

Быстродействующие координатные детекторы высокого разрешения: от газовых микроструктурных до полупроводниковых

Л.И.Шехтман

- Газовые детекторы, от MWPC к MPGD
- Газовый электронный умножитель (GEM)
- MicroMEGAS
- Полупроводниковые микростриповые детекторы
- Гибридные пиксельные детекторы
- Детекторы на основе монокристаллических активных пикселей

Газовые детекторы

Полупроводниковые детекторы

Стоимость

1 – 10 \$/см²10-100 \$/см²Количество
материала<10⁻³ X010⁻³ - 10⁻² X0Пространственное
разрешение

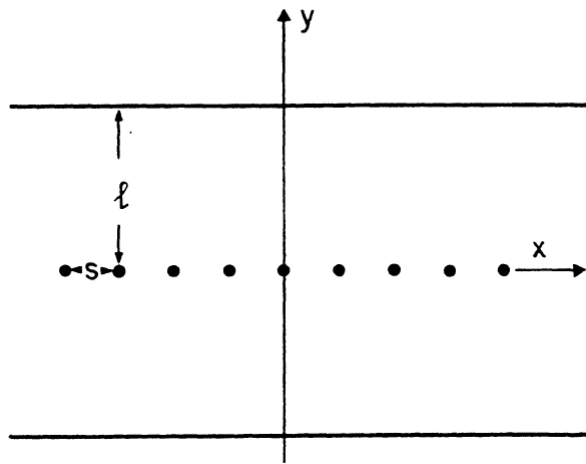
100 – 1000 мкм

1 – 100 мкм

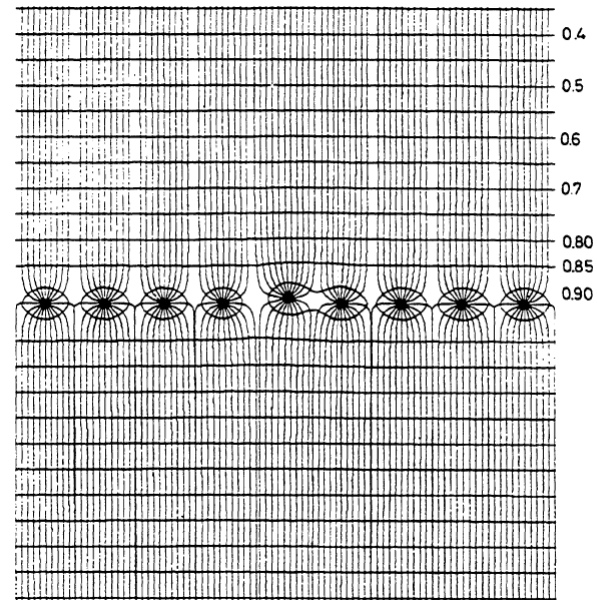
Многопроволочные пропорциональные 3 камеры

1978 г., Джордж Шарпак (Georges Charpak)

Нобелевская премия 1992 г.



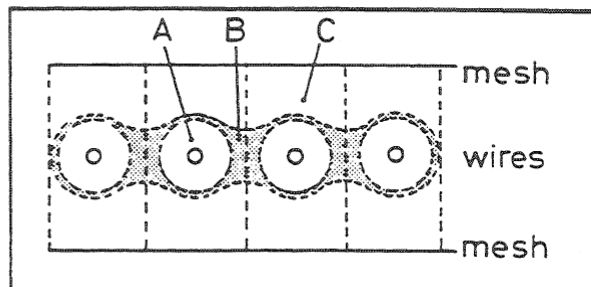
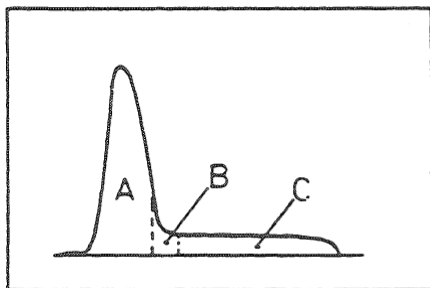
Устройство MWPC



Линии эквипотенциалов и
силовые линии электрического
поля в MWPC

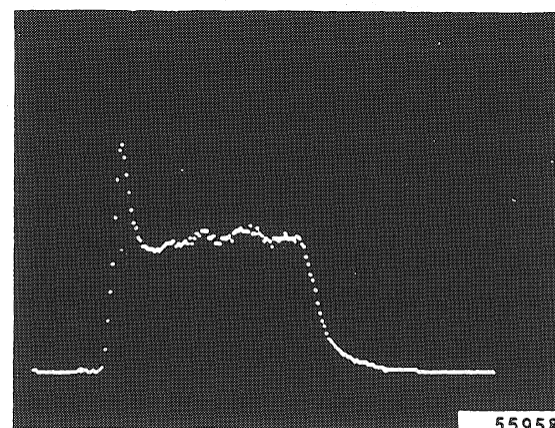
Многопроволочные пропорциональные камеры

4 Временная структура сигнала в MWPC



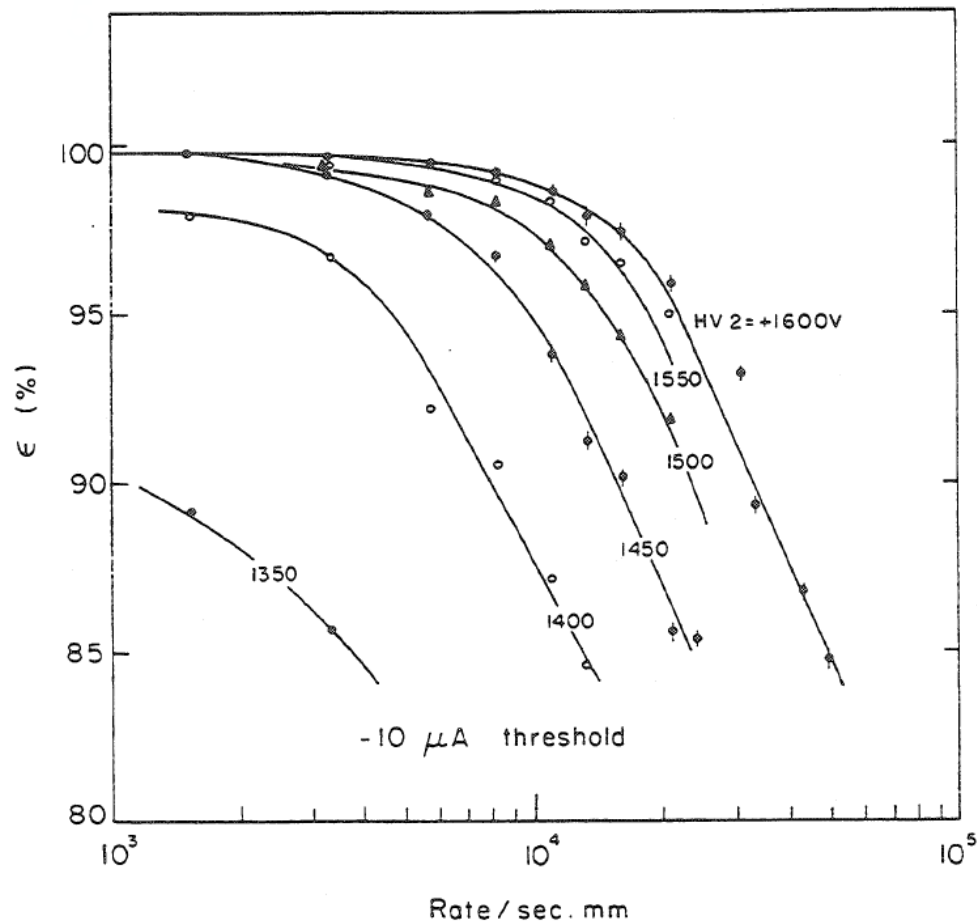
В зависимости от места образования первичной ионизации можно выделить три зоны по времени образования сигнала: быстрая зона А, промежуточная зона В и медленная зона С.

Сигнал от
наклонного
трека



100 nsec

Многопроволочные пропорциональные камеры



Объемный заряд ионов, накапливающихся в дрейфовом зазоре, экранирует электрическое поле, что приводит к падению коэффициента усиления и эффективности регистрации.

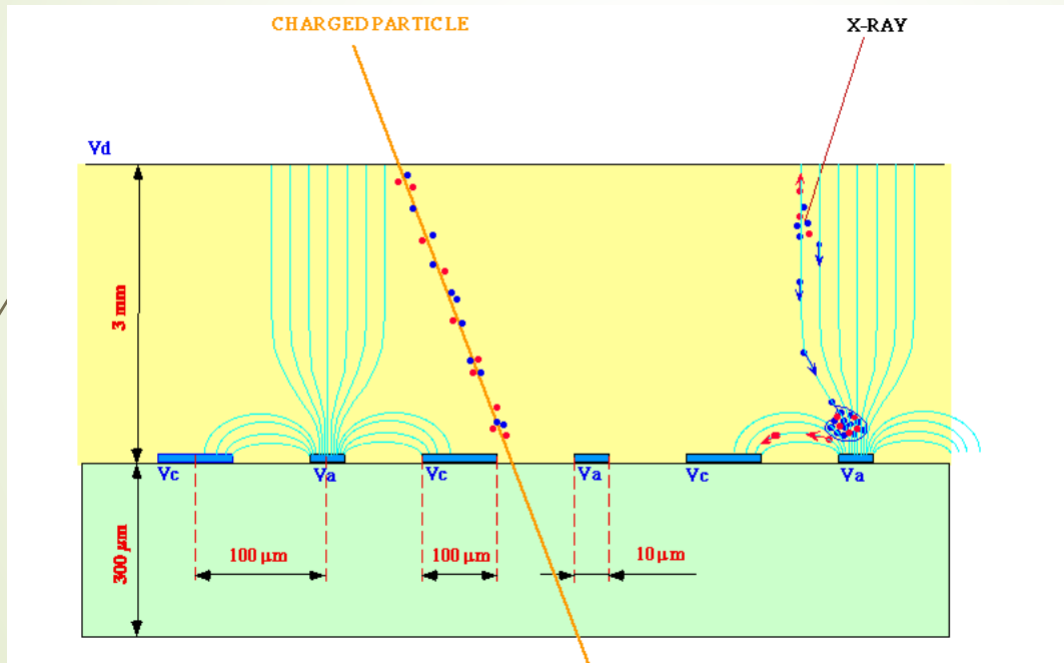
Эффективность регистрации в зависимости от потока частиц

Микрополосковая газовая камера (micro-strip gas chamber (MSGC))

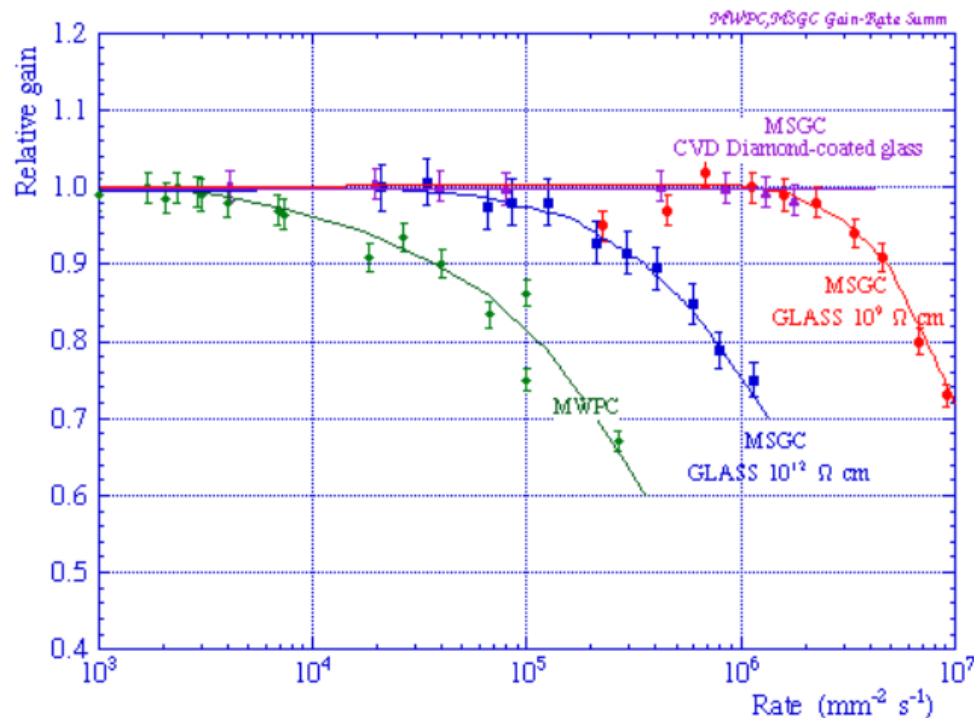
1989, Anton Oed

6

Проволочки в MWPC невозможно натянуть с шагом меньше 1 мм. Проблема пространственного разрешения и быстродействия остается неразрешимой. Но электроды можно изготовить методом литографии на изолирующей подложке.

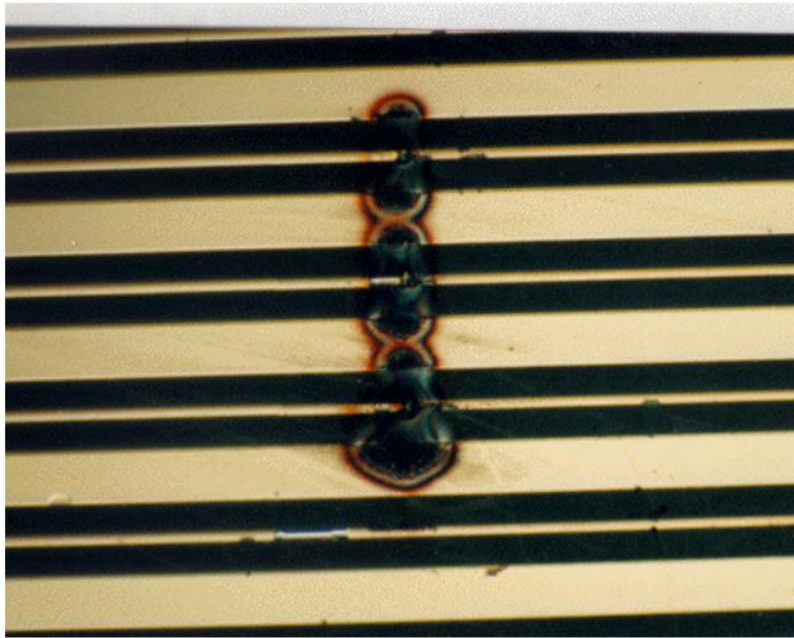


Микрополосковая газовая камера



Ионный ток частично течет через полуизолирующую подложку, поэтому ее материал должен иметь достаточно высокую электронную проводимость

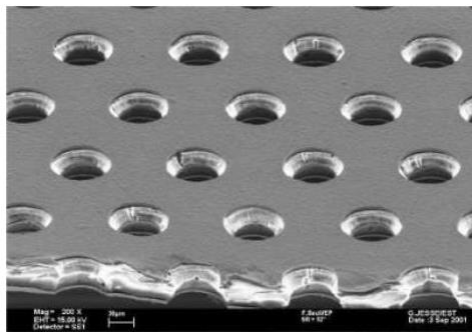
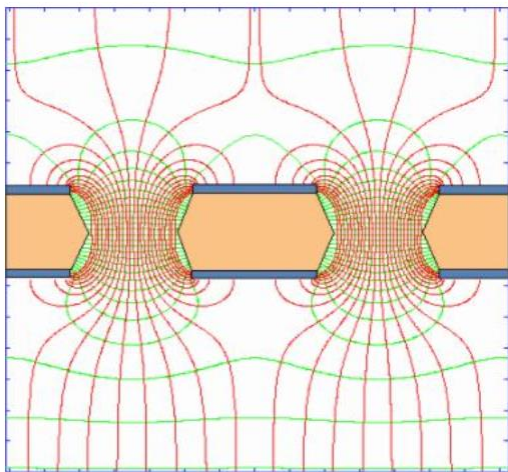
Относительное значение коэффициента газового усиления в зависимости от потока частиц (фотоны 8 кэВ) для MSGC с различной подложкой



Разрушение электродной структуры
из-за искровых разрядов

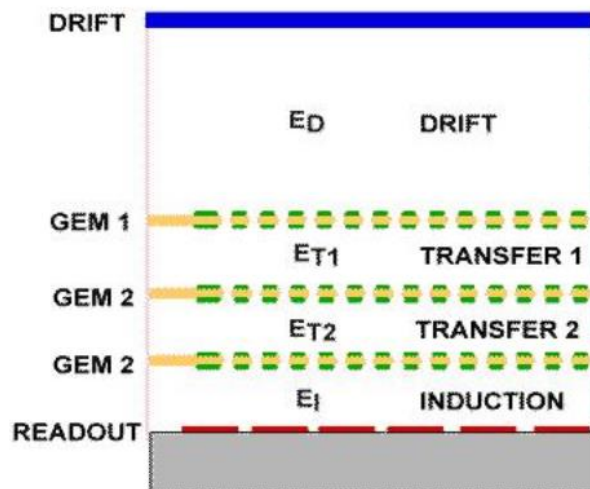
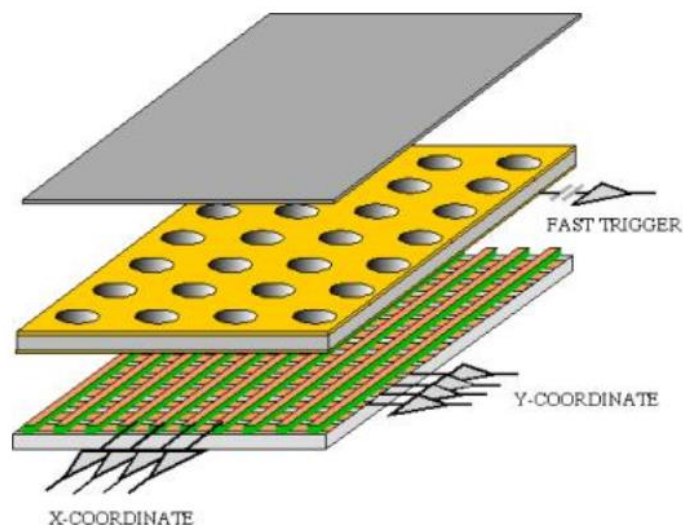
При наличии в налетающем потоке сильно взаимодействующих частиц (адронов) возникает ненулевая вероятность перехода пропорционального режима усиления в искровой пробой. Электроды MSGC, изготовленные по тонкопленочной технологии, разрушаются от единичного пробоя.

Новое поколение микроструктурных газовых детекторов (MPGD)
1996, Газовый электронный умножитель (Gas Electron Multiplier,
GEM), Фабио Саули
1996, MicroMEGAS, Янис Джиоматарис, Джордж Шарпак



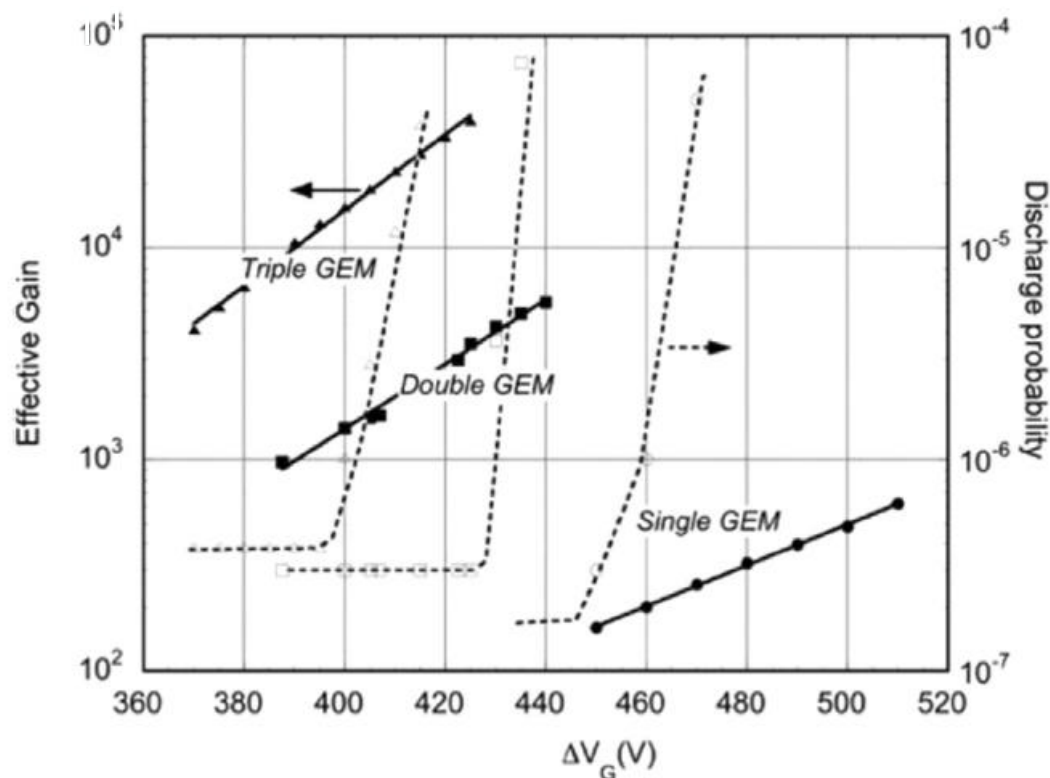
Газовый электронный умножитель, структура
электрического поля и изображение на электронном
микроскопе

Газовый электронный умножитель

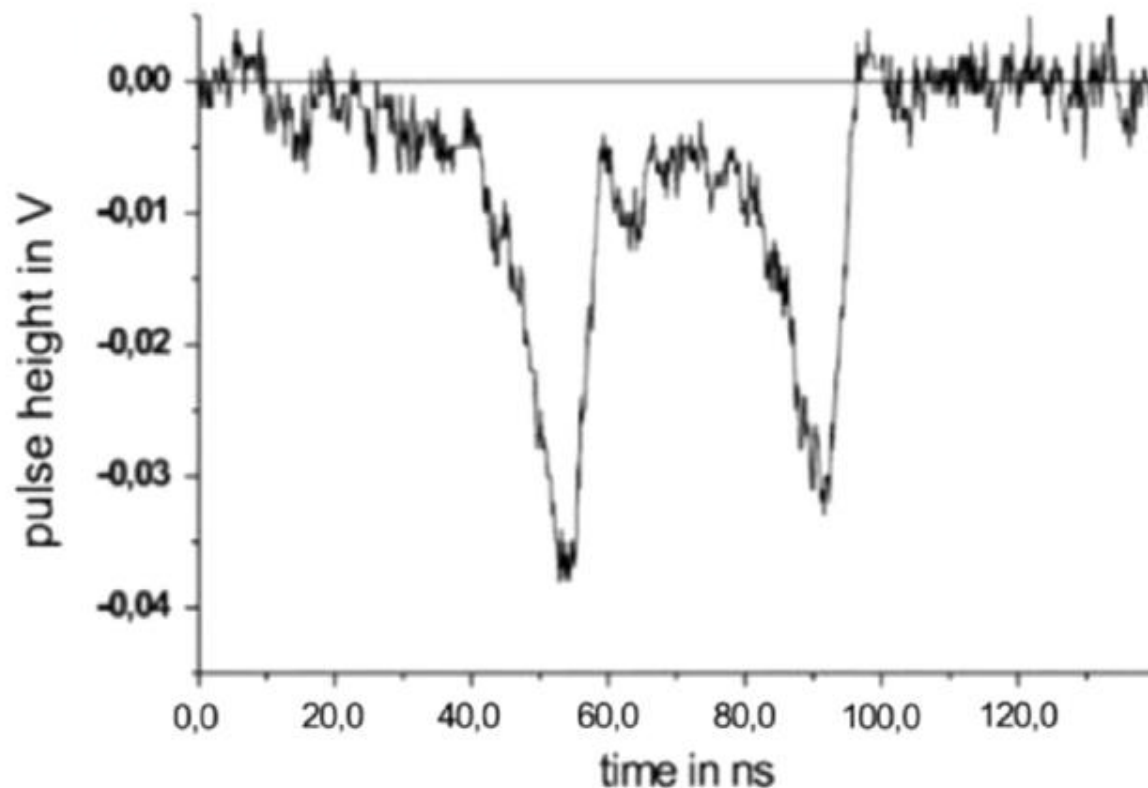


ГЭУ является распределенной усиливающей структурой. Под ним можно располагать регистрирующую структуру любой конфигурации. ГЭУ можно располагать каскадом, чтобы увеличивать коэффициент усиления. Также каскад из нескольких ГЭУ позволяет существенно снизить вероятность перехода пропорционального режима усиления в искровой пробой, поскольку коэффициент усиления каждого отдельного ГЭУ в каскаде невысок.

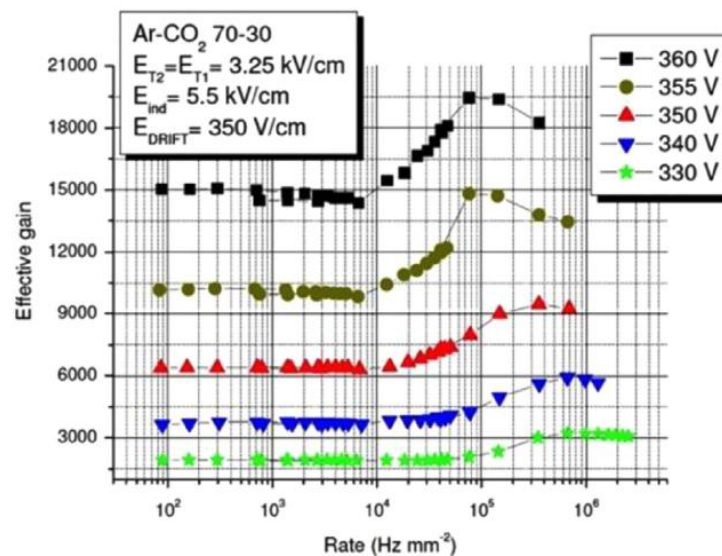
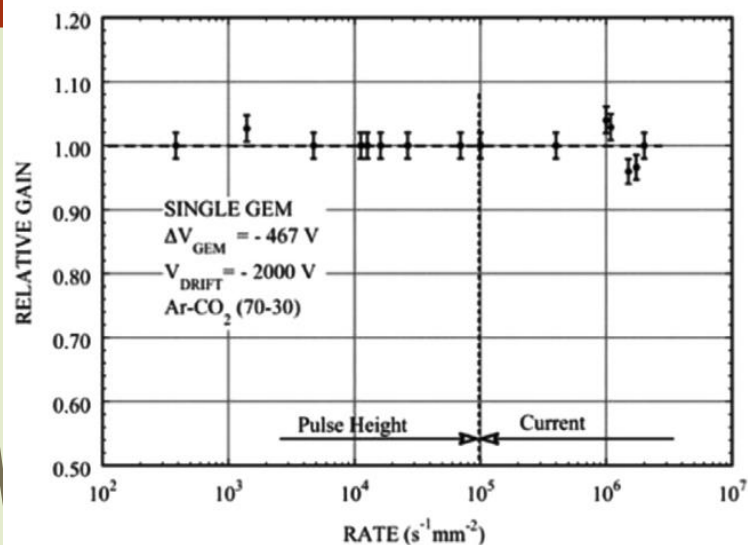
Газовый электронный умножитель



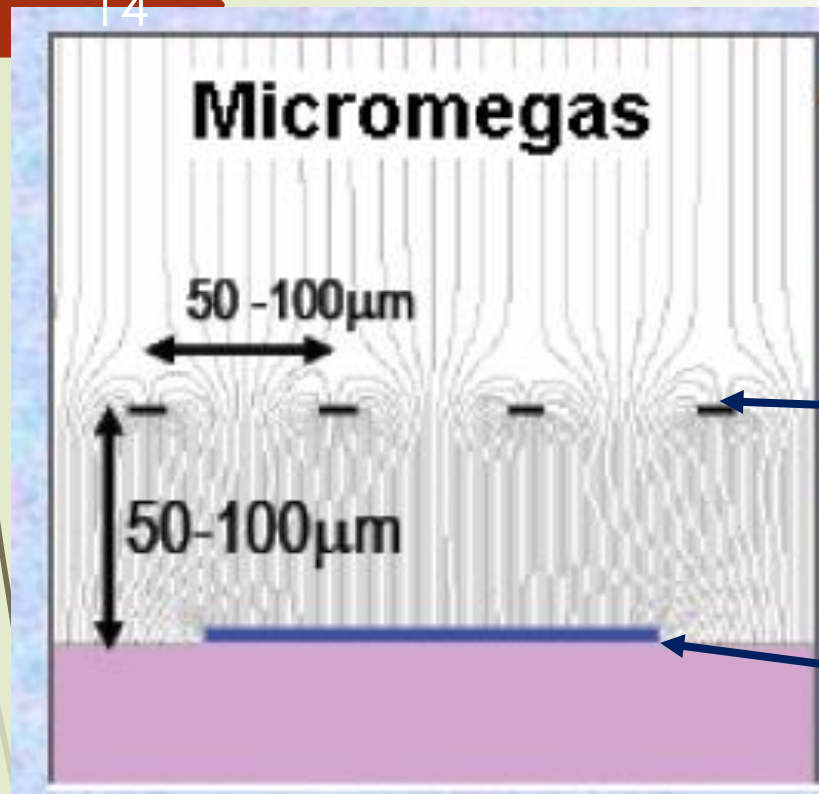
Эффективный коэффициент усиления (коэффициент усиления, который «видит» считывающая структура) и вероятность искрового разряда в зависимости от напряжения на ГЭУ в одинарном, двойном и тройном ГЭУ



Пример сигналов, образованных на аноде при регистрации двух близких треков электронов. Сигнал образуется при движении электронов в индукционном зазоре.



Зависимость коэффициента усиления (относительного усиления) от потока частиц (фотоны 8 кэВ) для одинарного и тройного ГЭУ.



Металлическая сетка

Считывающая
структура

Micromegas fabrication aspects

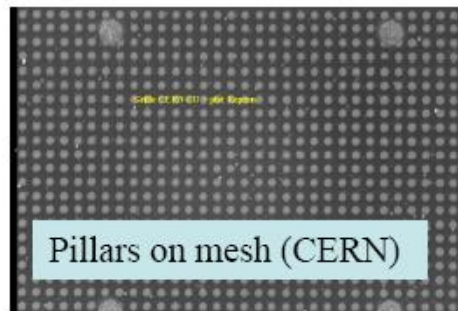
Grids: Commercial available low cost choices

Commercial electroformed grid
(Ni, Au, Cu....)

Thickness=3 μm , pitch =50 μm , 25, 12.5 μm

Pilars (h=25-200 μm , t=50-300 μm)

Photoresistive, kapton, glass....

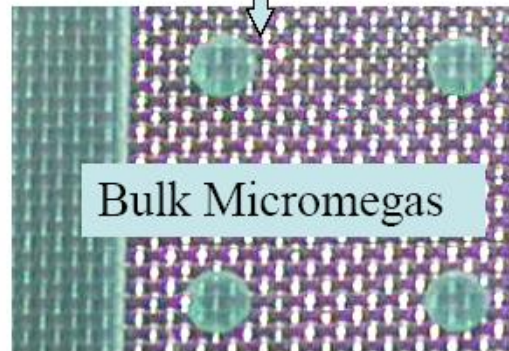
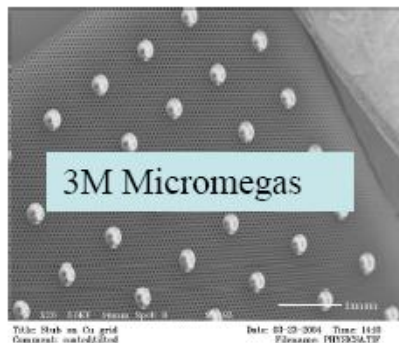
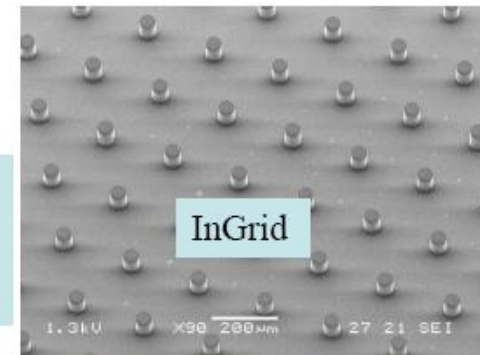


Cloth grid (Fe,)

Thickness=20 μm

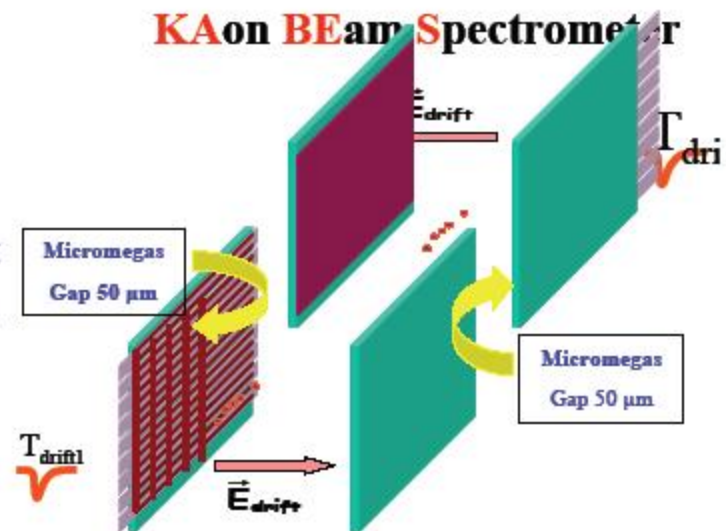
pitch =50 μm (500LPI)

Available in large rolls (1 m wide)

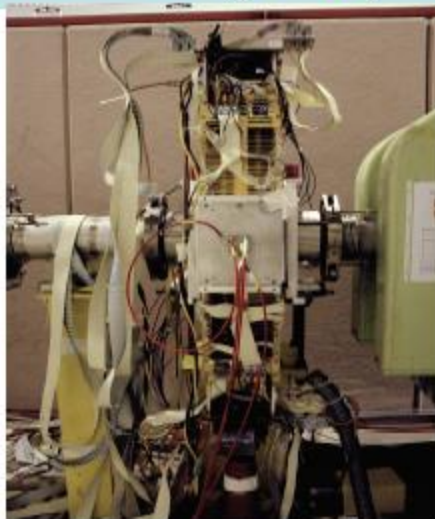


NA48/KABES

- CP violation experiment in operation at CERN from summer 2003 to end of 2005. Flux $3 \times 10^6/\text{cm}^2/\text{s}$ ($10^7/\text{cm}^2/\text{s}$ at hottest region)
- Principle : TPC + micromegas
- Fast, light and high rate BEAM detector

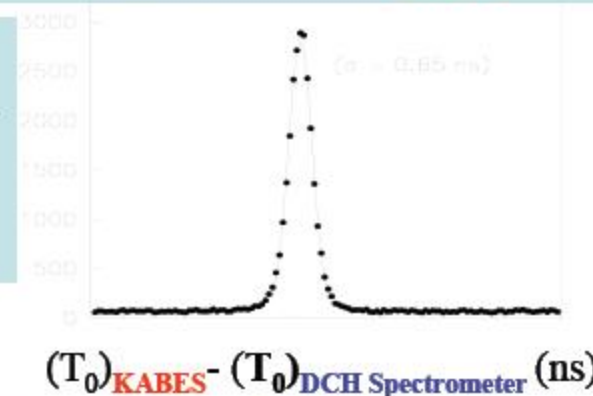


KABES in K12 ($K^+ + K^-$) beam line



Space
resolution from
drift time
measurement:
70 μm

Time resolution: **0.6 ns**



Tagging with reconstructed $K^\pm$ @ $p^\pm p^+ p^-$

Установки ИЯФ, где применяются ГЭУ:

- Детектор КЕДР
- Установка ДЕЙТРОН
- Тестовый пучок ВЭПП-4
- Лазерный поляриметр ВЭПП-4
- Торцевые диски КМД-3 (разработка)

Пространственное разрешение детектора для Тестового пучка

Параметры для оценки
систематической погрешности

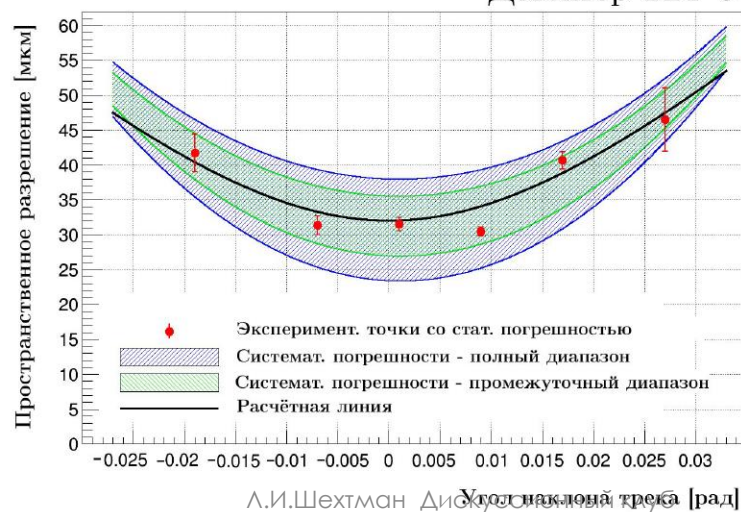
$$X/X_0 \in [0,25\%, 0,30\%]$$

$$\sigma_0 = 32 \text{ мкм}$$

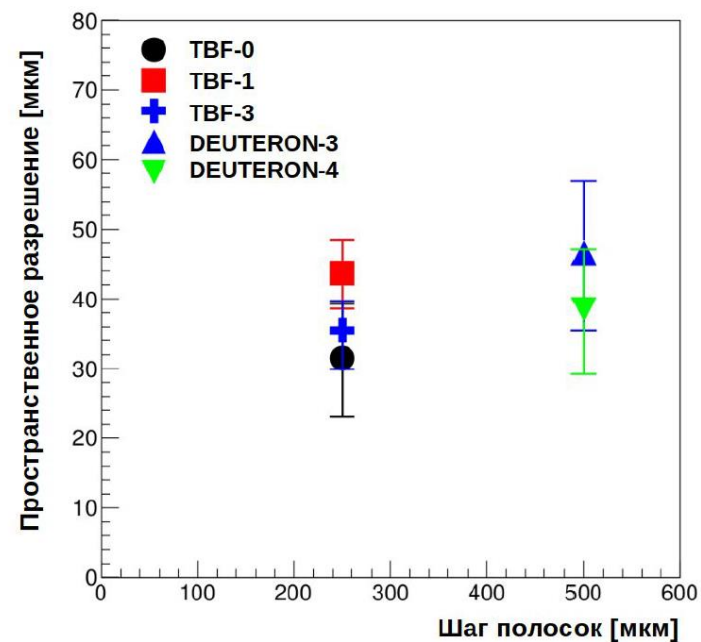
$$\sigma_{\text{Tracking}} \in [35, 50] \text{ мкм}$$

$$d = 4,5 \text{ мм}$$

Детектор TBF-0

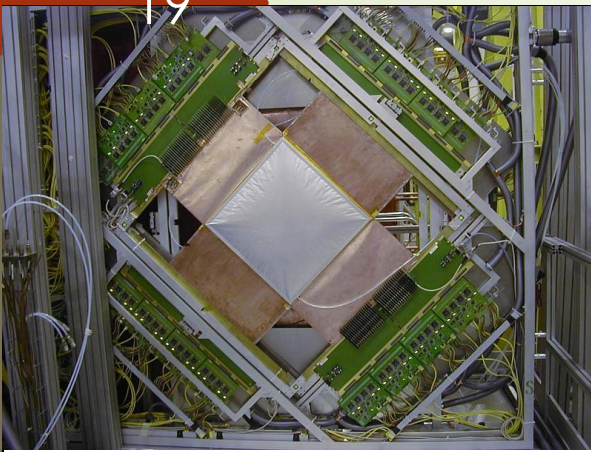


Результаты измерения пространственного разрешения детекторов

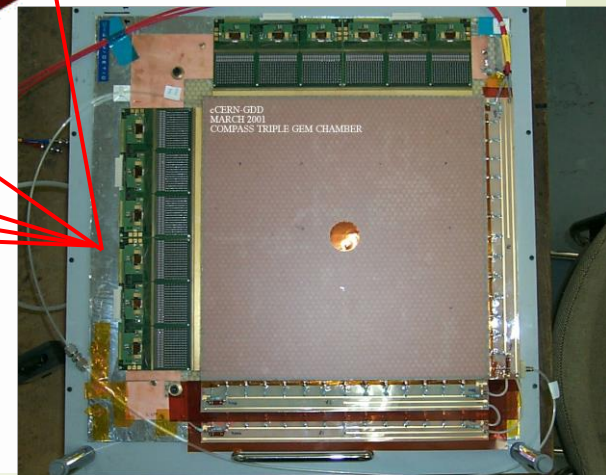
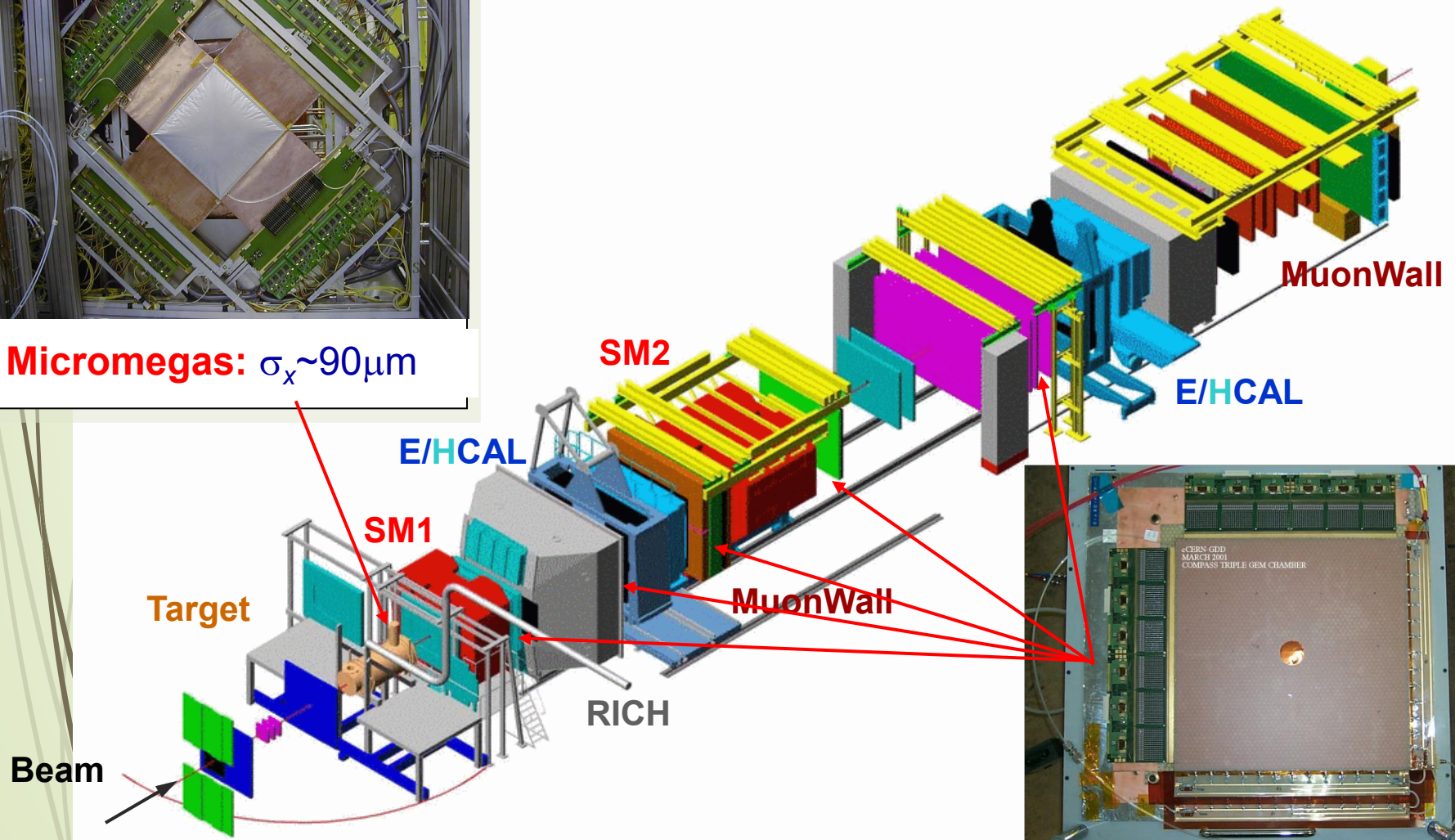


The COMPASS Spectrometer

19

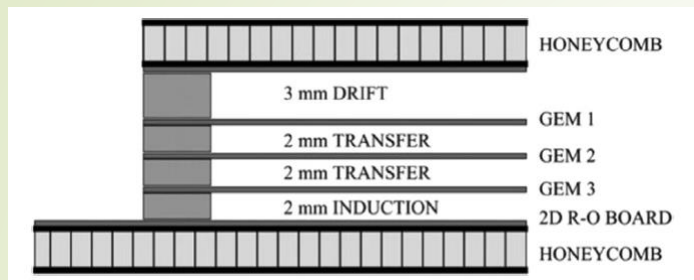


Micromegas: $\sigma_x \sim 90 \mu\text{m}$



GEM: $\sigma_x \sim 70 \mu\text{m}$

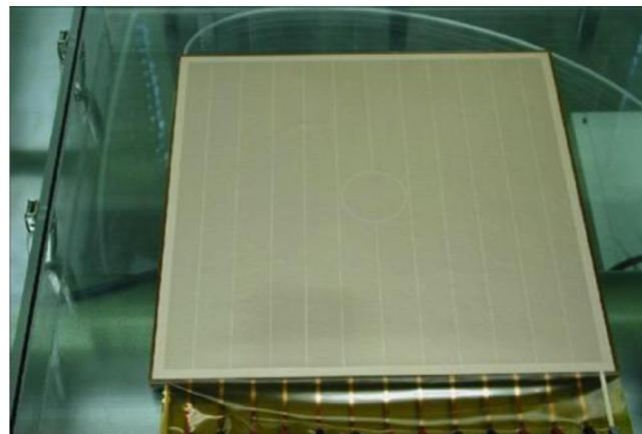
25.08.2026



Структура детектора



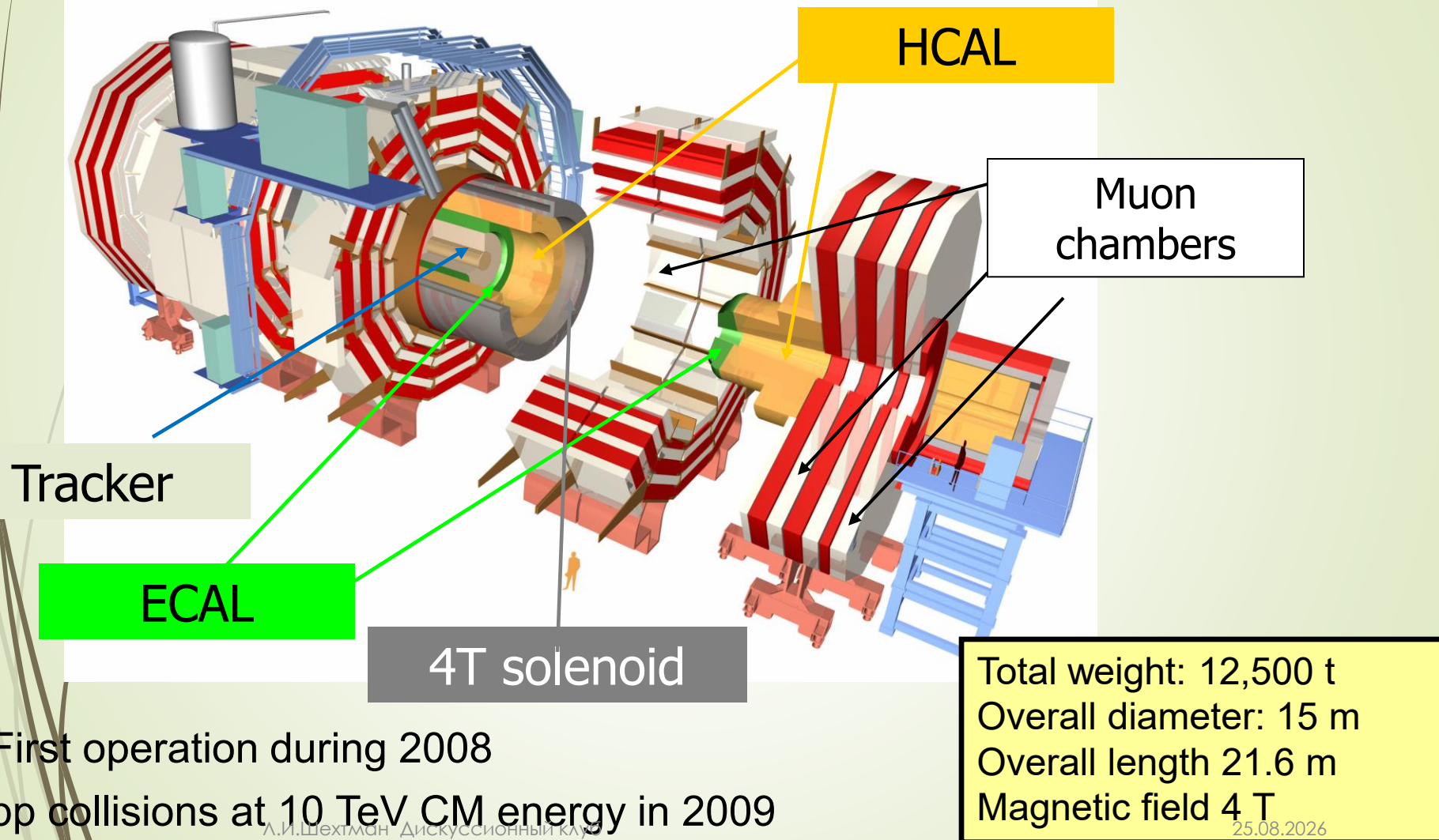
Проставка между ГЭУ



ГЭУ на рамке 25x25 см²

CMS Compact Muon Solenoid

21

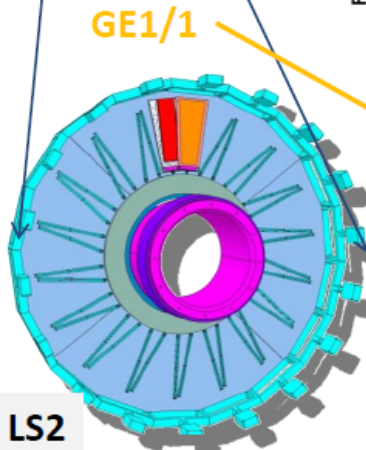




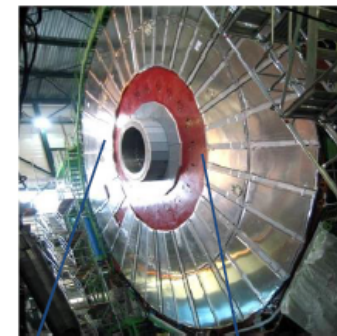
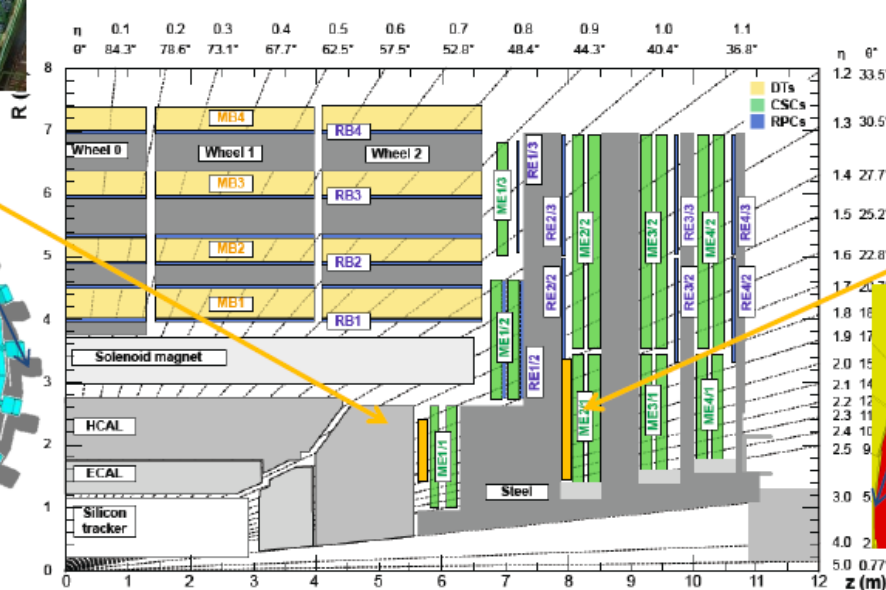
The CMS GEM Project

Install triple-GEM detectors (double stations) in $1.6 < |\eta| < 2.1$ -2.4 endcap region:

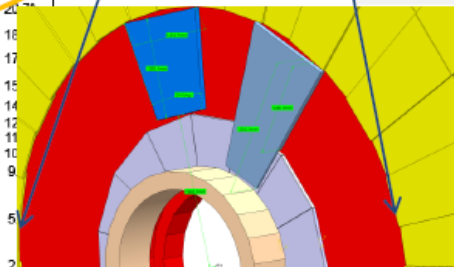
- ✓ Restore redundancy in muon system for robust tracking and triggering
- ✓ Improve LI and HLT muon momentum resolution to reduce or maintain global muon trigger rate
- ✓ Ensure $\sim 100\%$ trigger efficiency in high PU environment



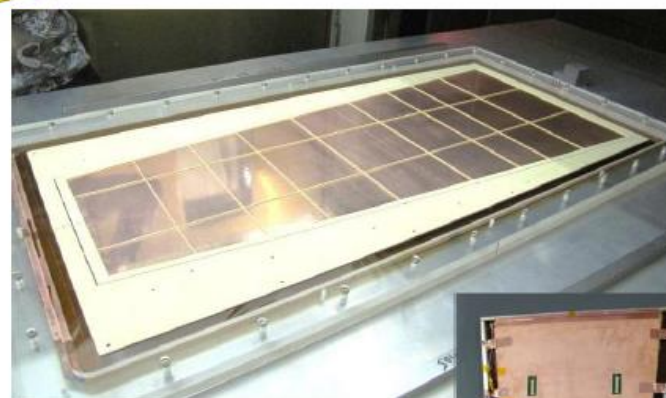
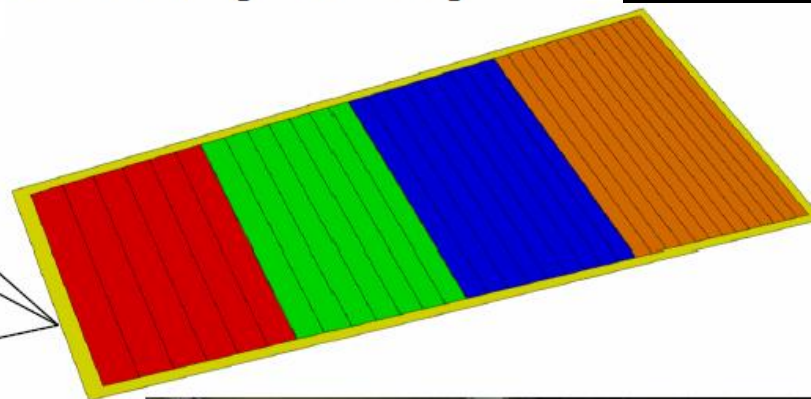
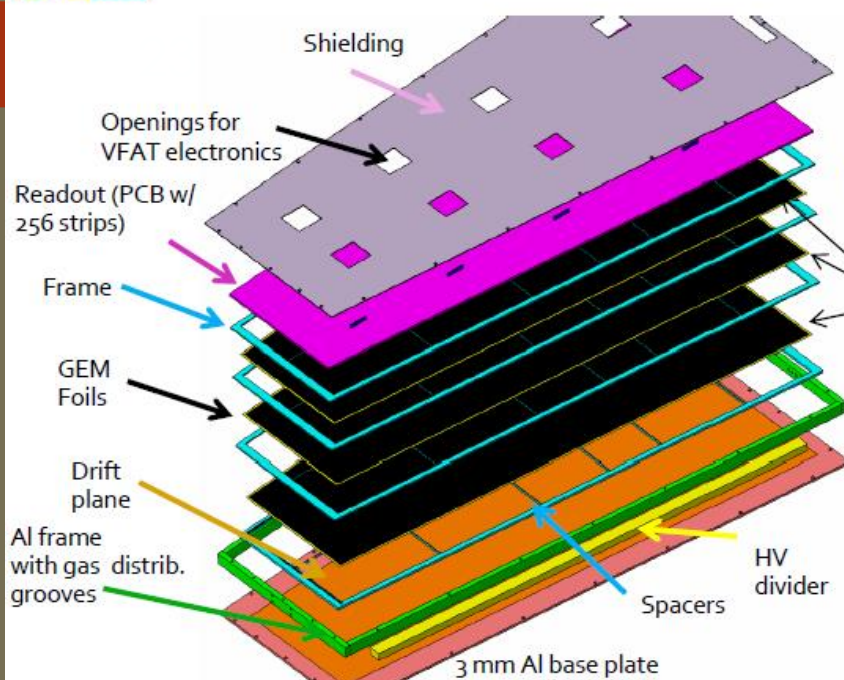
LS2



LS3?



1st GE1/1 Detector (2010)



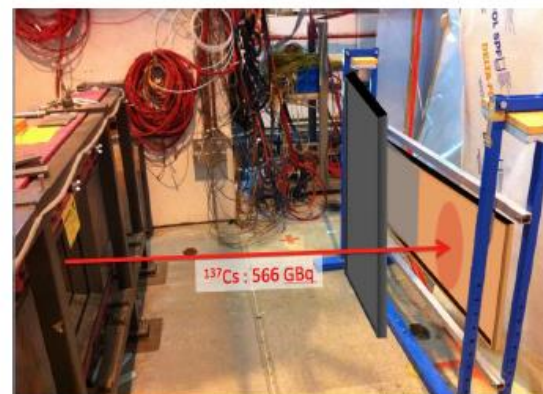
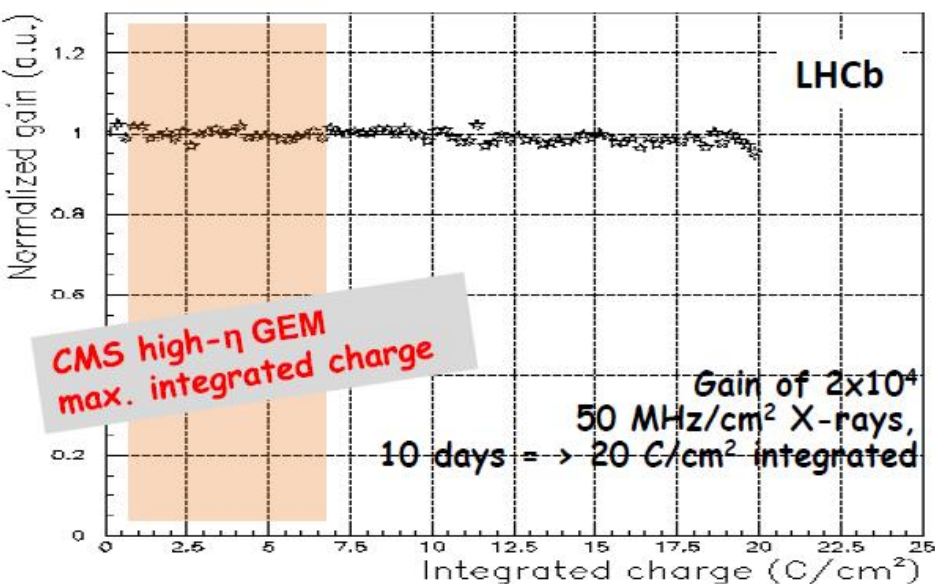
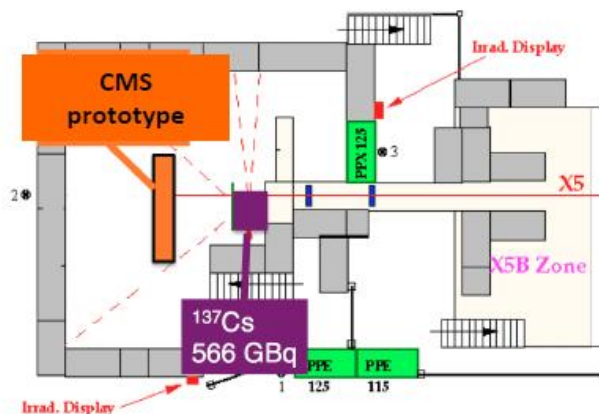
- **Largest GEM built at that time; active area 990 x (220-455)mm²**
- **Gap sizes: 3/2/2/2 mm**
- **Single-mask foils with spacer frames**
- **35 HV sectors per GEM foil, ~100cm² each**
- **1024 channels; 4 η partitions, 2 columns; 0.8-1.6mm strip pitch**
- **ID readout**



Aging test @ CERN GIF

A CMS GEI/I detector was installed in the CERN GIF; detector performance and environmental & gas parameters monitored:

- ☐ Ensure long-term operation inside CMS
- ☐ Understand effects of radiation on the materials
- ☐ Understand ageing origin (if any) and propose solutions



GEM settings:

Drift: 3 kV/cm, Others: 3.5 kV/cm Induction: 5 kV/cm

Gain: $8 \times 10^3 - 10^4$ Gas mix: Ar/CO₂/CF₄ (45:15:40)

Заключение (газовые микроструктурные детекторы)

Газовые микроструктурные детекторы позволяют измерять координаты фотонов мягкого рентгеновского диапазона и треков заряженных частиц с точностью 50-100 мкм и временным разрешением 1-10 нс

Быстродействие MPGD достигает 10^6 частиц/мм²с

Радиационные повреждения (старение) не обнаружены до величин потока заряда 20 Кл/см²

Умеренная стоимость этой технологии позволяет создавать детекторные системы площадью до ~ 100 м² (CMS, ATLAS)

Полупроводниковые детекторы

26

Материалы:

- ❑ Кремний – ширина запрещенной зоны 1,12 эВ
- ❑ Германий – ширина запрещенной зоны 0,67 эВ
- ❑ Арсенид галлия - ширина запрещенной зоны 1,35 эВ

	Si	Ge	GaAs
EG[eV]	1.12	0.67	1.35
$n_i(300\text{ K}) [\text{cm}^{-3}]$	1.45×10^{10}	2.4×10^{13}	1.79×10^6
$n_i(77\text{ K}) [\text{cm}^{-3}]$	2.30×10^{-20}	3.17×10^{-7}	7.74×10^{-32}
	p-n переход обедненная зона работа при 300K	охлаждение до 77K	имплантация Cr работа при 300K

Преимущества:

Пространственное разрешение до ~ 1 мкм

Быстродействие и временное разрешение (сбор заряда $\sim 1-10$ нс)

Отсутствует газовая инфраструктура

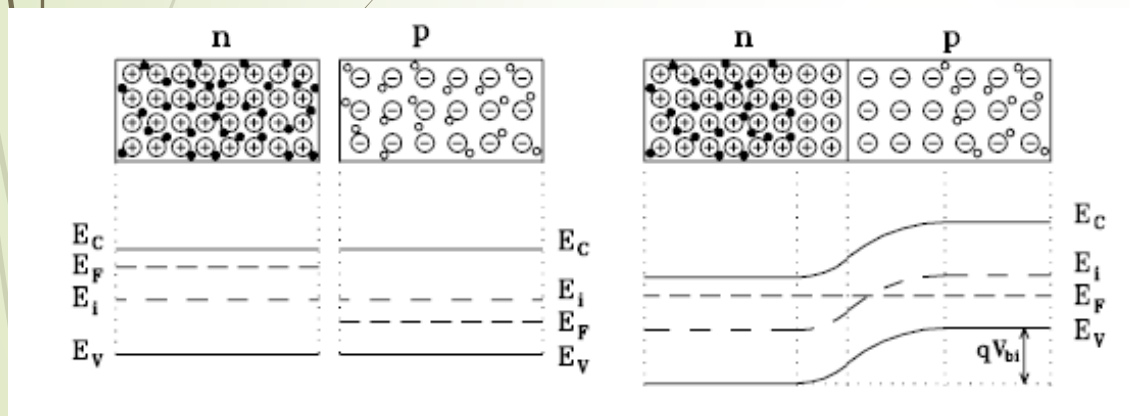
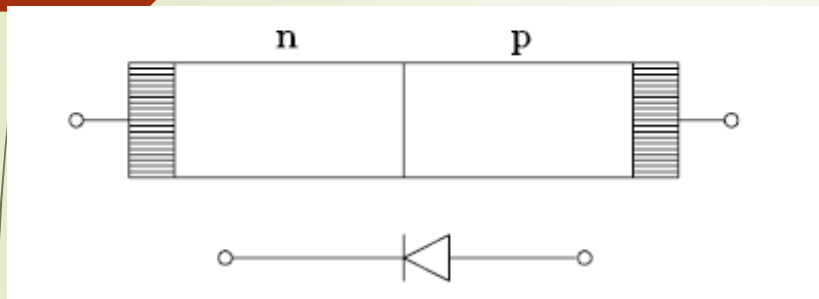
Высокое напряжение ~ 100 В, а не 1 кВ - 5 кВ

Недостатки:

Стоимость – 10-100 \$/см²

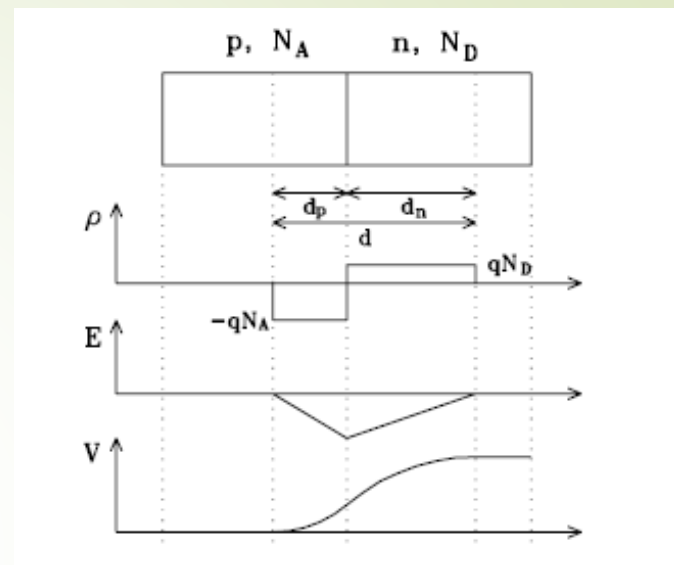
Радиационная стойкость ?

Полупроводниковые приборы: 28 р-п переход, диод

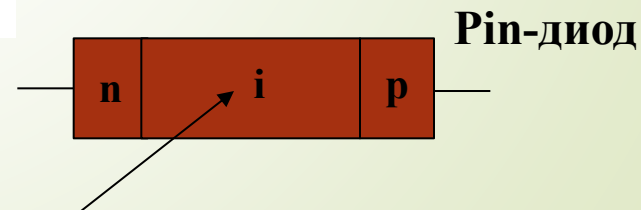


п- и р- полупроводники (слева) в термическом равновесии (справа). E_c и E_v – границы зоны проводимости и валентной зоны, E_f – уровень Ферми

Л.И.Шехтман Дискуссионный клуб



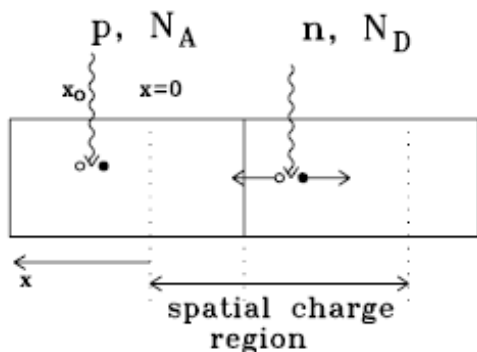
Объемный заряд, поле и потенциал в р-п переходе в отсутствии внешнего поля



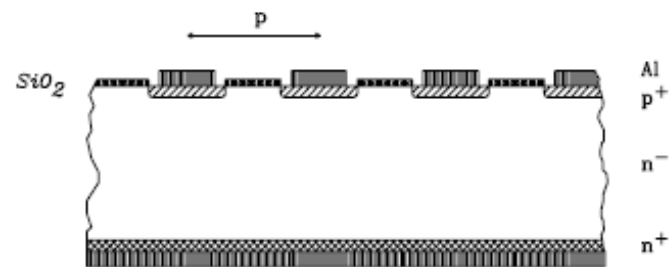
Собственный полупроводник

25.08.2026

Полупроводниковые приборы: 29 р-п переход, диод – генерация тока при регистрации ионизирующих частиц



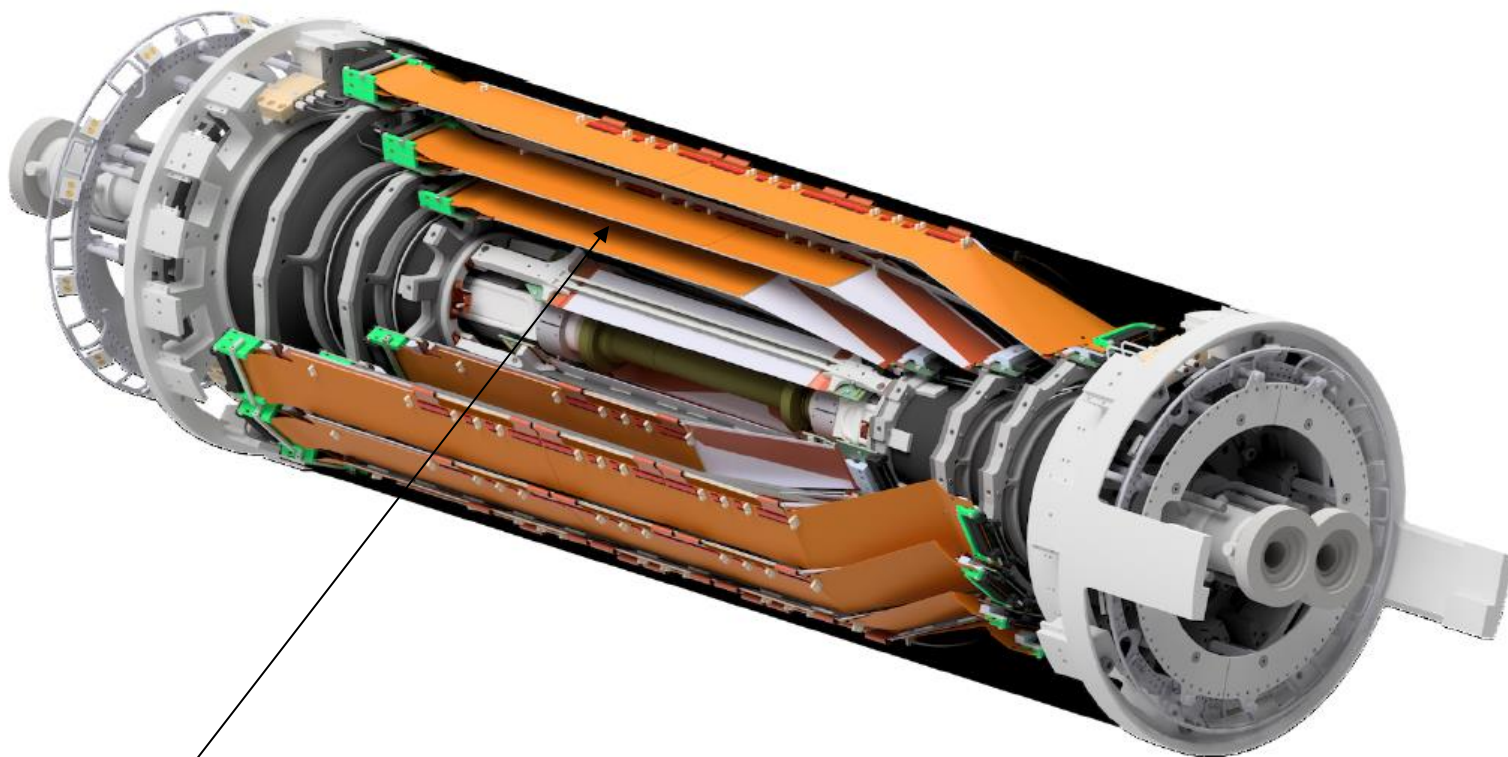
электрон-дырочная пара создает ток
при дрейфе в обедненной зоне



Устройство микрополоскового детектора
с р-п переходами и металлическими
полосками в контакте с р-имплантами
(DC-coupled)

Belle II вершинный детектор VXD

30



4 слоя кремниевых микрополосковых детекторов (SVD)

Л.И.Шехтман Дискуссионный клуб

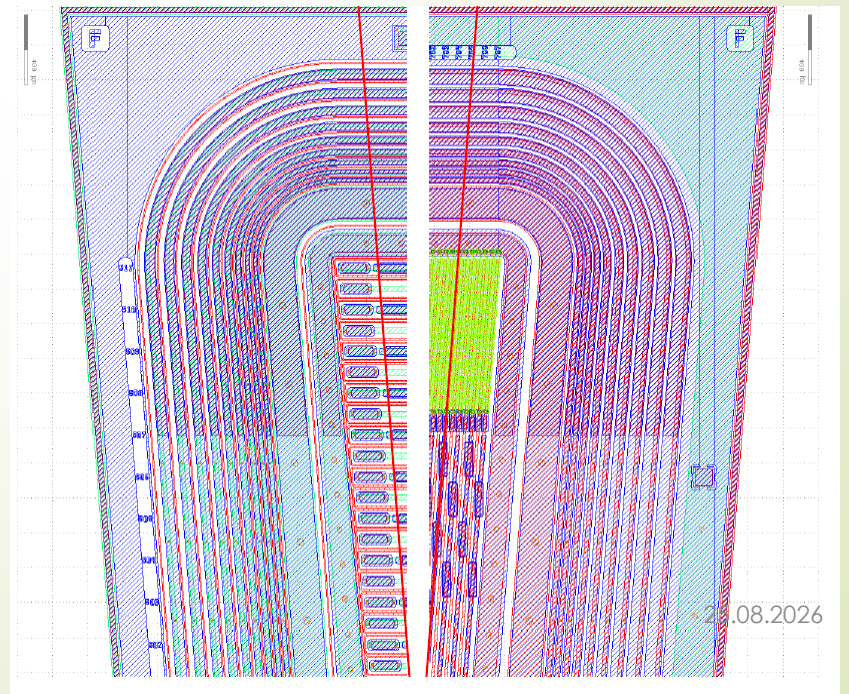
25.08.2026

Belle II вершинный детектор VXD

31

	Small rectangular	Large rectangular	Trapezoidal
Readout strips <i>P</i> -side	768	768	768
Readout strips <i>N</i> -side	768	512	512
Readout pitch <i>P</i> -side (μm)	50	75	50 – 75
Readout pitch <i>N</i> -side (μm)	160	240	240
Sensor active area (mm^2)	122.90×38.55	122.90×57.72	$122.76 \times (38.42 - 57.59)$
Sensor thickness (μm)	320	320	300
Manufacturer	Hamamatsu	Hamamatsu	Micron

Table 1. Geometrical details of the double-sided silicon strip sensor types used in the SVD. All sensors have one intermediate floating strip between two readout strips.



Belle II вершинный детектор VXD

32



Figure 96. Photo taken during the VXD installation in the Belle II detector: installation of the VXD in the Belle II detector. The slide guide installed in the Belle II detector using the slide guide installed in the forward part of Belle II.

Дискуссионный клуб

25.08.2026

Belle II вершинный детектор VXD

33

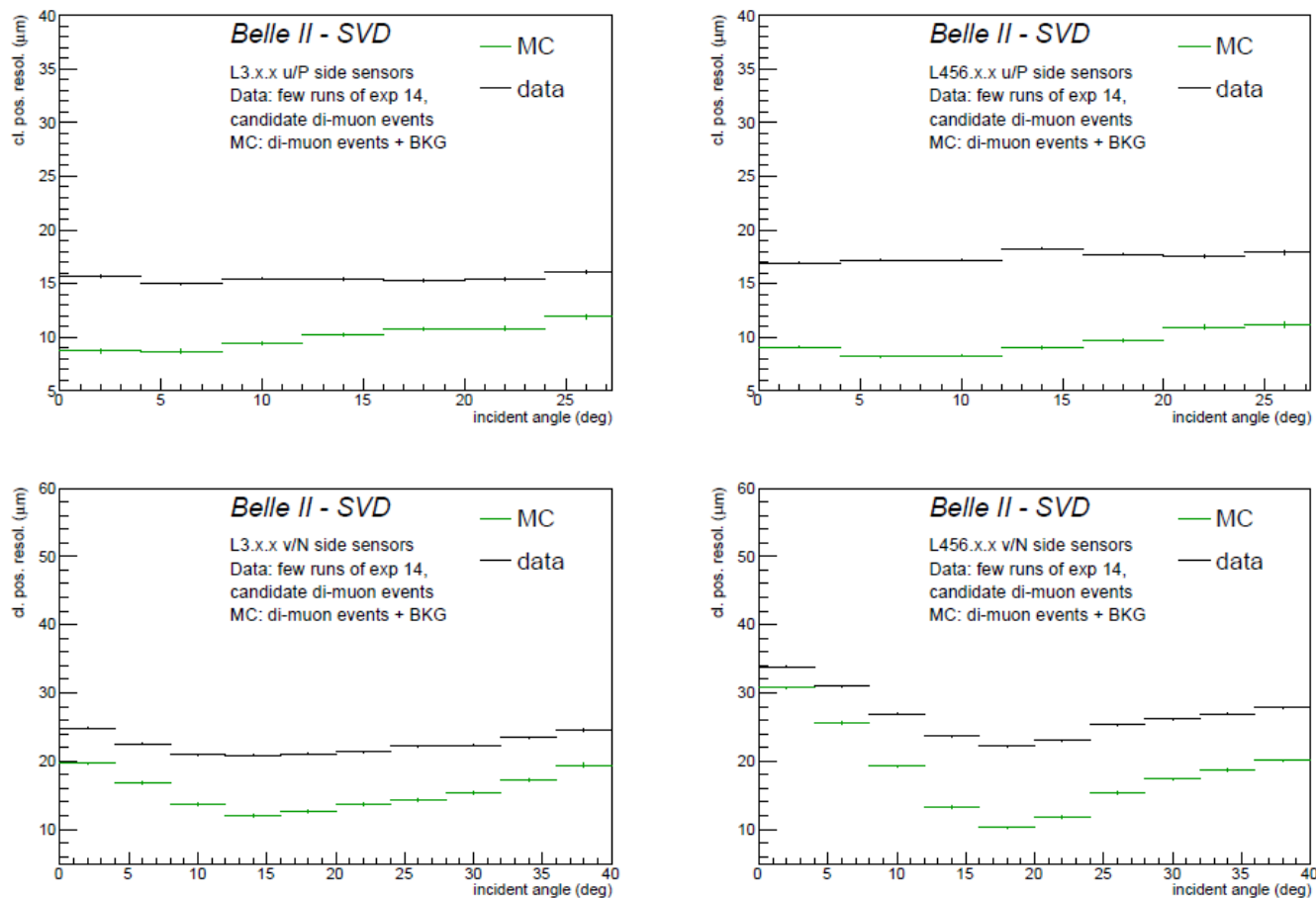


Figure 139. Cluster position resolution as a function of the track incident angle for data and MC simulation. In the upper row u/P side results for layer 3 (left) and layer 456 barrel sensors (right). In the lower row v/N side results for layer 3 (left) and layer 456 barrel sensors (right).

25.08.2026

Полупроводниковые микрополосковые детекторы в ИЯФ

34

Координатные детекторы рентгеновского излучения с временным разрешением (для ЦКП СКИФ, станция 1-3, секция «Плазма»):

GINTOS – детектор интегрирующего типа, сенсор GaAs:Cr, 1024 канала, шаг 50 мкм

SciCODE – детектор прямого счета фотонов с энергетическим и временным разрешением, сенсор Si, 1024 канала, шаг 50 мкм

Координатные детекторы для изучения быстропротекающих процессов (ЦКП СКИФ, станция 1-3, секции «Динамические процессы»):

DIMEX-Si – однокоординатный детектор, Si сенсор, 2048 каналов, шаг 50 мкм

DIMEX-Si2D – двухкоординатный детектор, Si сенсоры, 5120 каналов, шаг 100 мкм

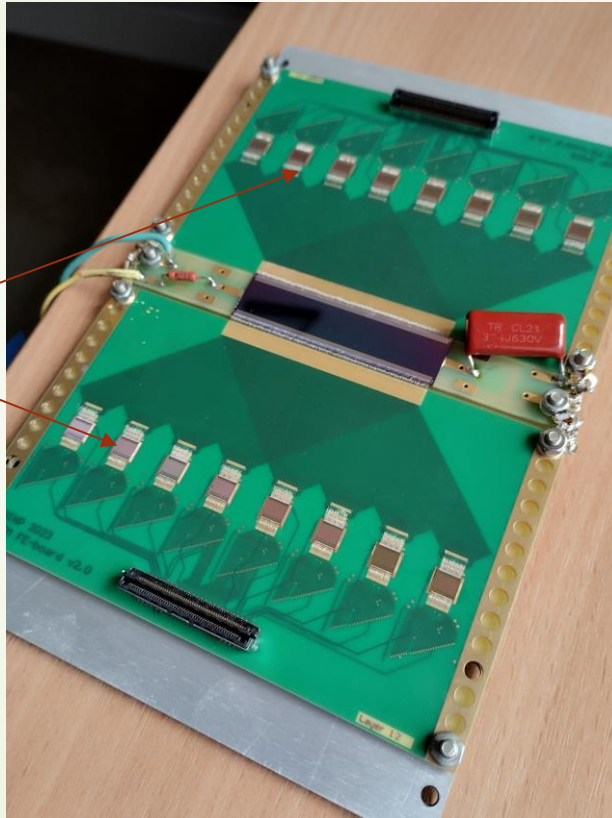
Внутренний трекер КМД-4:

12 двусторонних Si сенсоров 22x100 мм, шаг 50 мкм по ϕ , 250 мкм по Z , ~10000 каналов (обсуждение)

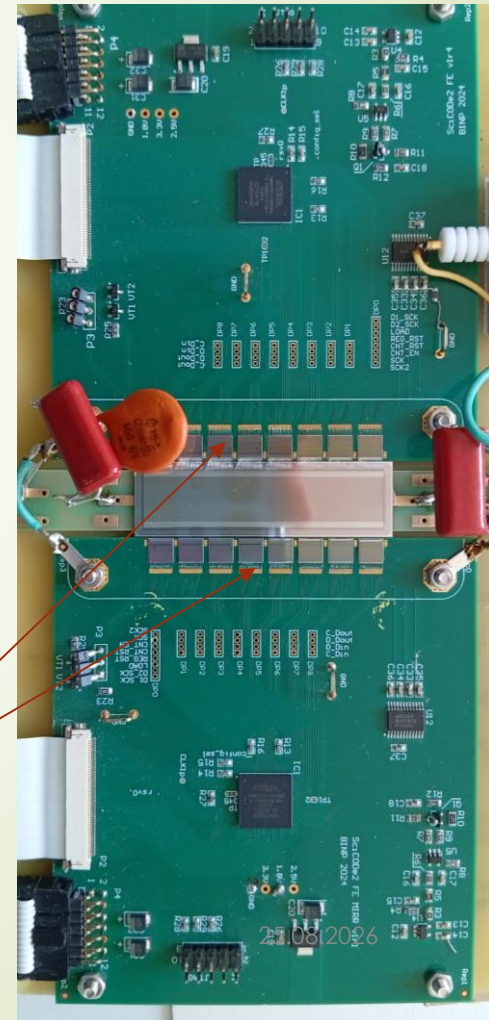
Полупроводниковые микрополосковые детекторы в ИЯФ

GINTOS
Модуль
регистрации

ASICs DMXG64C

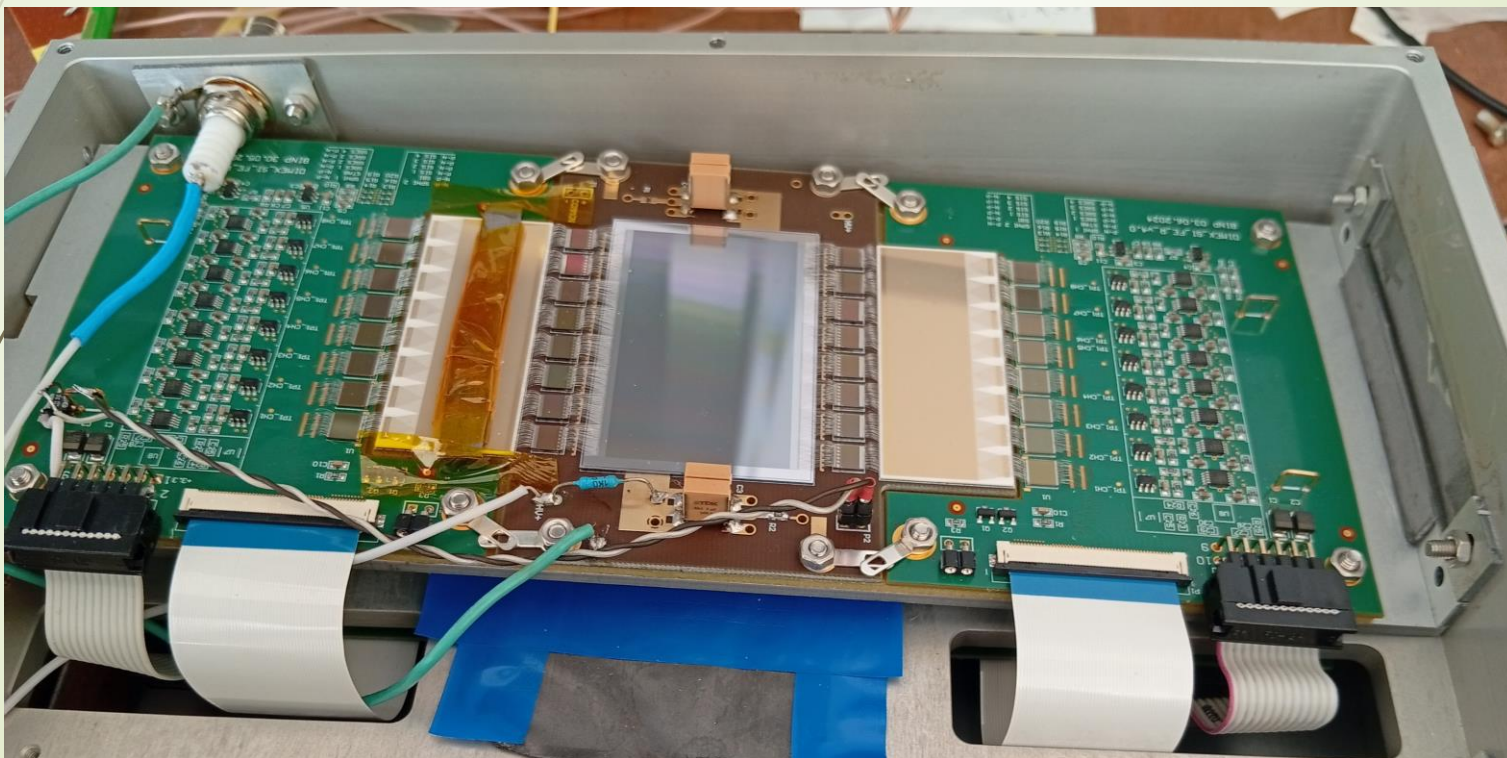


SciCODE – модуль регистрации



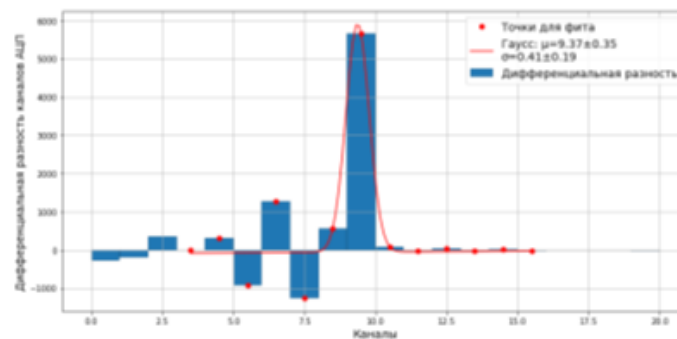
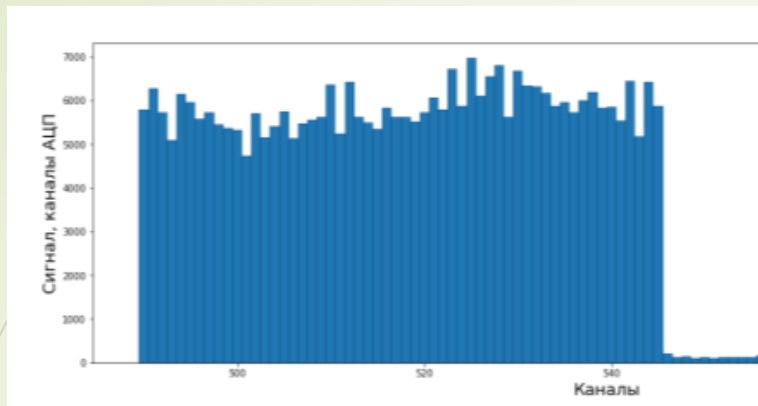
ASICs SciCODE64C

Полупроводниковые микроструктурные детекторы в ИЯФ



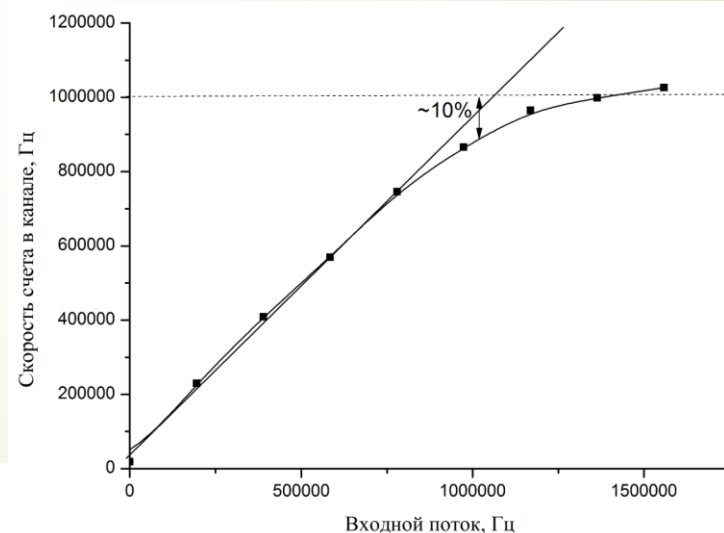
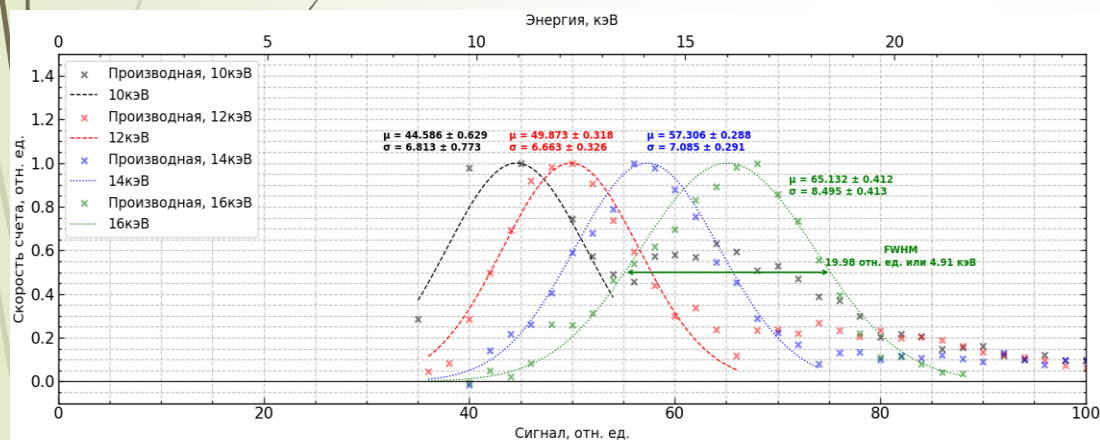
Полупроводниковые микрополосковые детекторы в ИЯФ

37



GINTOS – изображение непрозрачного края СИ на ВЭПП-3, средняя энергия в спектре ~ 17 кэВ

Производная, $\text{FWHM} \approx 20.5 \pm 0.1$ мкм



SciCODE: Дифференциальные амплитудные спектры детектора при различных энергиях пучка СИ (10, 12, 14 и 16 кэВ), полученные методом численного дифференцирования интегральных распределений. Энергетическое разрешение ~ 5 кэВ (FWHM)

SciCODE – быстродействие, 1 МГц при 10% просчетах

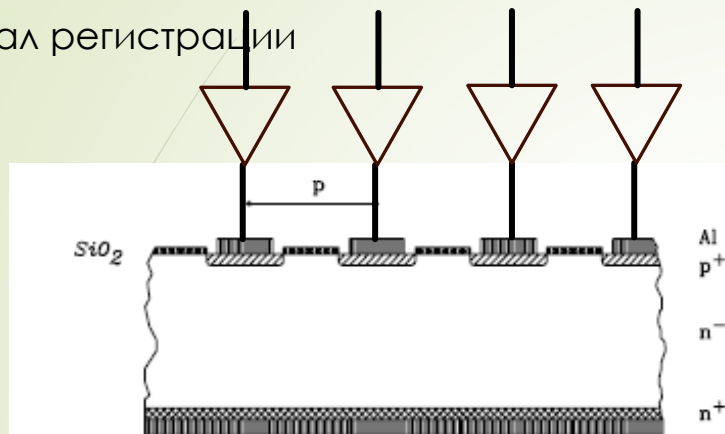
20.08.2026

Детекторы прямого счета фотонов

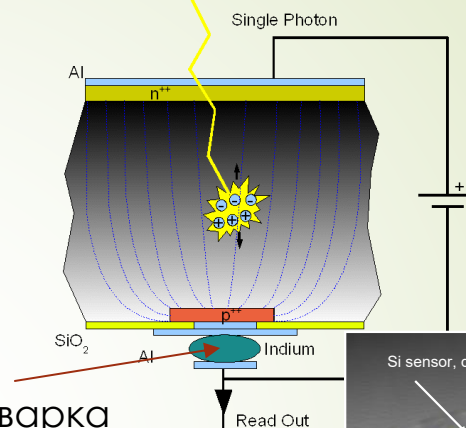
38

Стриповый детектор

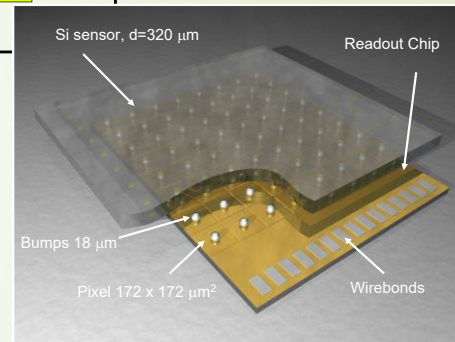
Канал регистрации



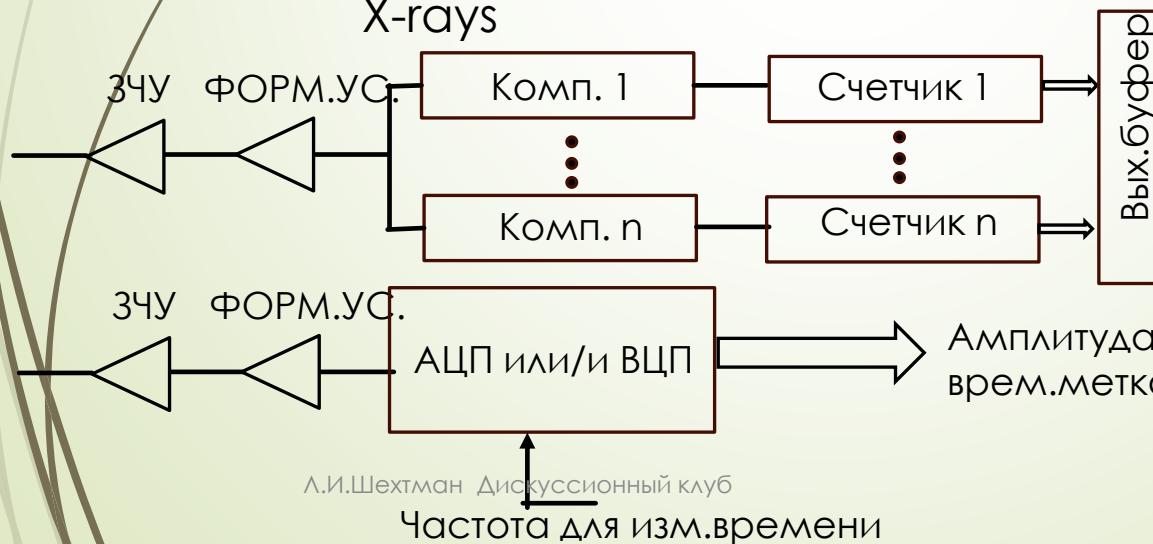
Пиксельный (матричный) детектор



Флип-чип сварка



X-rays



X-rays

Mythen, SciCODE, Pilatus, Eiger, Medipix

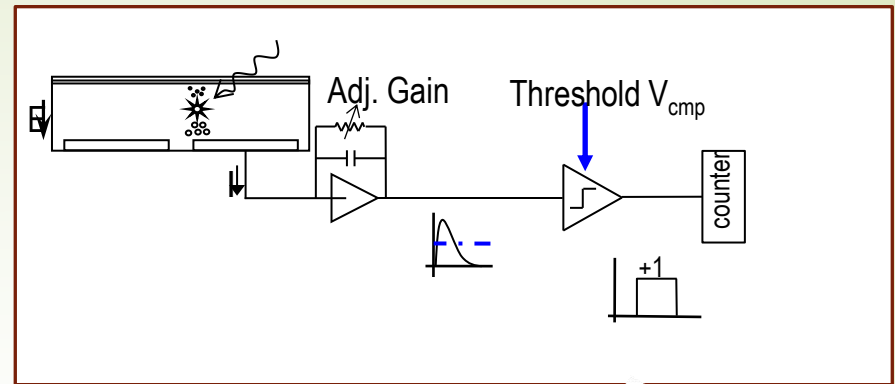
TimePix, VMM, Tiger

Eiger

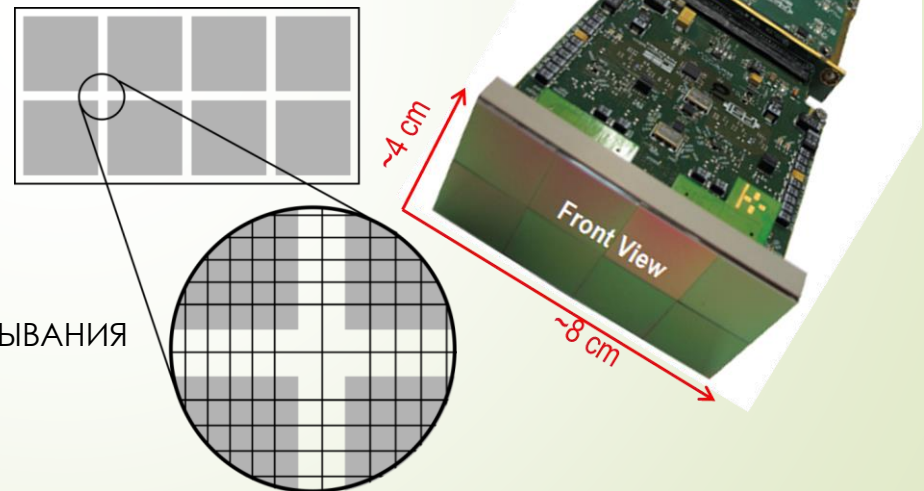
Счет фотонов

- 1 глобальный порог
- 6-бит ЦАП/ pixel
- 75 x 75 мкм²
- 256 x 256 пикселей
- Шум 100-200⁺ e⁻ RMS
- Конфигурирование: 4/8/12 бит счетчика
- Частота записи кадров: **23/11/8** кГц
- Эффективное мертвое время
 - EIGER: 200-600нс (зависит от режима усиления)

- 2x4 ИС
- ОДИН СЕНСОР 4x8 см²
- ТОЛЩИНА СЕНСОРА 320 МКМ
- СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СЧИТЫВАНИЯ ЧЕРЕЗ 10ГБ/С ETHERNET



Eiger модуль с
электроникой считывания
без сенсора

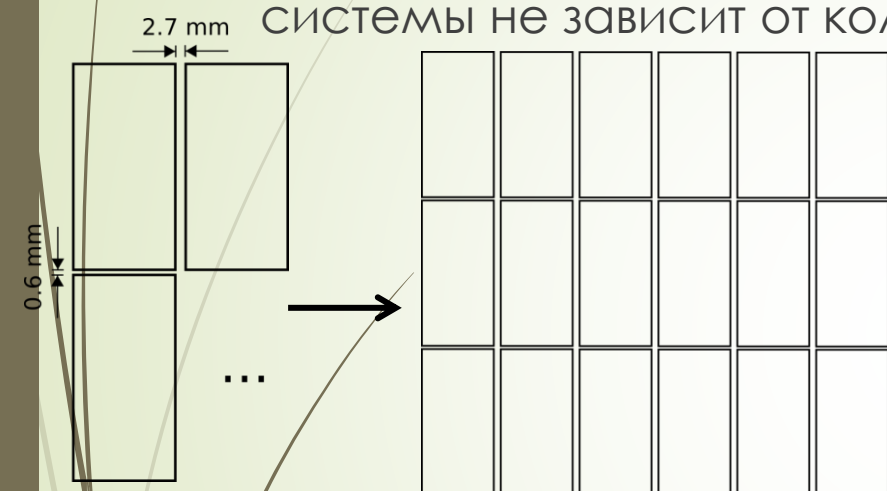


Eiger

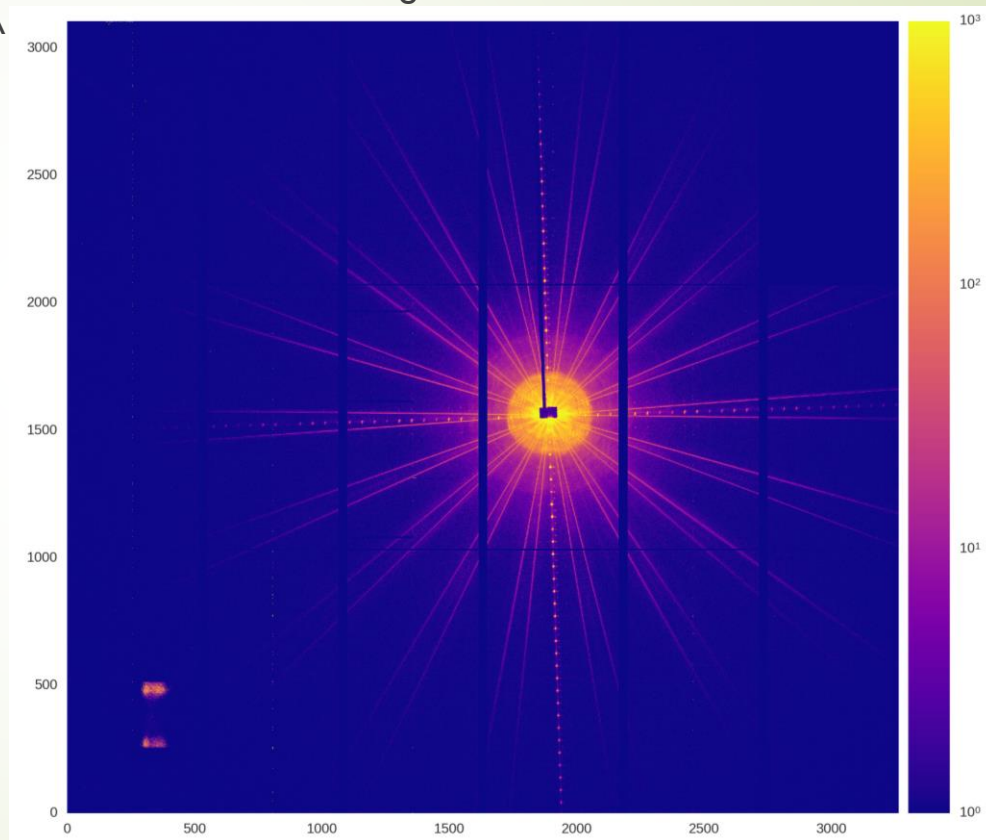
40

Детектор большой площади может быть набран из многих модулей

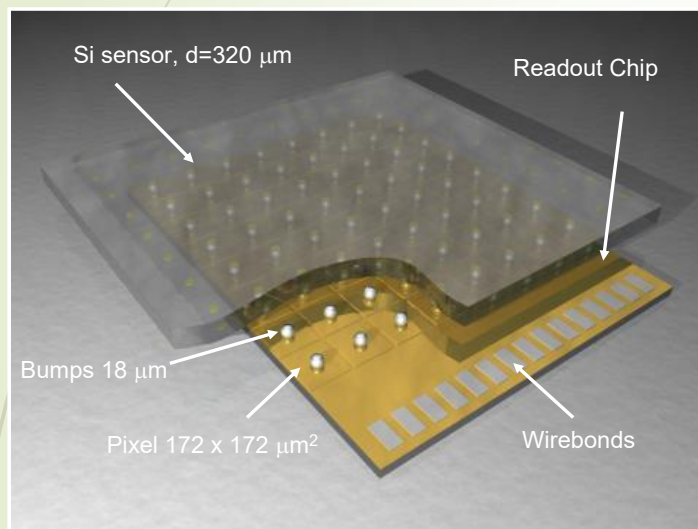
- Благодаря «параллельному» дизайну производительность системы не зависит от кол



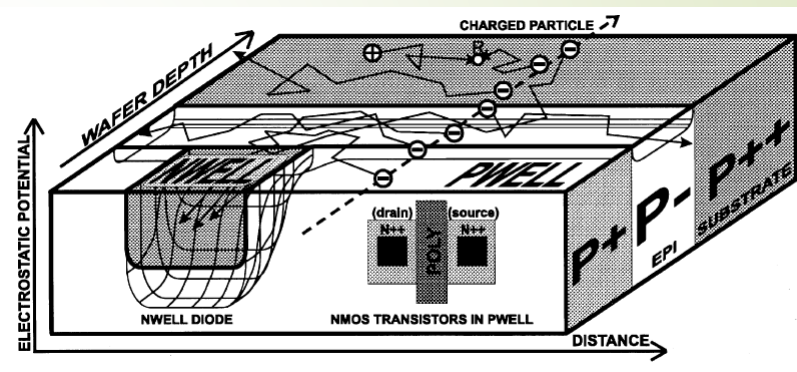
24 x 23 cm
3072 x 3072
pixels



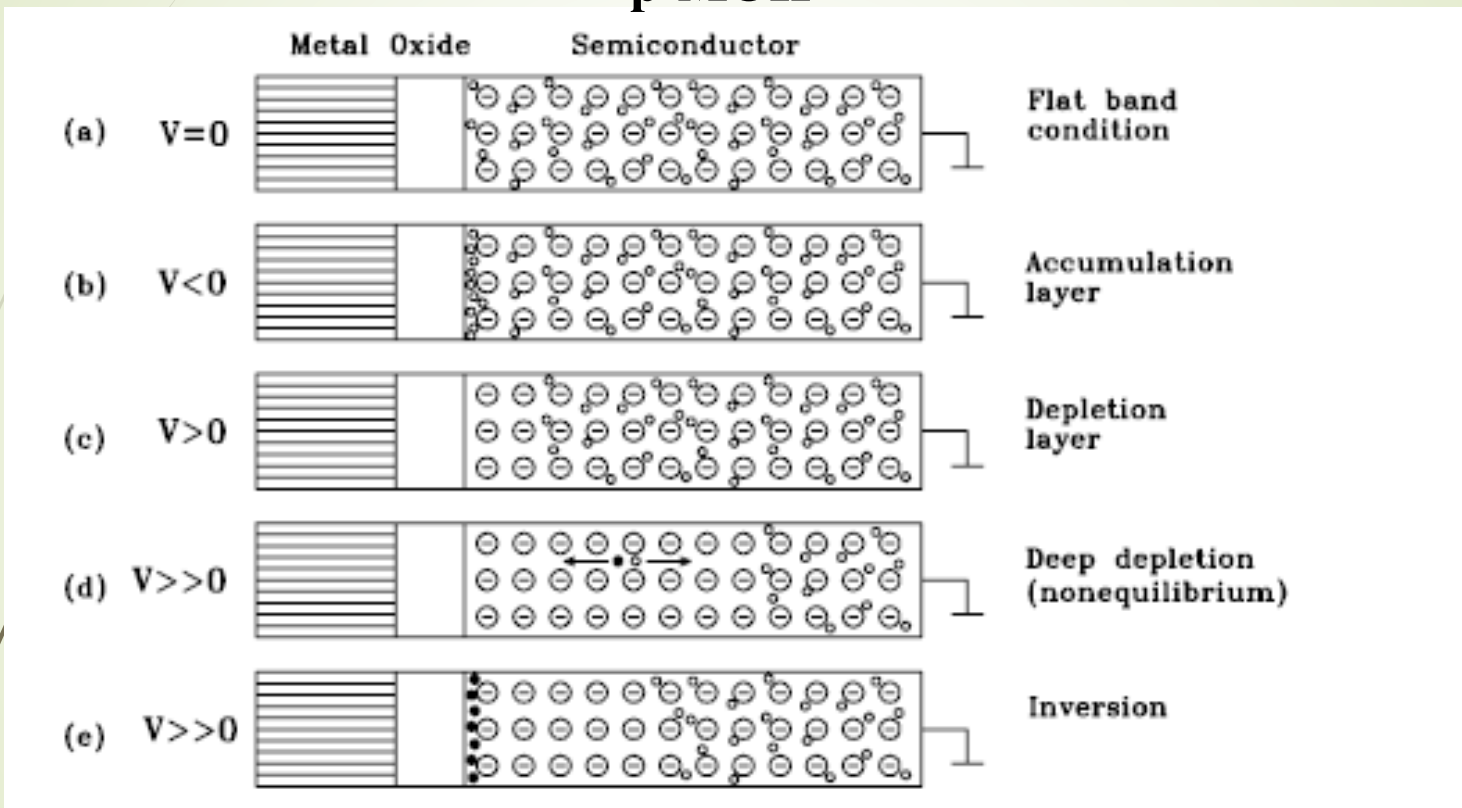
Гибридный матричный детектор (Hybrid pixel detector)



Активный пиксель – детектор и электроника интегрированы на одном кристалле



р-МОП



В состоянии deep depletion МОП ячейка может работать как детектор

Gerhard Lutz, "Semiconductor radiation detectors", © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999, 2007

Революция цифровой визуализации

43



Nobel Prize in Physics 2009

Willard S. Boyle and George E. Smith *"for the invention of an imaging semiconductor circuit - the CCD sensor."*

Digital imaging began with the invention of the Charge-Coupled Device (CCD) in 1969

Start of the the digital imaging revolution

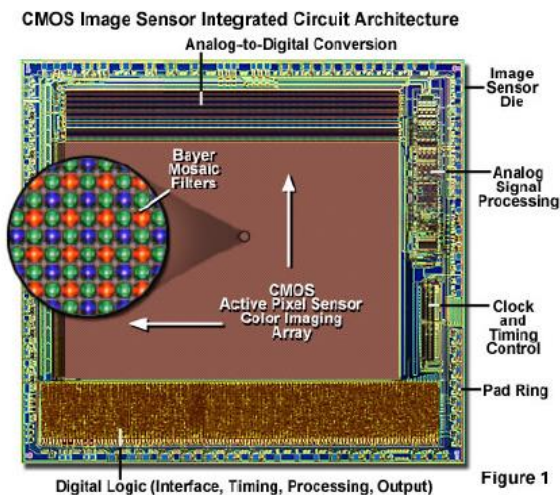
Boyle and Smith's invention improved commercial and consumer products for decades and is one of the most important technological innovations of the past half-century

Since its inception, digital imaging has progressed through improvements in CCDs and with the emergence of Complementary Metal-Oxide Silicon (CMOS) Image Sensor technology

Since 10 years CMOS has become the leading imaging technology driving the second golden age ...

КМОП матрицы (CMOS image sensor, CIS)

44



Source: Olympus (optical microscopy)

camera phones, vehicles, machine vision, human recognition and security systems

⇒ drive CMOS image sensors development and sales

cellular camera phones account for 62% of the sales

90% of the total image sensor sales in 2017

it was 74% in 2012, 54% in 2007

(Re)-invented in the early '90

- All-in-one: Electronic Camera On Chip
- Standard CMOS technology
 - ⇒ lower production cost significantly
 - ⇒ simpler integration of complex functionalities
- Very small pixels (today $\sim 1\mu\text{m}$, 40M pixel)
- Single low-supply and much lower power consumption
- Increased speed (column- or pixel- parallel processing)

CMOS Image Sensor Sales March Higher into Next Decade

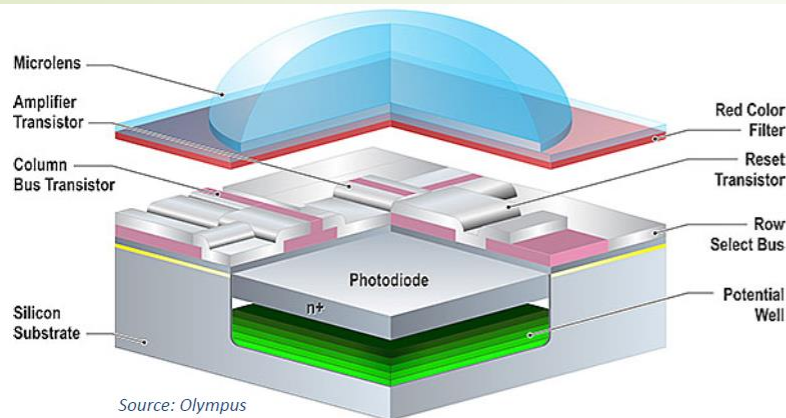


Source: IC Insights

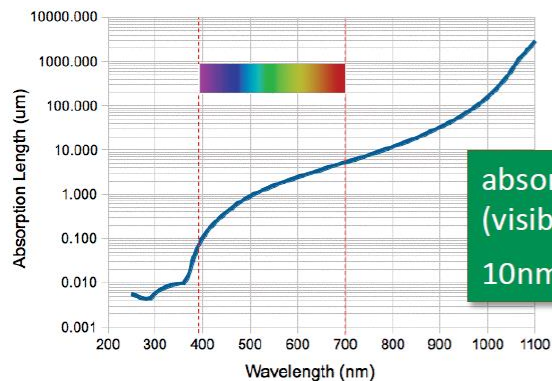
КМОП матрицы (CMOS image sensor, CIS)

Структура CIS пикселя

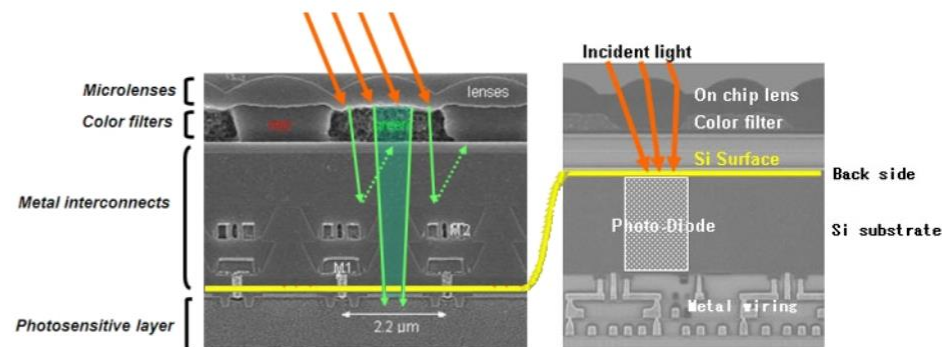
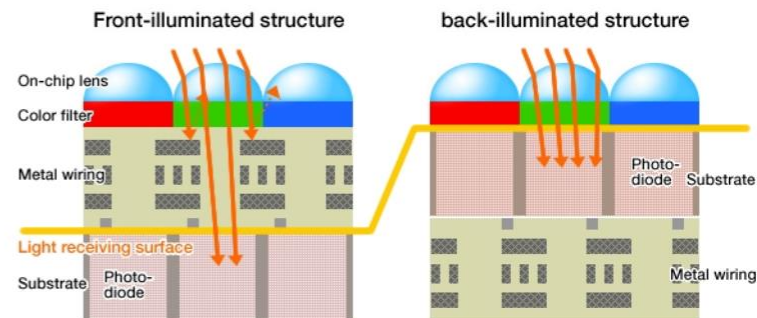
45



Source: Olympus



absorption depth
(visible light):
10nm – 5μm

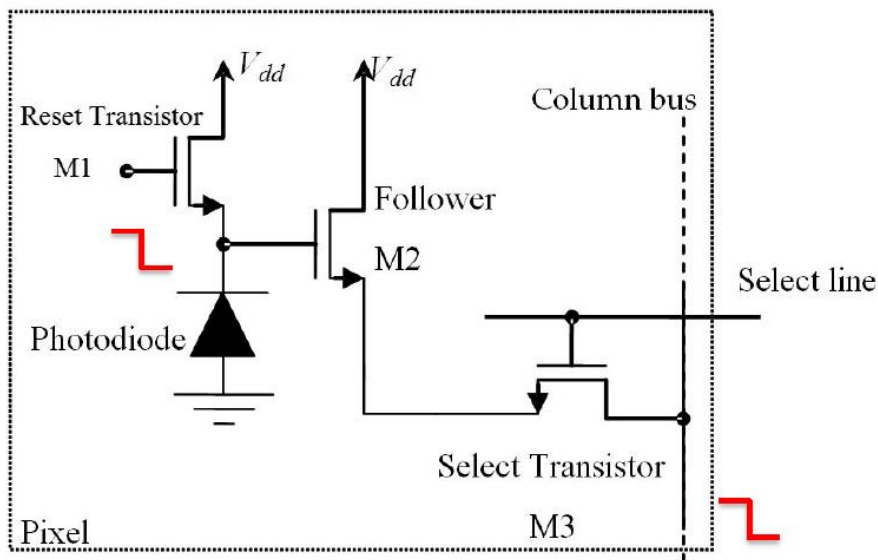


Структура CIS пикселя

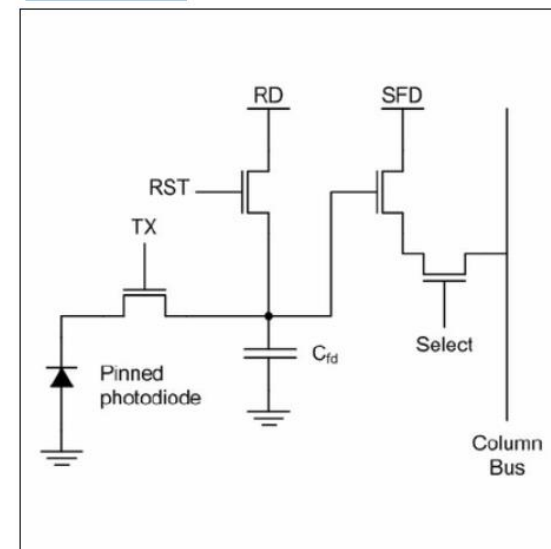
46

The photodiode usually occupies 20-30% of the pixel surface ... the rest is occupied by the in-pixel electronics

3T Pixel



4T Pixel



“integration time” = “exposure time”, time between two consecutive reset pulses

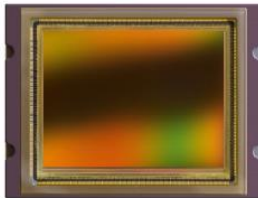
Today, more complex structures (5T, 6T, ...) are also commonly used

КМОП матрицы (CMOS image sensor, CIS)

47

Rolling Shutter or Global shutter

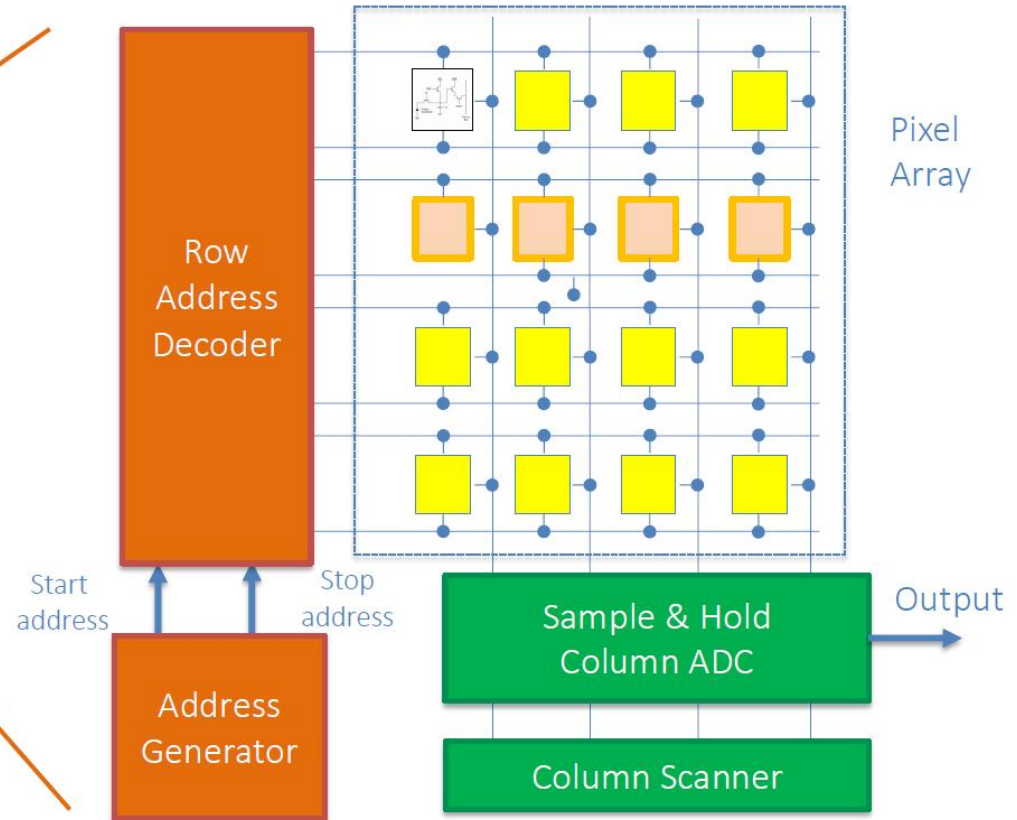
Typical CMOS Image sensors supports column- or pixel-parallel readout



Global Shutter



Rolling Shutter



Регистрация заряженных частиц сенсорами с активными пикселями (active pixel sensors, APS)

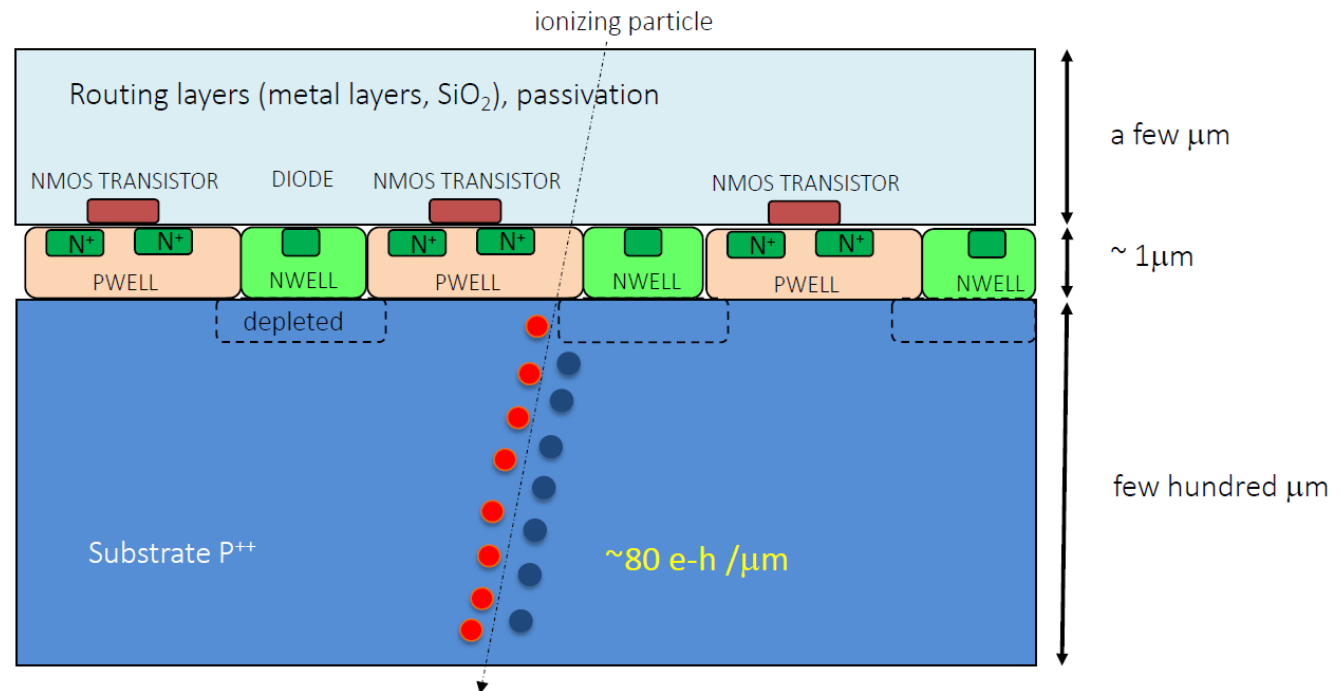
48

In a standard CMOS image sensor (in the early days) the photodiode is implanted in low-resistivity silicon

Depletion region is shallow, charge collection efficiency is low

Moreover the detector element covers only a small fraction of the pixel area

... not suitable for the measurement of single charged particles



Регистрация заряженных частиц сенсорами с активными пикселями (active pixel sensors, APS)

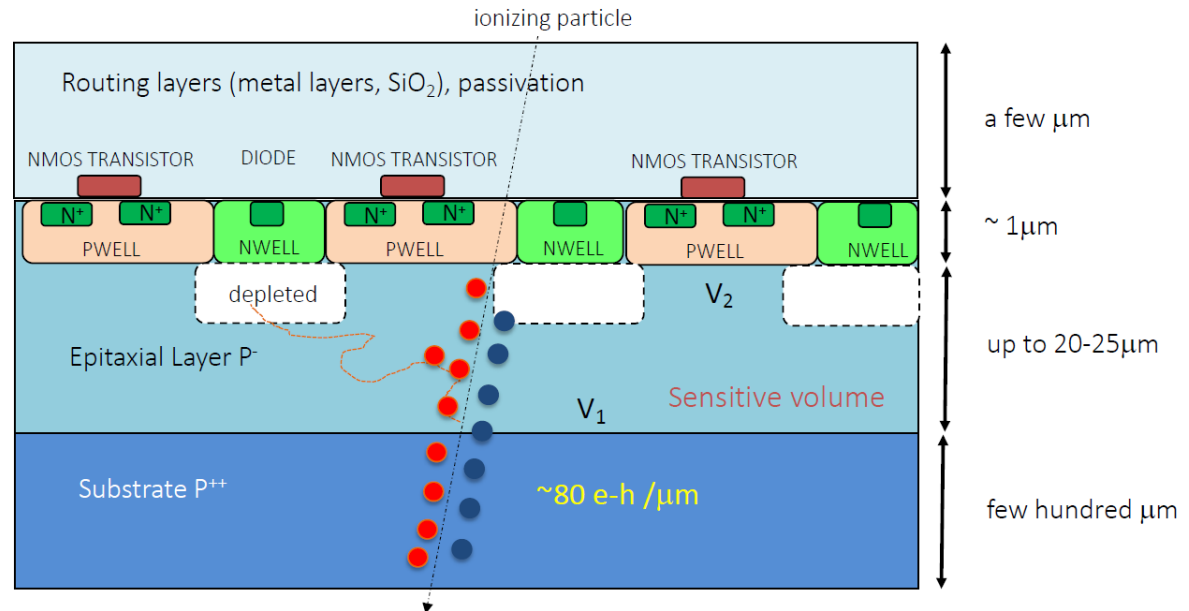
Use of an epitaxial layer with doping few order of magnitude smaller than one of the p++ substrate

Potential barriers exist at its boundaries

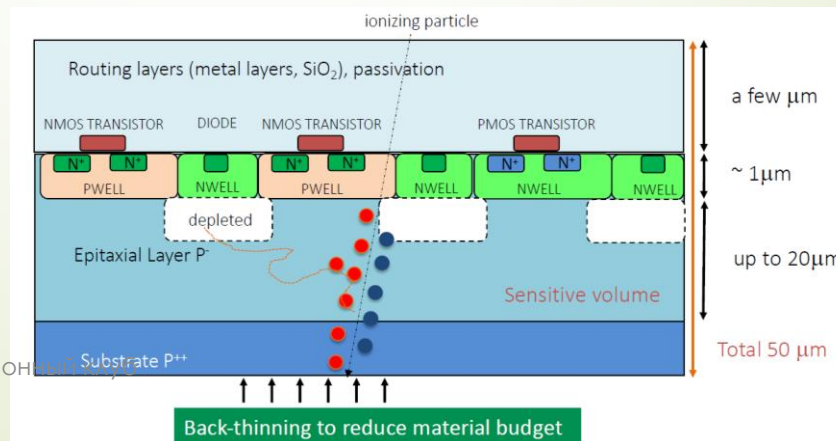
$$V_1 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{sub}}{N_{epi}}$$

$$V_2 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{PWELL}}{N_{epi}}$$

which keep minority carriers confined in the epi-layer



... till they reach the depleted region underneath the NWELL collection electrode



Применение монокристаллических сенсоров с активными пикселями (MAPS) для регистрации заряженных частиц

50



ELSEVIER

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 458 (2001) 677–689

NUCLEAR
INSTRUMENTS
& METHODS
IN PHYSICS
RESEARCH

Section A

www.elsevier.nl/locate/nima

A monolithic active pixel sensor for charged particle tracking and imaging using standard VLSI CMOS technology

R. Turchetta^{a,*}, J.D. Berst^a, B. Casadei^a, G. Claus^a, C. Colledani^a, W. Dulinski^a, Y. Hu^a, D. Husson^a, J.P. Le Normand^a, J.L. Riester^a, G. Deptuch^{b,1}, U. Goerlach^b, S. Higuieret^b, M. Winter^b

^aLEPSI, IN2P3/ULP, 23 rue du Loess, BP20, F-67037 Strasbourg, France

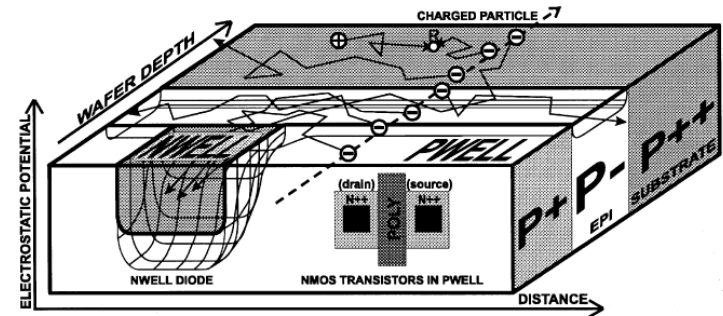
^bIReS, IN2P3/ULP, 23 rue du Loess, BP20, F-67037 Strasbourg, France

In a standard CMOS image sensor the photo diode is integrated in low-resistivity silicon:

⇒ Standard CMOS substrate

⇒ Depletion region is shallow, charge collection efficiency is low

Moreover the detector element covers only a small fraction of the pixel area



Integration of a sensor in 0.6μm CMOS process

- Twin (P and N) tubs
- Implanted in lightly doped (P⁻) epitaxial silicon layer
- Grown on top of the highly doped (P⁺⁺) substrate

The charge collection diode is made of the junction between the NWELL and the P-type epitaxial layer

Развитие сенсоров на основе активных пикселей (CMOS APS) – серия MIMOSA

51

p-type crystalline epitaxial layer hosts n-well charge collector

Signal is generated in a high-resistivity ($> 1 \text{ k}\Omega\text{cm}$) epi-layer
~20 μm thick (larger values possible)

Early versions with thin and low resistivity epi-layer

R&D mostly with AMS 0.6 μm and 0.35 μm technology

Only one transistor type in the active area (NMOS)

⇒ 2T or 3T in-pixel circuit

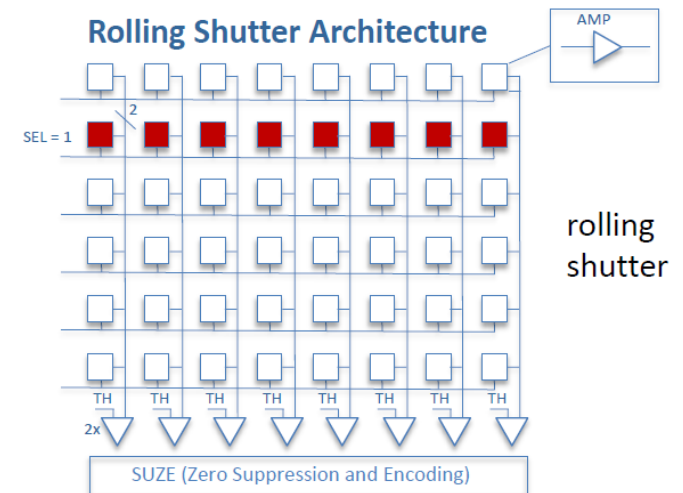
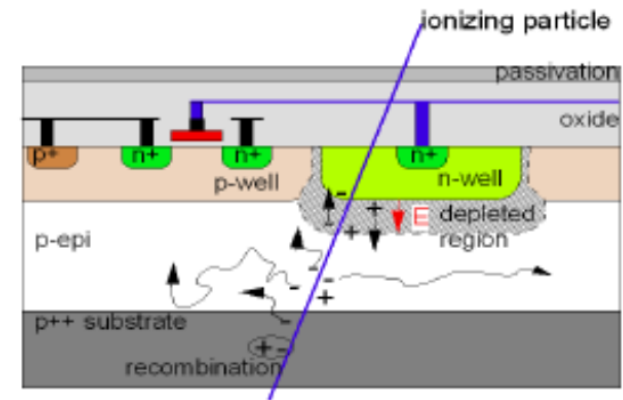
⇒ Rolling shutter architecture for matrix analogue readout

epi-layer not fully depleted

⇒ Charge collected (mostly) by diffusion and drift

⇒ Typical charge collection time $< 100\text{ns}$

Sensitive to radiation induced displacement damage in the epi layer
⇒ ok for applications with up to $\sim 10^{12} \text{ 1MeV N}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

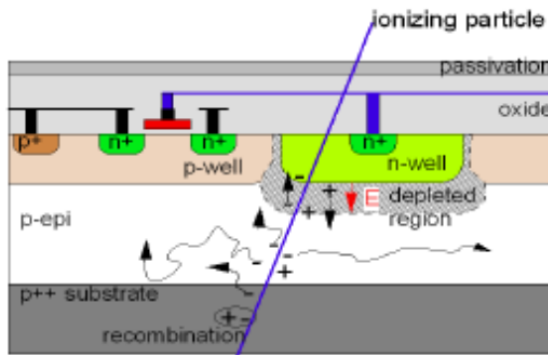


Первое применение детекторов с активными КМОП пикселями

– пиксельный детектор в эксперименте STAR (RHIC, BNL)

52

Process: AMS 0.35 μ m twin-well CMOS
(NMOS only in pixel array)

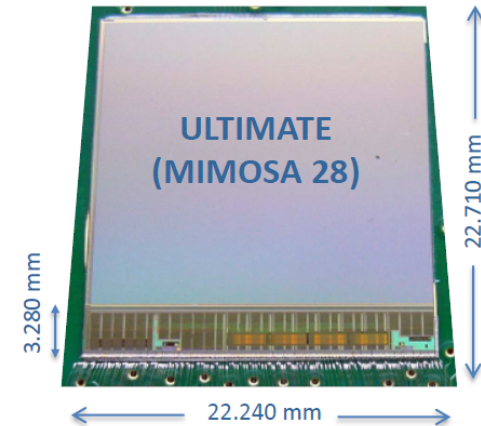
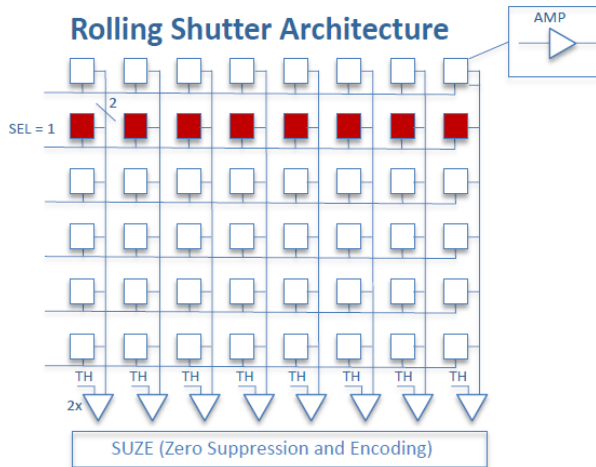


courtesy of PICSEL group (IPHC)

20 μ m high-resistivity p-epi layer ($\sim 800 \Omega \text{ cm}$)

Matrix

- pixel size: 20.7 $\mu\text{m} \times 20.7 \mu\text{m}$
- 928 rows x 960 columns $\sim 1\text{M}$ pixel
- in-pixel circuit: 2T structure
- Correlated Double Sampling



courtesy of PICSEL group (IPHC)

Periphery

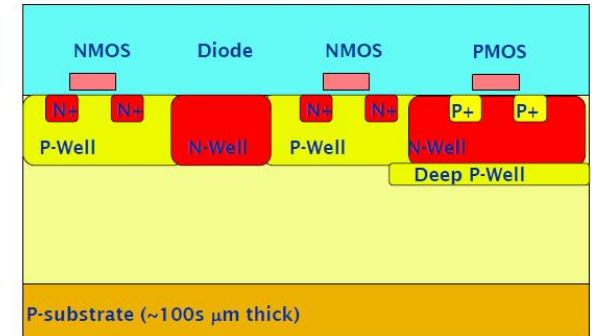
- end-of-column discriminators and zero suppression
- ping-pong memory for frame readout (1500 word)
- 2 LVDS output @160 MHz
- 185.6 μs integration time
- $\sim 160 \text{ mW/cm}^2$ power dissipation

“Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS) in a Quadruple Well Technology for Nearly 100% Fill Factor and Full CMOS Pixel”

R. Turchetta et al. , Sensors 2008, 8, 5336-5351; DOI: 10.3390/s8095336

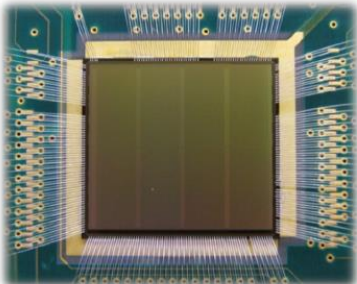
Standard CMOS with additional deep P-well implant Quadruple well technology

100% efficiency and CMOS electronics in the pixel



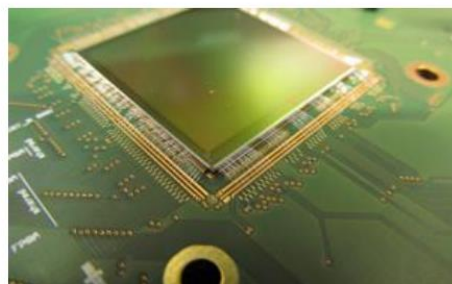
New generation of CMOS APS for scientific applications with complex CMOS circuitry inside the pixel (TowerJazz CIS 180nm)

TPAC - for ILC ECAL (CALICE)



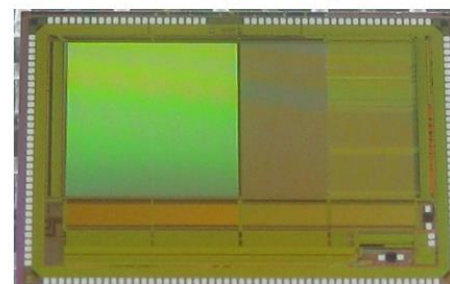
50μm pixel

PIMMS – for TOF mass spectroscopy



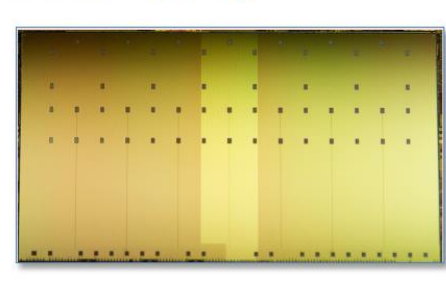
70μm pixel

CHERWELL – Calorimetry/Tracking



48 μm x 96 μm pixel

ALPIDE – Tracking

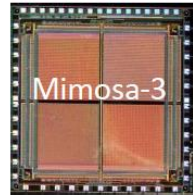


27 μm x 29 μm pixel

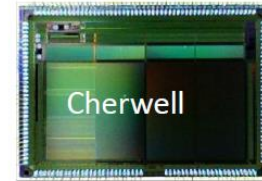
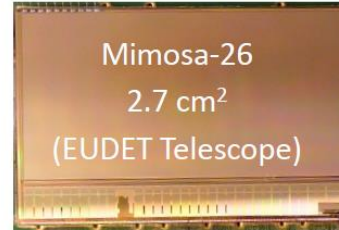
Развитие технологии КМОП активных пикселей (1999-2015)

54

Owing to the industrial development of CMOS imaging sensors and the intensive R&D by HEP community ...

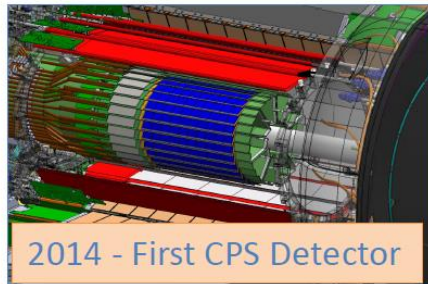


...

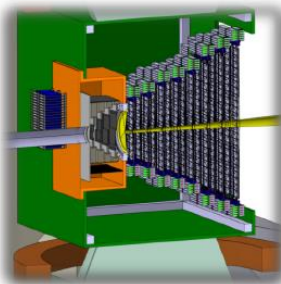


... several experiments have selected CMOS APS (STAR, ALICE, CBM, NICA MPD, sPHENIX, Mu3e)

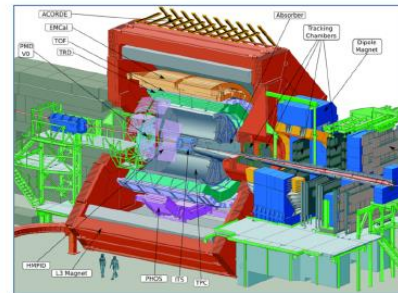
... and now intensive R&D ongoing for HL-LHC (ATLAS) and LC



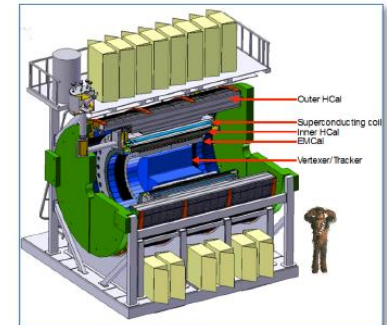
STAR HFT
0.16 m² – 356 M pixels



CBM MVD
0.08 m² – 146 M pixel



ALICE ITS Upgrade (and MFT)
10 m² – 12 G pixel

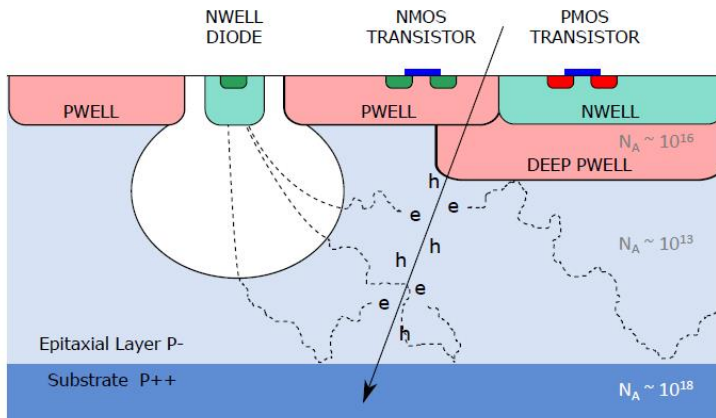


sPHENIX
0.2 m² – 251 M pixel

Сенсор ALPIDE

55

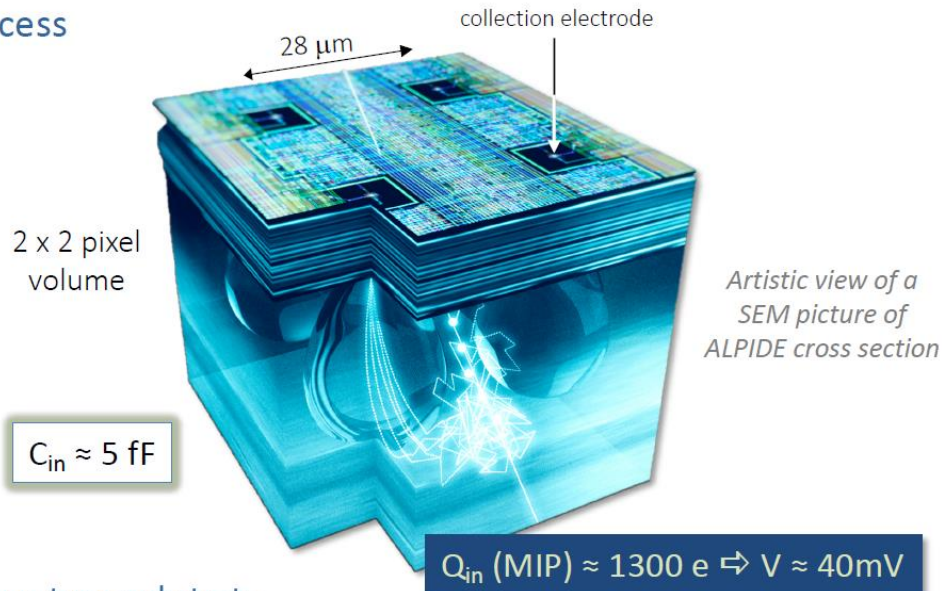
CMOS Pixel Sensor using TJ 0.18 μm CMOS Imaging Process



pixel capacitance $\approx 5 \text{ fF}$ (@ $V_{bb} = -3 \text{ V}$)

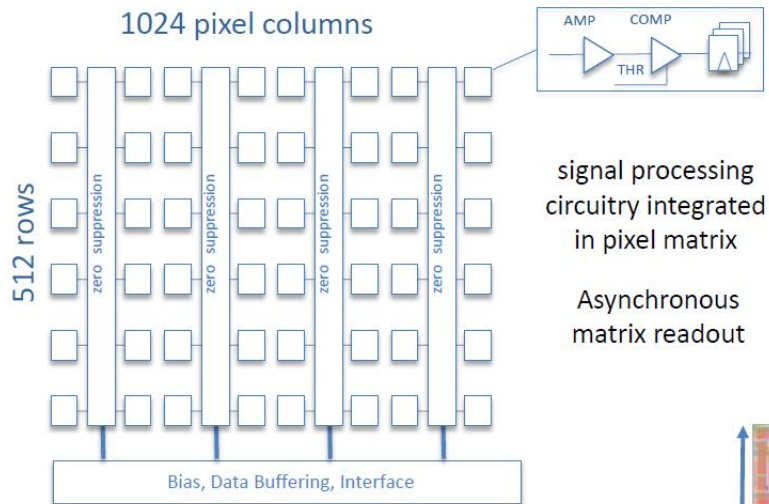
- ▶ High-resistivity ($> 1\text{k}\Omega \text{ cm}$) p-type epitaxial layer ($25\mu\text{m}$) on p-type substrate
- ▶ Small n-well diode ($2 \mu\text{m}$ diameter), ~ 100 times smaller than pixel $\Rightarrow$ low capacitance ($\sim \text{fF}$)
- ▶ Reverse bias voltage ($-6\text{V} < V_{BB} < 0\text{V}$) to substrate (contact from the top) to increase depletion zone around NWELL collection diode
- ▶ Deep PWELL shields NWELL of PMOS transistors

→ full CMOS circuitry within active area

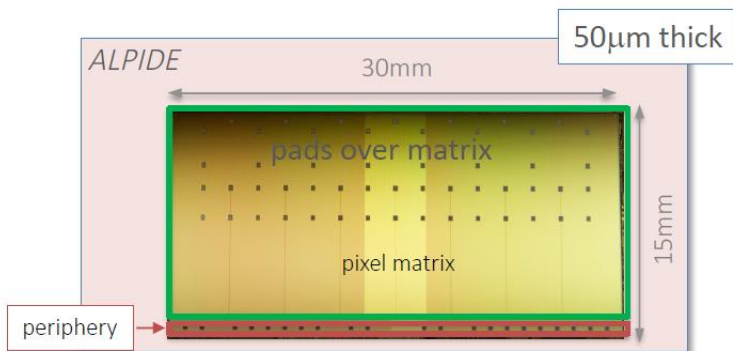


Пиксельный детектор эксперимента ALICE (ALPIDE)

56

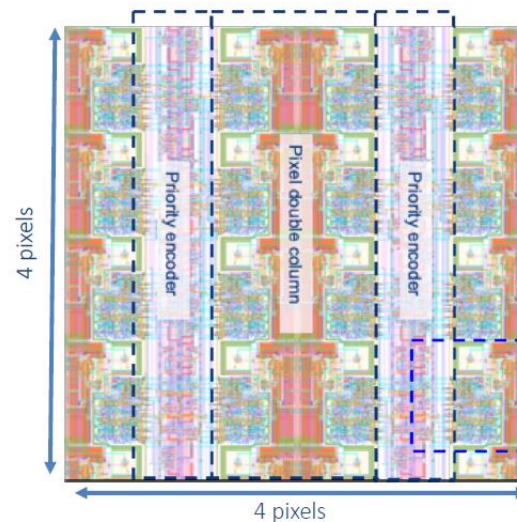


130,000 pixels / cm^2 $27 \times 29 \times 25 \mu\text{m}^3$
 charge collection time $< 30\text{ns}$ ($V_{bb} = -3\text{V}$)
 Max particle rate: $100 \text{ MHz}/\text{cm}^2$
 fake-hit rate: $< 1 \text{ Hz}/\text{cm}^2$
 power : $\approx 300 \text{ nW}/\text{pixel}$ ($< 40\text{mW}/\text{cm}^2$)

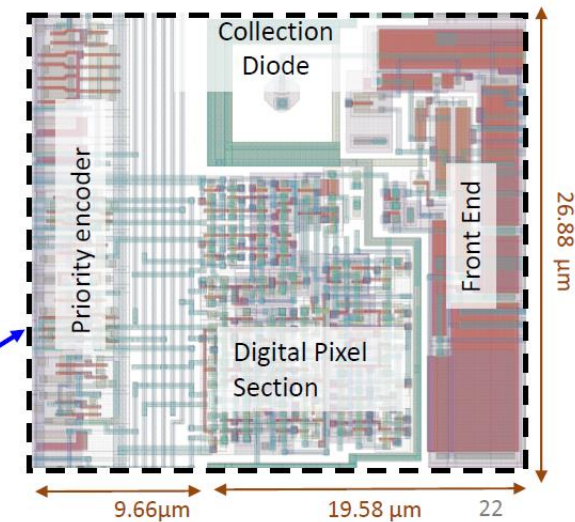


L. Musa (CERN) – VCI, Vienna, Feb 2019

Matrix Layout



Pixel Layout



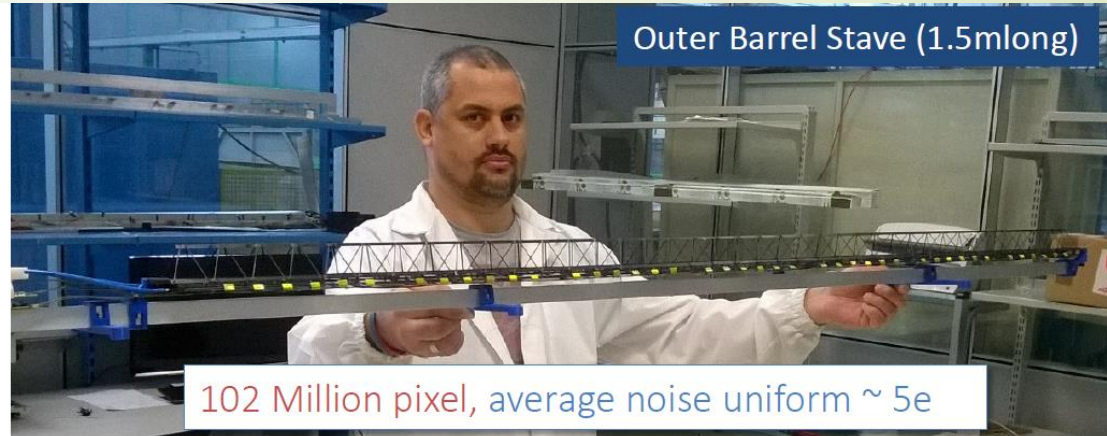
Пиксельный детектор эксперимента ALICE (ALPIDE)

57

Layers – 0, 1 and 2

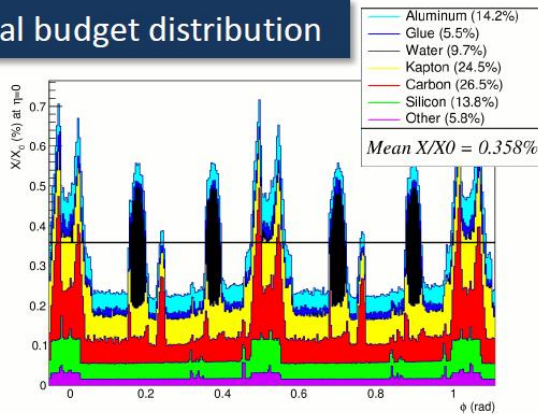


Outer Barrel Stave (1.5m long)



102 Million pixel, average noise uniform $\sim 5e$

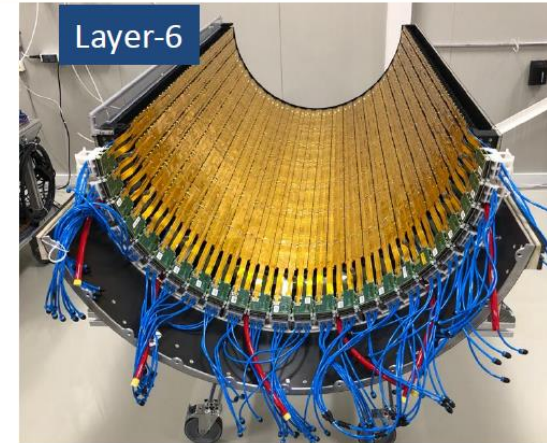
Material budget distribution



Layer-4



Layer-6

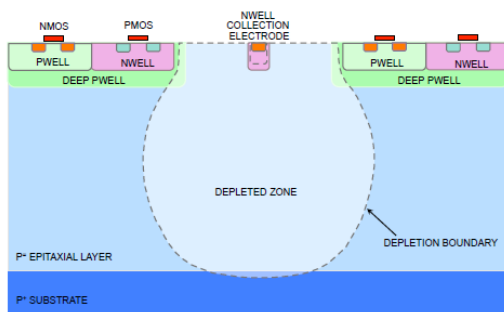


Полностью обедненные монокристалльные активные пиксели с электродом малого размера – модификация техпроцесса CIS TowerJazz

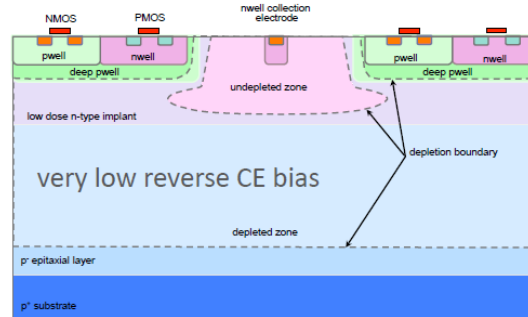
58

A process modification for CMOS Active Pixel Sensors (side activity of ALICE R&D)

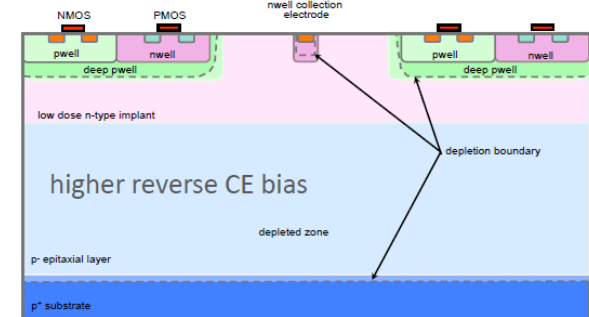
A possible solution to achieve full depletion of the sensitive layer combined with a low capacitance electrode is to implement a planar junction separate from the collection electrode



Standard Process (+DEEP PWELL)



Modified Process with low-dose n-type implant (+DEEP PWELL)



The process modification requires a single additional process mask with no changes on the sensor and circuit layout

For details on process modification and experimental results: W. Snoeys et al. NIM, A 871C (2017) pp. 90-96

The ALICE test vehicle chip (investigator) and prototype ALPIDE chips exist with both flavors

Проекты в разработке и в процессе обсуждения.

59

Детекторы для экспериментов с СИ на СКИФе:

SciCODE, DIMEX-Si, DIMEX-Si2D (Si микростриповые сенсоры + новые ASIC)

Гибридный пиксельный детектор (пиксельные сенсоры из Si и GaAs + пиксельный ASIC)

Внутренний трекер КМД-4 (Двусторонние Si микростриповые сенсоры + новый ASIC)

Детекторы для монитора фотонного пучка на ИКИ (Si и GaAs микростриповые сенсоры + новый ASIC)

Торцевые диски для КМД-4 (газовые микроструктурные детекторы большого размера + новый ASIC)

Компактная время-проекционная камера для СНД (торцевые детекторы на основе газовой микроструктурной технологии + новый пиксельный ASIC)