

Сцинтилляционные нейтронные и рентгеновские детекторы

-Нейтроны ~1 МэВ регистрация нейтронов по протонам отдачи (n,p)

- Может применяться например многослойная конструкция из оргстекла и ZnS: протоны отдачи возникают в орг. стекле вызывают вспышки в ZnS
- Или смеси водородсодержащей органики и сцинтиллятора: KI(Tl) и α -бромнафталин

3) **Нейтроны с энергиями <0.1 МэВ** можно регистрировать сначала замедлив до энергий ~0.5 кэВ с последующей регистрацией продуктов реакции $n+p \rightarrow d+\gamma$ либо замедлив до тепловых энергий.

Для регистрации замедленных нейтронов можно использовать полистирольные сц. содержащие Li-6 или B-10.

Например в работе Г.И.Бритвич и др. ИФВЭ.Протвино.2004. в прототипе детектора нейтронов атмосферных ливней применялся полистирольный литиевой сцинтиллятор СЦ-331(ИФВЭ). Содержание природного бора 2-3%, световыход ~60% от антрацена, максимальная излучаемая длина волны 420 нм, времена высвечивания ~2нс.

Сцинтилляторы для регистрации нейтронов

• **Органические сц.** наиболее часто используют для детектирования потоков быстрых нейтронов повышенной интенсивности.

1) Для регистрации нейтронов с энергией >20.4 МэВ может применяться реакция $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$.

C-11 испытывает β^+ -распад ($T_{1/2}=20.4$ мин):



$E(e^+) = 0 \div E_{\text{max}} = Q_{\beta} - 2m_e$ (сплошной спектр)

При быстрой аннигиляции позитрона с одним из электронов атома излучаются два гамма-кванта с энергией 511 кэВ с противоположно направленным импульсом.

Регистрация обеих частиц позволяет восстановить точку аннигиляции – принцип позитронно-эмиссионной томографии.

Изотопы для ПЭТ: ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F

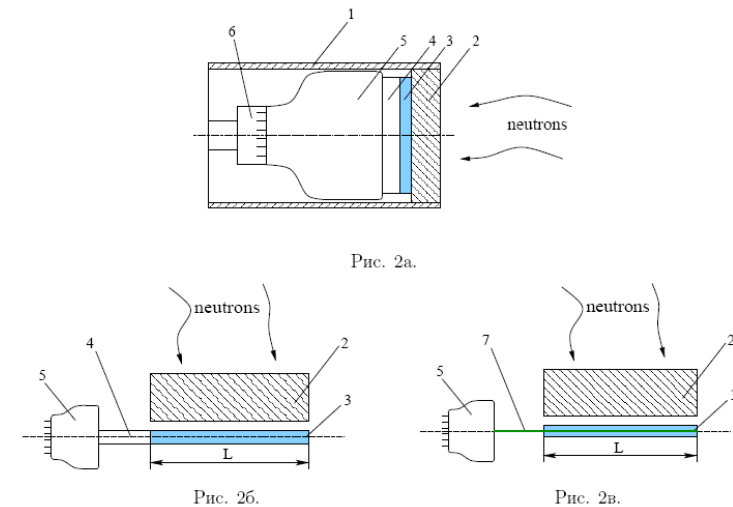
2) **Нейтроны с энергиями 0.1-10 МэВ:** по протонам отдачи (n,p), которые вызывают вспышки в фосфоре: **водородсодержащие пластические и жидкие орг. сцинтилляторы:**

- **Жидкий орг.сц.** NE 213 применяется для нейтронной спектроскопии, позволяет применять метод дискриминации гамма-фона по форме импульса (часто сопутствуют нейтронам)
- **Органические монокристаллы** стильбена, антрацена, толана.

Недостаток таких фосфоров: высокая чувствительность к γ -излучению.

В детекторах нейтронов на основе стильбена удается разделить нейтронную и γ -компоненты импульсов **по время высвечивания (оно различно для этих частиц).**

<http://www.isc.kharkov.com/old/products/scintillators/scint.htm>



ИФВЭ 2004-9
ОЭФ

Рис. 2. Конструкции детекторов нейтронов, использующих замедлитель и тонкие сцинтилляторы: а) детектор с небольшой эффективной рабочей площадью для работы в условиях высоких нагрузок; б) детектор с повышенной эффективной рабочей площадью; в) детектор с высокой эффективной рабочей площадью, использующий спектросмещающее волокно или световод сместитель спектра.
1 — полиэтиленовый корпус, 2 — полиэтиленовый замедлитель, 3 — тонкий сцинтиллятор, 4 — световод-смеситель света, который одновременно служит отражателем нейтронов, 5 — ФЭУ, 6 — умножитель напряжения для ФЭУ и электроника, 7 — спектросмещающее волокно (или световод сместитель спектра).

•Преимущества неорганических кристаллов перспективных для регистрации нейтронов:

- 1) Высокая концентрация *нейтрон-захватных компонентов* – ионов с высоким сечением захвата нейтронов, если эти ионы формируют крист. решетку (конверсионная эффективность)
- 2) Эффективный механизм передачи энергии и эффективность центров свечения (время высвечивания и световыход)

- **Тепловые нейтроны:** реакции (n,γ) и (n,α)

Применяются сц-ры содержащие изотопы ^6Li , ^{10}B , ^{157}Gd

Неорганические сцинтилляторы, литиевые стекла, жидкие сц-ры

Некоторые вещества позволяют применять дискриминацию гамма-фона PSD-методом, но **общий недостаток** – высокая чувствительность к гамма-фону по сравнению с He-3 газоразрядными детекторами

• (n, α) -реакция на Li-6:

- 1) **монокристалл LiI(Eu)** – прозрачен, быстрое время высвечивания, интенсивная вспышка ($E(\alpha+p)=4.7$ МэВ). Импульсы от гамма-фона с энергией <5 МэВ легко отделить амплитудной дискриминатором.
- 2) Сцинтиллирующие неорганическими пластмассами, называемыми **литиевыми стеклами**. Содержание Li до ~8% веса. Эффективность ~100% при толщине стекла 10-15мм. γ -кванты с энергией до 1,5 МэВ (меньше по амплитуде импульсов от нейтронов) дискриминируются.

Типовая конструкция: литиевое стекло в виде диска, непосредственно располагаемое на фотокатоде ФЭУ.

3) литиевые силикатные стекла с церием $^6\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}$, обладают повышенной чувствительностью к нейтронам. Содержание Li_2O на уровне 22.5-30 моль.%. Реактивы содержание Li обогащаются по Li-6 80-90%. Содержание Ce ~0.1%. Высокая интенсивности высвечивания, время высвечивания для α -частиц 60 нс. Спектр радиолуминесценции лежит в диапазоне 2.5-5 эВ с максимумом 3.2 эВ

4) Монокристаллы ортоборатов лития-гадолиния $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$ (LGBO:Ce)
Повешенная радиационная стойкость, оптическая прозрачность в широком спектральном диапазоне
В состав входят ионы с высокими сечениями захвата нейтронов Li-6 (940 барн), B-10 (3960 барн) и Gd (^{155}Gd : 61 кбарн, ^{157}Gd : 260кбарн)

Относительная сц. эффективность кристалловолокон из LGBO:Ce в 5.7 раз выше чем волокон ^6Li -силикатных стекол!

См. И.Н.Седунова и др. Известия Высших учебных заведений. Физика. №1/3. 2011

5) Смеси, содержащие B-10 и сц. ZnS (смесь порошка борной кислоты и сернистого цинка)

Низкий Z: слабая чувствительность к γ -квантам

Порошок: плохая прозрачность для собственного света, т.е. возможно применение лишь тонких слоев фосфора. А тонкий слой это низкая эффективность.

Для увеличения эффективность регистрации нейтронов детектор изготавливают слоистым: тонкие слои смеси чередуются со слоями прозрачного органического стекла (световоды), по которым отводится свет к фотокатоду ФЭУ. Эффективность регистрации нейтронов детектором со слоистым фосфором может достигать 30%.

Параметры литиевых стекол Vicron

Type	Isotopic Ratio	Total Lithium
GS1	Natural	2.4%
GS2	95% ^6Li	2.4%
GS3	99.99% ^7Li	2.4%
GS10	Natural	6.6%
GS20	95% ^6Li	6.6%
GS30	99.99% ^7Li	6.6%
KG1	Natural	7.5%
KG2	95% ^6Li	7.5%
KG3	99.99% ^7Li	7.5%

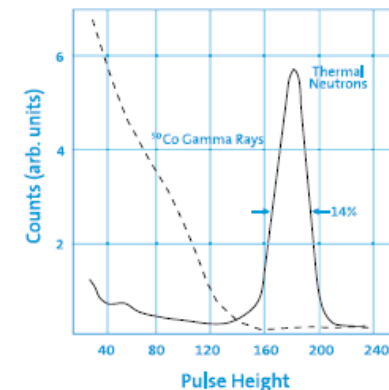


Figure 1. Pulse Height Spectra (1mm thick GS20 ^6Li Glass)

Table 1. Specific Neutron Detection

Neutron Energy	Glass Type	Glass Thickness	Ref.
0.01-20 eV	All types	0.1 - 10mm	1
Thermal	GS20 (NE905)	1.3mm	2
10eV-100 keV	GS20 (NE905)	3.2mm	3
100eV-1MeV	GS20	25.4mm	4
1-600 keV	KG2, GS20	9.5mm	5
1-6 MeV	GS20 (NE905)	25mm	6

б) Жидкие сц. с добавкой растворимых соединений бора.

α -частицу, образующаяся при реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)p$ вызывает вспышку света в жидком фосфоре.

Детектор: сц. из жидкого толуола, в котором растворен метилборат.

Приготовленный фосфор заливают в герметичный контейнер с толщиной рабочего объема по направлению потока нейтронов около 1 см.

Режекция γ -квантов: пробег электронов, образованных γ -квантами, больше толщины фосфора, поэтому имеют небольшую амплитуду импульсов и отделяются от нейтронов с помощью амплитудного дискриминатора.

Эффективность детектора зависит от концентрации B-10 и может достигать 50% при энергии нейтронов 1 кэВ.

Сцинтилляционные детекторы нейтронов

- Пока не найден оптимальный сцинтиллятор для регистрации нейтронов, имеющий одновременно: малое время послесвечения (высокие локальные загрузки), большой выход фотонов и высокую прозрачность, низкую γ -чувствительность, стоимость, технологичность, изготовление в больших объемах

+ Большие чувствительные площади, высокое простр. разрешение

+ Разнообразие методов съема:

традиционные счетные системы: сц+ФЭУ

системы интегрирующего типа: сц+CCD

+ Чувствительность к фоновому гамма-излучению может быть снижена при анализе формы импульса (сцинтилляторы ${}^6\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$, $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$)

Сцинтилляторы для регистрации тепловых нейтронов

Материал	Выход фотонов нейтрон / γ (1 МэВ)	Время высвеч. (нс)	Длина волны (нм)	+/-
Стекло ${}^6\text{Li}:\text{Ce}^{3+}$	~6000 / 4000	75	395	+ скорость счета + прозрачность - высокая гамма-чувствительность $1\text{E}-4$
монокристалл ${}^6\text{Li}:\text{Eu}^{2+}$	50000/12000	1400	470	+ эффективность + низкая гамма-чувствительность $1\text{E}-6$ - низкая скорость счета - Гигроскопичность
${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}:\text{Ag}^+$	160000/75000	1000	450	+ разделение n/γ (PSD) - низкая скорость счета - плохая прозрачность
Крист. $\text{LiBaF}_3:\text{Ce}$	3600/4500	1/34/2400	190-330	+ скорость счета
Порошок ${}^6\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$	50000/14000	200/800	385, 415	+ Разделение n/γ (PSD)

Методы считывания

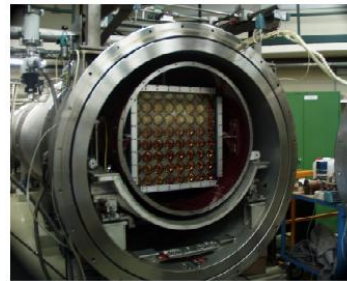
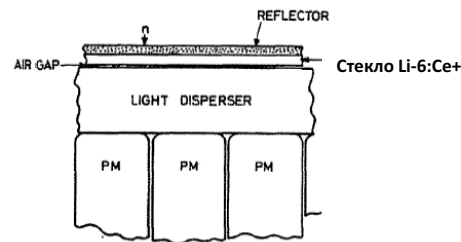
- **Прямой метод – камера Анжера (PM, PSPM)**
- **Метод оптоволоконного кодирования**
- WLSF
- CCD
- SiPM

См. C.W.E van Eijk, NIMA 477 (2002) 383-390

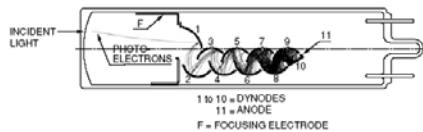
ISIS Facility, UK:

60% сцинт. детекторов

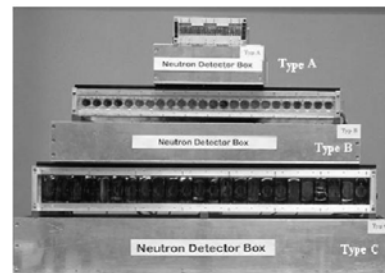
Камера Анжера (PM-readout)



Метод ц.т. дает простр.разреш. лучше, чем размер PM



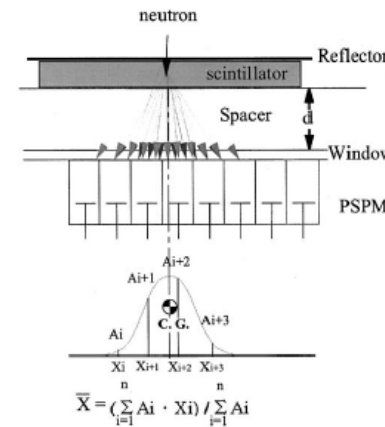
SANS KWS1, KWS2: детектор 60смх60см, 8х8 PMT, 128х128 каналов, 5ммх5мм, до 500кГц (readout электроника), эфф. 65-95% (1-3 А), $n/\gamma 10^{-4}$ (1 МэВ)



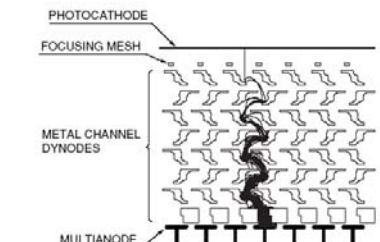
Julios family (Julich)

Type	A	B	C
Total size	320 × 390 × 115	900 × 450 × 125	1100 × 475 × 180
PM-cathode	6.8 × 24	28.6 \varnothing	40 × 80
Sensitive size	200 × 20	680 × 25	940 × 75
Spatial resolution	1.2	2.3	3.3

Камера Анжера (PSPM-readout)



MAPMT: HAMAMATSU H9500



Пространственное разрешение по измерению ц.т. сигнала:

$\text{FWHM} = 0.8\text{мм}$ и лучше

Чувст. обл. 49ммх49мм, 16х16 каналов, размер пиксела 3ммх3мм, мертв. обл. 10%, мертв. время 6нс

• Возможность покрытия больших площадей, но дорого

• Поканальный съём (!)

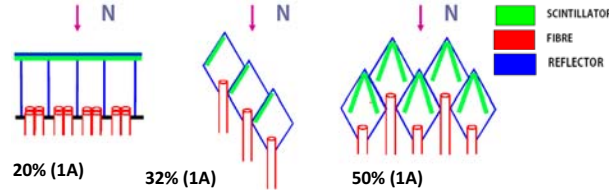
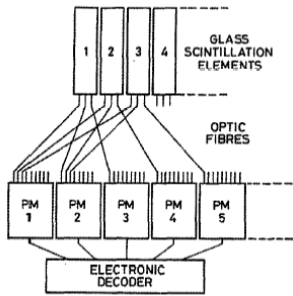
Fiber coded readout (ISIS)

ISIS Facility: ENGIN-X, HRPD, OSIRIS, HiPr, GEM, SXD
 ^{23}Cn , ^{25}Cn , ^{48}Cn – 1D, 2D размерность
 + малое кол-во ФЭУ

- Очень большое число оптических каналов

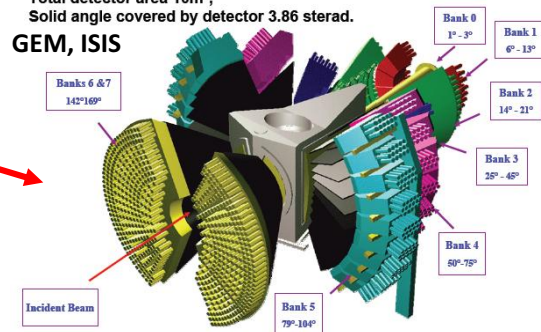
Пространственное разрешение 3-5 мм

Эффективность до 50% (1A) (V-образный сцинт. экран)

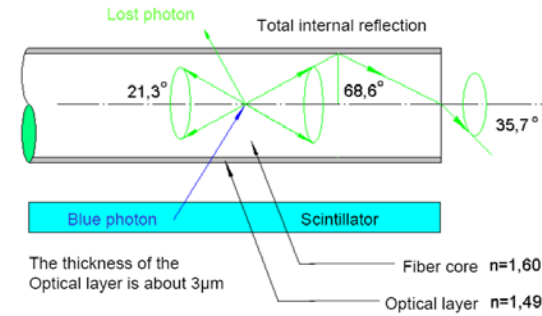


Total detector area 10m²,
 Solid angle covered by detector 3.86 sterad.

GEM, ISIS

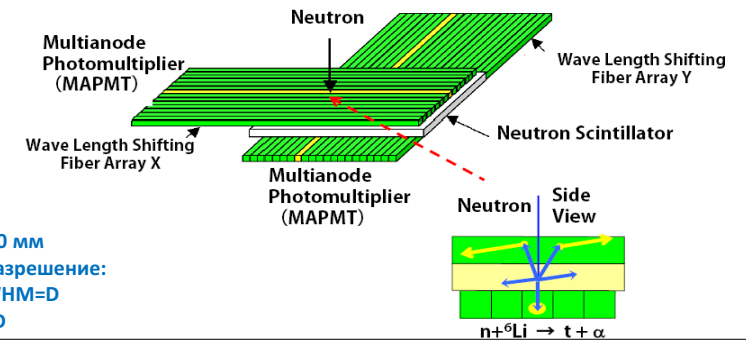


Съем информации на спектросмещающие волокна (WLSF readout)



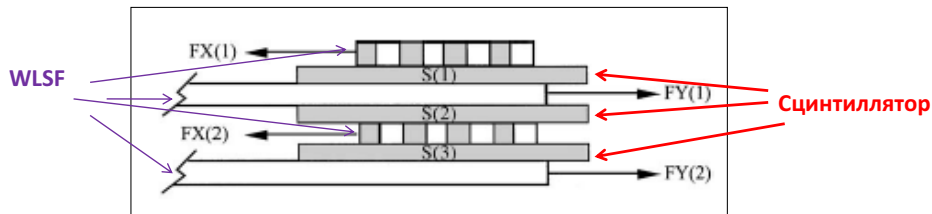
Принцип работы:

Фотоны «синего» диапазона, возникающие в сц. с некоторыми потерями проходят в волокно, где переизлучаются в фотоны «зеленого» диапазона. Эти фотоны не выходят из волокна и передаются в фотодетектор

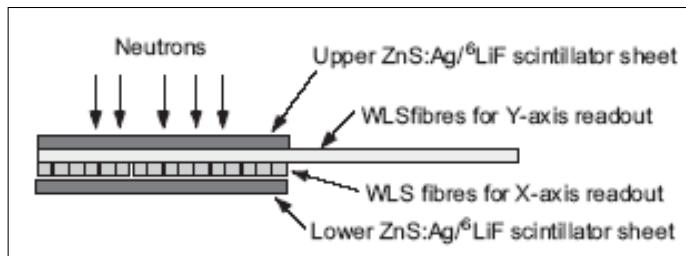


- Диаметр WLSF D=0.4-1.0 мм
- Пространственное разрешение:
- 1) Цифровой съем: FWHM=D
- 2) Метод ц.т.: FWHM<D

• Съем информации в сдвоенном детекторе



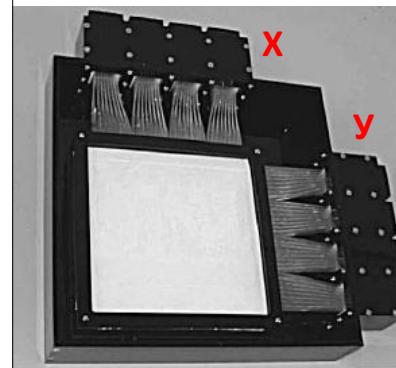
• Сцинтиллятор снаружи, считывающие волокна внутри



- Сцинтиллятор ZnS+⁶LiF (высокая интенсивность вспышки)
- невысокая скорость счета
- эффективность (1.8A): 1 слой – 20-30%, 2 слоя – 40-55%

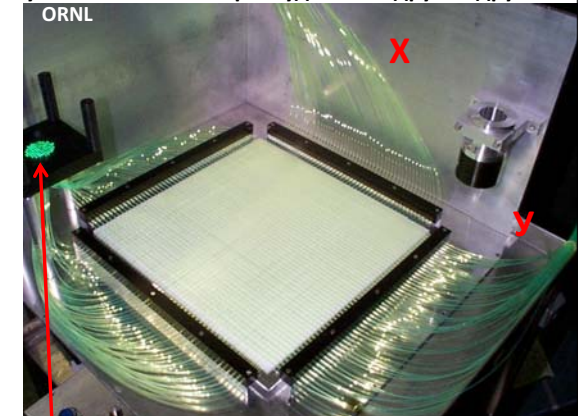
WLSF readout

«Плотная» упаковка волокон: волокна прижаты друг к другу



- Чувствительная площадь: 128x128мм,
- Размер пикселя: 0.5x0.5мм
- Многоанодные ФЭУ – 8 шт
- (Riken, KEK, CERN)

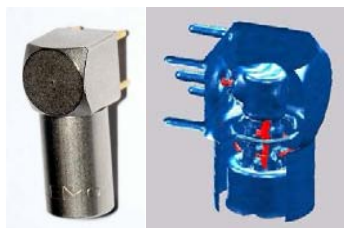
«Разреженная» упаковка волокон: волокна уложены на некотором удалении друг от друга



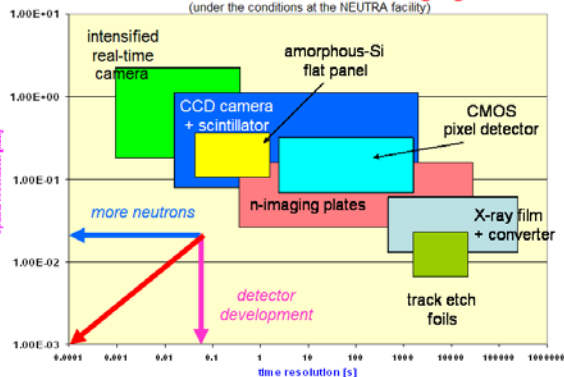
- Площадь детектора 25 x 25см
- Расстояние между волокнами 2 мм
- Число волокон 48x48 WLSF (X,Y)
- Многоанодный ФЭУ: Phillips XP1704
- Анализатор совпадений: Hamamatsu 1924
- Пространственное разрешение: < 5 мм
- Макс. скорость счета (на детектор): ~ 1 МГц
- Время формирования: 300нс
- Временное разрешение: 1 мкс

Детекторы фотографического типа

1. Image plate (запоминающие фосфоры)
2. Сцинтилляторы + CCD readout
- ...



Томография, нейтронография
Detectors for Neutron Imaging
 (under the conditions at the NEUTRA facility)



- Работа без монохроматизации пучка – высокие загрузки
- простр. разрешение ограничено типом конвертера и величиной пробегов частиц (< 0.1 мм)
- возможность покрытия больших площадей регистрации

Запоминающие фосфоры (Image plates)

1) Облучение IP

IP состоит из двух материалов:

- материал конвертера нейтронов** - кристаллы Gd_2O_3 ($n \rightarrow \gamma + e$)
- запоминающий люминофор** ($e \rightarrow$ метастабильные состояния) - $BaFBr:Eu^{2+}$

Первоначально был разработан для регистрации гамма-излучения

Время жизни метастабильных состояний – часы и дни

2) Получение информации: координата и интенсивность

Распределение плотности метастабильных состояний по площади IP говорит о координате и интенсивности облучения

При облучении фосфора **красным лазером** электроны переходят из метастабильный уровень в зону проводимости и очень быстро возвращаются в валентную зону с излучением **синего фотона**, который регистрируется сканирующим устройством

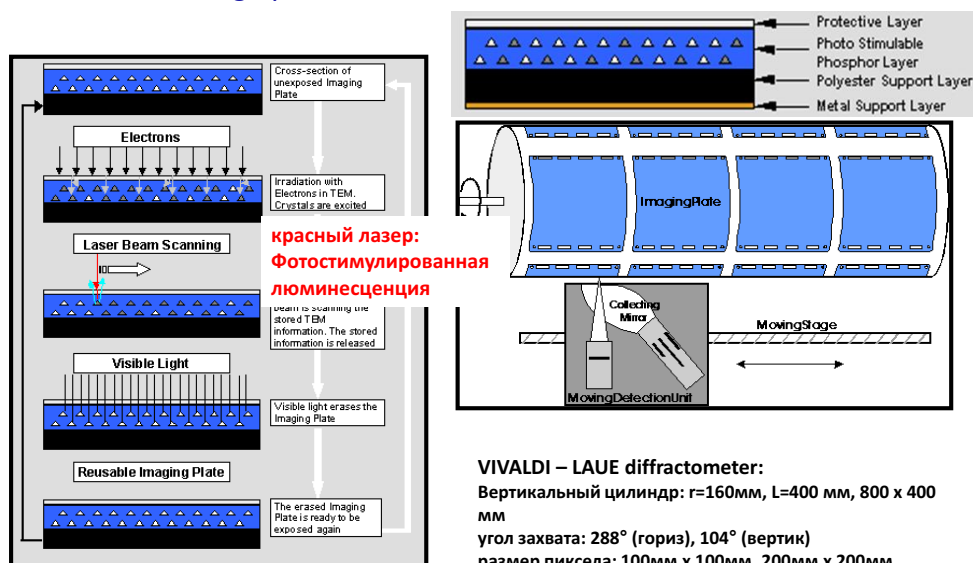
сканирующее устройство обычно имеет цветной фильтр (выделение спектра эмиссии) и фотоумножитель (усиление сигнала)

3) «Стирание» остаточных возб. состояний производится мощным источником белого света

- динамический диапазон до 18 бит
- пространственное разрешение ~0.1 мм (пробег конверсионных электронов)
- большие площади
- сложно организовать потоковые измерения (ручная установка IP в систему записи/чтения)
- отсутствует возможность калибровки на интенсивность пучка
- не годится для томографии

+/-

Image plates: VIVALDI – LAUE diffractometer

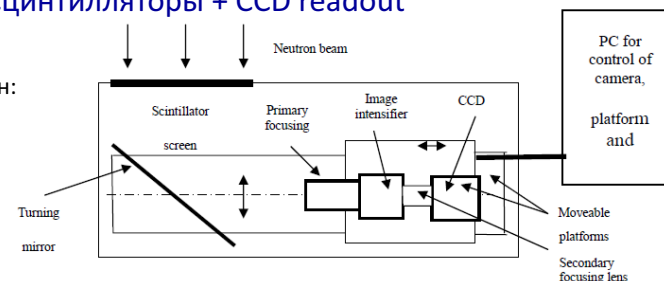


VIVALDI – LAUE diffractometer:
 Вертикальный цилиндр: $r=160\text{ мм}$, $L=400\text{ мм}$, $800 \times 400\text{ мм}$
 угол захвата: 288° (гориз), 104° (вертик)
 размер пиксела: $100\text{ мм} \times 100\text{ мм}$, $200\text{ мм} \times 200\text{ мм}$, $400\text{ мм} \times 400\text{ мм}$
 высокая чувствительность к гамма-фону (Z_{Gd})
 низкая эффективность 25% (1.8A)
 время экспозиции 4 мин

Сцинтилляторы + CCD readout

1) Сцинтилляционный экран:

- $ZnS(Ag):LiF$ – для нейтронов $\epsilon \sim 20-30\%$
- Gd_2O_2S – для гамма-частиц (Kodak Lanex regular)



2) Система регистрации

• стандартная схема : охлаждаемая CCD ($512 \times 512 - 2048 \times 2048$, 7-15 мкм), $T = -20-50^\circ\text{C}$

H Graafsma http://hasylab.desy.de/instrumentation/detectors/publications___reports

Охлаждение CCD необходимо для снижения теплового шума (тепловая генерация носителей заряда в п/п):

- без охлаждения насыщение CCD происходит менее чем за 1 с
- с охлаждением возможны измерения в течение нескольких часов

- ICCD=image intensifier+ CCD - для быстрых отображений (< 100 мкс)
 image intensifier: фотокатод+ MCP+ фосфоресцирующий экран
 ICCD чувствительность до 1 фотона
 управление затвором (MCP) с точностью до 200 пс

3) Для защиты CCD и электроники от прямого воздействия нейтронов, устанавливается зеркало

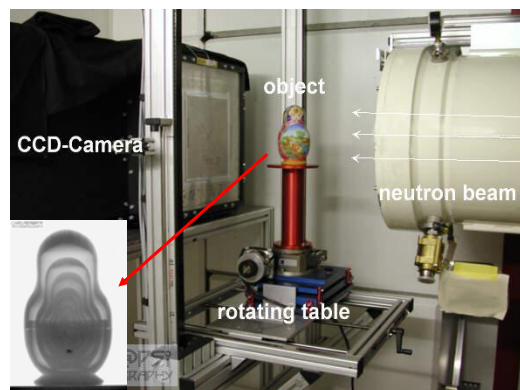
4) Системы фокусирующих линз или оптоволоконное соединение (меньшие потери света)

Томограф NEUTRA, PSI

Размер образца 4x4 – 30x30 см

- Динамический диапазон до 16 бит
- пиксель 0.02 – 0.15 мм
- число пикселей 1024 до 2048 (X, Y)
- Сигнал/шум 120 (CCD -20°-50°C)
- время экспозиции 2-60 сек/кадр
- время считывания 2 сек/кадр

<http://www.psi.ch/niag/cultural-heritage#>



X-ray



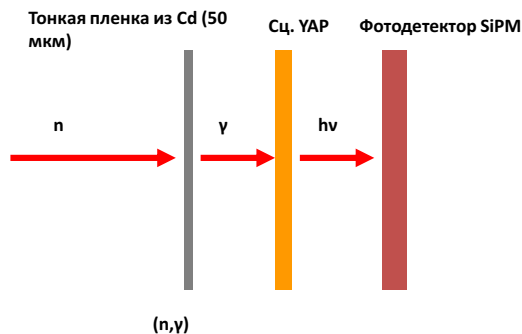
Бронзовая статуя Будды Шакьямуни зап. Тибет 14-15 век

Cd-YAP-SiPM detector

YAP Crystal (Yttrium Aluminium Perovskite) – сцинтиллятор с характеристическим временем высвечивания (decay time) 27нс (350нм)

SiPM – матрица лавинных фотодиодов, работающий в Гейгеровском режиме

- + Динамический диапазон от 1 фотона (400нм)
- + Размер 1x1 - 6x6 (ммхмм)
- + Пиксел 25-100 мкм
- + $\Delta t < 1$ нс
- + GAIN $\sim 1E6$
- + Стабильная работа в магн. полях до 15Тл
- + Невысокая стоимость



- + Постоянная эффективность в широком диапазоне (1-200 мэВ)
- + Высокое врем. разрешение
- + Стабильная работа в магн. полях до 15Тл

- Низкая эффективность
- Низкое соотношение сигнал/фон

Газовые сцинтилляторы

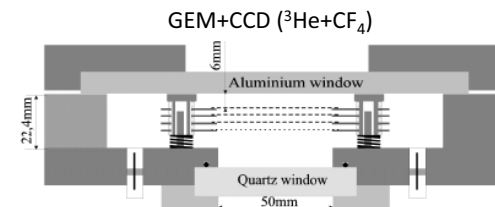
Газ: ${}^3\text{He}+{}^4\text{He}$ /ин.газ

Реакция: $n + {}^3\text{He} \rightarrow t + p$

• Lyman-Alpha Neutron Detector (LAND) – сигналom служит характеристическое излучение водорода (121.6 нм) при взаимодействии протона с атомами He-3.

• При 93 кПа (700 Torr) образуется 46 фотонов на 1 нейтрон .

• Добавка инертных газов (Ar/Xe/Kr) может увеличить интенсивность сигнала (УФ область) в 1000 раз (образование эксимеров X_2^*)



p-Т треки сфотографированные CCD



Ионизационная камера + фотодетектор:

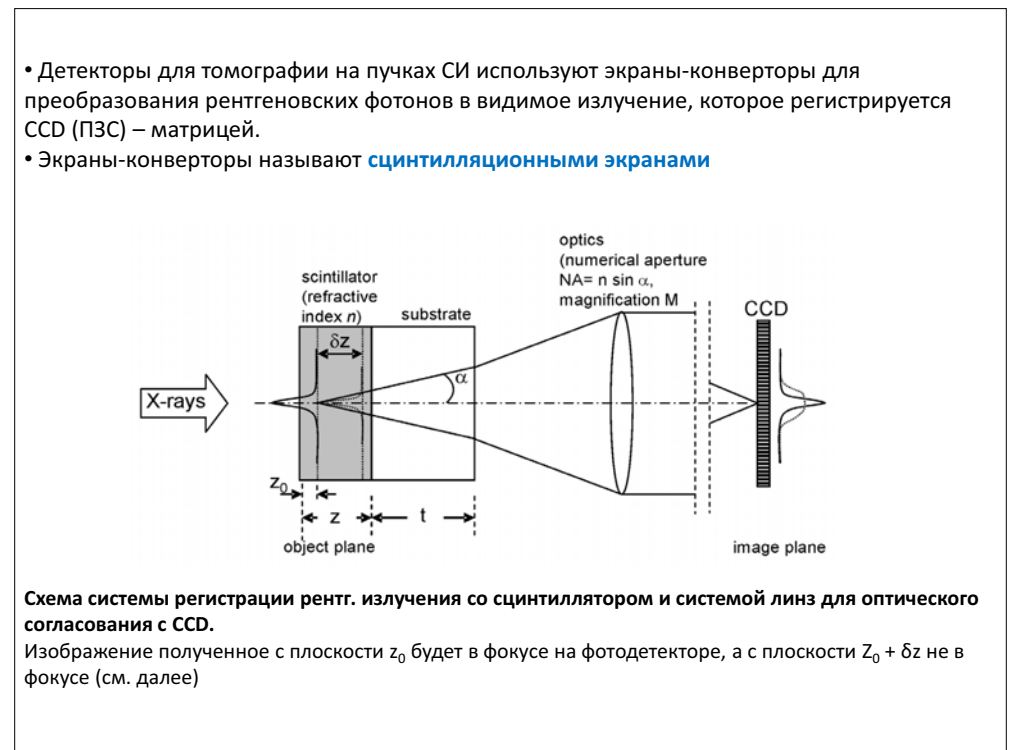
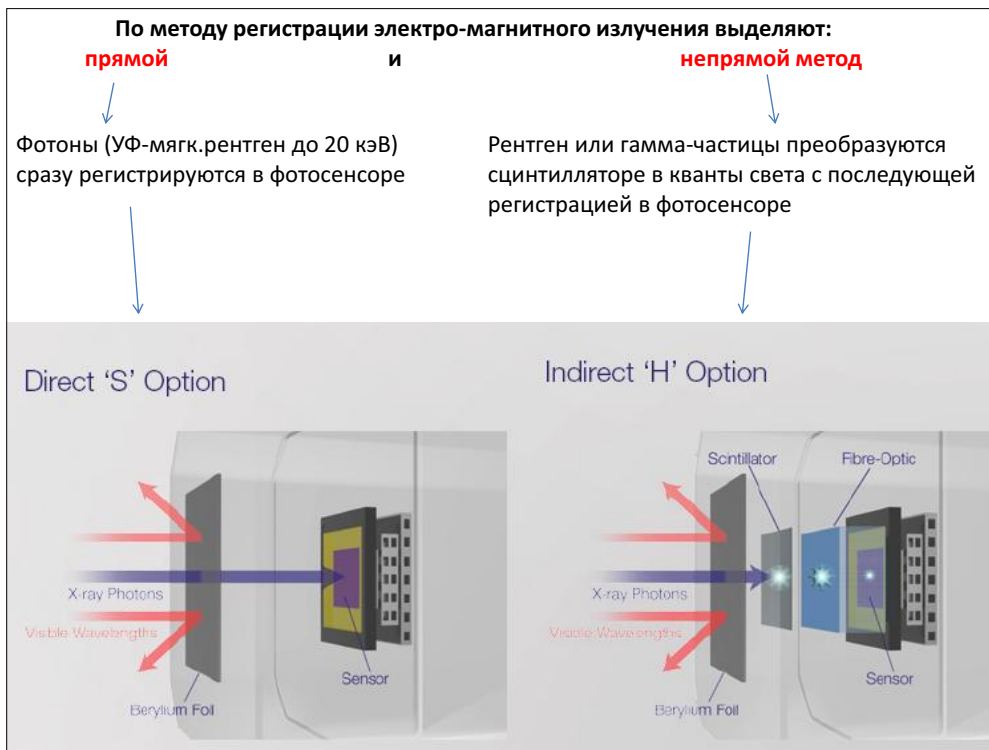
1. Поглощение ИИ и образование электронов
 2. Ускорение электронов в поле ~ 3 кВ/см
 3. Возбуждение Xe или Ar+1% Xe
 4. Сцинтилляция в области УФ и регистрация ФЭУ
- Для таких детекторов характерно в 2-3 раза лучшее амплитудное разрешение чем у стандартных проп.сч., регистрирующих ионизацию

Рентгеновские сц. детекторы

- Принцип регистрации: преобразование гамма-квантов в фотоны оптического диапазона с последующей их регистрацией ФЭУ или фотодиодами
- Сц. Могут быть органические, но лучшие характеристики достигаются с неорганическими сц. кристаллами NaI(Tl), CsI(Tl) или с кристаллами с высоким Z: BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) и др.
- Энергия необходимая для выхода одного фотона 200-300 эВ, поэтому энергетическое разрешение хуже чем у газоразрядных детекторов: неорг. сц. $\sim 40\%$ для фотонов 10 кэВ
- Временное разрешение может составлять < 1 нс, а загрузочная способность $2E6$ ф/с
- Для толщин сц. NaI(Tl), CsI(Tl) более 5 мм в диапазоне энергий 20-100 кэВ эффективность поглощения фотонов близка к 100%.

Области применения сц.

Region	Energy [keV]	Typical Application
VUV to XUV [EUV]	0.01 - 0.1	EUV Lithography
[EUV] XUV to Soft X-ray	0.1 - 1	Soft X-ray Imaging / Microscopy
Soft to Hard X-ray	1 - 14	X-ray Spectroscopy (e.g. SAXA), Plasma Diagnostics
Hard X-ray	14 - 100	Diffraction / Crystallography, Phase Contrast Imaging
Hard X-ray to Gamma	100 +	Gamma Tomography



Основные характеристики детекторов

- **Пространственное разрешение** определяется:
 - 1) Взаимодействие рентгеновского излучения со сцинтиллятором, подложкой
 - 2) Параметры оптической системы
 - 3) Разрешение фотодетектора
- **Для энергий свыше 100-150 кэВ** рассеяние Комптона доминирует.
- Средний пробег электронов существенно больше, чем у низкоэнергетичный электронов при ФЭ.
- **Кристалл должен иметь достаточную толщину:** если пробеги электронов полностью не укладываются в толщине кристалла, то ухудшается и пространственное разрешение.

Пример: длина пробега электронов в кристалле YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) при 20 кэВ ≈ 2.8 мкм, а при 100кэВ ≈ 44 мкм.

- **При низких энергиях фотонов** причиной ухудшения пространственного разрешения является **флуоресценция возникающая при фотоэлектрическом поглощении:** вторичные электроны и характеристические фотоны (см. ФЭ).
- Другой источник ухудшения пространственно разрешения – «**паразитная**» **люминесценция субстрата.**

Может составлять до 20% от люминесценции в сцинтиллирующем слое.
Фактор особенно важен для тонких слоев сцинтиллятора.

- **Пространственное разрешение оптической системы** м/у сц. экраном и CCD
См. Слайд26.
- CCD сфокусирована на изображение, возникающее в плоскости сц-ра z_0 .
- Изображения, получаемые на других расстояниях не в фокусе, т.е. регистрируются с худшим пространственным разрешением.

Эффекты в оптической системе влияющие на пространственное разрешение:

- 1) Дефект фокуса: $R \approx \delta z \cdot N.A.$, δz – дефект фокуса
- 2) Дифракция: $R \approx \lambda / N.A.$, λ – длина волны света
- 3) сферическая aberrация: $R \approx t \cdot N.A.^3$, $N.A.$ – числовая апертура

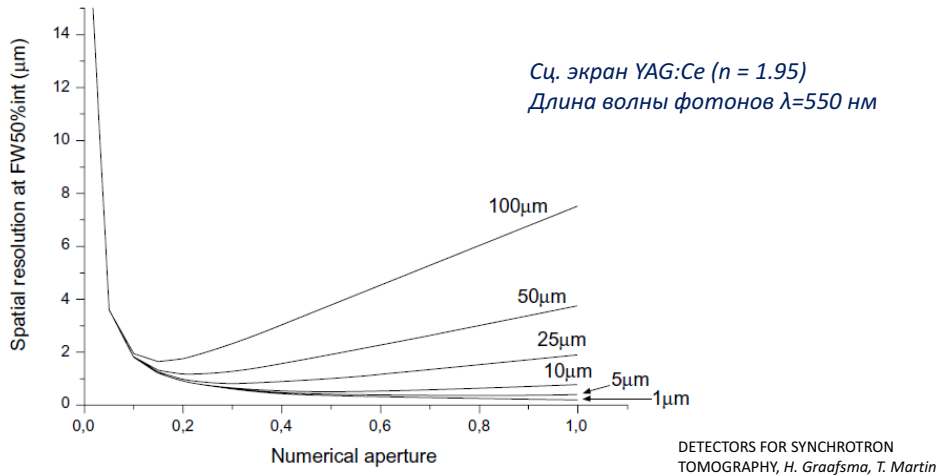
Пространственное разрешение обусловленное первыми двумя факторами можно описать ф-лой (Koch et al., 1998)

$$R_{fw50\%int} = \sqrt{\left(\frac{p}{NA}\right)^2 + (q \cdot z \cdot NA)^2}$$

R и z в мкм, $p = 0.18$, $q = 0.075$.

Дифракция
Дефект фокуса

Пространственное разрешение для различных толщин экранов и числовых апертур оптической системы.



Для увеличения пространственного разрешения необходимо уменьшить толщину экрана, но это уменьшит эффективность поглощения фотонов.

• Для улучшения поглощения частиц в тонком сцинтилляционном экране его применяют для регистрации фотонов с энергией над К-границей фотопоглощения в сц-ре:

- 17.04 кэВ для YAG:Ce
- 50.24 кэВ GGG:Eu ($Gd_3Ga_5O_{12}$)
- 63.3 кэВ LAG:Eu

- При этом улучшается эффективность поглощения, но и приводит к росту флуоресценцию, которая снижает пространственное разрешение (см. выше)
- Для оптических систем с достаточно высокой N.A. DQE в основном определяется эффективностью поглощения в сцинтилляционном экране и меньше выбором CCD
- Для системы с низкой N.A. заметный вклад в QDE – квантовая эффективность CCD-детектора и типа сц-ра (световыход).

Пример:

Сравниваем DQE для разных сц. (таблица для 20 кэВ, толщина сц. 5мкм)

СЦ: GGG:Eu и LAG:Eu имеют одинаковую эффективность поглощения, но разный световыход

CCD: типа FReLoN (пикс. 14мкм, 2048x2048, ESRF)

	optic	scintillator	absorption	DQE FReLoN	DQE Dalsa	spatial resolution	Ref.
10x	NA=0.3	YAG:Ce	0.07	0.021	0.013	2 µm	(1)
		LAG:Eu	0.11	0.031	0.017		
		GGG:Eu	0.11	0.037	0.021		
20x	NA=0.7	YAG:Ce	0.07	0.049	0.038	1.04 µm	(2)
		LAG:Eu	0.11	0.076	0.056		
		GGG:Eu	0.11	0.082	0.063		

(1) Cloetens *et al.* 1999

(2) Stapanoni *et al.* 2002

1) NA=0.3 улучшение $\Delta DQE=19\%$

2) NA=0.7 улучшение $\Delta DQE=8\%$

• **Детектируемая квантовая эффективность** системы формирования изображения

• Вторая ключевая характеристика, определяется отношением «сигнал/шум» на выходе и на входе детектора:

$$DQE \equiv \frac{SNR_{out}^2}{SNR_{in}^2} \approx \eta_{abs} \cdot \left(1 + \frac{1 + \frac{1}{\eta_{v/e}}}{\eta_{coll} \cdot \left(\frac{E_x}{E_v} \right) \cdot \eta_{x/v}} \right)^{-1}$$

SNR_{out} SNR_{in} - отношения «сигнал/шум» на выходе и на входе детектора соответственно,

η_{abs} – эффективность поглощения рентг.излучения в сц-ре,

$\eta_{v/e}$ – квантовая эффективность CCD

η_{coll} – эффективность сбосбора оптической системы с числовой апертурой NA и коэффициентом преломления сц-ра n

E_x – энергия рентгеновского излучения

E_v – энергия фотонов из сц-ра

$\eta_{x/v}$ – эффективность конверсии рентг. излучения в фотоны оптического диапазона (конверсионная эффективность) – число фотонов на поглощенный рентг. квант.

DQE=0÷1 зависит от многих факторов:

снижается с ухудшением простр. разрешения, при внесении шума при считывании информации с фотодетектора, или если не все частицы поглощаются

Сцинтилляционные экраны

• Различают две категории: **порошковые** и **кристаллические**.

Порошковые экраны

• Порошковый экран – смесь мелко-гранулированного фосфора (зерна до ~1 мкм) и связывающего вещества, образующих пленку.

• Для СИ рентгеновского диапазона применяются 2 основных порошковых сц. Экрана:

1) $Gd_2O_3:S:Tb$ (P43 или Gadox):

- Световыход 60 фотонов/кэВ

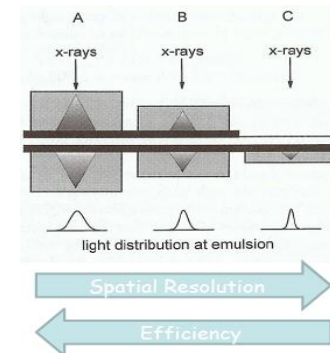
- Долгое время высвечивания: медленная компонента ~ неск. сотен мкс., что ограничивает применение экрана для области пучков СИ низкой интенсивности

2) $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ (YAG, P46)

- пригоден для высоких интенсивностей – быстрое время высвечивания

• **Пространственное разрешение порошковых экранов примерно соответствует их толщине.**

Поэтому необходимо выбирать оптимум м/у пространственным разрешением и эффективностью поглощения



Кристаллические экраны

- Не имеют недостатка порошковых экранов по жесткой связи м/у эффективностью и пространственным разрешением.
- Могут быть моно- и поликрист. форма, тонкие пленки на подложках
- Толщина 1 - 50 мкм
- Обеспечивают лучшее пространственное разрешение, поэтому являются основными конверторами для систем отображения высокого разрешения
- Различные методы изготовления тонких пленок: импульсного лазерного осаждения, напыления, жидкофазной эпитаксии, золь-гель процесс.

Ключевые параметры кристаллических экранов для систем высокого разрешения:

- 1) **Эффективность поглощения $\sim \rho Z^n$** $n=4(<500\text{кэВ})-5(>500\text{кэВ})$
сочетание высокой плотности материала ($> 5\text{г/см}^3$) + высокого Z (>50)
- 2) **Эффективность эмиссии света при поглощении (>15 фотонов/кэВ) + согласованность с полосой поглощения CCD (550-650 нм)**
- 3) для скоростного отображения приоритетно **время высвечивания**, а для высокого динамического диапазона – **отсутствие послесвечения из метастабильных состояний**
- 4) **Высокие оптические свойства** для передачи излученных фотонов без рассеяния
- 5) **Механические свойства:** прочность, не токсичность, возможность механической обработки
- 6) **Радиационная стойкость**

Монокристаллические

• Оксид висмура-германия BGO:

- + высокая плотность и Z, но
- низкий световыход, сложность полировки и высокий n

Не оптимален для систем высокого разрешения, больше пригоден для счетчиков гамма-частиц

• Вольфрамат кадмия CWO – более подходящий материал для широкого круга приложений:

- + высокий dE/dx, световыход, короткое послесвечение, спектр эмиссии хорошо согласуется со сп. чувст-тью CCD, негигроскопичен.
- сложность обработки и получения тонких слоев: доступны с толщиной не тоньше 50 мкм.

Пространственное разрешение 1.5-3 мкм для диапазона 6-30 кэВ. (Lee et al. (1997) Jung et al. (2002))

• силикат лютеция LSO – перспективный монокристалл.

- + высокая плотность, Z, высокий световыход
- эффективность поглощения ниже чем у BGO

Пространственное разрешение до 1 мкм – ограничено толщиной 10 мкм (Uesugi et al. 2001)

На практике в основном применяются монокристаллические и тонкопленочные крист.экраны (SCF).

При приготовлении монокрист.экранов применяются технологии полировки и огранки.

Часто применяемые сц-ры для регистрации рентгеновского излучения системами отображений

material	name	density (g/cm ³)	Z _{eff}	λ (nm)	LY (ph/keV)	refractive index	type
Gd ₂ O ₂ S:Tb	P43	7.3	59.5	545	60		powder
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce	P46	4.55	32	530			powder
CsI(Tl)		4.53	54	550	65	1.8	crystal
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	BGO	7.13	75	480	8.2	2.15	crystal
CdWO ₄		7.90	64	530	15	2.25	crystal
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂	LAG:Ce	6.73	63	550			crystal
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce	YAG:Ce	4.55	32	550	40	1.82	crystal
Lu ₂ SiO ₅ :Ce	LSO:Ce	7.4	66	420	25	1.82	crystal
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce	YAG:Ce	4.55	32	550	20	1.82	SCF
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Eu	LAG:Eu	6.73	63	595	11		SCF
Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ :Eu	GGG:Eu	7.1	53	595	44	1.96	SCF
Lu ₂ O ₃ :Eu ³⁺		8.4	68.8	611	20	1.88	polycrystal
Gd ₂ O ₃ :Eu ³⁺		7.1	61	611	19	1.82	polycrystal

Тонкопленочные

Для получения более тонких сц. экранов наносят тонкие пленки (моно- и поликрист. форма) на подложку

• Гранат иттрия-алюминия YAG:Ce на подложке YAG:

- + максимум эмиссионного спектра – 550 нм хорошо согласуется со сп. чувст-тью CCD, более быстрое высвечивание чем у следующего, световыход

• Гранат лютеция-алюминия LAG:Eu на подложке YAG:

- + эффективность поглощения в несколько раз выше чем у YAG:Ce: в 8 раз для 15 кэВ

Достигнутое пространственное разрешение (Koch et al., 1999) – 0.5 мкм получено на пленке LAG:Eu толщиной 1 мкм.

• Гранат гадолиния-галлия GGG:Eu – сц-р с очень высокими характеристиками:

- +Эффективность сравнима с LAG:Eu, а световыход лучше YAG:Ce и LAG:Eu
- +Быстрое время послесвечения:

Динамический диапазон систем с такими сц. экранами может достигать 16-17 бит (для сравнения с YAG:Ce - 10 бит Koch et al., 1999)

Поликристаллические сц. экраны

Оксид лютеция ($\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$) и оксид гадолиния ($\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$)

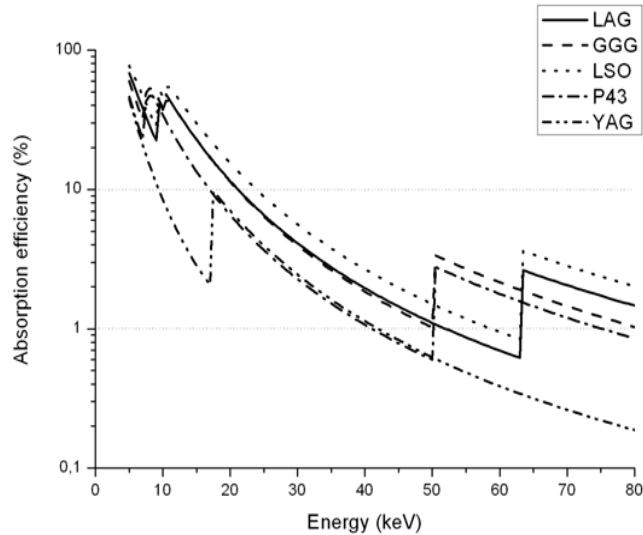
Оба сц.экрана изготавливаются при золь-гель процессе.

• Оксид лютеция ($\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$):

высокая эффективность поглощения, световыход в 2 раза выше чем у $\text{LAG}:\text{Eu}$, а эмиссионный спектр (макс. при 610 нм) хорошо согласуется с CCD.

Эффективность поглощения для ряда современных сц-ров, применяемых в системах отображения рентгеновского излучения на СИ (для толщин 5мкм):

- $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LAG)
- $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG)
- Lu_2SiO_5 (LSO)
- $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)
- $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ (P43)



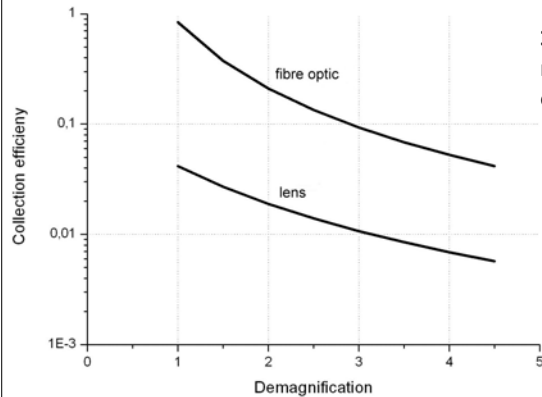
DETECTORS FOR SYNCHROTRON TOMOGRAPHY, H. Graafsma, T. Martin

• Оптоволоконная передача света предпочтительнее для регистрации света на больших апертурах.

• Эффективность передачи света (для порошковых экранов):

$$\eta = \left(\frac{1}{m}\right)^2 \left(\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1}\right)^{1/2} T_F(1 - L_R)F_c$$

m – коэффициент уменьшения,
 n_2, n_3 – коэф. преломл. Сердцевины и оболочки оптоволокна
 T_F коэф. пропускания волокна
 L_R – поверхностные потери на отражение
 F_c – плотность упаковки волокон (fill factor).



Эффективность передачи света при использовании линзы, влияние оптического увеличения изображения.

Световоды

Свет от сц.экрана к CCD доставляется 2-мя способами:

- 1) Система линз
- 2) Оптоволоконная система - фоконы (см. ранее)

Система линз - более простой и удобный способ для систем с высоким пространственным разрешением.

• Для порошковых экранов (излучение изотропно) эффективность передачи света

$$\eta = \frac{T_L M^2}{M^2 + 4f^2(1 + M)^2}$$

f – отношение фокальной длины к эффективному диаметру линзы,
 T_L – коэффициент трансмиссии (пропускания)
 M – коэффициент усиления изображения

• Для кристаллических конвертеров (излучение не изотропно) эффективность передачи света

$$\eta = \frac{T_L M^2}{16n^2 f^2(1 + M)^2}$$

n – коэффициент преломления кристаллического экрана.

Сравнение эффективности линз и оптоволоконных систем для порошковых сц. экранов.

magnification	lens coupling efficiency %	fibre-optic efficiency %
20×	18	-
10×	17	-
4×	13.7	-
1×	4.1	84
0.5×	1.9	21
0.25×	0.7	6

Линза с $f/1.2$,
 $T_L = 1, T_F = 1$

• Линзы более эффективны когда изображение увеличивается: микро томография на СИ

• При уменьшении изображения эффективность линз снижается – часть света теряется (при изотропном излучении)

• При уменьшении изображения более эффективны оптоволоконные системы
 Коэффициент уменьшения изображения не выше 3 из-за снижения эффективности передачи света.

Категории CCD:

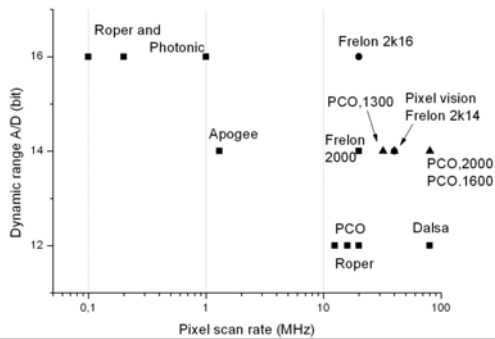
• **С медленным считыванием** (slow-scan camera) дин. диапазон до 16 бит, что достигается точными АЦП для уменьшения вклада при считывании в комбинации с *охлаждением* CCD. Эксперименты с длительной экспозицией.

• **Быстрые** 12-битные камеры. Доступны в широком диапазоне типоразмеров. Находят широкое применение.

Камеры со скоростью съемки 30-60 кадров/сек применяются для быстрой томографии, где скорость приоритетнее динамич. диапазона.

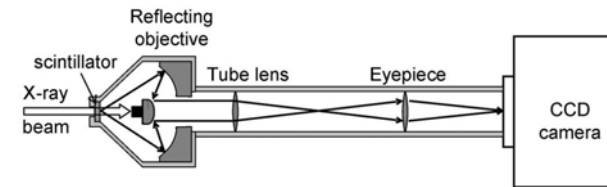
• **Промежуточный диапазон** – компромисс м/у быстродействием и дин. диапазоном – применяются для томографии на СИ.

Характеристики CCD матриц применяемых для томографии на СИ



CCD manufacturer	pixel size	array size	URL
Apogee	9 μm	1536 × 1024	www.ccd.com
Frelon	14 μm	2048 × 2048	www.esrf.fr
PCO	7.4 μm	2048 × 2048	www.pco.de
	7.4 μm	1600 × 1200	
Roper	6.8 μm	1317 × 1035	www.roperscientific.com
	6.45 μm	1392 × 1040	
Photonic	6.45 μm	1392 × 1040	www.photonic-science.co.uk
ATMEL	14 μm	2048 × 2048	www.atmel.com
Pixel Vision	14 μm	2048 × 2048	www.pvnc.com
Dalsa	12 μm	1024 × 1024	www.dalsa.com
	14 μm	1024 × 1024	

Детектор для микроскопии с отражающим объективом (ESRF)

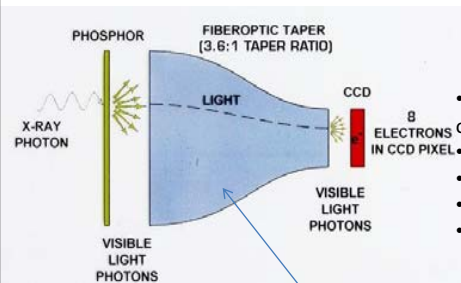


- Объектив состоит из вогнутого и выпуклого зеркал.
- Увеличение объектива 5x
- Радиус первого зеркала 135 мм, второго 50 мм, расстояния м/у ними 85мм
- Объектив имеет поглотитель прямого пучка, что позволяет предотвратить CCD и линзы от радиационных повреждений

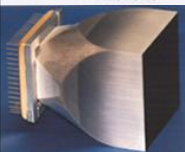
Достоинства по сравнению с системами рефракции:

- Нет отражения от зеркала – передающего изображения с сц.экрана на оптику
 - Отсутствие радиац. повреждений оптических компонент
- Но более высокая стоимость!

Двухкоординатный рентгеновский детектор с фоконом

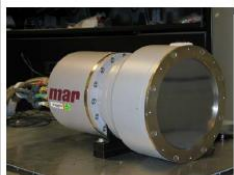


- Для увеличения поля зрения применяют волоконно-оптические конуса
- Размерность матриц CCD ~неск. тыс. пикселей (X,Y)
- Размер пиксела CCD 10-20 мкм
- Время считывания 1-5 с.
- CCD обычно охлаждается для снижения шума.



Fiber Optic Taper
(1 – 3 De-Magnification)

- Для рентгена широко применяется фосфор $Gd_2O_2S(Tb)$: высокоэффективен и время высвечивания неск. сотен мкс.
- Детекторы могут иметь большую площадь ~ тыс. mm^2 (кристаллография макромолекул)



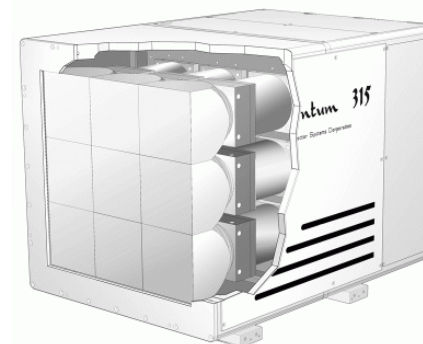
Mar 165



Bruker 6500

Area Detector Systems Corporation

- Для увеличения площади регистрации применяют модульные конструкции 2x2 и др.
- При параллельном считывании данных с модулей время считывания не увеличивается

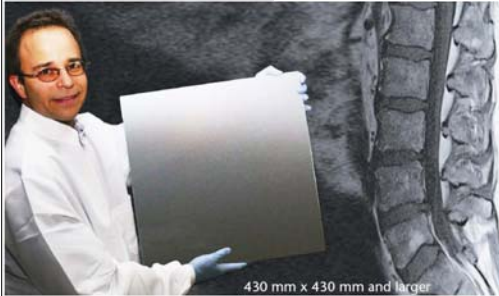


Specification	Quantum 4r	Quantum 210r	Quantum 315r
Detector type	Array 2x2	Array 2x2	Array 3x3
Active area (mm)	188 x 188	210 x 210	315 x 315
Number of Pixels	2304 x 2304	4096 x 4096	6144 x 6144
Pixel size (microns)	82 x 82	51 x 51	51 x 51
Inactive width strip (microns) (pixels)	400 5	400 8	400 8
CCD type	EEV 05-30 AIMO	Thomson THX 7899 (2K x 2K)	Thomson THX 7899 (2K x 2K)
Readout Time (seconds) Full Resolution 2x2 binned	9 and 3 1	1 0.5	1 0.5
Dimensions (mm)	330 x 356 x 610	330 x 356 x 650	410 x 460 x 920
Weight (kg)	48	54	141
Operating Temp (°C)	-50	-45	-45

X-Large Format Fiber Optic Faceplates

High Resolution Image Transfer for Digital X-Ray Applications

SCHOTT
glass made of ideas



430 mm x 430 mm and larger

Фасетная оптоволоконная пластина для рентгеновских приложений

- **Может служить субстратом для нанесения** *сц-ра*
- **Фотопроводник** (с высокой разрешающей способностью и высоким коэффициентом передачи) *сц-ра* к **фотодетектору** (CCD, CMOS)
- **Эффективно поглощает рентген:** предотвращает старение фотодетектора
- **Диаметр волокна от 4 мкм и более**

Typical Performance Parameters	Glass Type			
	47A	47A HT	47A RH	48A
Fiber Size (µm)/ Resolution (lp/mm)	6/83	6/83	6/83	25/20
Numerical Aperture	1.0	1.0	1.0	1.0
Stray Light Control (EMA)	Yes	Yes	Yes	Yes
Collimated Transmission at 550 nm: 3 mm Thick (%)	73	78	62	60
Coefficient of Thermal Expansion ($\times 10^{-7}/K$)	68	70	68	98
Maximum Formats (mm)	300 x 375	300 x 375	300 x 375	430 x 430 ft larger
X-Ray Attenuation %				
28 kVp	98.8	98.9	98.8	98.9
70 kVp	96.3	97.7	96.5	97.2
140 kVp	67.8	73.0	69.1	66.9
Density, g/cm ³	4.15	4.50	4.15	4.23

Background

Quantum Efficiency (QE)

The QE of the CCD is governed by the ability of the incident photons to be absorbed in the depletion region of the sensor. To understand how the photon is absorbed in this key region, or not, is a key factor in understanding the QE range of the variety of sensors on offer. Although there are other factors which effect the final shape of the QE curve such as the different materials and their different absorption coefficient and the reflectance of the silicon the most dominant and straightforward impact on the sensor QE is the structure of the actual CCD. If we look at the CCD in cross-section it helps to illustrate this point as shown in Fig. 1.

In a front illuminated device, photons falling on the CCD must travel through the region of the gate electrodes structures. These structures are very strong absorbers of lower energy X-ray photons, which can be absorbed within a few nm of material.

As a general rule, the absorption length of the incident X-ray increase that is lengthens, with increasing energy. If we apply this simple rule to photons incident on the CCD structure, we can see that in a front illuminated device photons must travel through the regions of the gate electrodes structures, AR coating (if applicable) and the oxide layer, effectively making up a 'dead zone' before entering the depletion zone. The effective depth of this zone will also delineate the probability of absorption of the higher energy photons, with the incident photons energies increasing to a point where their absorption length is longer than the depth, hence the probability of capture approaches zero. This also explains the QE strengthening to a peak then reducing as the energy increases. Another point to note is that the discontinuities or

edges seen in the QE are the result of the intrinsic properties of the silicon, the absorption edges L-edge at 100.6 eV and K-edge at 1.8 keV.

Other Sensors:-

Deep Depletion sensors, as the name suggests, extend the depth of the depletion zone and thereby increase the higher energy range that they can directly detect.

Back-illuminated sensors are sensors that have been effectively inverted so the electrode structure is no longer on the top surface but the bottom. The bulk of silicon is also removed leaving only a very thin 'dead zone' layer, thus allowing the softer X-ray detection.

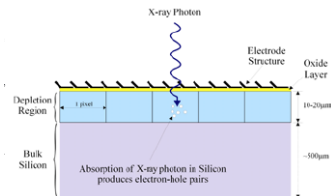


Fig. 1. A schematic cross-section illustrating direct detection of an X-ray photon by a CCD sensor.

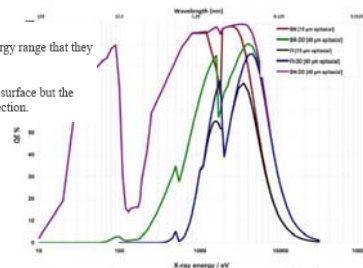


Fig. 2. Quantum efficiency curves for a range of sensor types - direct detection

Technical Note Indirect Detection

With energies of $> \sim 22$ keV, the CCD is no longer able to directly detect the incident photons. This means a transducer needs to be introduced into the system to convert the incident photons to photons, which are again visible to the detector.

'Two Step' Detection

The first step in this 'two step' detection is a material, commonly a scintillator, to convert the incident X-ray's photons into visible wavelength photons, which can then be directly detected by the CCD in the second step. These 'converter' materials comprise of an extensive range of options of both phosphors and scintillators, selection depends on the specific requirement for detection, for example energy range, spatial resolution etc.

As is shown in the sensor range diagram, this method of detection is the only option once the energies of X-ray photons (> 20 keV) are to be detected as the CCD is no longer able to absorb the photons within the depletion zone. The requirement to convert the incident photon has some key disadvantages, primarily the actual conversion process is very inefficient. Also, as the incident photon is no longer directly detected there is no longer the ability to correlate the number of electrons to the incident energies. There has been a series of evolutions of design and in the components, which has improved the detection of signal.

Methods of Indirect Detection

Phosphor

The sensor is coated with a phosphor, for example Gadolinium Oxysulphide ($Gd_2O_3:Tb$) often referred to as GADOX, also known as P43. This phosphor absorbs X-ray photons and emits visible photons predominately at 545 nm (2.28 eV), and has approximately a 15% conversion efficiency, i.e. 15% of the absorbed X-ray photon energy is converted into visible photons. However, only a fraction of these generated photons will reach the detector as they are emitted in all directions. This illustrates the inefficiency of the conversion process with both signal and spatial resolution, as the secondary emission will effectively spread from the generation point. Increasing the depth of the scintillator, or phosphor, relates to the energy range that it will be able to absorb and convert, however the thicker it becomes, there is an equivalent reduction in the spatial resolution, so again a balance must be found.

Fiber Faceplate and Scintillator/Phosphor

The next development was to place fiber-optic, coated or bonded to a scintillator. This effectively acts to maintain spatial resolution as it channels the light via the individual fibers onto the sensor, reducing the spread of the light from the generation point. The introduction of the fiber-optic has other important advantages, the fiber can be extruded to form a taper, this increases the area that can be imaged, albeit with a demagnification of the image. It can also offer protection to the sensor from the harder X-rays, which are in themselves damaging to the silicon structure of the CCD.

Lens Based Systems

There has been a growing interest in the use of lens-based camera systems to image scintillator screens. The method is popular as the active area of the scintillator can be very large, 50 cm² and larger. With the camera protected from the direct path of the damaging hard X-ray, even neutron and gamma sources can be used in this method. From a camera position this is also a simpler and easier method as there is no need to modify or change the standard camera which allows for a quick and easy replacement or upgrade.

Each of these versions have their associated advantages and disadvantages, however some simple rules can be applied:

- The more components in the optical path the less the transmission
- Higher Spatial resolution requires the light to be channelled or focussed
- If imaging greater than 5x sensor area a lens system is required
- If the distance from scintillator >10's cm, a lens is required

There are further variations on these basic types of indirect detection. At Andor we have cameras in all versions and we use a dedicated team to design and build these bespoke systems. The design process looks at the requirements and matches the variety of components options, such as fiber and scintillator, to produce a final quality Andor product. Contact your local sales representative. For details of our CSR (Customer Special Request) process, see page 20 where we can deliver an Andor quality camera for your specific requirement.

Direct Detection

Direct detection occurs when an incident photon is absorbed within the silicon of the CCD, resulting in the production of the electron-hole (e-h) pairs. If this absorption occurs within the depletion region of the CCD, the electrons and holes are separated by the applied internal electric field, generated by the CCD's electrode structure. The electrons are being trapped by the field and the holes undergo rapid recombination. The trapped electrons can subsequently be 'clocked' to the amplifier and readout. For this reason only the electrons of the e-h pairs formed in the depletion zone will be read out as signal. When an incident photon is absorbed, the number of e-h pairs formed and the size of the cloud they form in the silicon is directly related to the energy of the incident photon. These relationships are shown in the graphs and tables that follow.

The equation holds for photon energies >10 eV, assuming an ideal quantum yield.

$$N_{e-h} = \frac{E(eV)}{E_{eh}} \quad \begin{matrix} e.g \\ For 5.9 keV \\ E(eV) = 5900 \end{matrix} \quad N_{e-h} = \frac{5900}{3.65} = 1616 e^-$$

N_{e-h} - Average number of e-h pairs formed
 E_{eh} - Energy required to generate an e-h pair 3.65 eV/e for Silicon at RT
 $E(eV)$ - Energy of the incident photon

N_{e-h} - Average number of e-h pairs formed
 E_{eh} - Energy required to generate an e-h pair 3.65 eV/e for Silicon at RT
 $E(eV)$ - Energy of the incident photon

Energy-Dispersion Detection

The relationship between incident photon energy and the number of electrons that are generated in the CCD means that in a low flux situation, single photons per pixel events, the energy of the X-ray source can be calculated. This powerful technique is key for EDS [energy-dispersive spectroscopic] applications. This is possible by using the histogram generated from the image pixels signal levels. The peaks found in this histogram give a count level from which the number of electrons generated can be derived using the cameras sensitivity, the incident photon energy can then be found.

Energy Resolution

The energy resolution is a measure of the ability to resolve individual energy lines. It can be calculated by the FWHM of the energy peaks. The theoretical limiting energy resolution for a CCD is related by the equation* below.

$$FMHW(eV) = 2.355[E(eV)E_{eh} F]^{1/2}$$

F = Fano Factor = 0.1*
 $E(eV)$ = Energy of incident photon
 E_{eh} = energy to generate a e-h pair

Unit Conversion	
Wavelength	Pressure
1 nm = 10 Å	1 Torr = 1/760 atm
eV = 1239 / nm	1 Torr = 133.322 Pa
	1 Torr ≈ 1 mbar

The direct detection energy resolution of a CCD camera is an effective method of testing the performance of the camera. The design and interface must be optimal to approach the theoretical energy resolution, with all the camera key performance parameters optimised.

Andor builds the worlds leading cameras because we optimise these parameters to achieve the best system performance, from the design through to the final build stage of our world leading camera platforms. Across the system's key parameters the highest performance must be achieved; charged transfer efficiency (CTE), the noise of the electronics, the lowest dark current a linear response over the entire dynamic range, at Andor we do this as standard.

Energy Range (eV)	e-h pairs generated per absorbed photon
1.1-3.1	single e-h pair
>3.1	multiple e-h pairs

Table 1. Relationship of electron hole generation to energy range

*The Fano Factor is an empirical constant used to determine the variation in charge generated when an X-ray photon or particles interact. The factor is empirically derived and is determined to be 0.1.

Reference: James R. Jespersen - Scientific Charge-Coupled Devices

