

Детекторы фотонов вакуумного типа

Краткий обзор на основе лекции Thierry Gys, CERN PH/DT2

Неорганические скинтилляторы

| Scintillator material | Density [g/cm ³] | Refractive Index | Wavelength [nm] for max. emission | Decay time constant [μs] | Photons/MeV |
|---|------------------------------|------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| NaI | 3.7 | 1.78 | 303 | 0.06 | 8 · 10 ⁴ |
| NaI(Tl) | 3.7 | 1.85 | 410 | 0.25 | 4 · 10 ⁴ |
| CsI(Tl) | 4.5 | 1.80 | 565 | 1.0 | 1.1 · 10 ⁴ |
| Bi ₄ Ge ₂ O ₁₂ | 7.1 | 2.15 | 480 | 0.30 | 2.8 · 10 ³ |
| CsF | 4.1 | 1.48 | 390 | 0.003 | 2 · 10 ³ |
| LSO | 7.4 | 1.82 | 420 | 0.04 | 1.4 · 10 ⁴ |
| PbWO ₄ | 8.3 | 1.82 | 420 | 0.006 | 2 · 10 ² |
| LHe | 0.1 | 1.02 | 390 | 0.01/1.6 | 2 · 10 ² |
| LAr | 1.4 | 1.29* | 150 | 0.005/0.86 | 4 · 10 ⁴ |
| LXe | 3.1 | 1.60* | 150 | 0.003/0.02 | 4 · 10 ⁴ |

* at 170 nm

Органические скинтилляторы

| Scintillator material | Density [g/cm ³] | Refractive Index | Wavelength [nm] for max. emission | Decay time constant [ns] | Photons/MeV |
|-----------------------|------------------------------|------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Naphtalene | 1.15 | 1.58 | 348 | 11 | 4 · 10 ³ |
| Antracene | 1.25 | 1.59 | 448 | 30 | 4 · 10 ⁴ |
| p-Terphenyl | 1.23 | 1.65 | 391 | 6-12 | 1.2 · 10 ⁴ |
| NE102* | 1.03 | 1.58 | 425 | 2.5 | 2.5 · 10 ⁴ |
| NE104* | 1.03 | 1.58 | 405 | 1.8 | 2.4 · 10 ⁴ |
| NE110* | 1.03 | 1.58 | 437 | 3.3 | 2.4 · 10 ⁴ |
| NE111* | 1.03 | 1.58 | 370 | 1.7 | 2.3 · 10 ⁴ |
| BC400** | 1.03 | 1.58 | 423 | 2.4 | 2.5 · 10 ² |
| BC428** | 1.03 | 1.58 | 480 | 12.5 | 2.2 · 10 ⁴ |
| BC443** | 1.05 | 1.58 | 425 | 2.2 | 2.4 · 10 ⁴ |

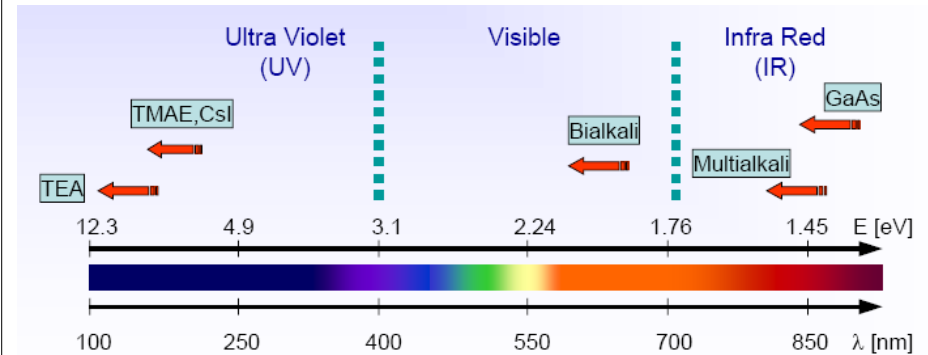
* Nuclear Enterprises, U.K.
** Bicron Corporation, USA

фотоны видимого диапазона

Фотодетекторы

1. Газовые (см. ранее)
2. Вакуумного типа
3. Твердотельные (п/п) (в следующей лекции)
4. Гибридные – сочетают несколько признаков: вакуум+п/п

Порог фотоэмиссии для различных материалов



CERN Academic Training Programme 2004/2005

Фотодетекторы: основные положения

- **Назначение:** преобразовать фотоны видимого диапазона энергий 1-10 эВ в электрический сигнал
- **Принцип преобразования:** фотоэлектрический эффект – поглощение фотонов в материале катода (**фотокатода**) с эмиссией электронов

- **Энергия фотонов мала:** основное требование высокое усиление первичного сигнала
- Эффективность преобразования фотонов в электроны описывается **квантовой эффективностью** = количество фотоэлектронов на один поглощенный фотон

$$QE(\lambda) = \frac{N_{ph-e}(\lambda)}{N_{\gamma}(\lambda)}$$

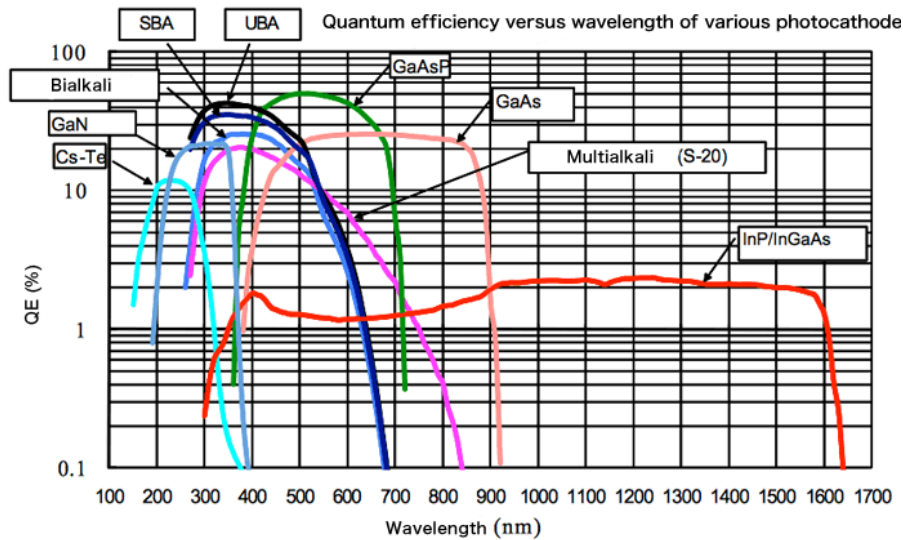
- Эквивалентная характеристика фотокатода – **излучательная чувствительность катода**

$$E(\lambda) = \frac{I_k}{P(\lambda)} \quad \begin{array}{l} I_k - \text{эмиссионный ток фотоэлектронов с катода} \\ P(\lambda) - \text{мощность падающего фотонного излучения} \end{array}$$

$$E(\lambda) = \lambda QE(\lambda) \frac{e}{hc} = \frac{\lambda QE(\lambda)}{1240} \quad \begin{array}{l} \text{A/Вт} \\ \lambda \text{ в нм} \end{array}$$

- **Также частыми требованиями являются:** низкий уровень собственного шума\темнового тока, низкие флуктуации усиления и размер чувствительной области, температурный диапазон, максимальная плотность фототока (до деградации фотокатода)
- **По принципу регистрации:** счетчики (счет ед. фотонов), интеграторы (экспозиция за устан. время)

Квантовая эффективность фотокатодов



<http://www.hamamatsu.com/jp/en/technology/innovation/photocathode/index.html>

Материалы фотокатодов

Ag-O-Cs (серебряно-кислородно-цезиевый или S-1). Первый многокомпонентный материал для фотокатодов (1929 г.) Спектральная чувствительность от 300 нм до 1200 нм. Высокий темновой ток, поэтому современные ФЭУ с этим фотокатодом используются в инфракрасной области с охлаждением.

Sb-Cs (сурьмяно-цезиевый). Сп. чувств-сть от УФ до видимого света (макс. 420 нм). Используется в основном в фотокатодах, работающих в отражательном режиме.

Бищелочной (сурьмяно-рубидиево-цезиевый Sb-Rb-Cs, сурьмяно-калиево-цезиевый Sb-K-Cs). Спектральный диапазон подобен Sb-Cs фотокатоду (син-зел. область), но чувствительность выше, а темновой ток ниже. Хорошо подходит к эмиссионным спектрам наиболее распространенных сцинтилляторов. Часто используются для измерения в сц. детекторах. Sb-K-Cs фотокатод более чувствителен, но имеет вдвое более высокий темновой ток по сравнению с Sb-Rb-Cs.

Высокотемпературный бищелочной, или **низкошумящий бищелочной** (натриево-калиево-сурьмяной, Na-K-Sb). Часто применяется в скважинном каротаже, т.к. его рабочий диапазон - до 175 °С. При комн. Темп-ре обеспечивает очень низкий уровень темнового тока, т.е. может применяться для счета фотонов.

Мультищелочной (натриево-калиево-сурьмяно-цезиевый, Na-K-Sb-Cs или S-20). Широкий диапазон: от УФ до ближней ИК области. Часто применяется для широкополосных спектрофотометров и приложений, использующих счёт фотонов. Фотокатод состоит из плёнки бищелочного Na-K-Sb, покрытой дипольным поверхностным слоем Cs-Sb или Cs, снижающим работу выхода электрона.

GaAs (арсенид-галлиевый). Еще больший диапазон чувствительности, чем у мультищелочного: от УФ до 930 нм.

InGaAs (арсенид галлия-индия). Имеет большую чувствительность в ИК диапазоне по сравнению с GaAs. В диапазоне 900-1000нм имеет гораздо лучшее отношение сигнал/шум, чем Ag-O-Cs. При изготовлении по специальной технологии этот фотокатод может работать до 1700 нм.

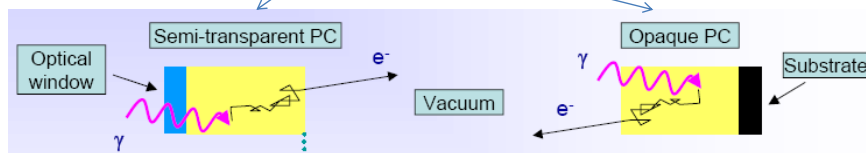
Cs-Te, Cs-I (теллурид-цезия, иодид цезия - **солнечно-слепые**). Сп. диапазон: вакуумный (~150 нм) и ближний УФ (300 нм), до видимого света: Cs-Te до 320 нм, а Cs-I до 200 нм.

Фотоэлектрический эффект происходит в 3 стадии (модель W.E.Spicer):

- 1) Поглощение энергии фотона атомом с выходом электрона
- 2) Диффузия электрона через материал (часть его энергии теряется)
- 3) Электрон достигает поверхности катода и покидает материал (его энергии д.быть достаточно для выхода из материала: работа выхода)

Идеальный фотокатод должен поглотить все фотоны и излучить все образовавшиеся электроны

- 2 типа фотокатодов: 1) полупрозрачный – работает на «пролет»**
2) непрозрачный (отражательный режим)



- Процесс эмиссии электронов описан в теории Спайсера.
- Эффективность выхода электронов из фотокатода для частоты фотонов ν (квантовая эффективность)

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{\alpha_{PE}}{\alpha} \left(\frac{1}{1 + \alpha L} \right) \cdot p_s$$

R : коэффициент отражения фотонов

α : коэффициент оптического поглощения фотонов

α_{PE} : коэффициент поглощения фотонов когда электроны получают энергию большую уровня вакуума

L : диффузионная длина электронов

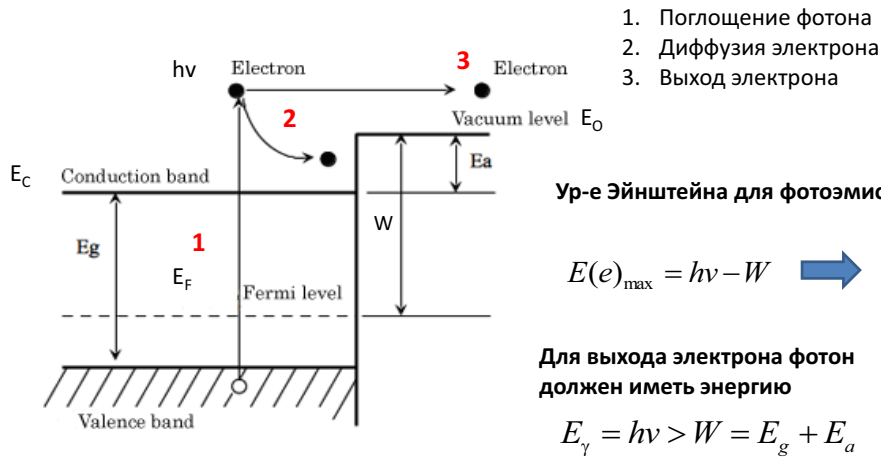
p_s : вероятность выхода электронов в вакуум

ν : частота фотонов ($E=h\nu$)

Из выражения следует, что увеличить кв. эф. фотокатода можно например

- 1) увеличив диффузионную длину L с помощью улучшения кристаллических свойств фотокатода
- 2) Уменьшая энергию сродства электронов, увеличивая p_s

Зонная структура щелочных фотокатодов



1. Поглощение фотона
2. Диффузия электрона
3. Выход электрона

Ур-е Эйнштейна для фотоэмиссии:

$$E(e)_{\max} = hv - W \rightarrow$$

Для выхода электрона фотон должен иметь энергию

$$E_{\gamma} = hv > W = E_g + E_a$$

Щелочные металлы имеют низкую работу выхода

Na-K-Sb-Cs (S-20) $W=1.4$ эВ

E_g – ширина запрещенной зоны

E_F – энергия Ферми

E_0 – энергия вакуума

$W = E_0 - E_F$ – работа выхода электрона

E_C – минимальная энергия зоны проводимости

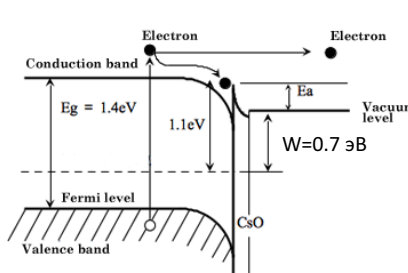
$E_a = E_0 - E_C$ – энергия сродства электрона

Кристаллические п\п фотокатоды (видимый диапазон и ИК)

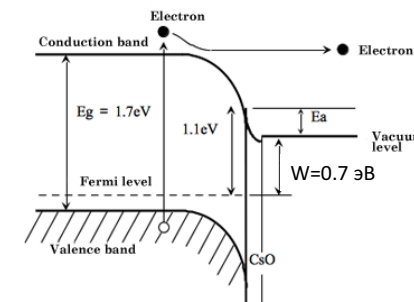
- Основа фотокатода – п\п кристаллы GaAs (арсенид галлия) или GaAsP (фосфид арсенида галлия) – материалы с малой шириной запрещенной зоны и низкой работой выхода
- Нанесение на поверхность кристалла тонкого слоя оксида цезия CsO с последующей активацией приводит к перестройке зонной структуры близи поверхности:

- Энергия сродства электронов становится отрицательной – фотокатоды с отрицательной энергией сродства электронов (Negative Electron Affinity photocathodes).
- Электроны со дна зоны проводимости могут выйти в вакуум, что обуславливает чувствительность до 900нм (соответствует ширине запрещенной зоны E_g).

- В кристаллах с большей шириной запрещенной зоны эффект проявляется заметнее.
- Использование GaAsP позволяет увеличить квантовую эффективность фотокатода почти в 2 раза (до 50%).



Модель зонной структуры для GaAs



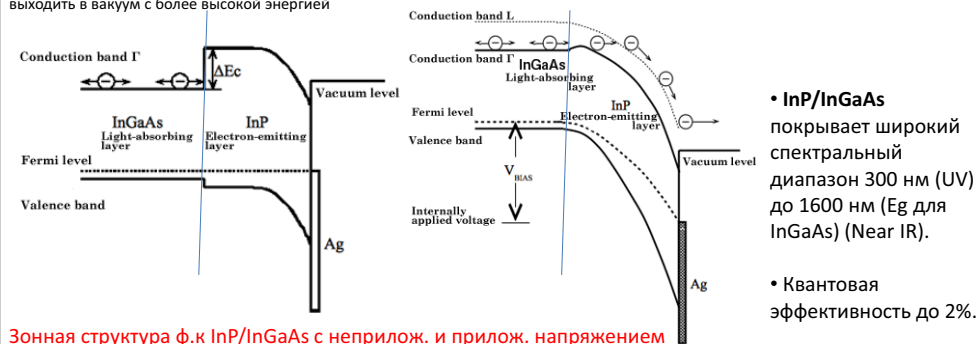
Модель зонной структуры для GaAsP

Ближний диапазон инфракрасного излучения

- В ближней ИК области $\lambda > 1.1$ мкм используются фотокатоды InP/InGaAs с переносом электронов через гетеропереход (контакт двух п\п).
- На поверхность п\п наносится тонкий металлический слой (~5 нм, серебро) для формирования барьера Шоттки. (потенциальный барьер, возникающий в приконтактном слое п/п-металл, равный разности работ выхода металла и полупроводника)
- Приложение напряжения между электродом Шоттки и обратной стороной п\п кристалла формирует электрическое поле внутри фотокатода. Это позволяет существенно снизить поверхностный потенц. барьер, ускорить фотоэлектроны и легче выйти им в вакуум.

Зонные модели фотоэлектронной эмиссии в фотокатоде с гетеропереходом

- 1) Напряжение не приложено: фотоэлектроны из светопоглощающего слоя InGaAs не могут преодолеть барьер в области проводимости ΔE_C и достигнуть поверхности эмиссии в InP.
 - 2) При приложении напряжения, формируется обедненная область на границе электрода Шоттки вглубь п\п и происходит перестройка зонной структуры: потенциальный барьер снижается и электроны легко выходят в вакуум из InP.
- Кроме этого электроны ускоряются в слое InP и способны перейти со дна зоны проводимости Γ в выше лежащую область L , и затем выходить в вакуум с более высокой энергией



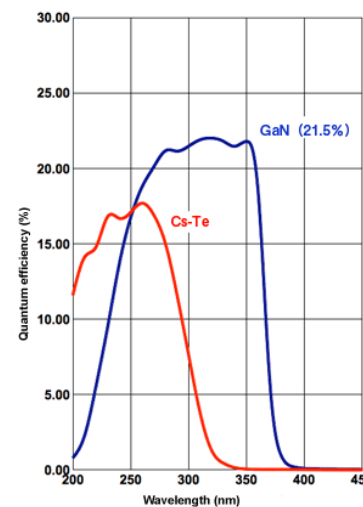
• InP/InGaAs покрывает широкий спектральный диапазон 300 нм (UV) до 1600 нм (E_g для InGaAs) (Near IR).

• Квантовая эффективность до 2%.

Зонная структура ф.к InP/InGaAs с неприм. и прим. напряжением

Ф.к. для ультрафиолетового диапазона

П\п нитрид галлия GaN работает в пропускающей свет моде. GaN формируется при эпитаксии на сапфировой подложке, и на стекле (новая технология HAMAMATSU через выращивание пленок на кремнии) Кв. эффективность более 20% для УФ.



На рис. сравнение спектральных характеристик традиционного УФ ф.к. теллурида цезия Cs-Te и GaN (QE=21.5% для 380 нм).

GaN ф.к. применяются в электронно-оптических преобразователях УФ диапазона (ultraviolet image intensifiers).

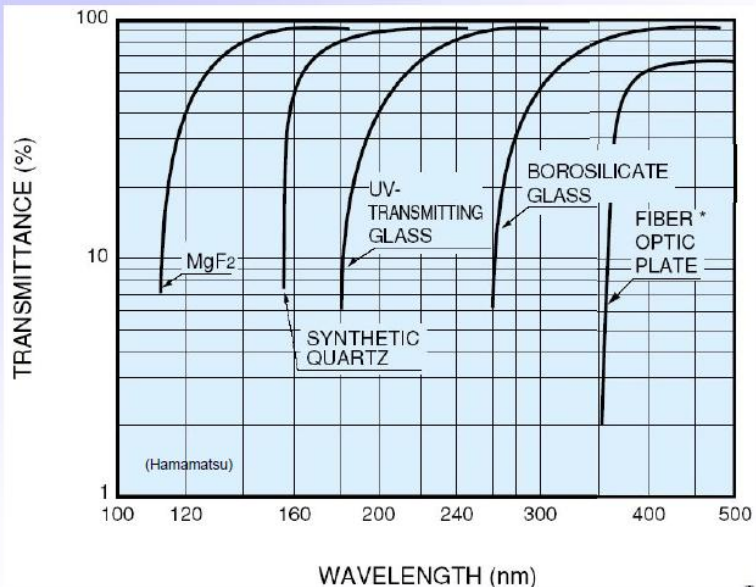


Фото-электронные умножители (ФЭУ)

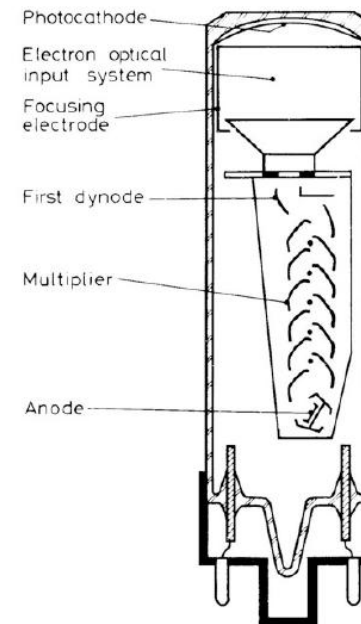
Принцип работы:

- Поглощение фотона в фотокатоде
- Эмиссия электронов из фотокатода
- Вторичная эмиссия электронов из цепочки динодов

Усиление обычно $>10^6$

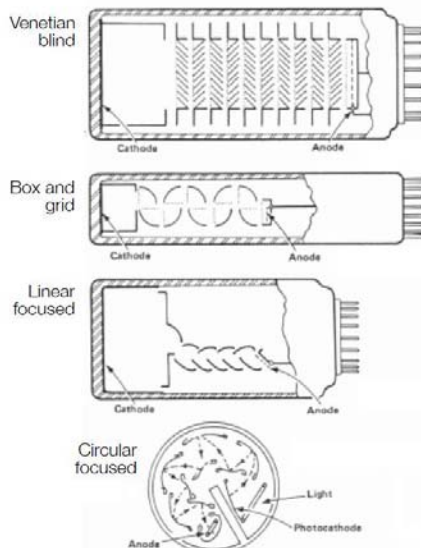


PMT Collection



Классификация ФЭУ по типу динодов

- 1) системы на дискретных динодах с электростатической фокусировкой электронных пучков (наиболее часто используемые диноды коробчатые, ковшеобразной и тороидальной формы)
- 2) системы на дискретных динодах сквозного типа (динодами являются сетки, жалюзи, плёнки),
- 3) системы на распределённых динодах (пластинчатые, щелевые и трубчатые).

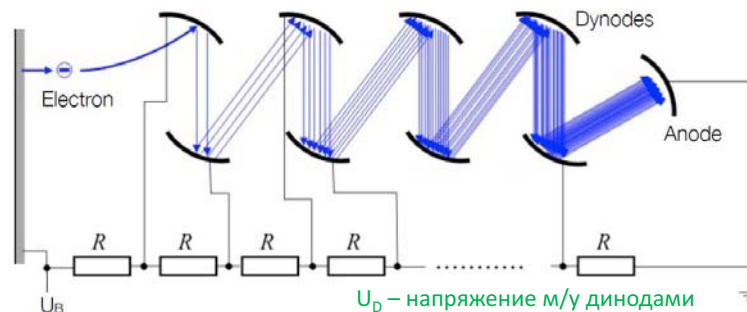


Оптимизация по

- 1) Усилению
- 2) Изоляции анода
- 3) Линейности сигнала
- 4) времени дрейфа электронов

Высокая чувствительность к магнитному полю :
применяются магнитные экраны из мю-металла (магнито-мягкий сплав с высокой магнитной проницаемостью)

Усиление электронов на динодах



Развитие процесса усиления:

- Электроны эл. полем ускоряются и двигаются по заданным траекториям к динодам
- Выбиваются вторичные электроны
- Лавинообразное размножение электронов происходит ступенчато

Коэффициент вторичной электронной эмиссии:

$$\delta = \frac{N_e^{out}}{N_e^{in}}$$

Обычно: $\left. \begin{matrix} \delta = 2 - 10 \\ n = 8 - 15 \end{matrix} \right\} \rightarrow G = \delta^n = 10^6 - 10^8$

• Флуктуация усиления:

- Энергия электрона пришедшего к диноду определяется только разностью потенциалов:

$$\delta = kU_D$$

- Полное усиление: $G = \delta^n = (kU_D)^n$

- Приложенное напряжение: $U_B = nU_D = \frac{n}{k} G^{1/n}$

- Если продифференцировать U_B по n и найти минимум (усиление при мин. напряжении), то:

$$n = \ln G \quad \rightarrow \quad \frac{dG}{G} = n \frac{dU_D}{U_D} = n \frac{dU_B}{U_B}$$

При $n=10$ для обеспечения флуктуации усиления=10%, необходимо стабилизировать напряжение на уровне 1%, а для 1% - на уровне 0.1%!

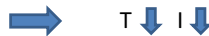
Современные источники напряжения позволяют обеспечить стабильность высокого напряжения на уровне 0.05%.

Источники темнового тока и остаточных пульсаций в ФЭУ

В ФЭУ в отсутствие света протекает ток – темновой ток, который вызван:

- 1) Термоэлектронная эмиссия с катода и динодов (тепловой шум)
- 2) Токи утечки
- 3) радиоактивные включения в материалах
- 4) явления ионизации
- 5) световые явления

• **Тепловой ток** описывается ур-ем Рихардсона: $I = AT^2 \exp\left(-\frac{eW}{kT}\right)$ A – пост., T в градусах К,
W – работа выхода,
k – пост. Больцмана.

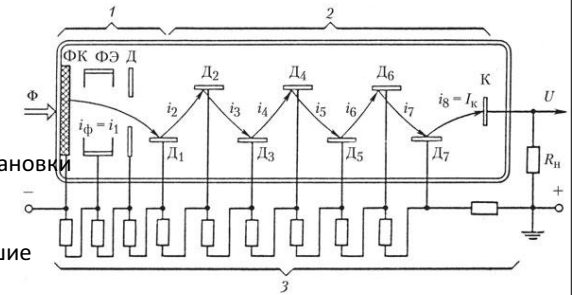


- Ток утечки проходит **через изолирующие поддержки электродов и внешние контакты**
- **Р/а включения в материалах** вызывают эмиссию электронов из динодов и фотокатода
- **Наличие остаточных газов в колбе.** Атомы ионизируются электронами, а вторичные ионы, ускоряясь полем, выбивают электроны из катода/динодов. – этот процесс вызывает остаточные пульсации во времени, которое равно времени дрейфа ионов в ФЭУ: ~0.1-1 мкс
- При больших токах остаточные пульсации могут быть вызваны **–свечением электрода:** Свет излученный с последних динодов может вернуться в фотокатоду и вызвать повторную лавину. Характерное время таких пульсаций 30-60нс после основного импульса, амплитуды малы.

Для большинства ФЭУ темновой ток на уровне ~ нА.

Делители напряжения

Д.н.- применяются для стабилизации напряжения на динодах. Состоят из цепочки резисторов с определенным номиналом точной установки напряжения на динодах .



Кроме этого д.н. предотвращает большие скачки разности потенциалов между динодами при измерении тока протекающего в ФЭУ.

Такие измерения могут приводить к флуктуациям усиления и линейности. При этом важно чтобы ток через резистивную цепочку (ток утечки) был больше тока через ФЭУ

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{I_{anode}}{I_{Rchain}} \frac{n(1-\delta)+1}{(n+1)(1-\delta)}$$

$\frac{I_{anode}}{I_{Rchain}}$ Средний ток на аноде
Ток утечки

Для достижения 1% линейности, необходимо иметь $\frac{I_{anode}}{I_{Rchain}} \approx 0.01$

При работе в импульсном режиме анодный ток может быть большим, особенно на последних стадиях усиления. Поэтому применяют дополнительную стабилизацию потенциала на последних динодах.

Энергетическое разрешение и статистический шум

- **Статистический шум обусловлен статистической природой процессов фотоэлектрического эффекта на фотокатоде и вторичной электронной эмиссии с динодов**
- **При постоянном потоке фотонов, число электронов выходящих с фотокатода описывается Пуассоновским распределением**

η – эффективность светосбора

$$P_n(n_e) = \frac{n_e^n e^{-n_e}}{n!} \quad n_e - \text{число фотоэлектронов: } n_e = \frac{dE}{dx} \times \frac{\text{Photons}}{\text{MeV}} \times \eta \times Q.E.$$

Для сч. NaI(Tl) и фотонов 10 МэВ: $n_e = 20000$
Photons/MeV=40000, $\eta=0.2$, $Q.E.=0.25$ $\sigma_n / \langle n \rangle = 0.7\%$

Это есть фундаментальное физическое ограничение разрешения ФЭУ

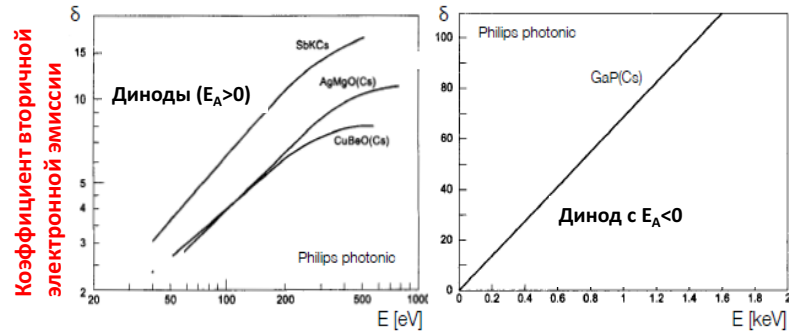
- **Флуктуация электронов при усилении на динодах**

$$P_n(\delta) = \frac{\delta^n e^{-\delta}}{n!} \quad \text{Для N динодов: } \left(\frac{\sigma_n}{\langle n \rangle}\right)^2 = \frac{1}{\delta} + \dots + \frac{1}{\delta^N} \approx \frac{1}{\delta - 1}$$

Другие флуктуации в системе усиления электронов:

- Разность времени дрейфа электронов м/у динодами
- Неоднородность коэффициента δ на динодах и др. факторы

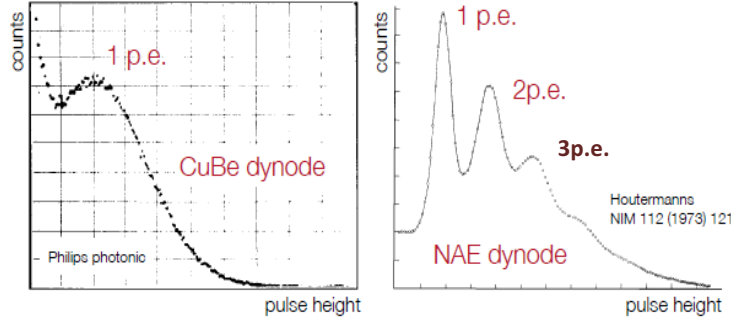
Тип материала динода определяет амплитудное разрешение ФЭУ



Коэффициент вторичной электронной эмиссии

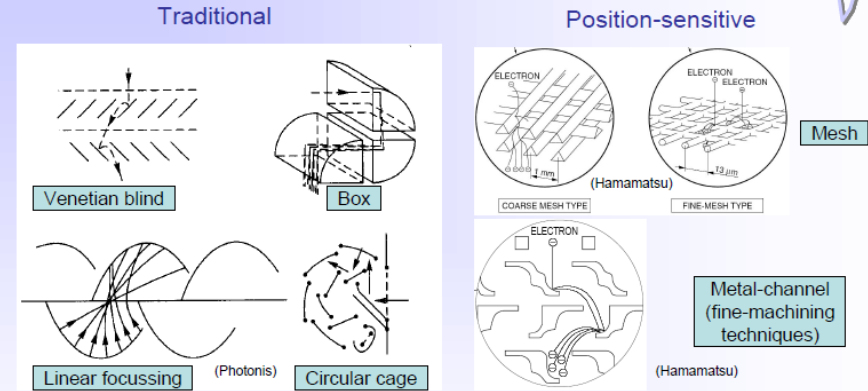
$$\sigma_n / \langle n \rangle = 1 / \sqrt{\delta}$$

Для лучшего энергетического разрешения предпочтительнее материалы с высоким δ



Dynode configurations of PMT's

3b Photo-detection



• "Fast" PMT's require well-designed input electron optics to limit (e) chromatic and geometric aberrations → transit time spread < 200 ps;
 • PMT's are in general very sensitive to magnetic fields, even to earth field (30-60 μ T). Magnetic shielding required.

CERN Academic Training Programme 2004/2005

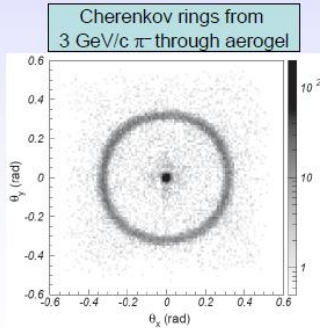


Multi-anode and flat-panel PMT's

3b Photo-detection

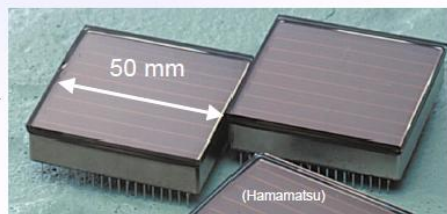


- Multi-anode (Hamamatsu H7546)**
- Up to 8 x 8 channels (2 x 2 mm² each);
 - Size: 28 x 28 mm²;
 - Active area 18.1 x 18.1 mm² (41%);
 - Alkali PC: QE \approx 20% @ λ_{max} = 400 nm;
 - Gain \approx 3 10⁵;
 - Gain uniformity typ. 1 : 2.5;
 - Cross-talk typ. 2%



(T. Matsumoto et al., NIMA 521 (2004) 367)

- Flat-panel (Hamamatsu H8500):**
- 8 x 8 channels (5.8 x 5.8 mm² each);
 - Excellent surface coverage (89%)



CERN Academic Training Programme 2004/2005

Микроканальные пластины

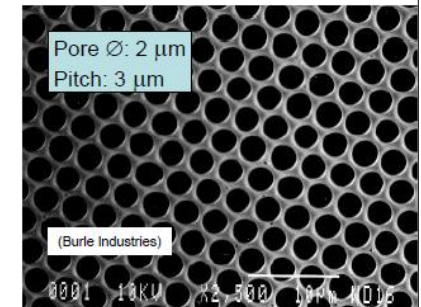
Непрерывная цепочка динодов, обычно каналы имеют наклон для минимизации обратного тока ионов



Материал: Свинцовое стекло
 На торцах: слой никрома

Характеристики:

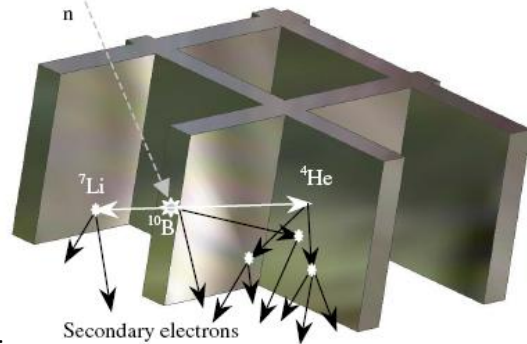
- усиление до 50000
- быстрый сигнал: временное разрешение \sim 50 пс
- менее чувствительны к магнитным полям 0.1-1 Тл
- ограниченное время жизни \sim 0.5 Кл/см²
- ограничение по току \sim мкА/см²
- \sim 40% электронов прошедших на пластину усиливаются не эффективно
- управление высоким напряжением для пропускания электронов
- Можно использовать каскадное усиление: 2 X MCP усиление до 10⁶



MCP

Применяются для регистрации ионов, электронов, рентг. излучение, UV

- + Расчетная эффективность до 80%
- + FWHM – размер канала (10-25 мкм)
- + $\Delta t < 1$ нс
- + GAIN ~ 10000
- + угловая зависимость эффективности: возможное применение для коллимация пучка

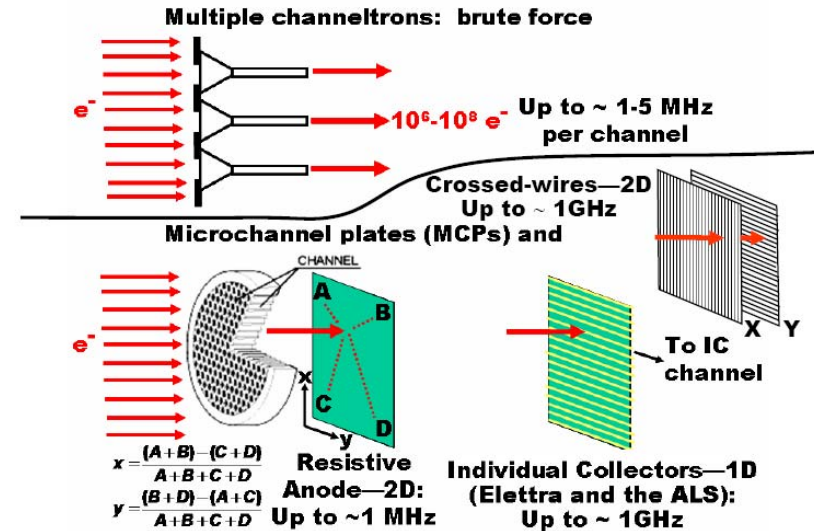


Стекло содержит примесь Бор-10

Производители МКП:
Hamamatsu Corp.
Del Mar Photonics
Burle Industries
PHOTONIS Group
North Inst.Tech.Indust.Group
ООО ВТЦ «Баспик»

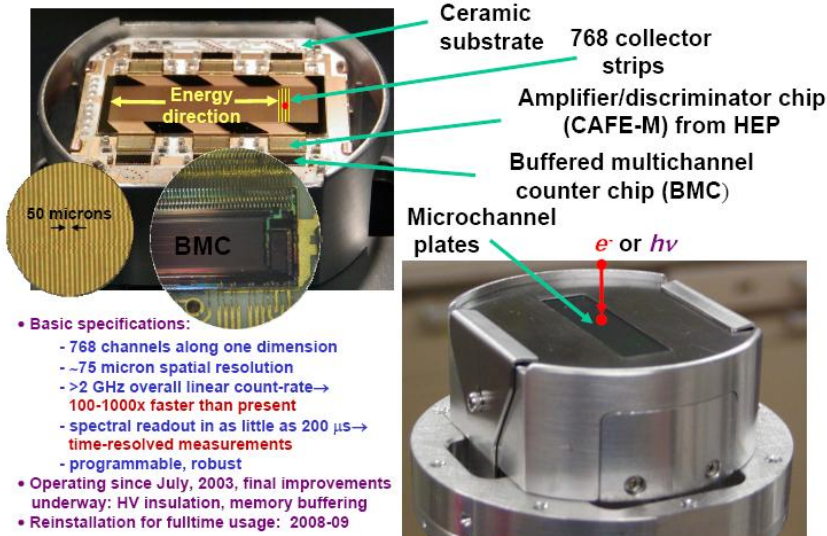
- Readout:
- 1) strips - LC delay line, pixel ... fast
 - 2) Phosphor screen + CCD slow

MULTICHANNEL DETECTION GEOMETRIES



C.Fadley, ICTP, Trieste, 2008

Next Generation Detection: ALS High-Speed Detector—1D



- Basic specifications:
 - 768 channels along one dimension
 - ~ 75 micron spatial resolution
 - > 2 GHz overall linear count-rate \rightarrow 100-1000x faster than present
 - spectral readout in as little as $200 \mu s \rightarrow$ time-resolved measurements
 - programmable, robust
- Operating since July, 2003, final improvements underway: HV insulation, memory buffering
- Reinstallation for fulltime usage: 2008-09

C.Fadley, ICTP, Trieste, 2008

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП или image intensifier)

Назначение:

- 1) Преобразование невидимого глазом излучения (ИК, УФ, рентген) в видимое
- 2) Усиления яркости изображения

Принцип работы:

- Первичное излучение в фотокатод преобразуется в электронное
- Электроны преобразуются в видимое излучение на люминесцентном экране.

- Для усиления слабых потоков фотонов содержат фотокатоды, в которых образуются электроны.
- Поток электронов усиливается (напр. МКП) и бомбардирует люминесцентный экран, воспроизводящий усиленное изображение.
- Регистрация усиленного изображения: глаз, CCD или другие.

ЭОП широко используются в приборах ночного видения.

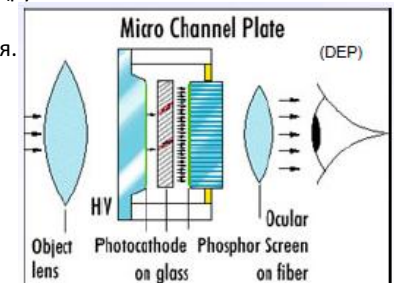




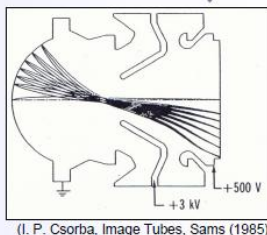
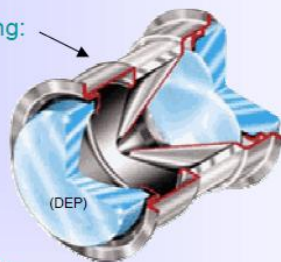
Image intensifier generations

3b Photo-detection

Gen. I - electrostatic focussing:

- high image resolution;
- wide dynamic range;
- low noise;

Время работы: 1000 часов

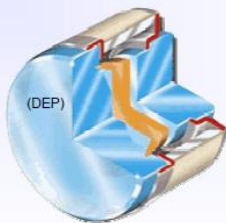


(I. P. Csorba, Image Tubes, Sams (1985))

Gen. II - Micro Channel Plate:

- worse resolution;
- much higher gain;

2000-2500 часов



Gen. III - GaAs photo-cathode; $E_A < 0$

- enhanced sensitivity in near infrared;
- 10000-15000 часов

CERN Academic Training Programme 2004/2005



Phosphor screens

extra slide not shown 3b Photo-detection

Principle:

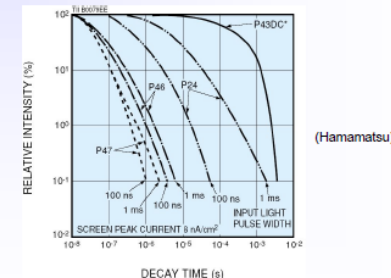
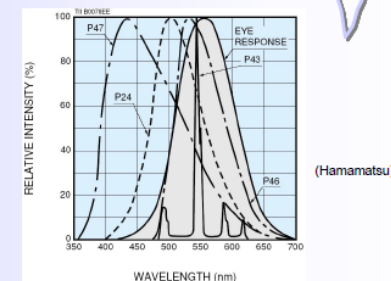
- absorb electrons;
- emit light on a characteristic λ of their material;

Spectral response:

- originally adapted to human eye response;
- must now match solid-state sensor response (e.g. CCD's);

Decay time:

- short (<100ns) for e.g. high-speed CCD's to minimize afterglow;
- long (~1ms) for night-vision and surveillance to minimize flicker;



C. D'Ambrosio, T. Gys, C. Joram, M. Moll and L. Ropelewski CERN - PH/DT2 Particle Detectors - Principles and Techniques 3b/15

CERN Academic Training Programme 2004/2005

Детекторы фотонов гибридного типа: п/п+вакуум

- Гибридные фото-детекторы: комбинация вакуумного и п/п детекторов
- Совмещают чувствительность ФЭУ с высоким пространственным и энергетическим разрешением кремниевых детекторов.
- Временное разрешение ~50 пкс, в то время как у лучших ФЭУ ~200 пс.

• Электроны из фотокатода разгоняются электрическим полем 10-20 кВ до энергий ~кэВ и образуют электрон-дырочные пары в п/п детекторе.

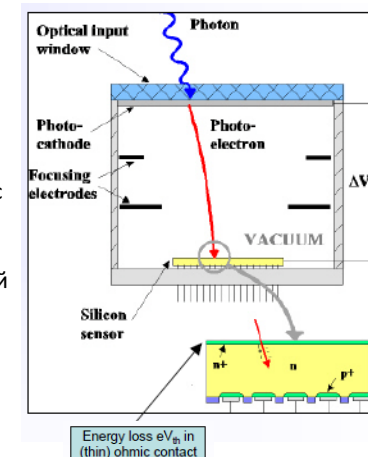
На образование пары эл/дырка в Si затрачивается 3.6 эВ.

- Фокусировка электронов осуществляется электростатическими линзами (фокусирующие электроды)
- Усиление осуществляется в один этап – поэтому энергетическое разрешение существенно лучше чем у много диодных ФЭУ

• П/п сенсор должен быть пригоден для работы в вакуумной трубке:

- 1) Низкое газовыделение и тренировка (термо отжиг с откачкой)
- 2) Отвод тепла
- 3) Соединение с внешней считывающей электроникой

- П/п сенсоры:
 - без усиления – CCD
 - с усилением – лавинные фотодиоды (~100)



Суммарное усиление может достигать ~10⁵

Энергетическое разрешение

• Фотоэлектроны разогнанные эл.полем (разность потенциалов м/у фотокатодом и контактом на п/п детекторе 10-20 кВ) теряют свою энергию на образование эл/дырочных пар в п/п
 Для кремния $W=3.6$ эВ

• Усиление равно: $G = \frac{e(\Delta V - V_{th})}{W_{Si}}$

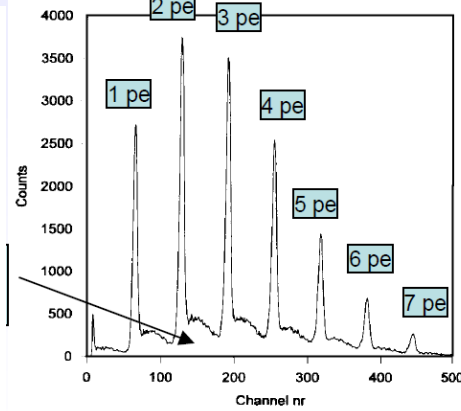
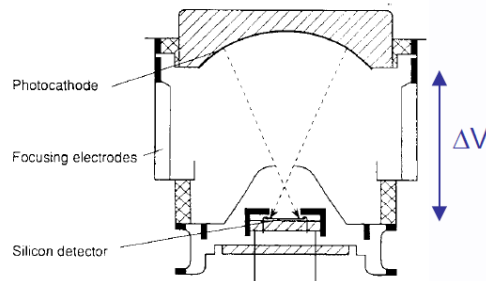
eV_{th} – энергия затрачиваемая на прохождение тонкого электрода на поверхности п/п

Флуктуация усиления $\sigma_G = \sqrt{F \times G}$

Для кремния фактор Фано $F=0.12$

➔ При $\Delta V=20$ кВ,
 $G \approx 5000$ $\sigma \approx 25$

$\sigma/G < 0.5\%$



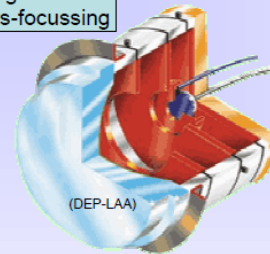
(C.P. Datema et al., NIM A 387(1997) 100)



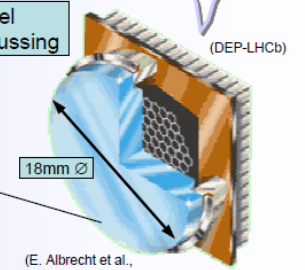
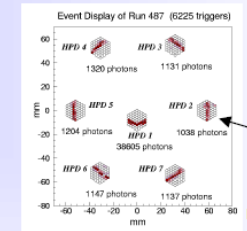
Various kinds of commercial HPD's

extra slide not shown 3b Photo-detection

Single-diode cross-focussing

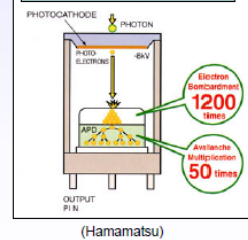


Multi-pixel proximity-focussing



(E. Albrecht et al., NIMA A 411 (1998) 249-264)

Single avalanche diode HPD



DEP-LHCb development:

- Multi-alkali photo-cathode;
- Commercial anode with 61 2mm-pixels; vacuum feed-throughs to external analog (VA2) readout electronics;
- Proximity-focussing electron optics;
- Poor intrinsic active area coverage (~50%);

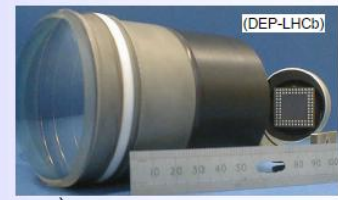
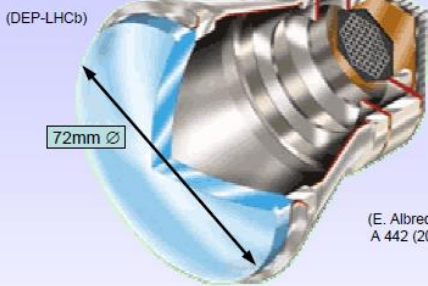
CERN Academic Training Programme 2004/2005



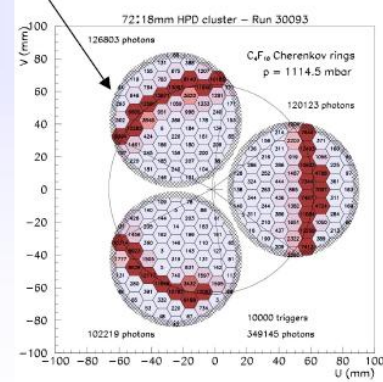
Various kinds of commercial HPD's

extra slide not shown 3b Photo-detection

Multi-pixel, cross-focussing



(E. Albrecht et al., NIMA A 442 (2000) 164-170)



DEP-LHCb development:

- Commercial anode;
- Cross-focussing electron optics (de-magnification by ~5);
- High intrinsic active area coverage (83%);

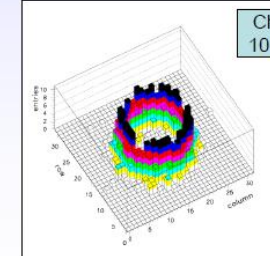
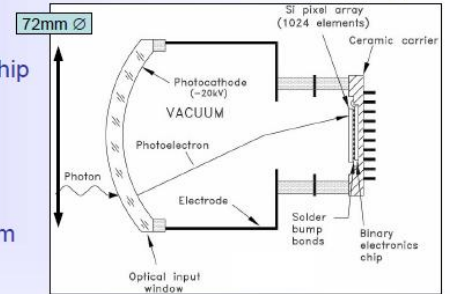


Pixel-HPD's for LHCb RICH's

3b Photo-detection

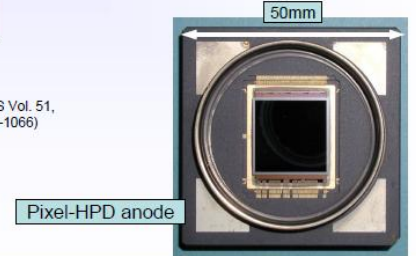
Industry-LHCb development:

- LHCb-dedicated pixel array sensor bump-bonded to binary electronic chip (in coll. w. ALICE-ITS), specially developed high T° bump-bonding;
- Flip-chip assembly encapsulated inside vacuum tube using full-custom ceramic carrier;



Cherenkov rings from 10 GeV/c π- through air

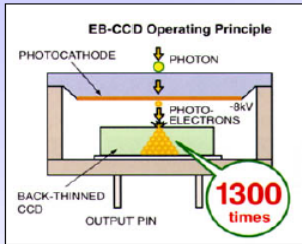
(M. Moritz et al., IEEE TNS Vol. 51, No. 3., June 2004, 1060-1066)



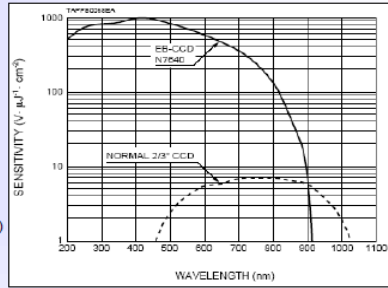
Pixel-HPD anode

CERN Academic Training Programme 2004/2005

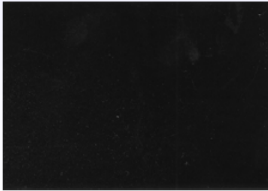
EBCCD proximity-focused



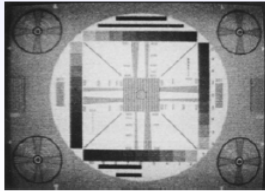
(Hamamatsu)



Commercial 2/3" CCD



Hamamatsu N7640 EB-CCD



Собственный шум без охлаждения ~ неск. тыс. электронов

Object illuminance: 0.1lx

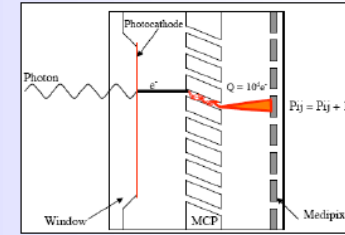
CCD без электронной бомбардировки

<http://www.hamamatsu.com/jp/en/technology/innovation/imaging/index.html>

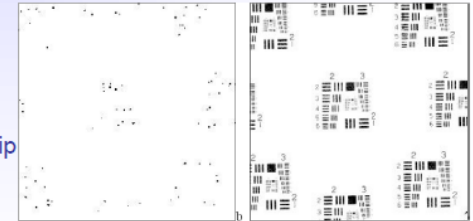
extra slide not shown

Development of next-generation astronomical AO:

- Alternative to replace more conventional high-speed CCD's;
- Aim for IR response, ultra-low noise and several kHz frame-rates;
- GaAs photo-cathode;
- Proximity-focussing electron optics;
- High-gain wide dynamic range MCP;
- Anode: Medipix2 photon-counting chip used both as direct electron detector ($55\mu\text{m}$ pixels) and FE readout electronics;



(J. Vallerger et al., Proc. SPIE, vol. 5490 (2004) 1256-1267)



Images of USAF test pattern, 100ms (left) and 100s (right) exposures, 50k MCP gain