

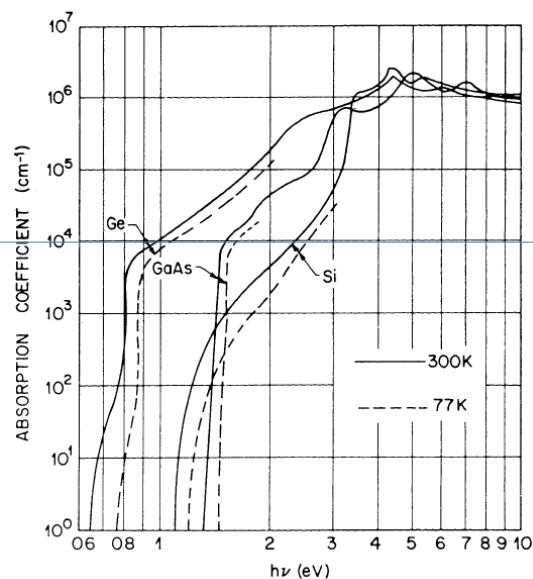
## Полупроводниковые детекторы для регистрации фотонов и гамма-квантов

- Все п/п диоды являются светочувствительными
- для высокой квантовой эффективности они разрабатываются таким образом, чтобы избежать значительного мертвых слоев на поверхности, так как **большая часть фотонов видимого диапазона поглощается в пределах около 1 мм от поверхности.**

Количество поглощенных фотонов:

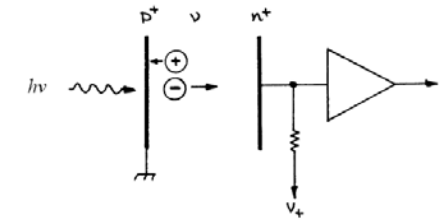
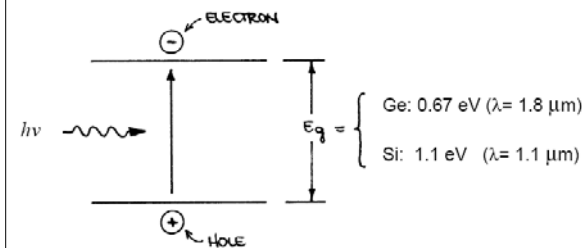
$$N_{abs} = N_0 \int e^{-\alpha x} dx$$

При коэффициенте поглощения  $\alpha = 10^4$  1/см нечувствительный слой должен быть <0,1 мм, что позволит избежать значительных потерь (<10%).



## П/п фотодетекторы

Традиционно ФЭУ применяются для регистрации фотонов, однако в последнее время резко выросла популярность использования п/п техники

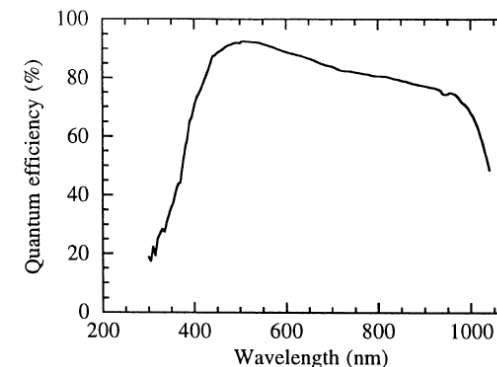


Свет из сцинтилляторов: 200-500 нм (2.5-6 эВ)

Достоинства п/п фотодиодов:

- высокая квантовая эффективность (70-90%) для сравнения 30% у ФЭУ
- нечувствительность к магнитным полям
- малые размеры

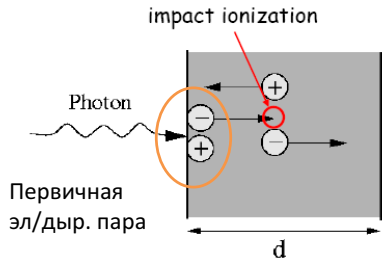
- Квантовая эффективность фотодиодов в 2-3 раза выше ФЭУ



LBNL Microsystems Lab  
(N.Wang, S. Holland)

- ФЭУ обеспечивают высокое усиление сигнала, вклад шума электроники не велик
- Фотодиоды очень чувствительны к уровню шума, поэтому используются низкошумящие ПУ
- Требования по уровню шума электроники можно снизить используя фотодетекторы с внутренним усилением – лавинные фотодиоды

## Принцип работы п/п с внутренним усилением: лавинный фотодиод



**Назначение:** регистрация очень слабых зарядов образующихся при поглощении квантов диапазона видимого света.

- Диод работает при высоком обратном напряжении смещения
- носители заряда ускоряются внутренним полем в п/п, что позволяет им при **ударной ионизации атомов решетки** образовывать новые носители.
- Вновь образованные заряды при дрейфе также ускоряются и образуют новые носители – наблюдается **лавинообразное усиление первичной ионизации.**

В итоге ток вырастает в  $\sim 100$  раз  $M = \frac{I_{mph}}{I_{ph}} \sim 100$

### Увеличение числа эл/дыр пар вызванное электронами

$G_n = e^{\alpha_n d}$  Коэффициент ударной ионизации для электронов  $\alpha_n$  – зависит от напряженности поля

$\alpha_n = \alpha_{n0} e^{-E_n / |E|}$   $\alpha_{n0}, E_n$  – постоянные зависящие от материала

**Коэффициент  $\alpha$  сильно зависит от температуры и количества примесей =>**

Необходима хорошая стабилизация питающего напряжения и температуры (или учёт температуры в схеме питания)

- Вторичные дырки также могут ионизовать атомы и приводить к появлению дополнительных электрон/ионных пар – этот процесс носит характер положительной обратной связи :  
уже при  $G_n > 2$  суммарное усиление приводит к лавинному пробое кристалла

- Однако вероятность ионизации электронами существенно выше, что хорошо с точки зрения усиления

- Пробойная напряженность эл. поля в области усиления зависит от соотношения коэффициентов

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_p} = 0.15 \cdot \exp\left(\frac{1.15 \cdot 10^6}{|E|}\right)$$

- Кремний выгоден с этой точки зрения

**Связь усиления ( $M \equiv G$ ) с коэффициентами ионизации для электронов  $\alpha_n$  и дырок  $\alpha_p$ :**

$$1 - \frac{1}{M} = \int_0^W \alpha_n \exp\left[-\int_x^W (\alpha_n - \alpha_p) dx'\right] dx$$

$W$  – длина области усиления  
 $x$  – координата начала усиления – **усиление зависит от координаты**

### Т.о. существует жесткая связь $M \propto$ величиной усиления, толщиной детектора и напряженностью поля :

- при более низких полях достигается более высокое усиление
- При высоких полях усиление ограничивается локальными полями высокой напряженности – что решается оптимизацией геометрии поля

$E = 2 \cdot 10^5$  V/cm     $G_n = 2.2 \cdot 10^3$      $d = 520 \mu\text{m}$      $V_b = 10$  kV

$E = 3 \cdot 10^5$  V/cm     $G_n = 50$      $d = 5 \mu\text{m}$      $V_b = 150$  V

$E = 4 \cdot 10^5$  V/cm     $G_n = 6.5$      $d = 0.5 \mu\text{m}$      $V_b = 20$  V

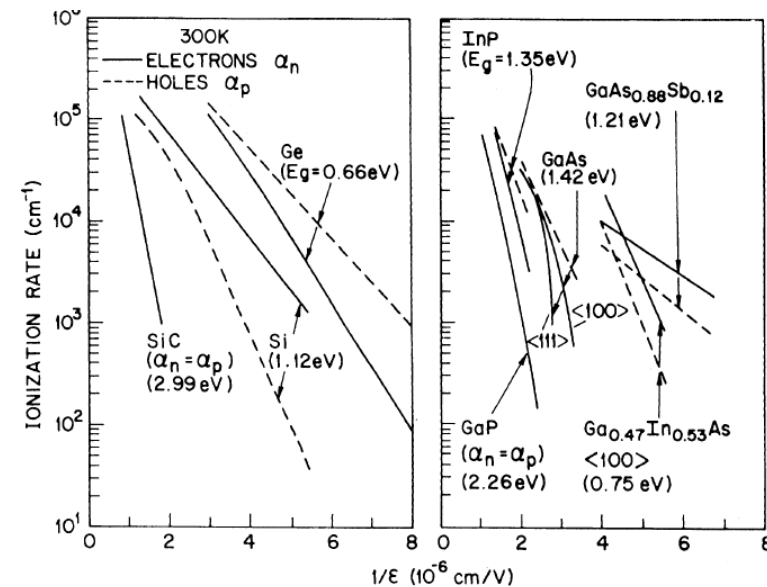
$E = 5 \cdot 10^5$  V/cm     $G_n = 2.8$      $d = 0.1 \mu\text{m}$      $V_b = 5$  V

Для достижения усиления 100-1000 необходимо

- 1) Толщина обедненной области  $\sim 100$  мкм
- 2) Напряжение смещения 500-1000 В
- 3) Оптимизация геометрии электрического поля

Экспоненциальная зависимость усиления только при  $\alpha_n \neq \alpha_p$ :

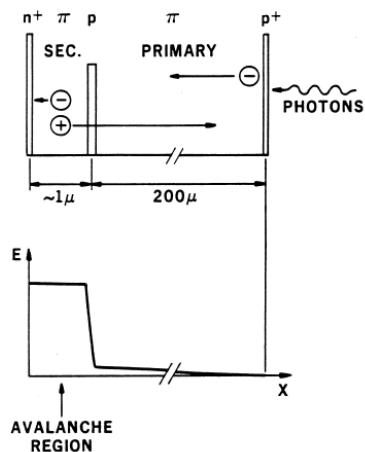
- **отношение скоростей ионизации для носителей должны отличаться от 1**
- **в усилении участвуют носители с большей скоростью ионизации**



### Сквозная геометрия лавинного диода

- Основа диода слабо допированный p-p\p
- Область высокой напряженности поля создается внесением промежуточного r-слоя (диффузионный метод)

- При приложении обратного напряжения, слева формируется обедненная область.
  - В начале область обеднения растет с напряжением до промежуточного r-слоя.
  - Т.к. этой слой имеет более высокое допирование, поэтому необходимо приложить более высокое напряжение смещения
  - **В результате формируется область высокой напряженности поля m\y пр-переходом и промежуточным r-слоем.**
- Из-за малого допирования области за r-слоем (справа) напряженность поля необходимая для обеднения здесь низкая.



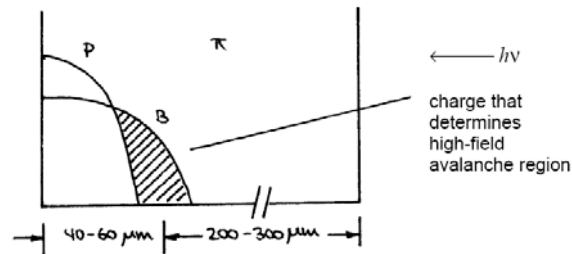
#### Достоинства конструкции:

- В усилении участвуют только основные носители с более высоким коэф. ионизации – стабильность, низкий шум
- Напряженность поля определяется в основном свойствами r-слоя и мало чувствительная к основному слою
- кристалл можно сделать более толстым для уменьшения емкости

- Фотоны входят справа, образуя эл/дырки
- Электроны дрейфуют в область усиления, где развивается лавина
- Дырки дрейфуют через область низкой напряженности! (риск пробоя снижается, см. выше), формируя основной сигнал

Доп. слайд

### Common Implementation of Reach Through Structure



Lightly doped p-type material is doped with two deep diffusions to create a local high-field region.

The deep B diffusion introduces acceptors.

The overlapping P diffusion (shaded) forms a lightly doped p-region due to compensation ( $N_A - N_D$ ) with a high field determined by the local  $p^+$  doping.

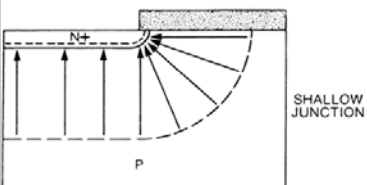
Problem: deep diffusions are difficult to control – low yield

Nevertheless, these devices are commercially available with gains of  $10^3$  to  $10^6$ .

Helmut Spieler  
LBNL

### Оптимизация геометрии электрического поля

- Возможность работы при высоких напряжениях ограничена областями высокой напряженности эл. поля

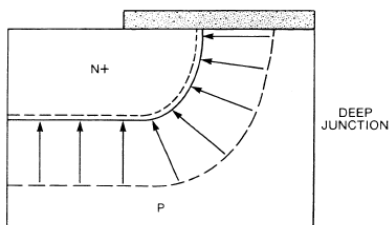


(from Baliga, Modern Power Devices)

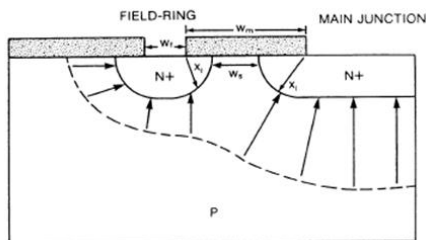
- Пробой происходит до достижения рабочего напряжения

Необходимо увеличить радиус кривизны области обеднения: напряженность поля снизится

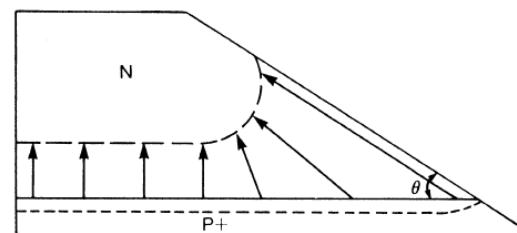
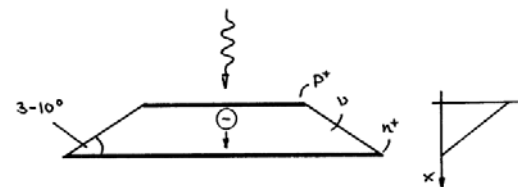
#### 1) Можно увеличить толщину n+ - слоя



#### 2) Охранный электрод: сглаживание краевого эффекта



### 3) Конусная форма диода



Все эти решения чувствительны к однородности концентрации допантов: обычно ~20%

## Шум в ЛФД

**Электронные шумы:** 1- последовательные и 2- параллельные.

- 1) в основном пропорциональны ёмкости лавинного фотодиода
- 2) связаны с механическими колебаниями прибора и поверхностными токами утечки.

**Статистические шумы при усилении:**

обусловлены различной природой ударной ионизации (электронная и дырочная)

Могут быть выражены через фактор избыточного шума (excess noise factor) :

$$F = M \left[ 1 - (1 - k) \left( \frac{M-1}{M} \right)^2 \right]$$

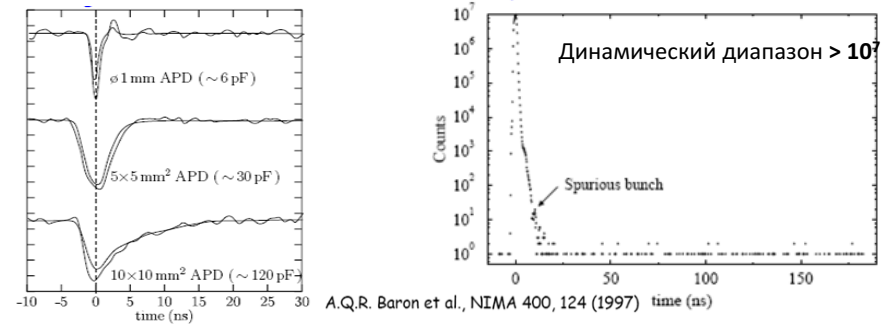
$k = \alpha_n / \alpha_p$  – соотношение коэффициентов ударной ионизации для дырок и электронов.

➔ увеличение асимметрии коэффициентов ионизации приводит к уменьшению  $F$ .

На практике к этому стремятся, поскольку  $F$  вносит основной вклад в ограничение энергетического разрешения ЛФД.

## Характеристики ЛФД

- Очень высокие напр. поля: быстрое время сбора носителей – Врем. разрешение  $\sim 1$  нс
- Флуктуации при усилении – низкое энерг. разрешение 20% (24 кэВ)- 40% (12 кэВ)
- Скорость счета до  $10^7$  фотонов /сек
- Темновой шум 0.01 соб/сек
- Работа в диапазоне энергий 3-30 кэВ(ограничено толщиной) (СИ)



- ЛФД может работать в Гейгеровской моде при напряжении выше пробойного:  $E > 3 \times 10^5$  В/см
- В этом режиме электрон-дырочная пара образованная единственным поглощенным фотоном формирует лавину.
- ЛФД работающие в таком режиме называются - однофотонные лавинные фотодиоды - **single photon avalanche diode (SPAD)**:
- Детектор работает как счетчик, сигнал не пропорционален энергии фотона

## AVALANCHE PHOTODIODE



Head = APD + Pre-amplifier

- Hamamatsu
  - 5x3mm² 135 μm available
  - φ=3mm 135μm (proto)
- EGG
  - 5x5mm² 110μm
  - 10x10mm² 110 μm

### Acquisition system : ACE (APD Controller Electronic)

- Principle of use: amplitude (mV)  $\Leftrightarrow$  energy (eV)
  - ◆ 1 counter, 2 thresholds (high and low) for level discrimination
  - ◆ Counter with low level only = integral counter.
  - ◆ Counter with low-high level = counter in energy range.

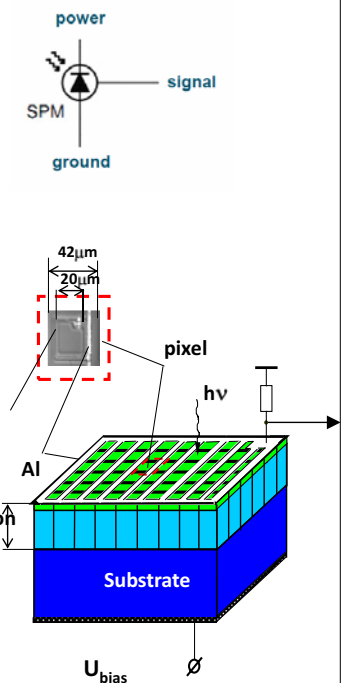
ACE (APD Controller Electronic)

## Кремниевые фотоумножители (Si-PM)

**Матрицы из ЛФД на общей подложке.**

Назначение: регистрация одиночных фотонов.

- Размерность отдельного ЛФД: 20-100 мкм
- Плотность 500-4000 шт/мм²
- Отдельный элемент 1-3 мм
- Каждый ЛФД работает в режиме Гейгера: дает «0» или «1»
- Диоды объединены: сигнал  $\sim$  числу сработавших диодов
- Динамический диапазон  $\sim$  числу диодов: от 1-1000 фотонов на мм².
- Кв. эфф.  $\sim 20\%$
- Питающее напряжение ( $V_b$ ) зависит от технологии  $\sim 25-70$  В
- Усиление  $\sim 10^6$





**Достоинства:**

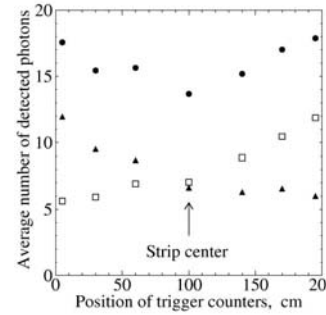
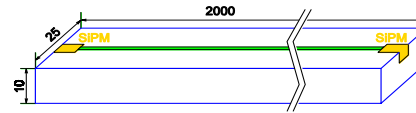
- компактность
- нечувствительность к магнитным полям
- низкое раб.напряжение
- чувствительность

**Недостатки:**

- низкая рад.стойкость
- высокий низкоамплитудный шум

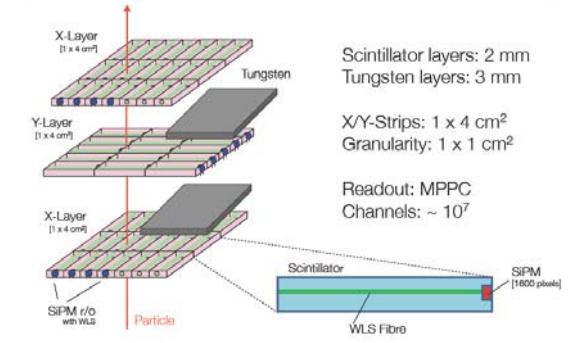
**Scintillator based muon systems**

◆ Scintillator + Wavelength shifter + SiPM

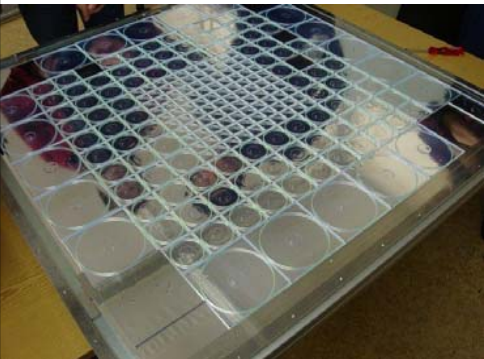


**More than 13 detected photons per MIP**  
 $\epsilon > 99\%$  at rate  $> 1\text{kHz}/\text{cm}^2$

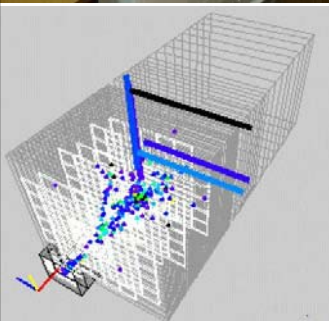
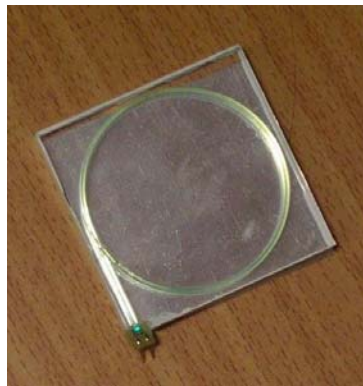
**CALICE – Scintillator ECAL**



**Коллаборация CALICE (2007) : адронный калориметр (HCAL) на основе сц-ров и SiPM**



Пластиковый сц-р (5мм) +WLSF + SiPM



- dense packing ensures the absence of 'dead' zones
- intrinsic noise of a single cell  $\sim 0.01$  Hz
- rate capability up to  $\sim 10\text{kHz}/\text{cm}^2$
- time resolution  $\sim 1.2$  ns

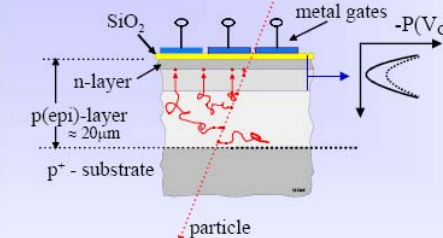
Е.Попова, 2012  
 P.Pakhlov (ITEP)



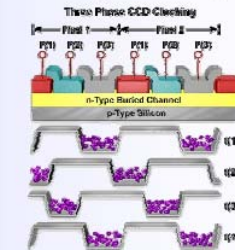
**CCD – Charged Coupled Devices**

2b - Tracking with Solid State Detectors

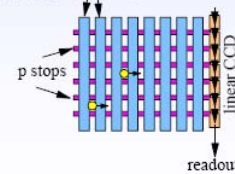
(1) MOS structure with segmented metal layer; Charge is captured in a potential well.



(2) Readout: Shift electrons towards anode by periodic variation of 3 potentials



(3) Create an array of pixel for a 2D detector



**Pixel CCD**

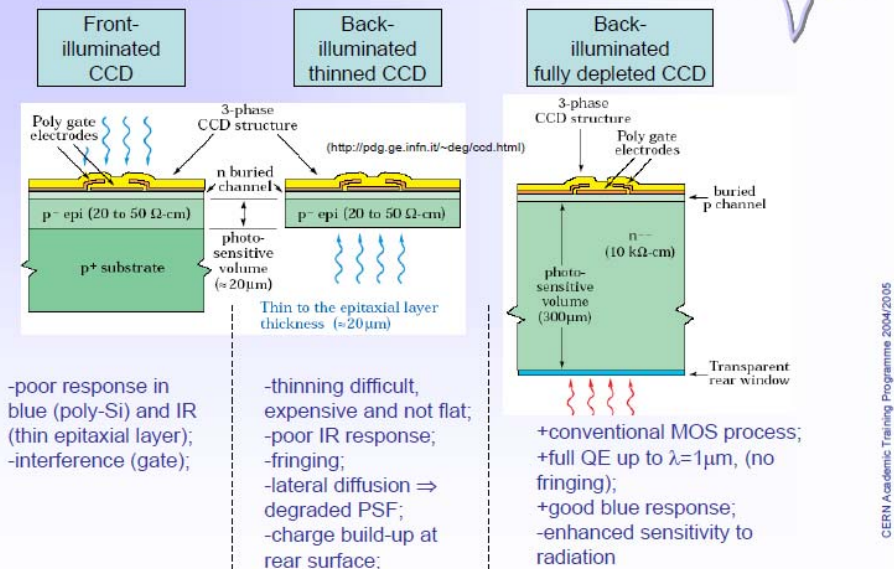
- needs only few readout channels
- small charge ( $\approx 2000$  e)  $\Rightarrow$  needs cooling
- long readout time, active during readout
- sensitive to radiation damage

$\Rightarrow$  applicable for low rate experiment without high intensity radiation field



## Back-illuminated fully depleted CCD

3b Photo-detection



CERN Academic Training Programme 2004/2005

C. D'Ambrosio, T. Gys, C. Joram, M. Moll and L. Ropelewski CERN - PH/DT2 Particle Detectors - Principles and Techniques 3b/22 **По CCD см. также приложение**



## Hybrid Pixel Array Detector (HPAD)

### Diode Detection Layer

- Fully depleted, high resistivity
- Direct x-ray conversion
- Silicon, GaAs, CdTe, etc.

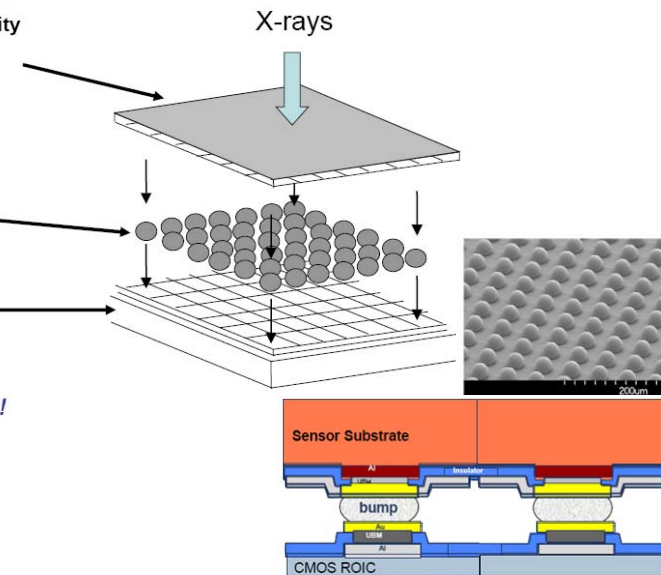
### Connecting Bumps

- Solder or indium
- 1 per pixel

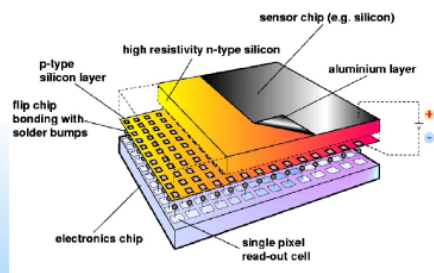
### CMOS Layer

- Signal processing
- Signal storage & output

*Gives enormous flexibility!*



## Hybrid Pixel Array Detectors

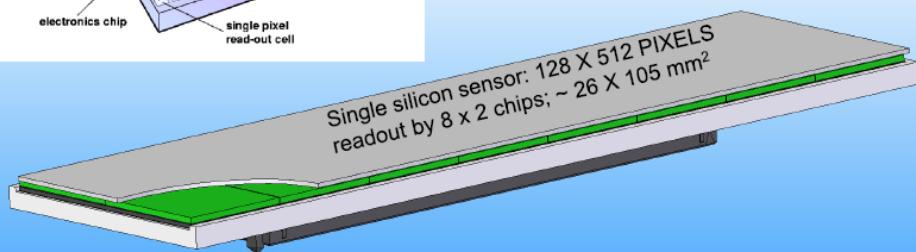


### Pixellated Silicon Sensor:

absorbs photons and produces electrical signal

### Pixellated readout chip (ASIC):

Processes signal produced in sensor and sends data out



Chip carrier board to talk to and readout chips

**По гибридным технологиям см. приложение**

## The Adaptive Gain Integrating Pixel Detector

### The AGIPD consortium:

PSI/SLS -Villingen: chip design; interconnect and module assembly

Universität Bonn: chip design

Universität Hamburg: radiation damage tests, "charge explosion" studies; and sensor design

DESY: chip design, interface and control electronics, mechanics, cooling; overall coordination

### Some Facts

6 years development

~ 20 people

### Some Milestones

First 16x16 pixels prototype

Definition of final design

Production, assembly and test

End 2010

Summer 2011

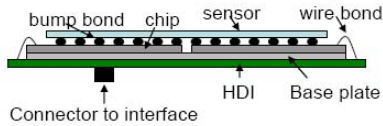
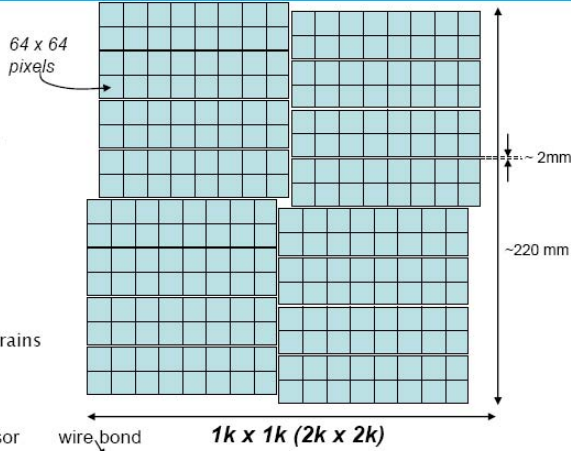
>2013



# The Adaptive Gain Integrating Pixel Detector

## Basic parameters

- 1 Megapixel detector (1k x 1k)
- 200µm x 200µm pixels
- Flat detector
- Sensor: Silicon 128 x 512 pixel tiles
- Single shot 2D-imaging
- 4.5 MHz frame rate
- 2 x 10<sup>4</sup> photons dynamic range
- Adaptive gain switching
- Single photon sensitivity at 12keV
- Noise ≤ 300e
- Storage depth ≥ 350 images
- Analogue readout between bunch-trains



Introduction to  
Synchrotron Radiation  
Detectors

Heinz Graafsma  
Photon Science Detector Group  
DESY-Hamburg, Germany  
heinz.graafsma@desy.de

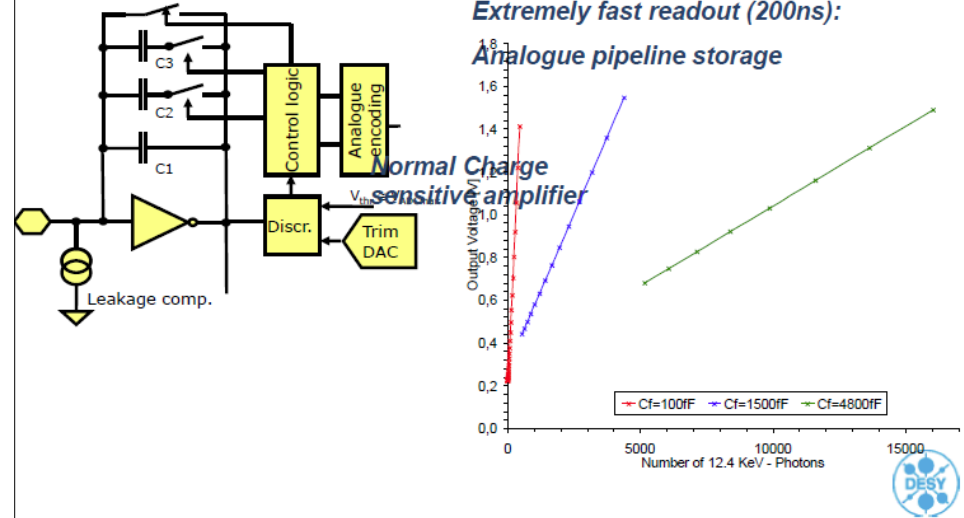
# The Adaptive Gain Integrating Pixel Detector

High dynamic range:

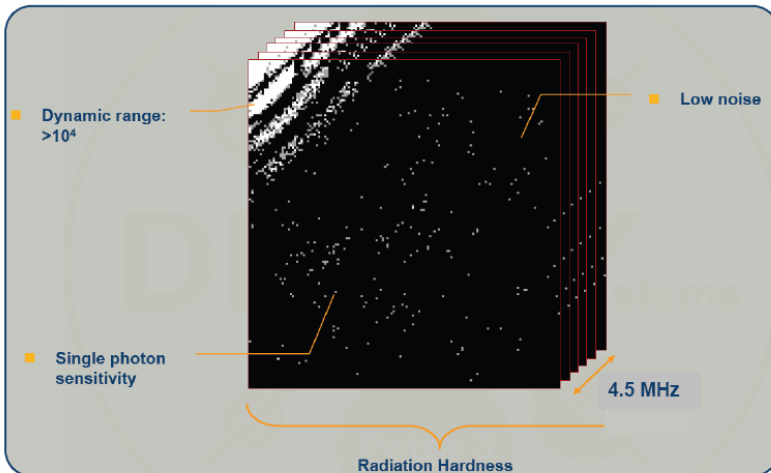
Dynamically gain switching system

Extremely fast readout (200ns):

Analogue pipeline storage



## XFEL Detector requirements



The XFEL solutions:  
Hybrid Pixel Array Detectors



## Бурное развитие гибридной технологии:

- 1) Конструкция детектора адаптируется под сферу применения в отличие от промышленно изготавливаемых детекторов (CCD)
- 2) Высокое пространственное разрешение
- 3) Параллельное считывание – высокая загрузочная способность (FEL)

Но: высокая стоимость изготовления!