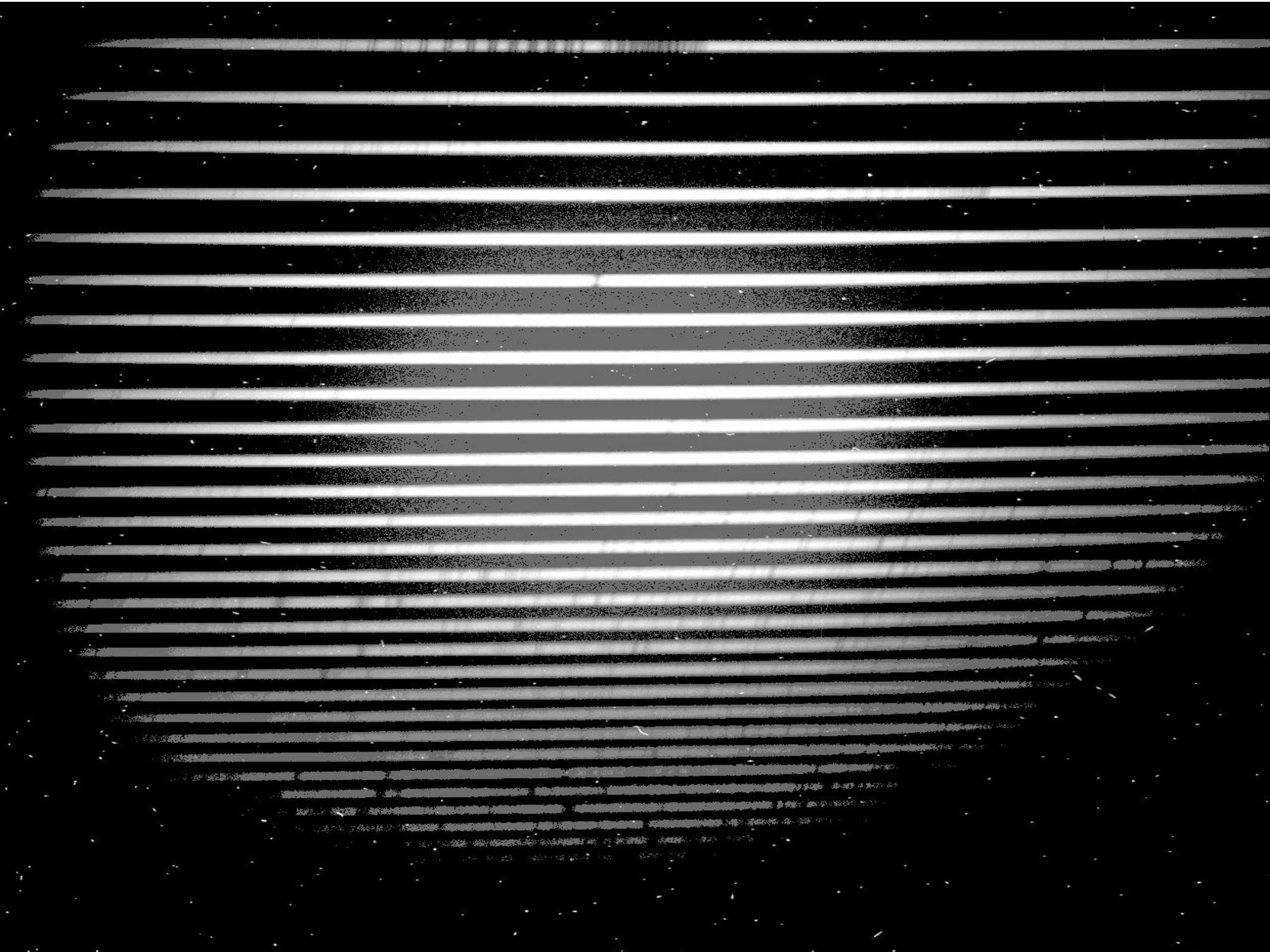
4. Одновременная съемка
объекта и регистрация
уровня темнового тока

5. **зависит от однородности
ПЗС**



Космические лучи





Плоское поле

неоднородность чувствительности ПЗС

- 1) крупномасштабная
- 2) пиксельная
 - горячие и холодные пиксели

Спектральная неоднородность чувствительности

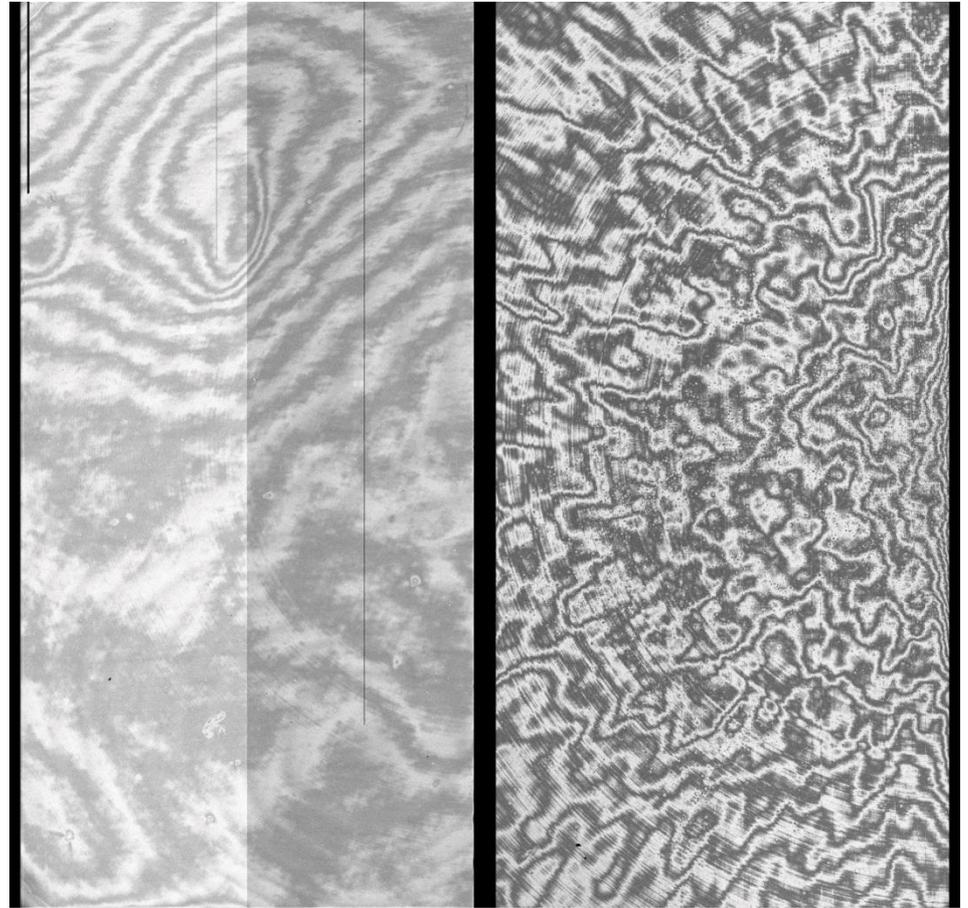
- 1) в белом свете
- 2) монохромная

Интерференционные полосы

$\lambda=650$ nm

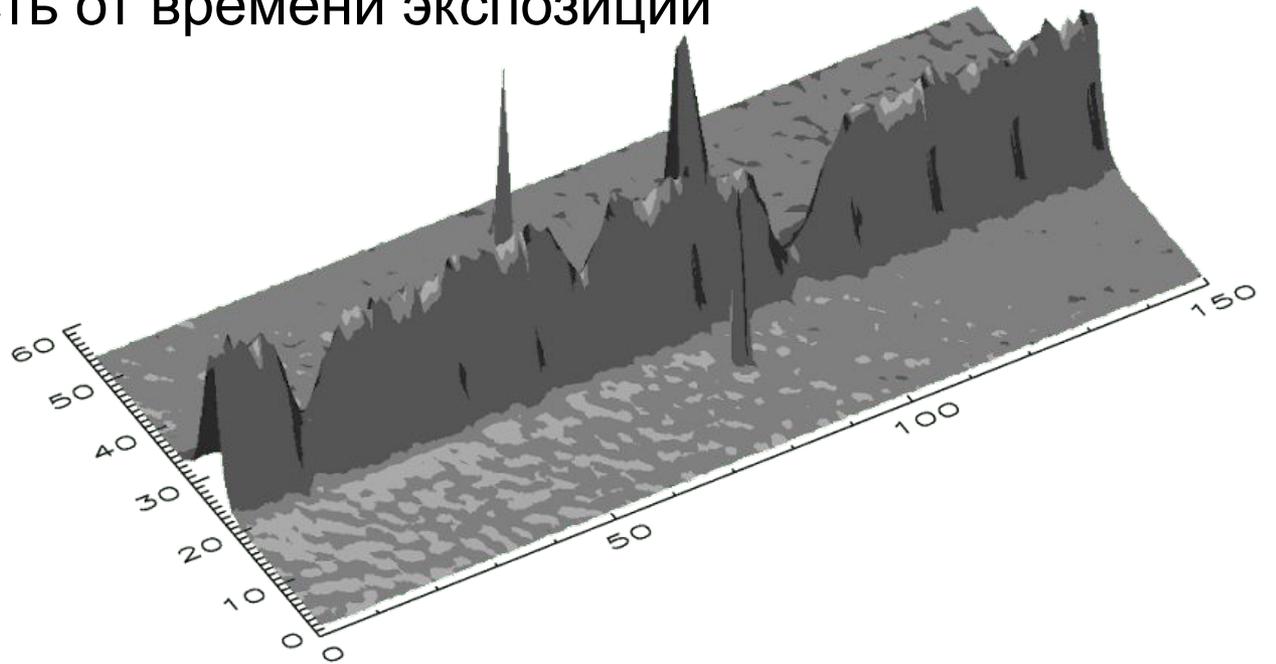


$\lambda=900$ nm

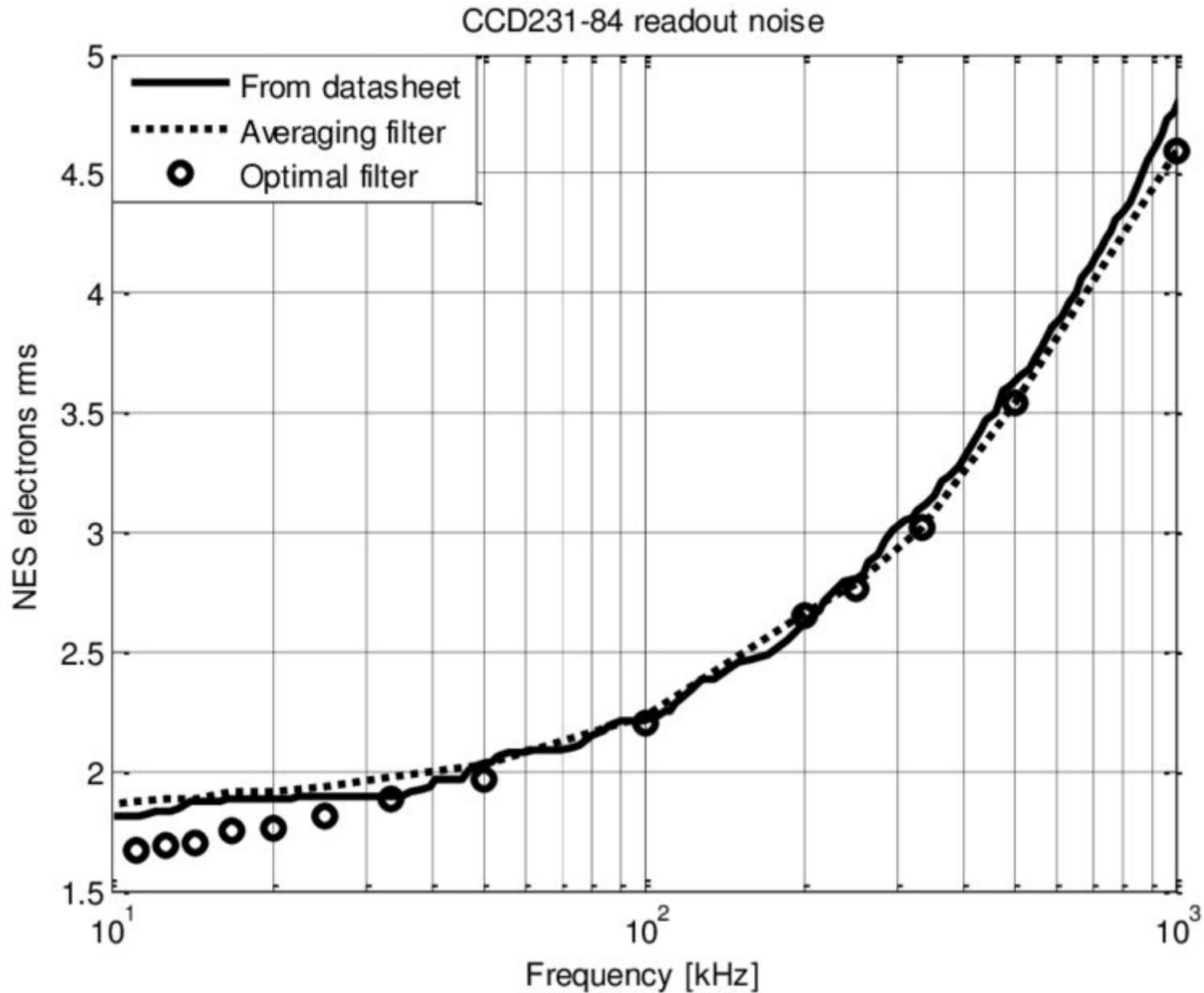


Шум

- Статистический шум (Распределение Пуассона $\sigma \approx \sqrt{N}$)
- Шум темнового тока пропорционален времени, зависит от температуры
- Шум считывания (RON - readout noise) зависит от температуры, скорости (частоты) считывания и используемого усилителя
- Космические лучи разрушают содержимое нескольких пикселей, зависимость от времени экспозиции



Частота считывания



TYPICAL PERFORMANCE

(Low noise mode)

Maximum readout frequency	3 MHz
Output amplifier responsivity	4.5 $\mu\text{V}/e^-$
Peak signal	100 ke^-/pixel
Dynamic range @ 20 kHz	33,333:1
Spectral range	200 – 1060 nm
Readout noise @ 20 kHz	3 e^- rms

GENERAL DATA

Format

Image area	27.6 x 27.6 mm
Active pixels	2048 (H) x 2048+4 (V)
Pixel size	13.5 x 13.5 μm
Number of output amplifiers	2
Number of underscan (serial) pixels	50
Fill factor	100%

Package

Package size	37.0 x 51.7 mm
Number of pins	24
Inter-pin spacing	2.54 mm
Inter-row spacing	45.72 mm
Window material	Removable glass
Package type	Ceramic DIL array

PERFORMANCE

		Min	Typical	Max	Units	Note
Peak charge storage		80,000	100,000		e^-/pixel	1
Peak output voltage (unbinned)			450		mV	
Dark signal at 293 K			250	500	$e^-/\text{pixel/s}$	2, 3
Dynamic range			33,333:1			4
Charge transfer efficiency	Parallel	99.999	99.9999	-	%	5
	Serial	99.999	99.9993	-	%	
Output amplifier responsivity	Low noise mode	3	4.5	6	$\mu\text{V}/e^-$	3
	High signal mode		1.5			
Readout noise at 253 K	Low noise mode		3.0	4.5	rms e^-/pixel	3, 6
	High signal mode		6.0		rms e^-/pixel	
Maximum readout frequency			20	3000	kHz	7
Dark signal non-uniformity at 293 K (std. deviation)			60	125	$e^-/\text{pixel/s}$	3, 8
Output node capacity			1,000,000		e^-	9

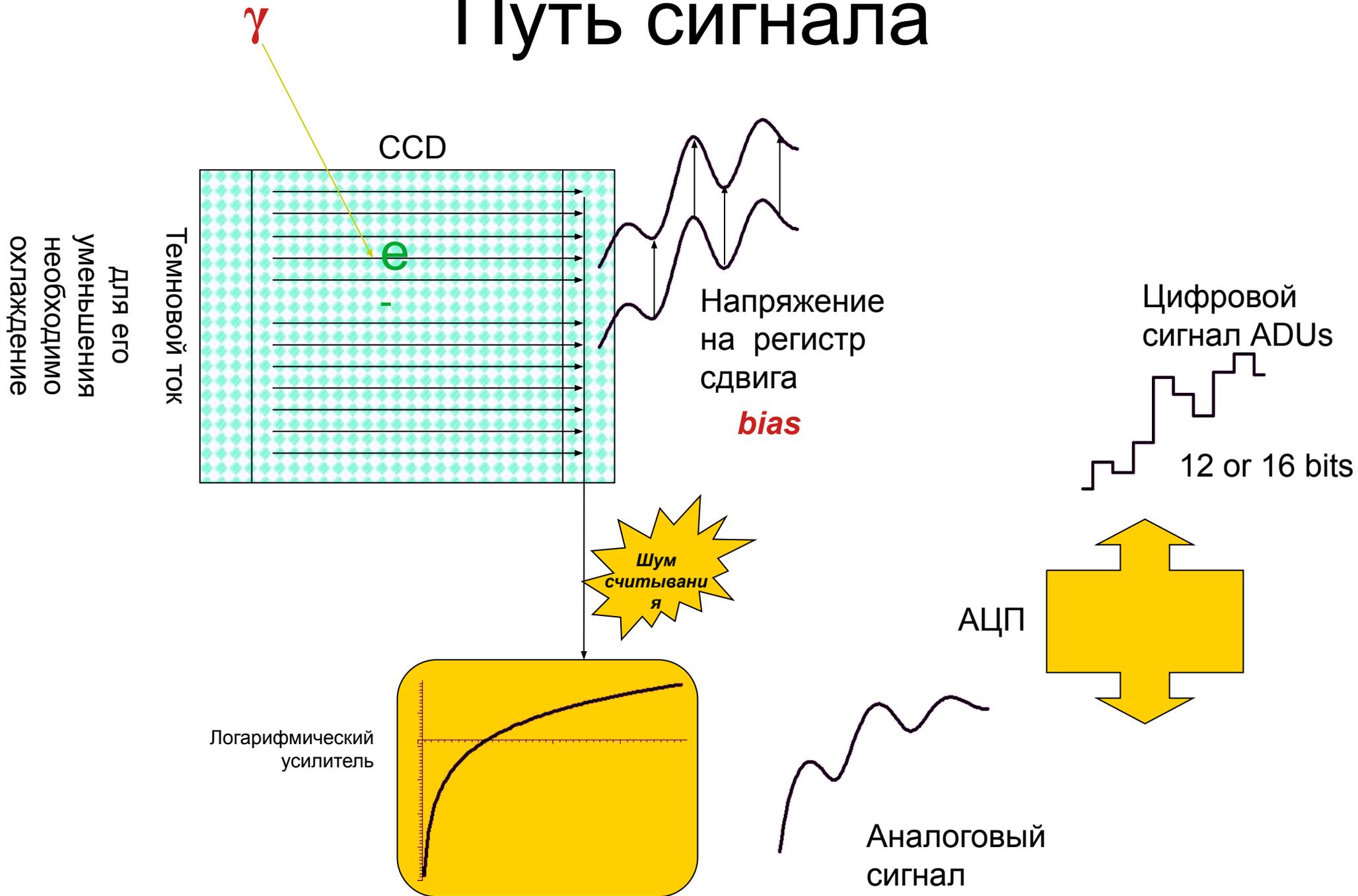
TEMPERATURE LIMITS

	Min	Typical	Max	
Storage.....	153	-	373	K
Operating.....	153	253	323	K

Operation or storage in humid conditions may give rise to ice on the sensor surface on cooling, causing irreversible damage.

Maximum device heating/cooling5 K/min

Путь сигнала



Отношение сигнала к шуму S/N (SNR)

Простейшее приближение ($S \gg N$)

$$N = \sqrt{S}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{S}{\sqrt{S}} = \sqrt{S}$$

$$S = (S_{reg} - bias) \times gain$$

$$\frac{S}{N} = \sqrt{(S_{reg} - bias) \times gain}$$

Для суммы N пикселей

$$\frac{S}{N} = \sqrt{(S_{reg} - bias) \times gain \times N}$$

Отношение сигнала к шуму S/N (SNR)

Общий случай

$$N = \sqrt{(S_{reg} - bias) \times gain + N_{dark} + N_{readout}}$$
$$\frac{S}{N} = \frac{(S_{reg} - bias) \times gain}{\sqrt{(S_{reg} - bias) \times gain + N_{dark} + N_{readout}}}$$

Для времени накопления t и потоке $S'=dS/dt$

$$\frac{S}{N} = \frac{(S'_{reg} - bias) \times gain \times t}{\sqrt{(S'_{reg} - bias) \times gain \times t + N_{dark} \times t + N_{readout}}}$$

Наблюдаемый сигнал

Нестабильность положения разбиение на несколько экспозиций

Нелинейные эффекты разбиение на несколько экспозиций

BIAS и шум съемка bias кадров — с 0ой экспозицией

Шум считывания (RON - readout noise)

Статистический шум увеличение времени экспозиции

Космические лучи (cosmic rays) разбиение на несколько экспозиций

Интерференционные полосы (frings) не ходить туда или flat field

Неоднородность спектральной чувствительности QE съемка flat

Неоднородность чувствительности ПЗС (flat field) съемка flat field

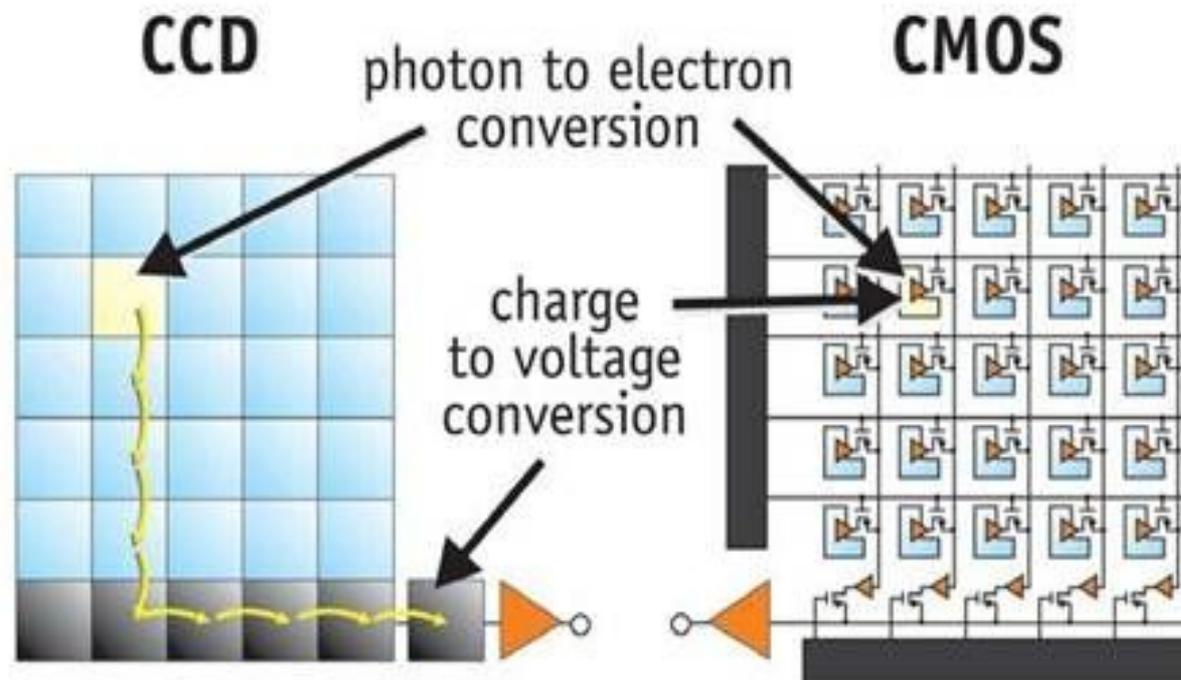
Темновой шум ПЗС (dark) охлаждение равномерно засвеченной области

Посторонний и рассеянный сигнал изменение конструкции

Полезный сигнал

CMOS или КМОП матрица

комплементарная структура металл-оксид-полупроводник





CMOS

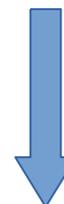


CCD



- Компактность
- Встроенная функциональность
- Радиационная устойчивость (применение в космосе)
- Встроенный электронный затвор
- Отсутствие переноса заряда и проблем
- Возможность работы в ИК
- Высокая скорость считывания (использование для видео)

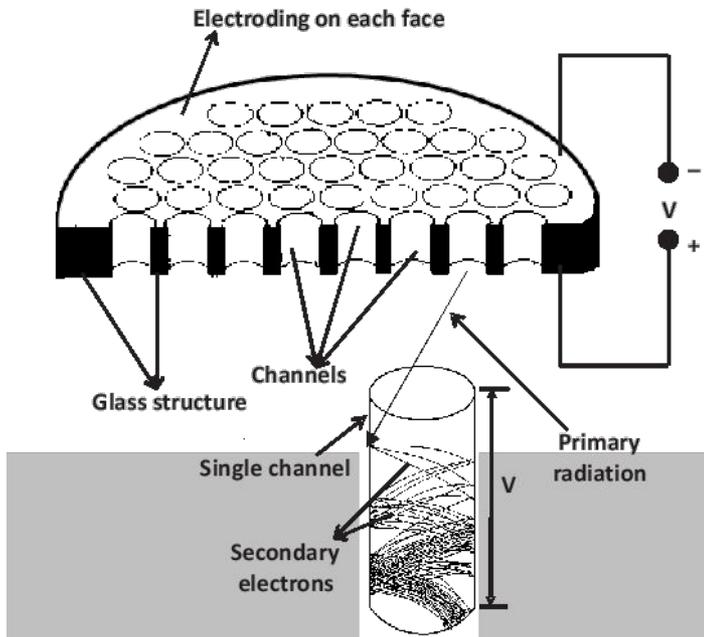
- Емкость накопления сигнала
- Динамический диапазон
- Высокая линейность
- Высокая точность
- Работа при низких температурах
- Высокая квантовая эффективность при обратной засветке



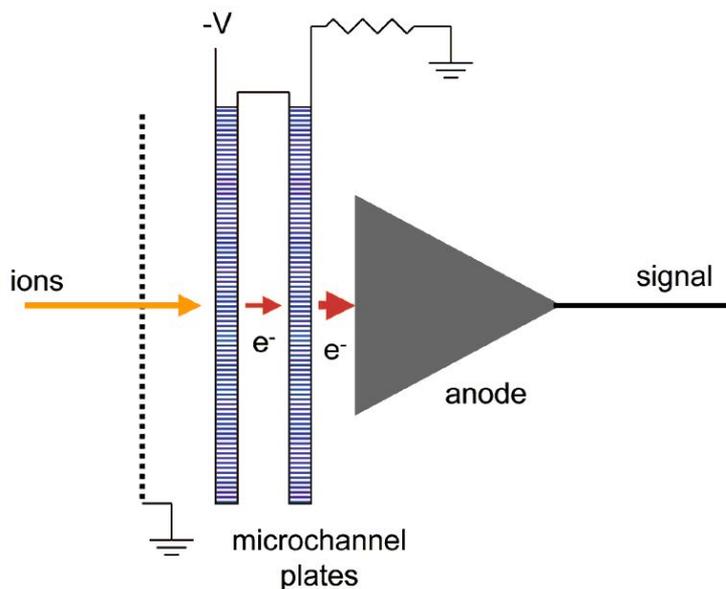
Использование в астрономии

Ультрафиолетовый приемник

Микроканальная пластина



- Фотон выбивает электрон или жесткий фотон ионизирует чувствительный слой
- Электрон или ион сталкивается с первой поверхностью и выбивает вторичные электроны
- Электроны разгоняются в электрическом поле и выбивают еще электроны → принцип фотоумножителя
- Усиленный сигнал регистрируется как событие на конкретной ячейке
- Координатное представление изображения



(x,y)
(10,12)
(23,156)
(78,34)
(56,23)

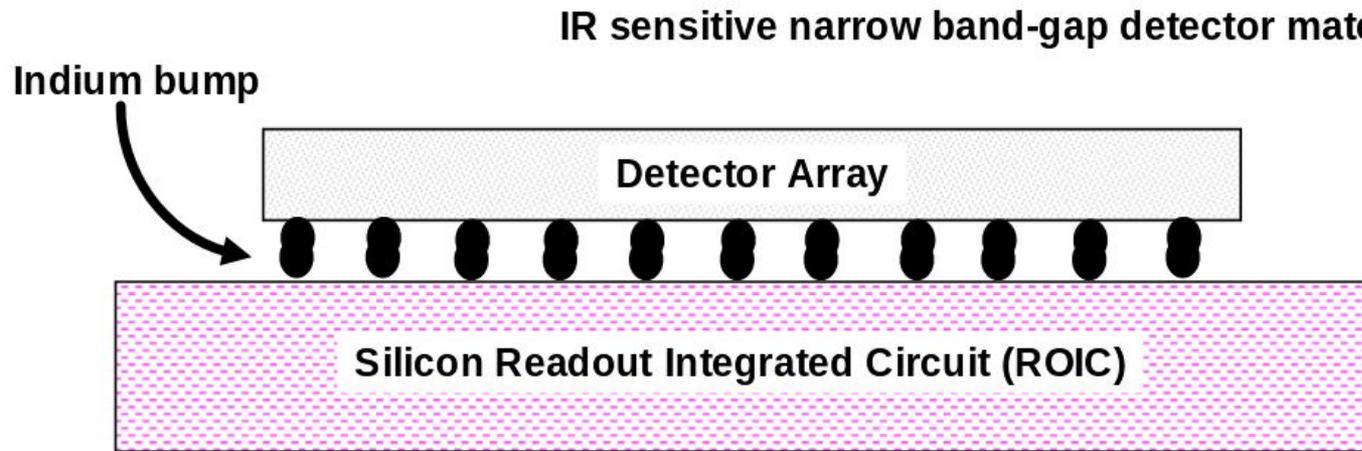
Микроканальная пластина



Инфракрасные приемники

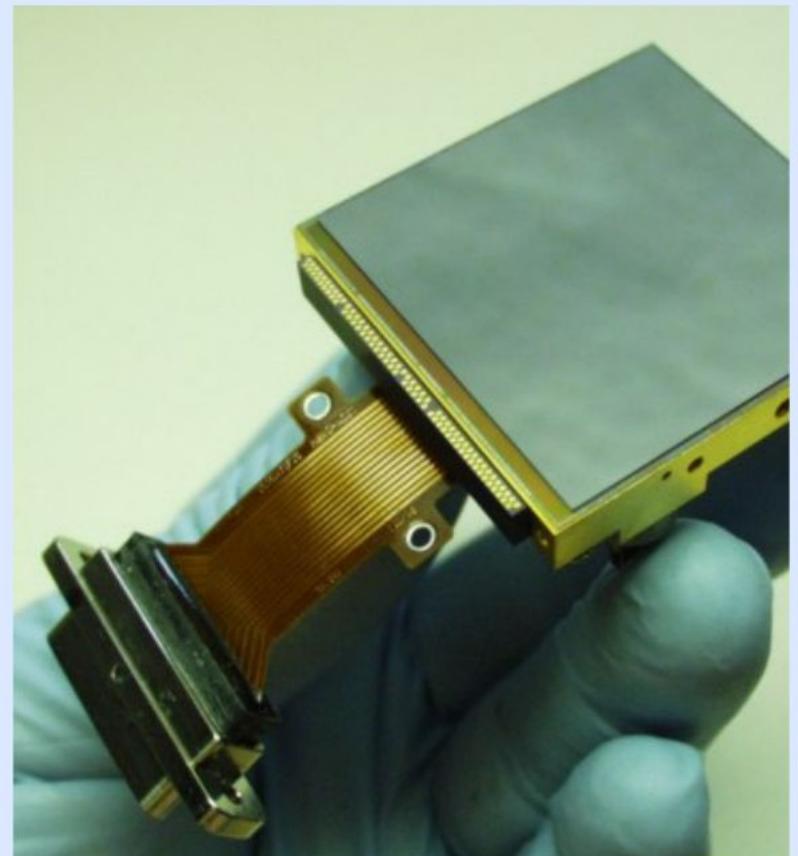
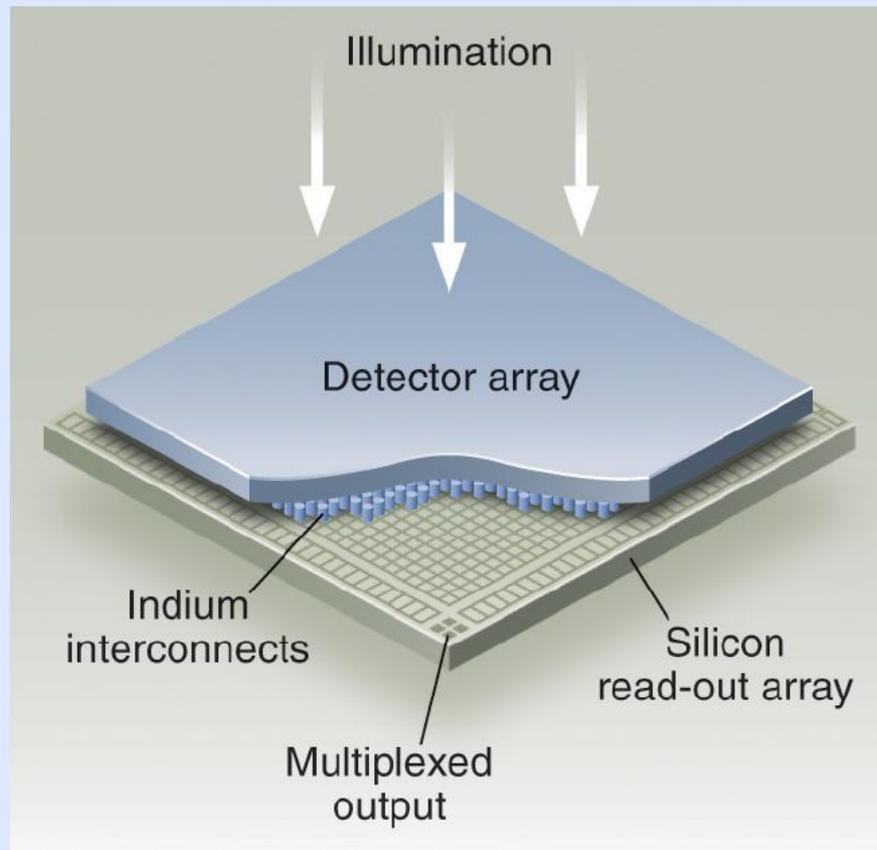
Из-за красной границы фотоэффекта ПЗС на основе кремневой пластины не могут работать в ИК на длинах волн $> 1\text{ мкм}$ (10000 \AA)

→ замена на более светочувствительные соединения InSb, HgCdTe, Si:As, ...

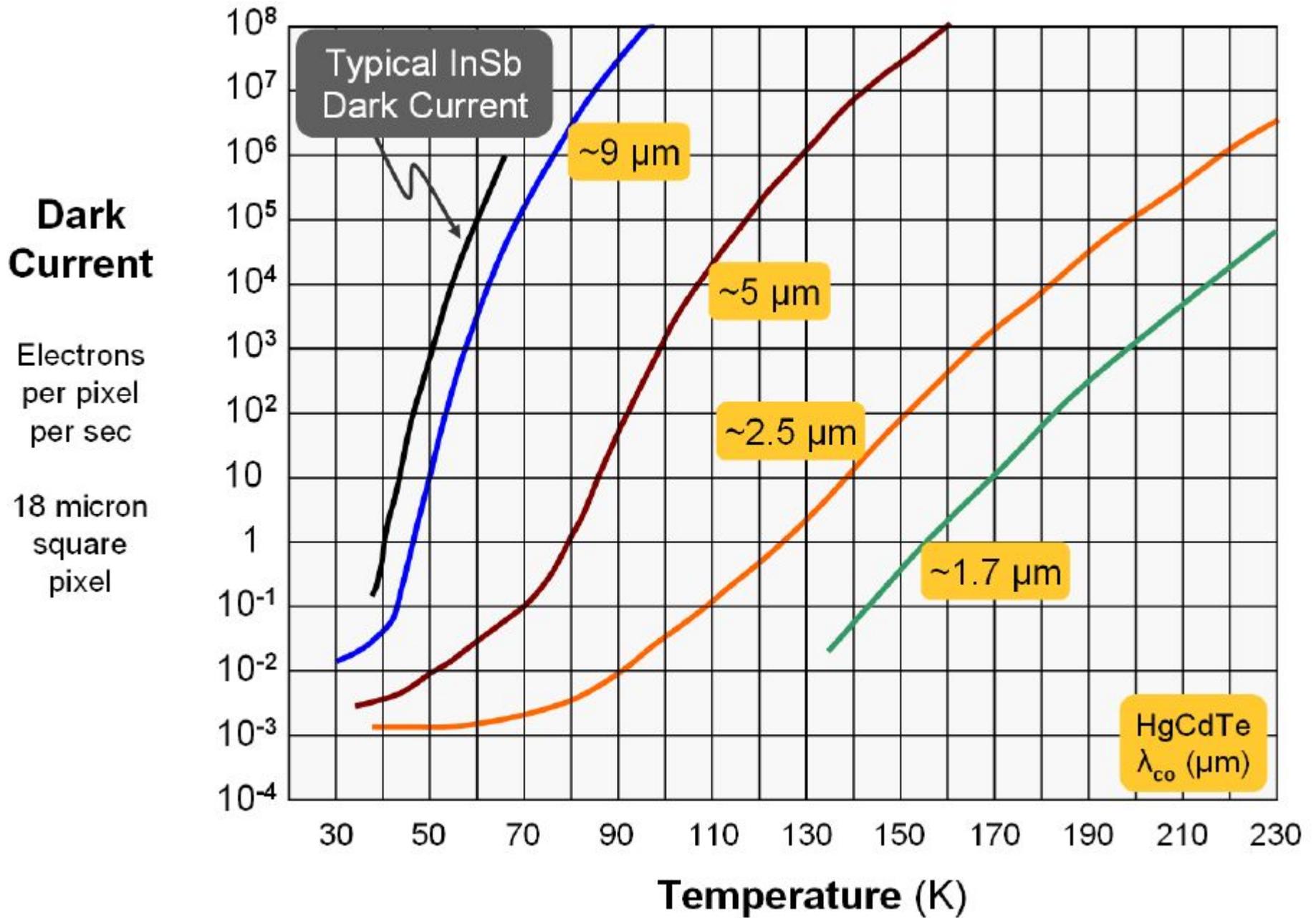


- CMOS КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) структура
- Фотон выбивает в чувствительном слое электрон (фотоэффект)
- Электрон переходит в кремниевую пластину
- Электроны накапливаются
- Управляющие сигналы переправляют электроны на выход
- Оцифровка сигнала

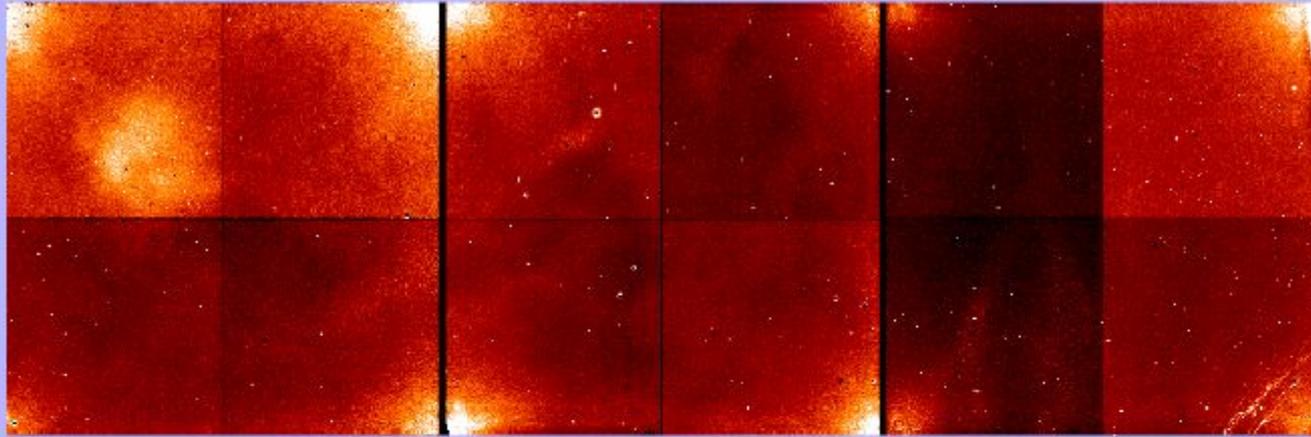
HgCdTe IR детектор



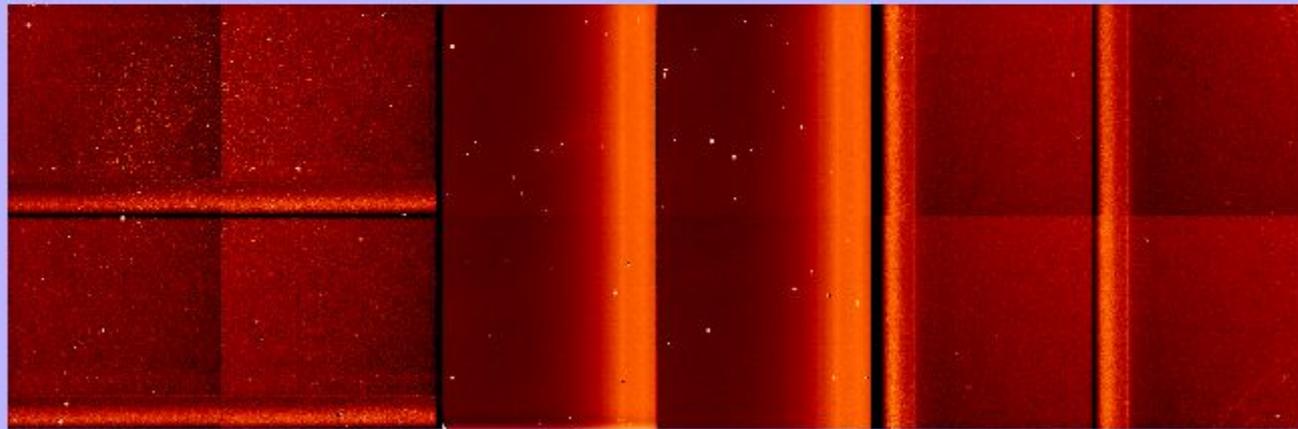
Темновой ток



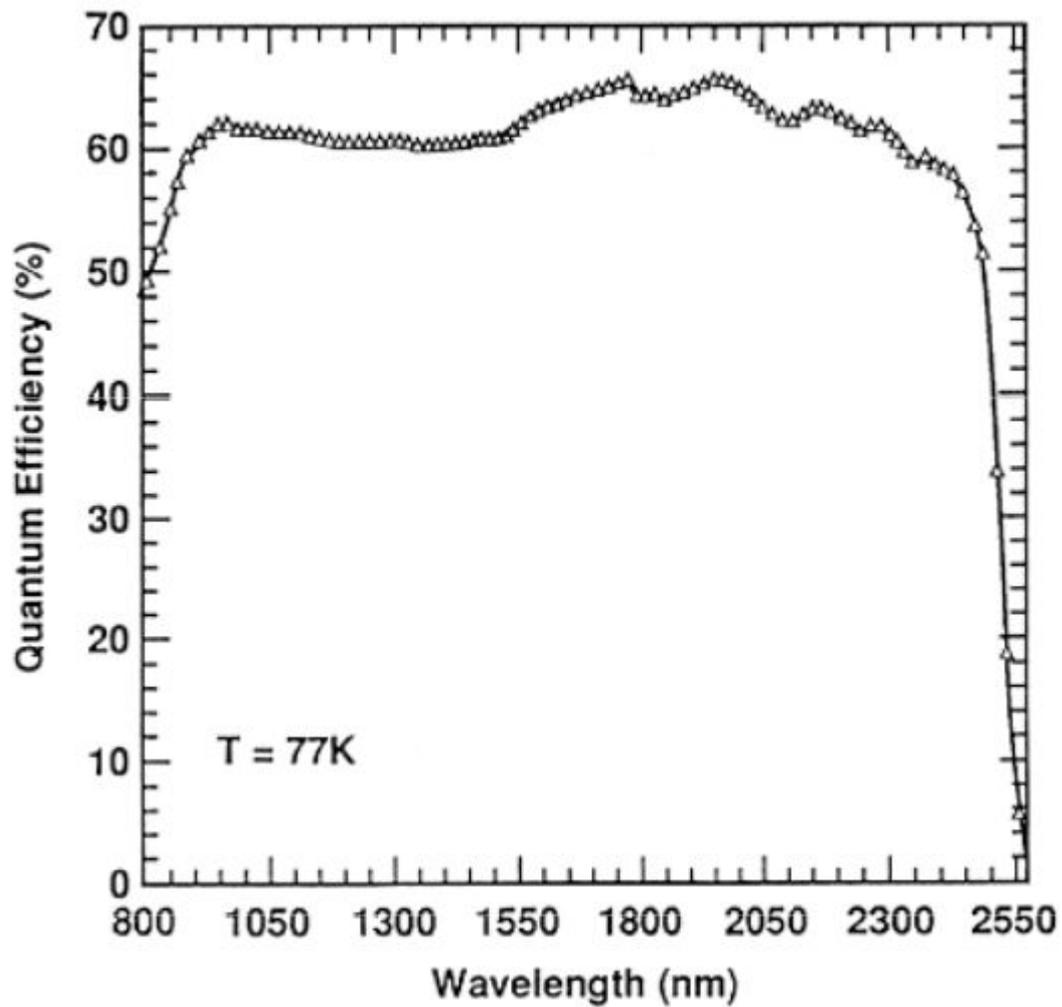
Темновой ток



Dark Current



Spatially-dependent bias (“shading”)



ИК приемники требуют сильного охлаждения!!!

Мозайка из 4 1k x 1k InSb матриц
Спектрограф CRIRES ESO

