

Микропиксельные лавинные фотодиоды

Г. С. Ахмедов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
Институт Радиационных Проблем НАНА, Баку, Азербайджан

ahmadovgadir@gmail.com

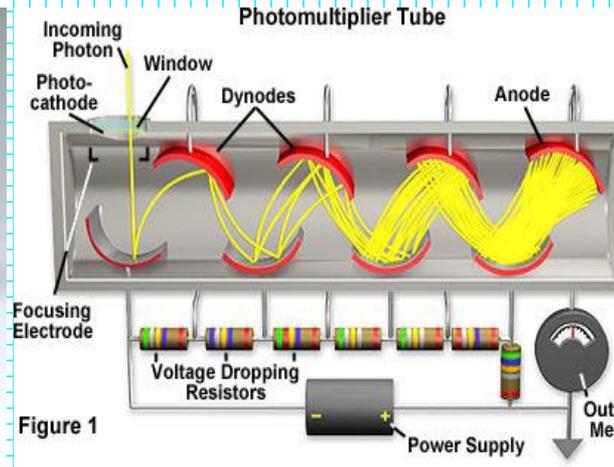
Содержание

- Фотоприемники
- Лавинные фотодиоды (ЛФД)
- Гейгеровский режим микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД)
- Сцинтилляционные детекторы на основе МЛФД
- Новые микропиксельные лавинные фототранзисторы

Фотоприемники

Вакуумные фотоэлектронные умножители (ФЭУ)

Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) - распространенные фотоприемники, применяются в науке и технике. Используются для регистрации слабых световых сигналов на уровне счета единичных фотонов.



Преимущества:

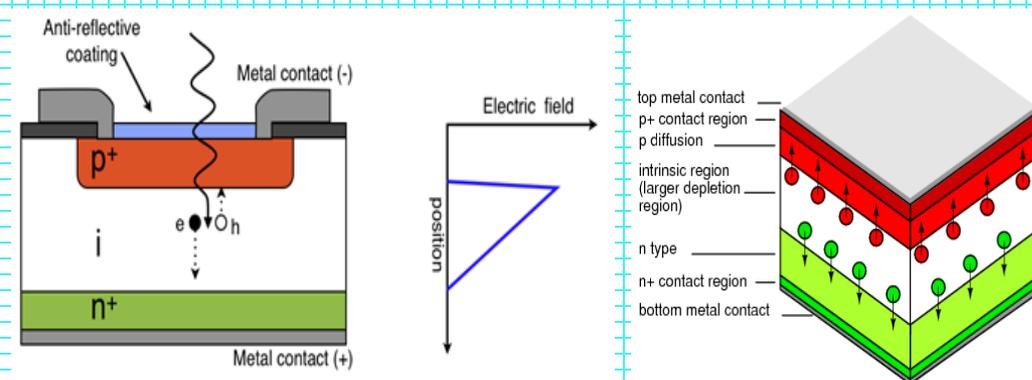
- Высокий коэффициент усиления (10^7 - 10^8)
- Низкие шумы
- Большие площади (до нескольких дм^2)

Недостатки:

- Некомпактность
- Чувствительность к магнитным полям
- Высокое напряжение питания
- Эффективность регистрации фотонов (до 25%)
- Относительно высокая стоимость

PiN диоды

Не имеют внутреннего усиления. PiN диоды также применяются в различных экспериментах. Такие диоды имеют очень простую структуру, так как между областями электронной (n) и дырочной (p) проводимости находится собственно i-область (полупроводник).



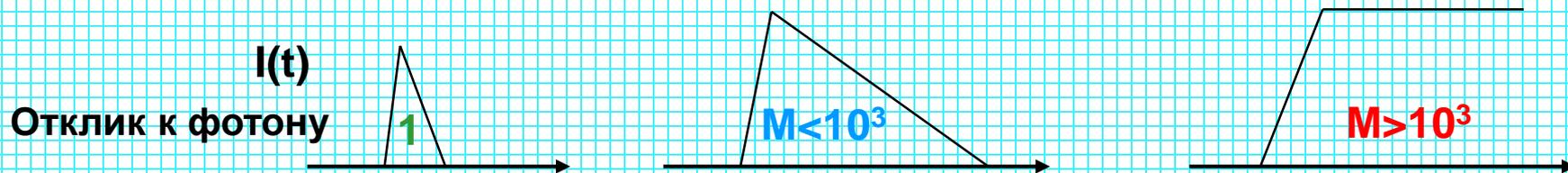
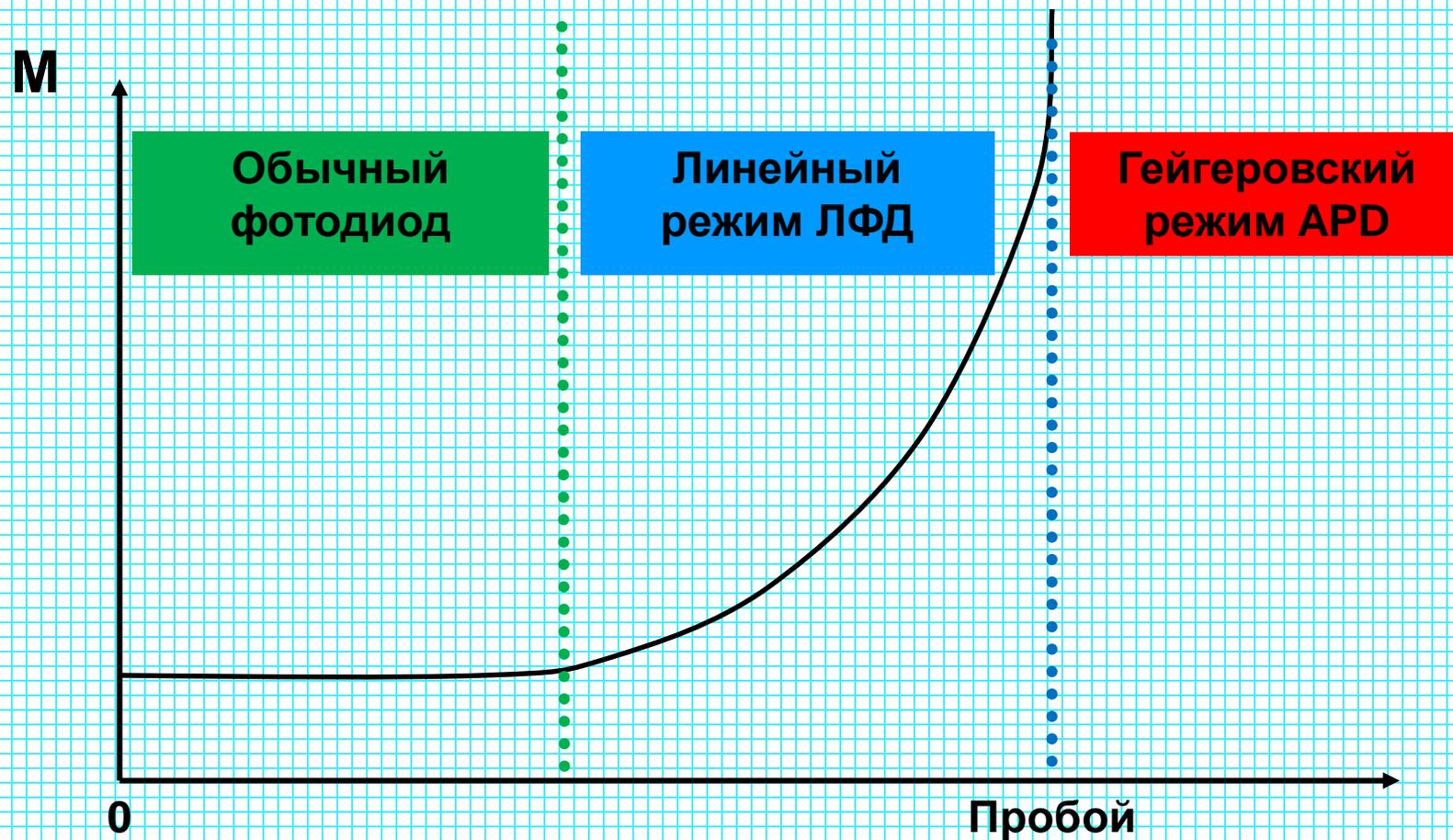
Преимущества:

- Хорошая линейность (динамическая область)
- Квантовая эффективность достигает 90%

Недостатки:

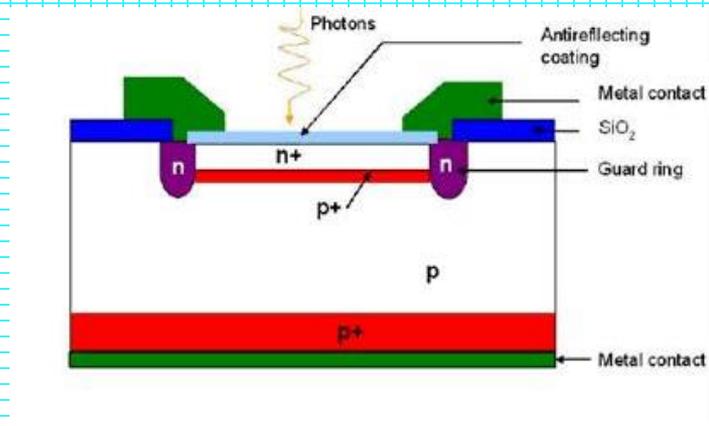
- Высокое рабочее напряжение
- Чувствительность к другим видам излучения (Nuclear counter effect)
- Требуется зарядо-чувствительные усилители

Лавинные фотодиоды (ЛФД)



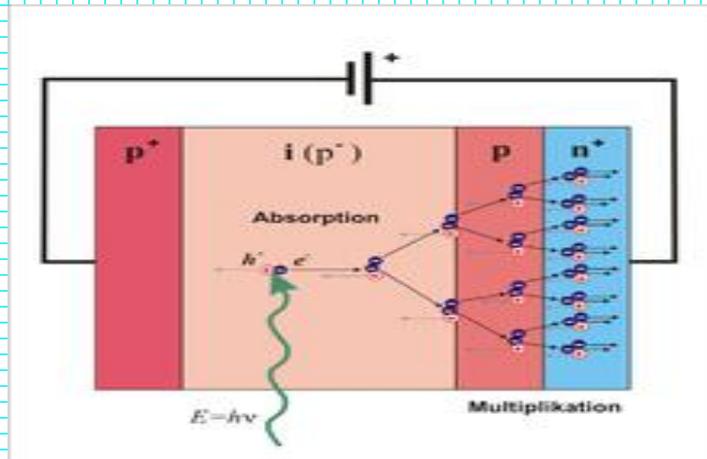
Линейные лавинные фотодиоды (ЛФД)

Лавинные фотодиоды - фотодиоды со встроенной областью высокого электрического поля. ($>10^5$ В/см) С увеличением напряжения смещения, электроны ускоряются. В результате процесса ударной ионизации создают вторичные электрон-дырочные пары



Преимущества:

- Внутреннее усиление ($<10^2-10^3$)
- Высокие быстродействие
- Высокая квантовая эффективность (до 90%)
- Широкий динамический диапазон



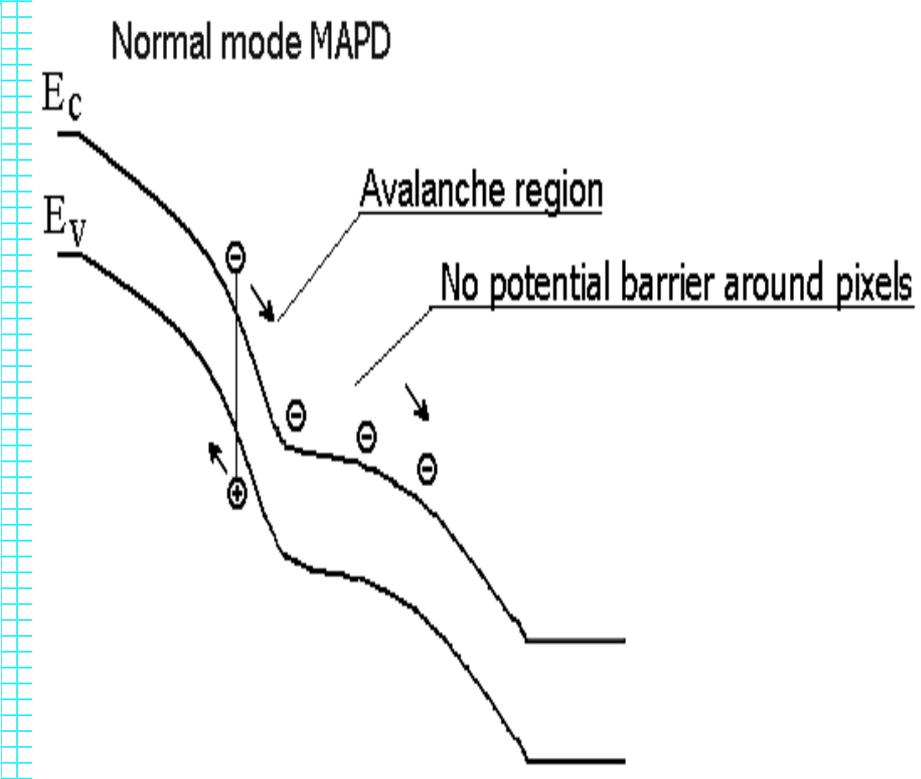
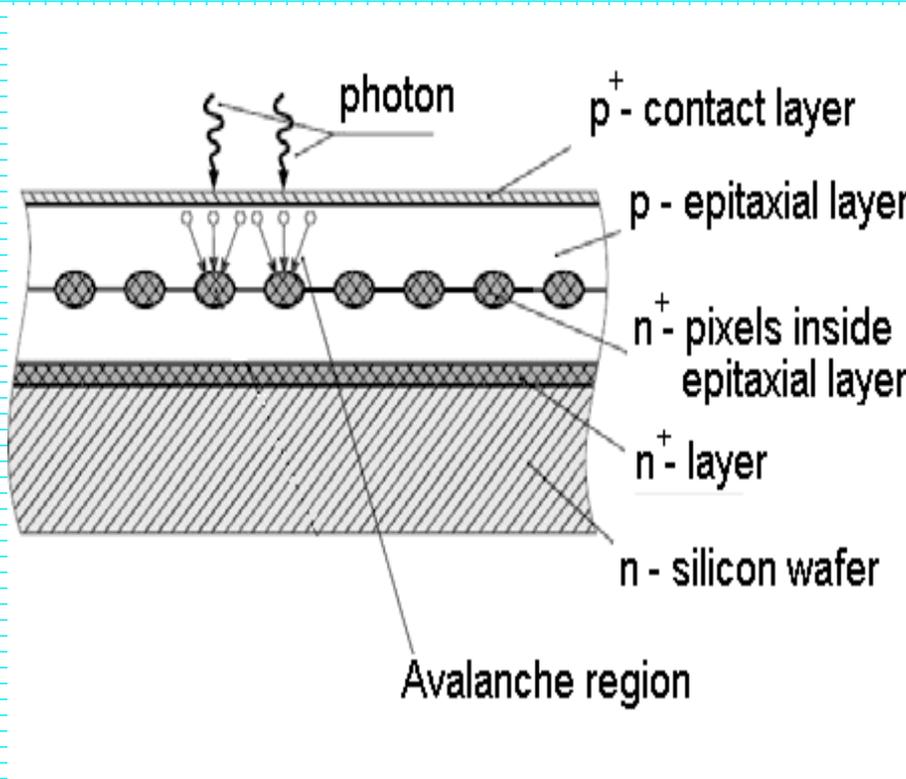
Недостатки:

- Низкое внутреннее усиление ($<10^3$)
- Не позволяет зарегистрировать менее 20 фотонов
- Шум-фактор >2
- Нестабильность и пространственная неоднородность при высоких усилениях

Линейные лавинные фотодиоды (Zecotek photonics)

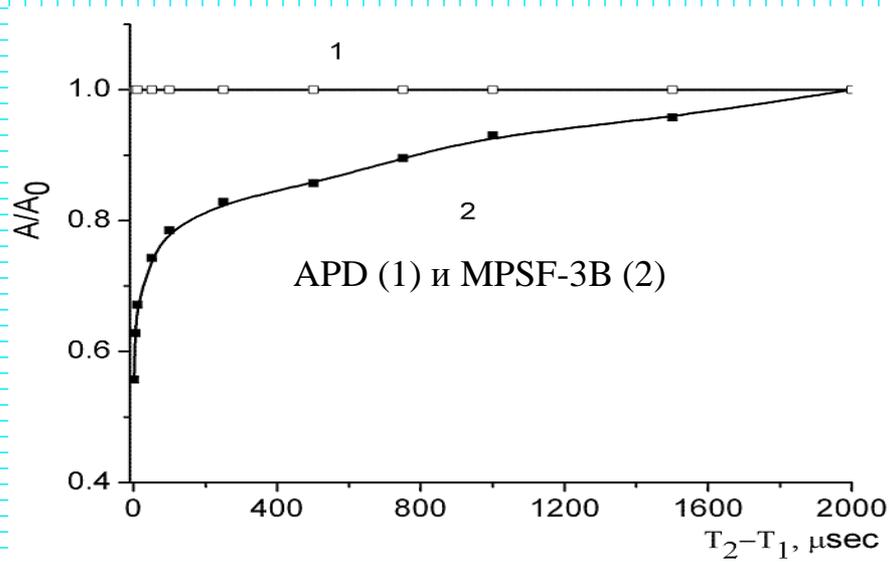
Эти пиксельные ЛФД были изготовлены совместно с фирмой Zecotek Photonics Inc. Образцы имели следующие геометрические параметры: фоточувствительная площадь — $3 \times 3 \text{ mm}^2$; толщины первого и второго эпитаксиального слоя р-типа проводимости — $3.5 \text{ }\mu\text{m}$; удельные сопротивления обоих эпитаксиальных слоев — $7 \Omega \cdot \text{cm}$ (или концентрация примесей — $1.85 \cdot 10^{15} \pm 5\% \text{ atom/cm}^3$); диаметр пикселей (т. е. n+-областей) вдоль поверхности — $2 \text{ }\mu\text{m}$; толщина пикселей (n+ -областей) — около $0.8 \text{ }\mu\text{m}$; интервал между пикселями вдоль поверхности — $3 \text{ }\mu\text{m}$; поверхностная плотность пикселей — $4 \cdot 10^4 \text{ пиксел/мм}^2$.

Конструкция и принцип работы ЛФД



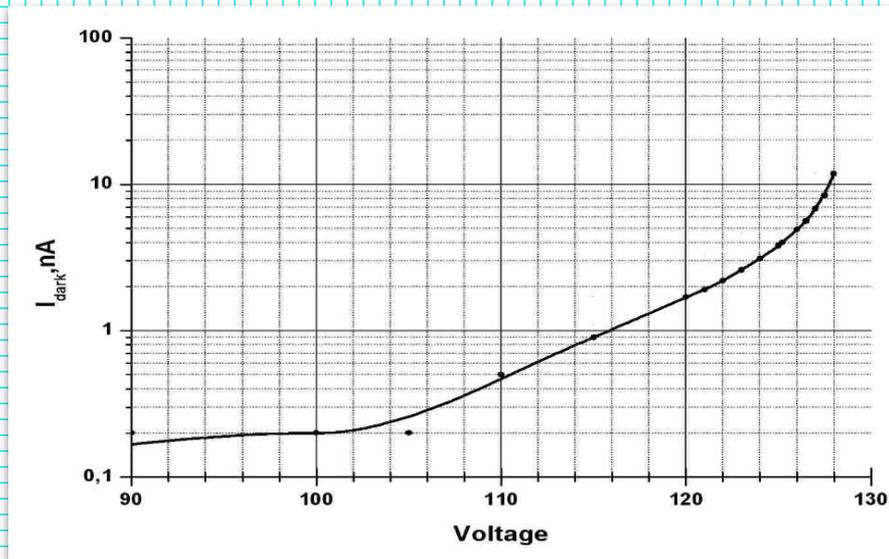
Параметры ЛФД

Время восстановления пикселей прибора < 50 нс

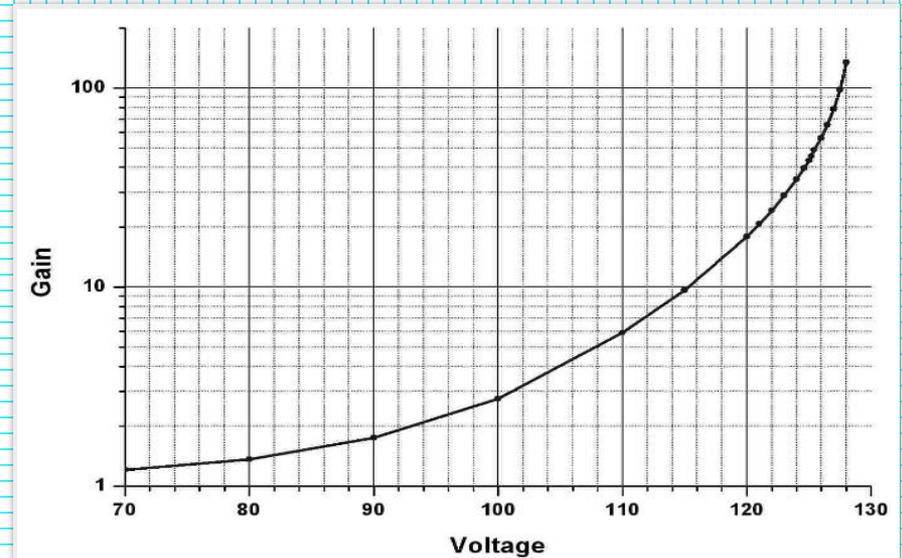


APD (1) и MPSF-3B (2)

темновой ток < 10 нА при 128 В



коэффициент усиления < 250

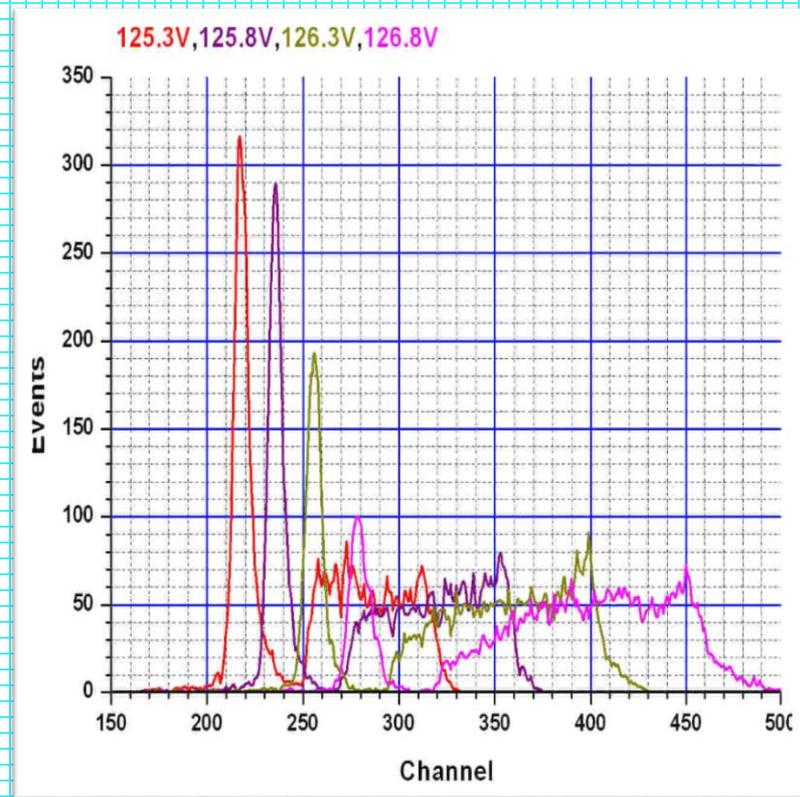
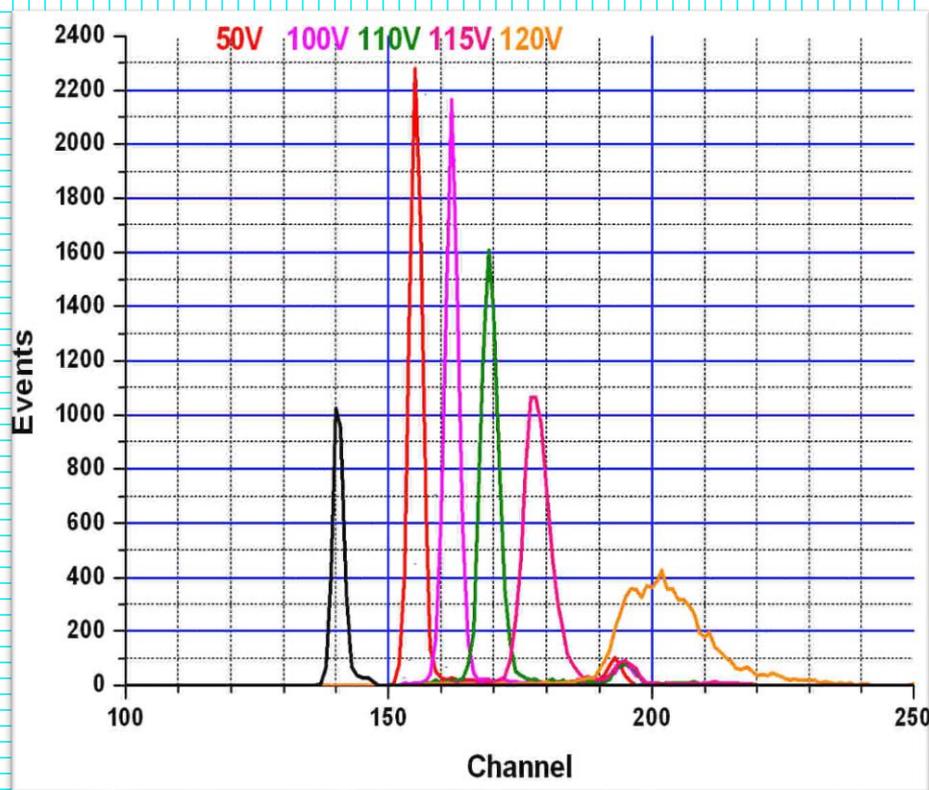
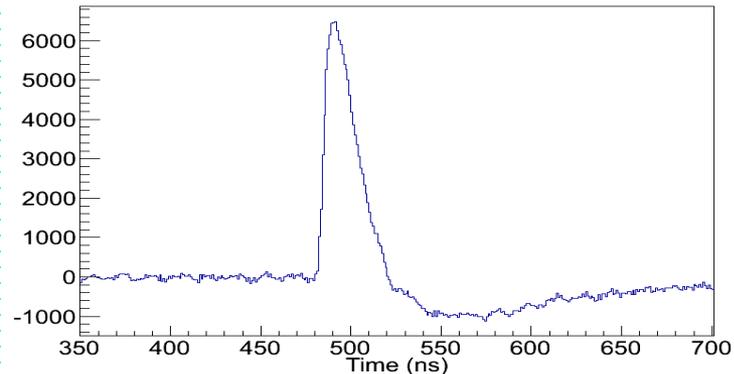


Спектры от альфа-источника Am^{241}

Эксперимент проведен на воздухе при комнатной температуре.

Нестабильность появляется при высоком коэффициенте усиления.

Здесь применялся усилитель с коэффициентом усиления около 30

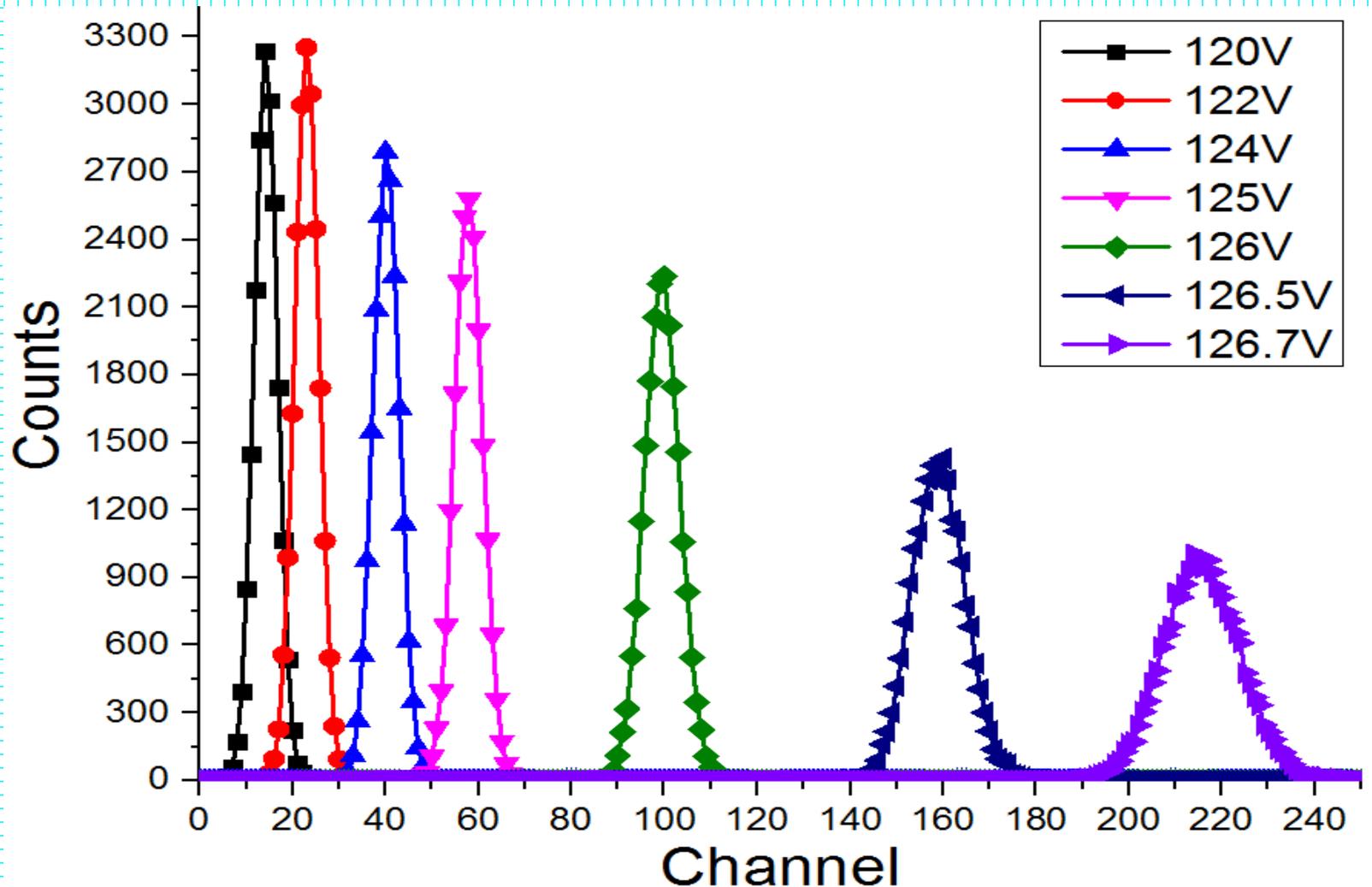


Спектры от источника красного света

Ширина импульса - 100 нс

Частота импульса - 1 кГц

Коэффициент усиления усилителя - 35

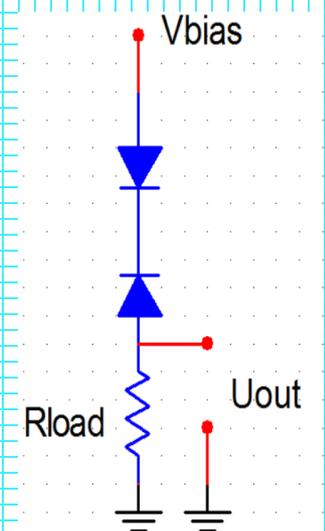
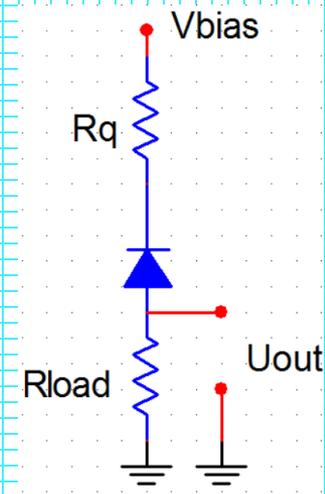


ЛФД, работающие при напряжениях выше напряжения пробоя, в режиме Гейгера (ГЛФД)

Технология Hamamatsu, SENS� не позволяет изготавливать МЛФД с высокой плотностью ячеек (>5000 ячеек/мм²) и с высоким PDE (>15%). Однако их технология позволяет получать очень быстрые времена восстановления ячейки (<6 нсек). Быстровосстанавливающиеся ячейки способны срабатывать несколько раз за время световой вспышки волокна Y11 (~10 нсек), что должно привести к эффективному увеличению динамического диапазона ЛФД.

Технология Zecotek позволяет изготавливать МЛФД с высокой плотностью ячеек (>15000 ячеек/мм²) и с высоким PDE (>25%). Однако МЛФД Zecotek имеют медленное время восстановления ячейки (95% восстанавливается за ~1 мсек). В этой технологии функцию гасящего индивидуального резистора выполняют искусственные потенциальные ямы

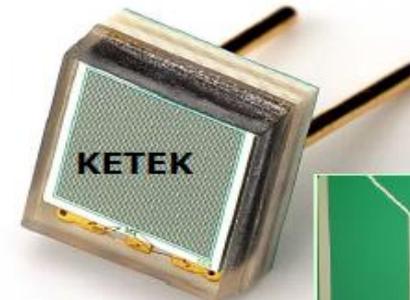
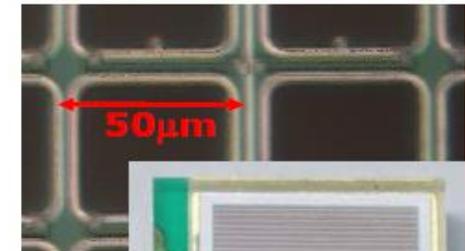
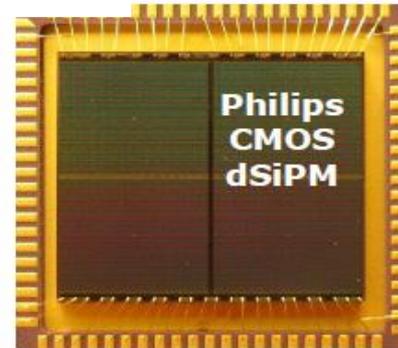
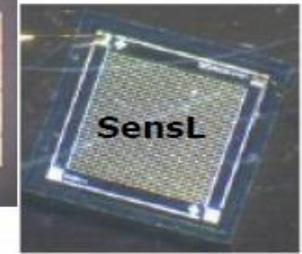
Эквивалентная схема одного пикселя МЛФД



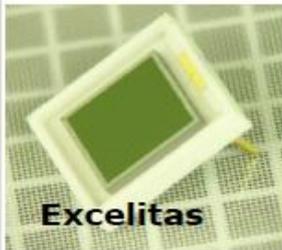
*Эквивалентная схема
одного пикселя МЛФД
с глубоководными пикселями*

Производители ГЛФД

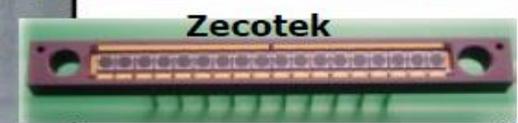
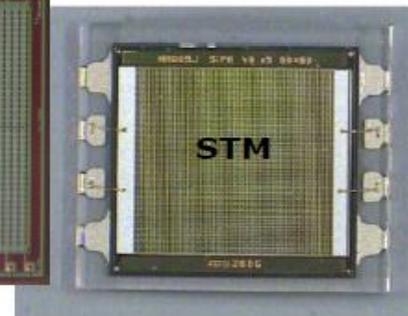
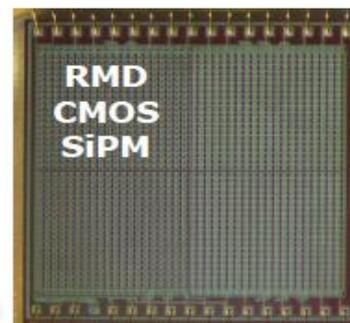
В настоящее время коммерческое производство кремниевых фотоумножителей осуществляются такими известными фирмами и институтами



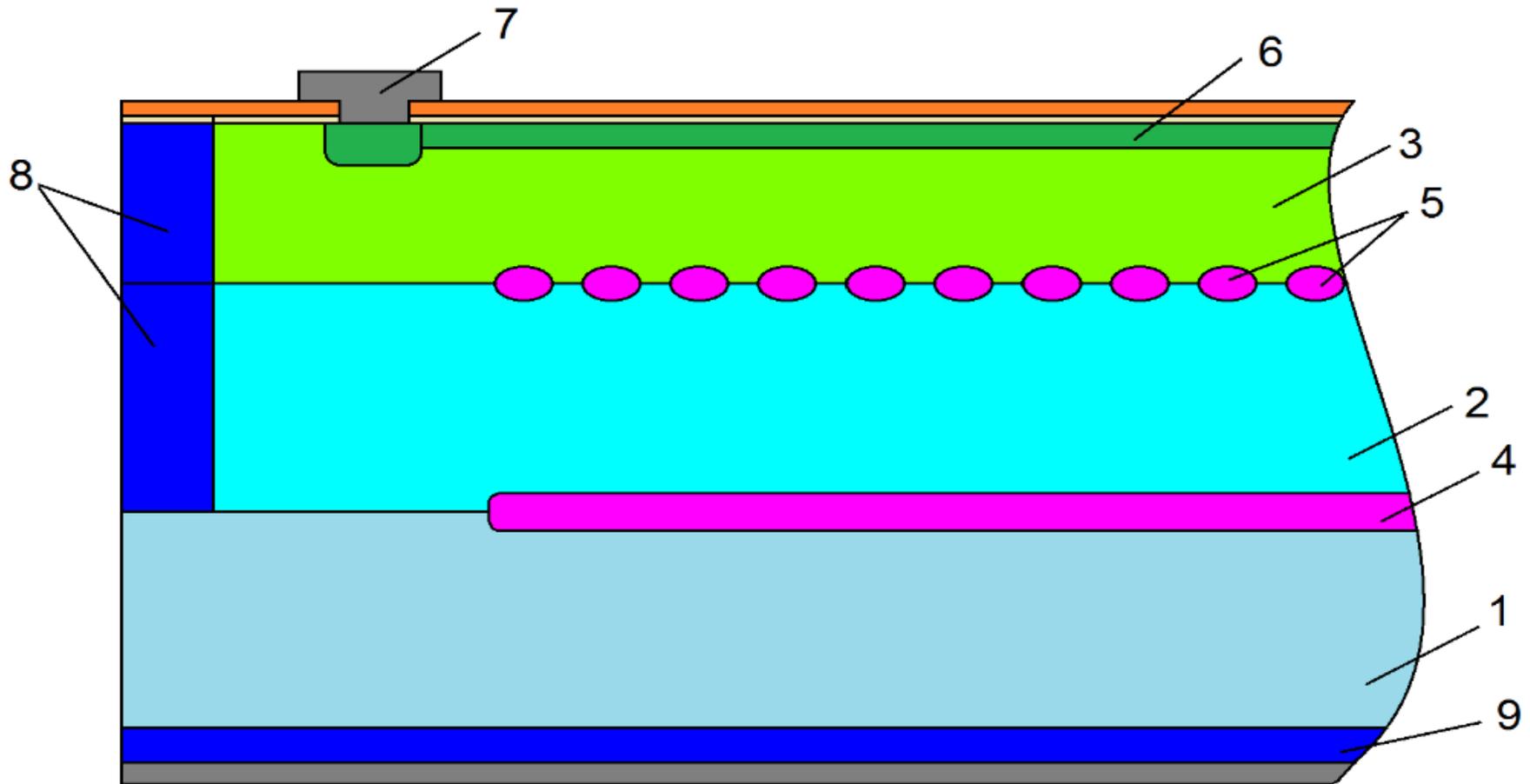
- **CPTA**, Moscow, Russia
- **MePhi/Pulsar Enterprise**, Moscow, Russia
- **Zecotek**, Vancouver, Canada
- **Hamamatsu HPK**, Hamamatsu, Japan
- **FBK-AdvanSiD**, Trento, Italy
- **ST Microelectronics**, Catania, Italy
- **Amplification Technologies** Orlando, USA
- **SensL**, Cork, Ireland
- **MPI-HLL**, Munich, Germany
- **RMD**, Boston, USA
- **Philips**, Aachen, Germany
- **Excelitas tech.** (formerly Perkin-Elmer)
- **KETEK**, Munich, Germany
- **National Nano Fab Center**, Korea
- **Novel Device Laboratory (NDL)**, Beijing, China
- **E2V**
- **CSEM**



Amplification Technologies (DAPD)



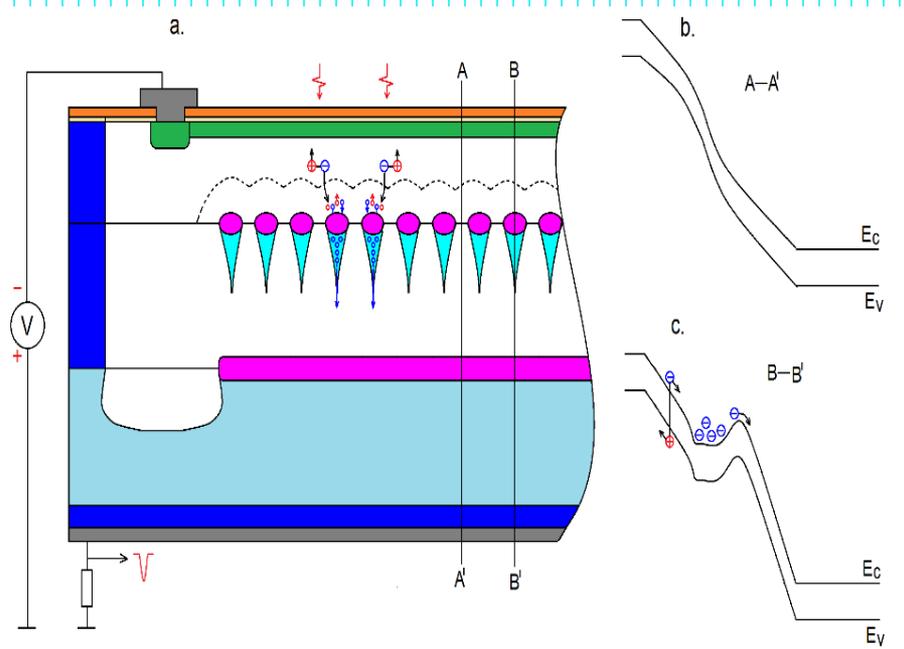
Конструкция МЛФД



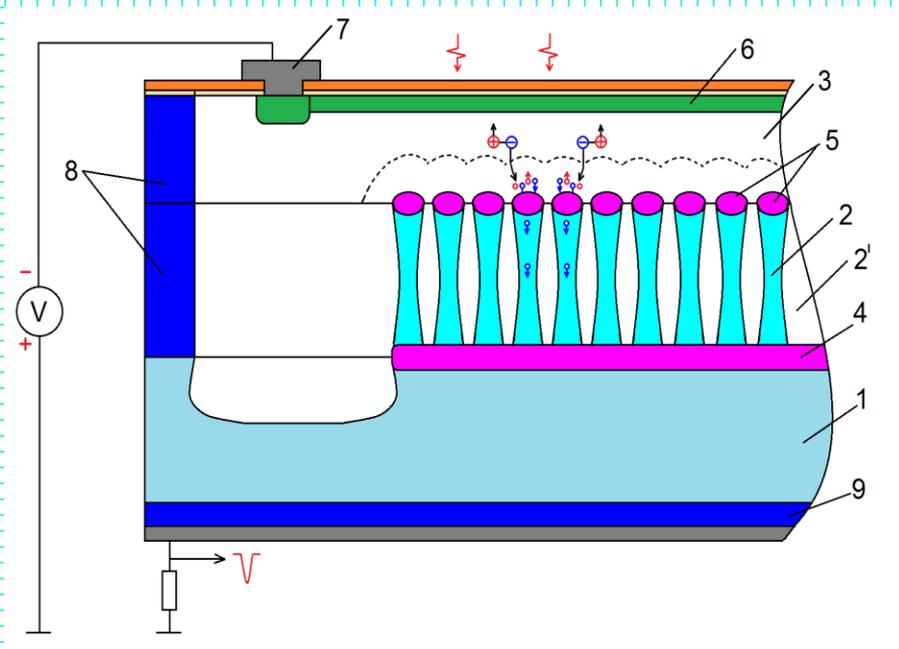
1 – Si подложка n-типа; 2 – эпитаксиальный слой n- типа; 3 – эпитаксиальный слой p-типа; 4 – тонкий слой n⁺- типа; 5 – матрица областей n⁺- типа (пиксели); 6 – слой p⁺ -типа; 7 – металлический контакт; 8 – охранный кольцо n⁺- типа; 9 –слой n⁺- типа проводимости.

Принцип работы МЛФД

**Конструкция
для высокая эффективность**

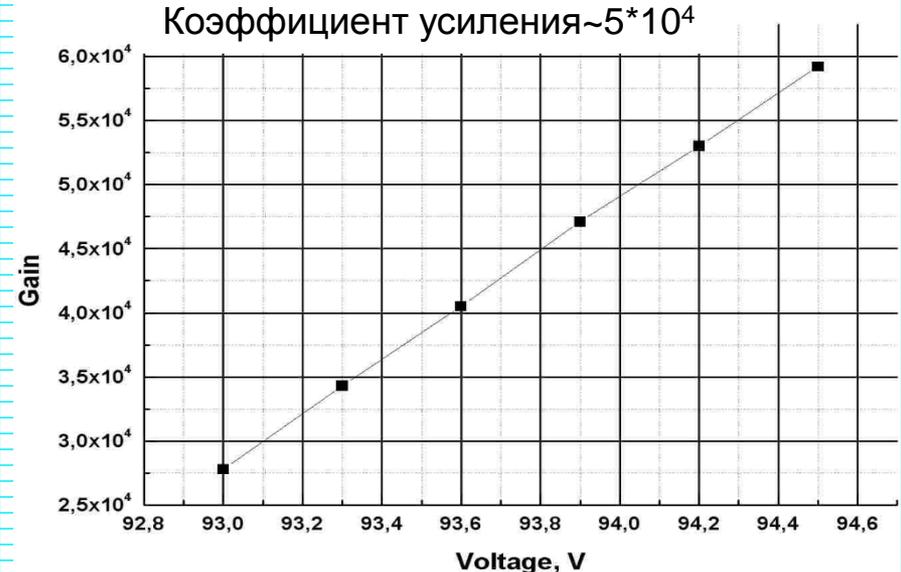
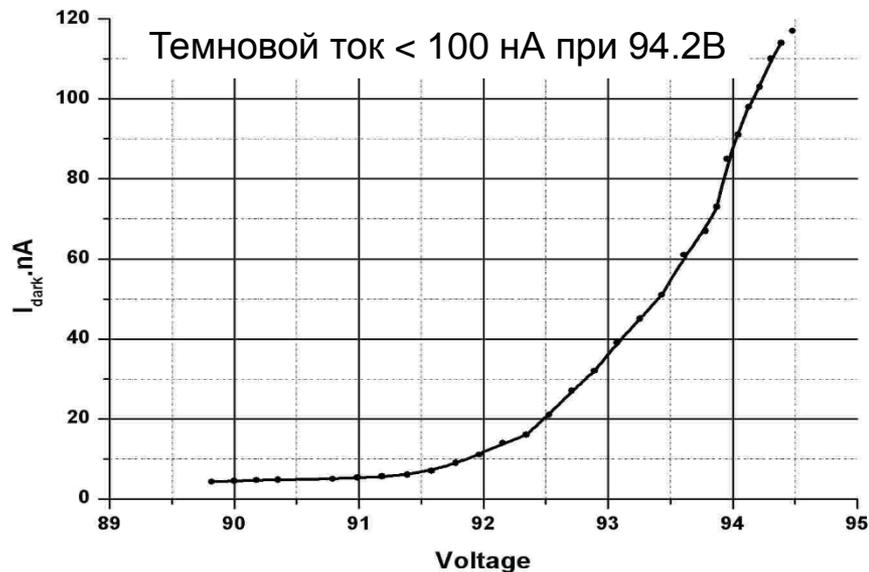
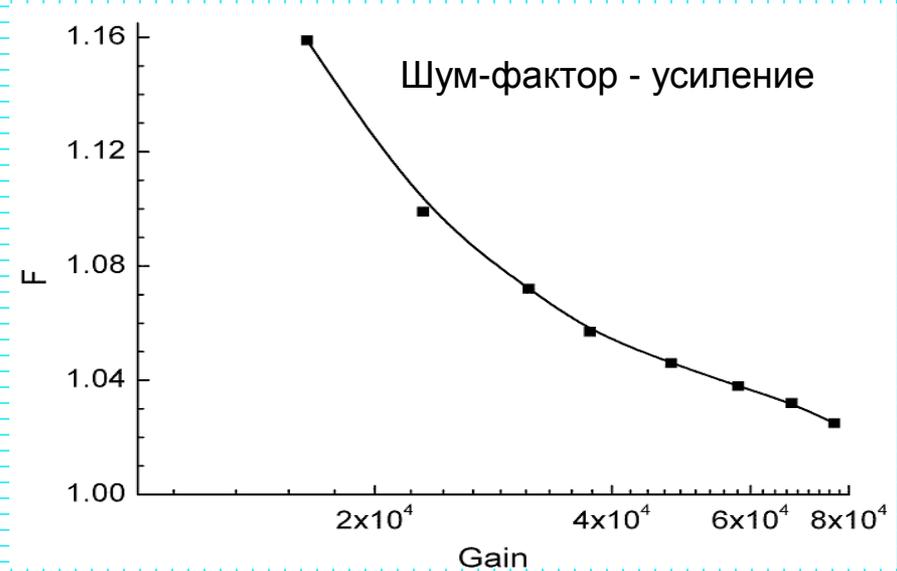
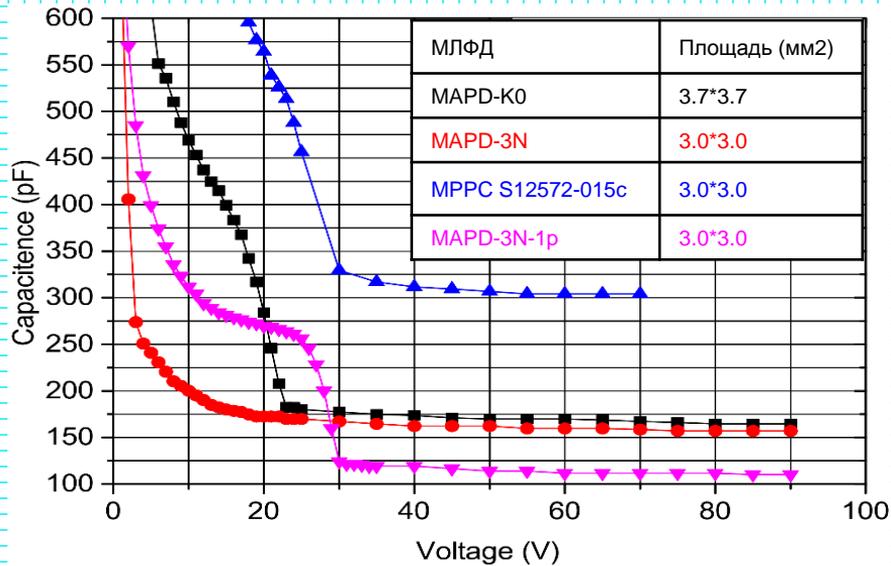


**Конструкция
для быстрее время восстановления**

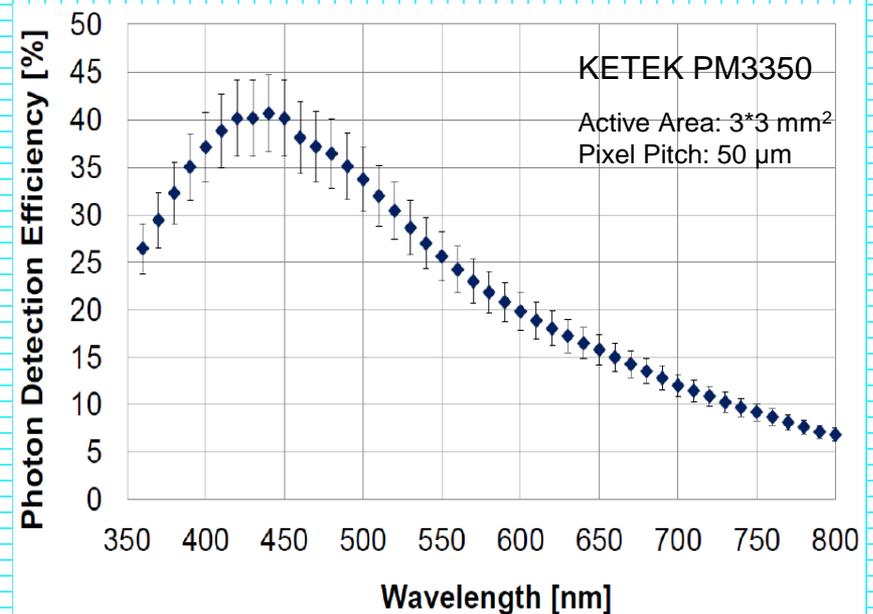
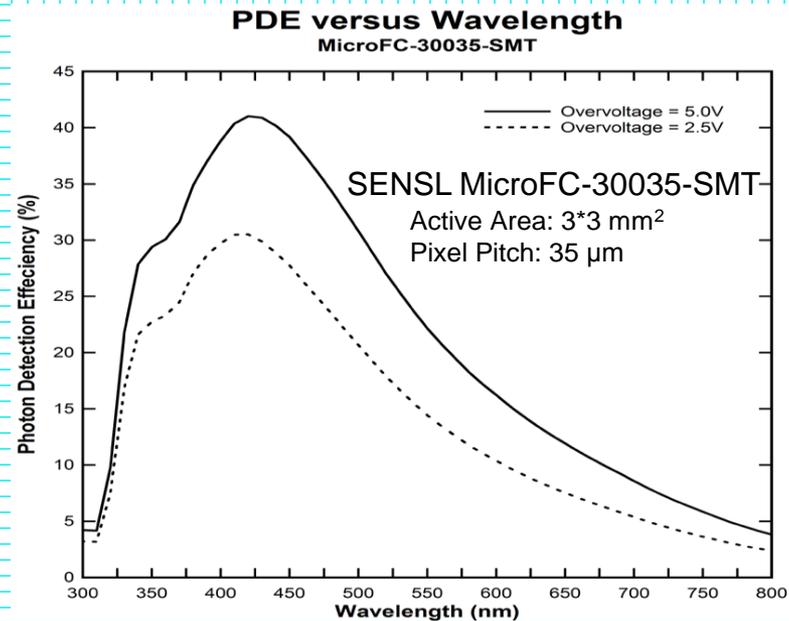
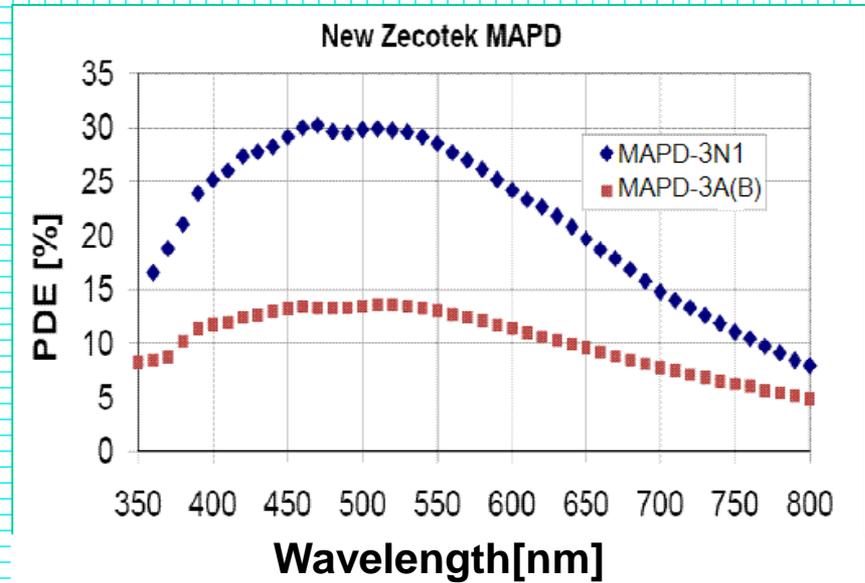
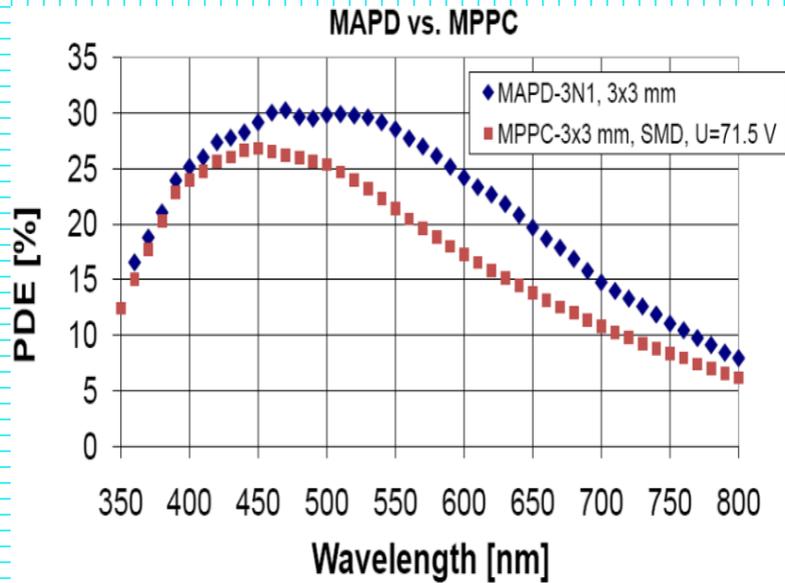


а – сечение конструкции МЛФД под потенциалом,
b – энергетическая диаграмма по сечению А–А',
с – энергетическая диаграмма по сечению В–В'.

Характеристики и параметры ГЛФД

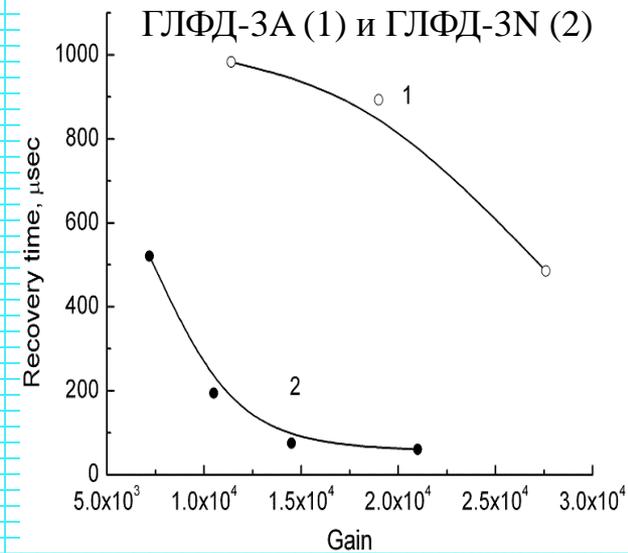
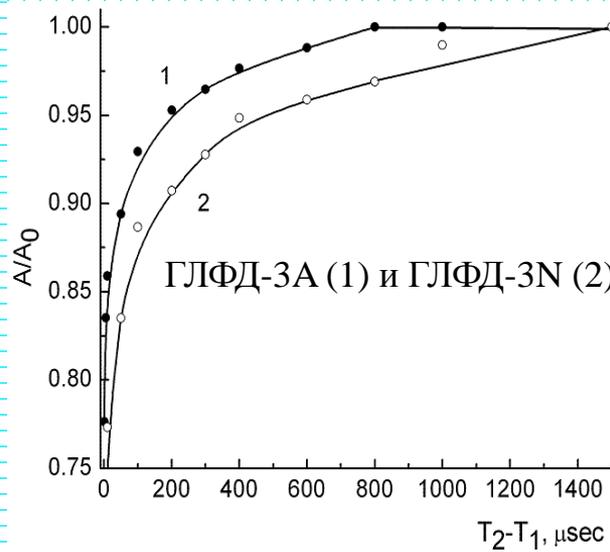
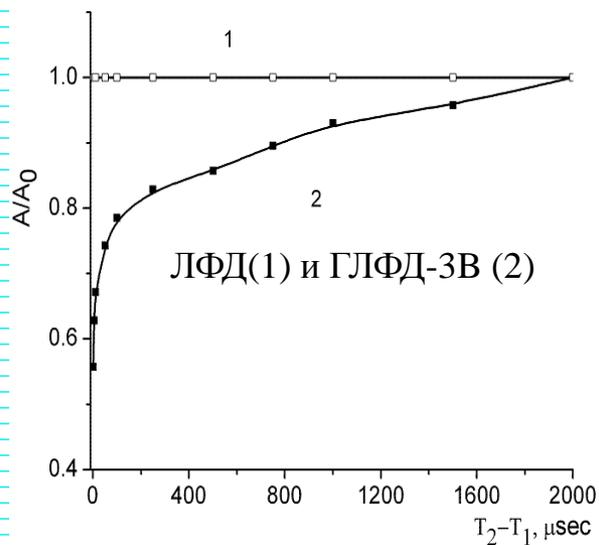
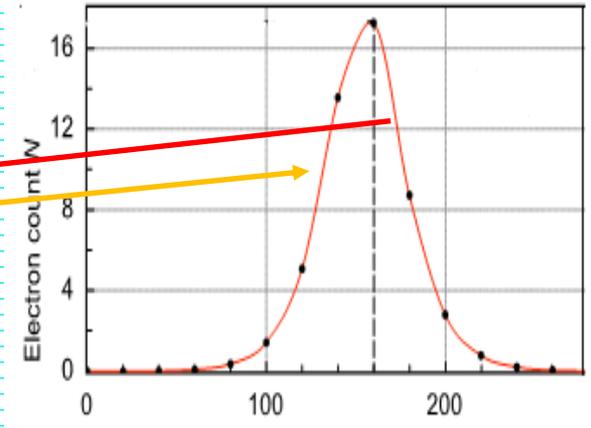
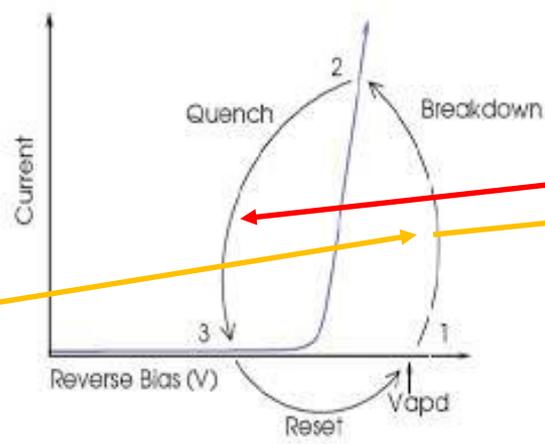
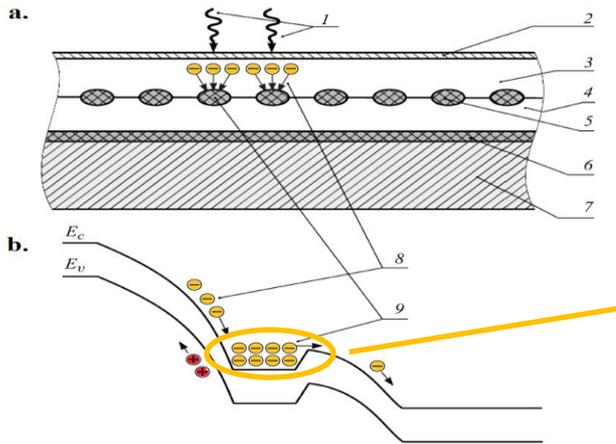


Спектральная чувствительность ГЛФД



Время восстановления ГЛФД

Время восстановления пикселей зависит от глубины потенциальной ямы (ёмкость). В зависимости от плотности донорских примесей в пикселях (n+-области) можно менять время восстановления. Потенциальная яма выполняет функцию гасящего индивидуального резистора в МЛФД.



Линейность и динамический диапазон ГЛФД

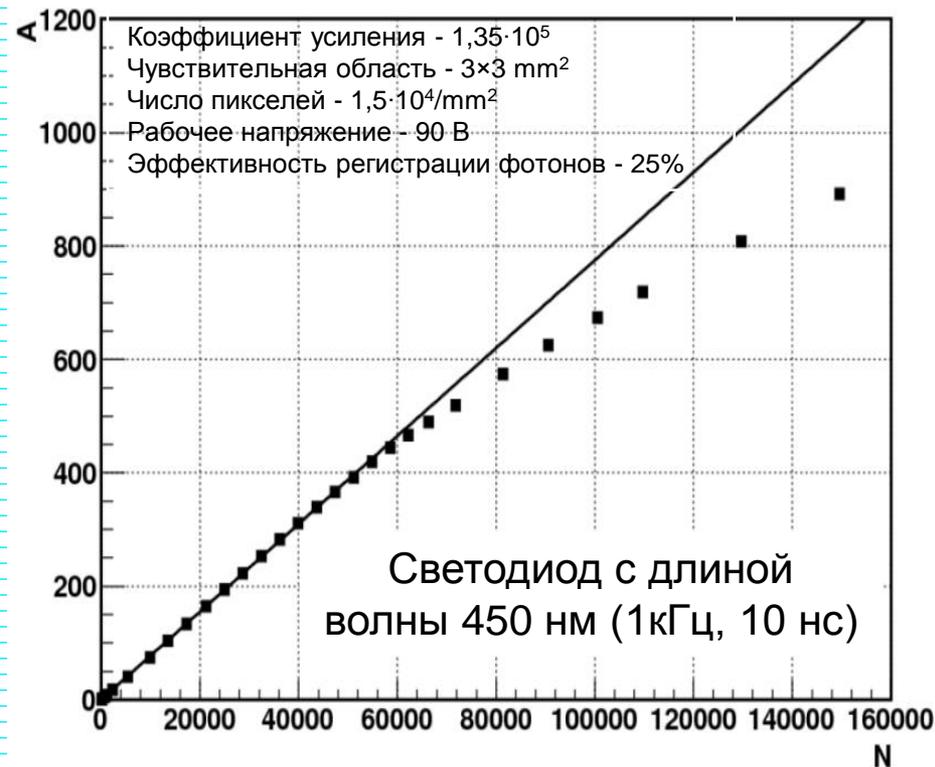
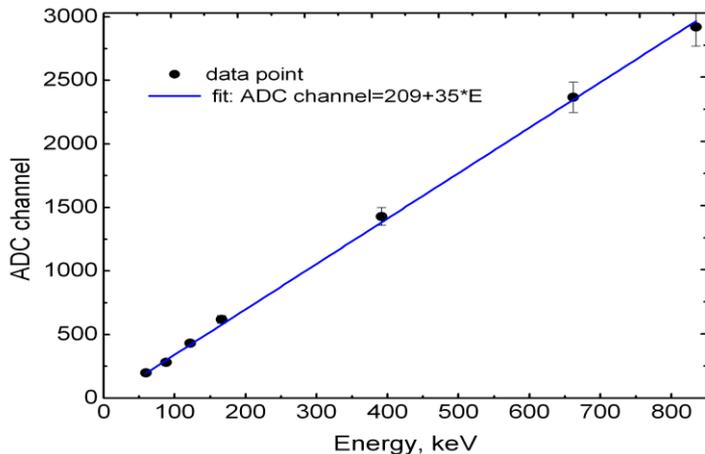
Технология Zecotek позволяет изготавливать МЛФД с высокой плотностью ячеек (>15000 ячеек/мм²). Это очень важно, так как позволяет охватить широкий диапазон энергий фотонов (даже больше, чем 30 ГэВ), предполагая, что фотон 1ГэВ производит до двух тысяч фотоэлектронов

МАРД	3А	3В	3N	3N1P	К0
Плотность-рпх/мм ²	15000	40000	15000	15000	40000
Размер,мм ²	3x3	3x3	3x3	3x3	3.7x3.7
ЭРФ, % (450-550)	~13	~13	~30	~30	~40
Усиление-10 ⁴	2	1	5	5	5
Рабочее напряжение	~66	~70	~90	~90	~90

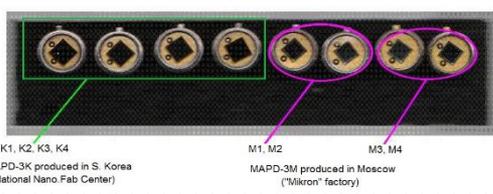
Число пикселей обеспечивает линейность ГЛФД

$$N_f = N \left(1 - e^{-\frac{N_\gamma \cdot PDE}{N}} \right)$$

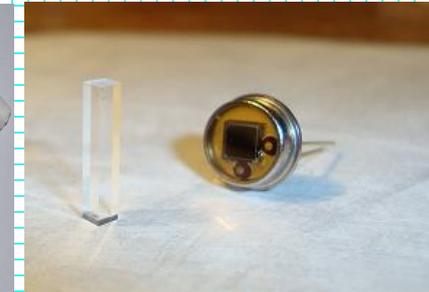
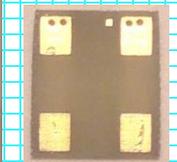
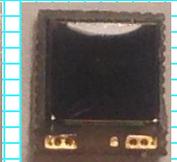
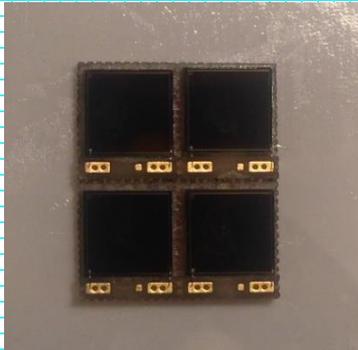
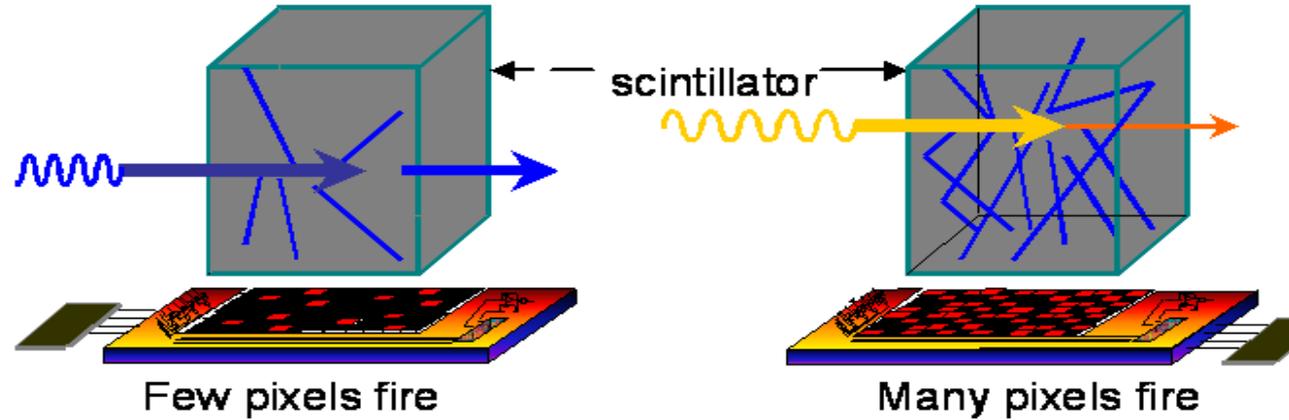
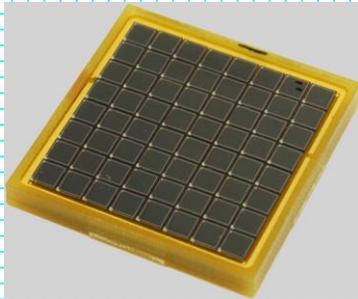
Для большой динамический диапазон нужно большой плотностью пикселей или быстрее время восстановления.



Сцинтилляционные детекторы на основе ГЛФД

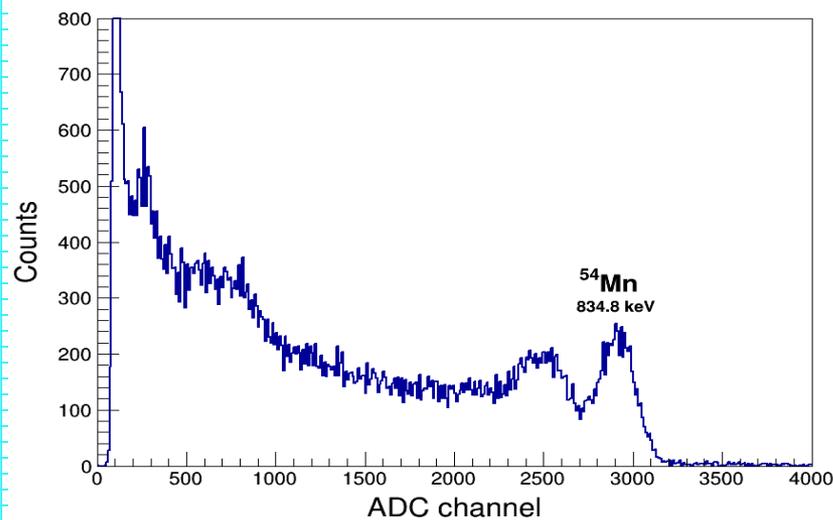
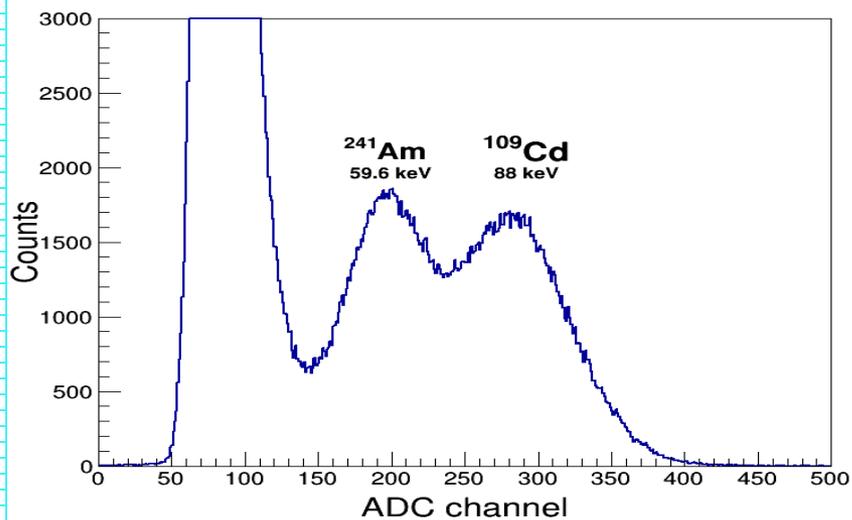
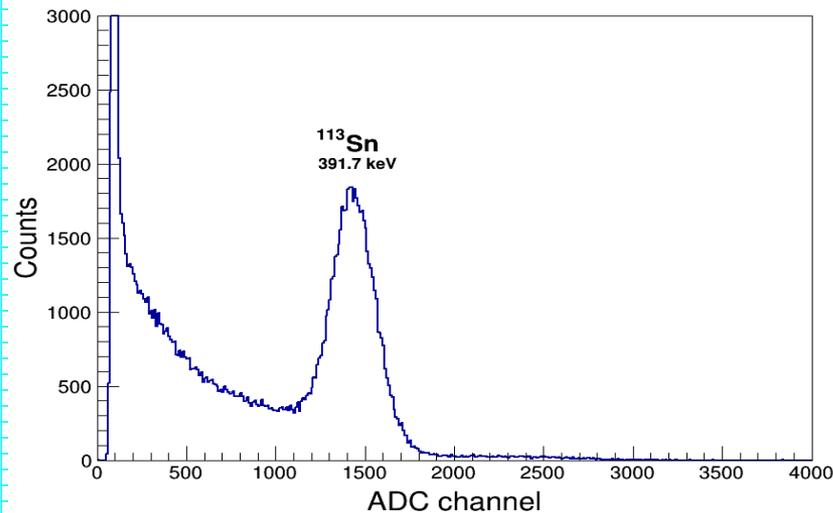
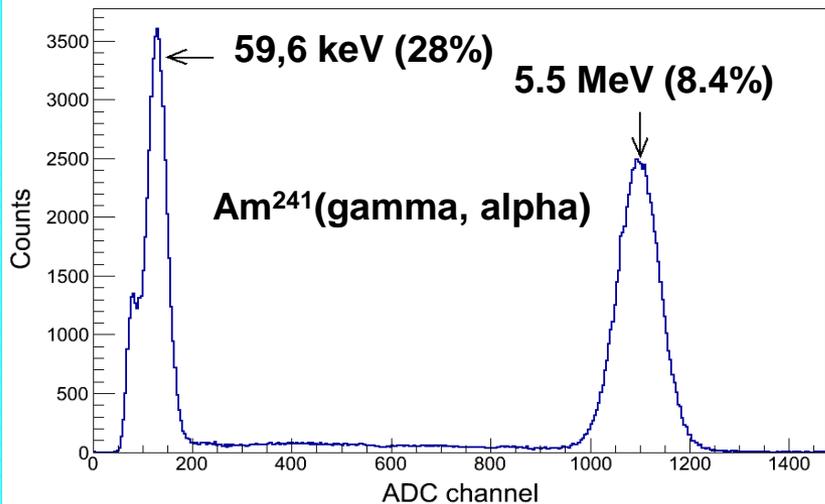


Material	NaI(Tl)	LFS-3	LFS-8
Density(g/cm ³)	3.67	3.35	3.4
Light output (%)	100	85	82
Decay time, (ns)	235	30	19
Peak emis, (nm)	410	425	422



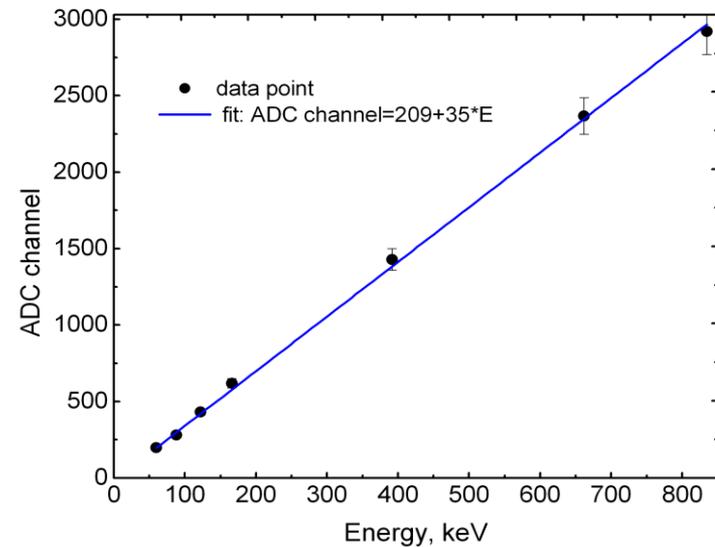
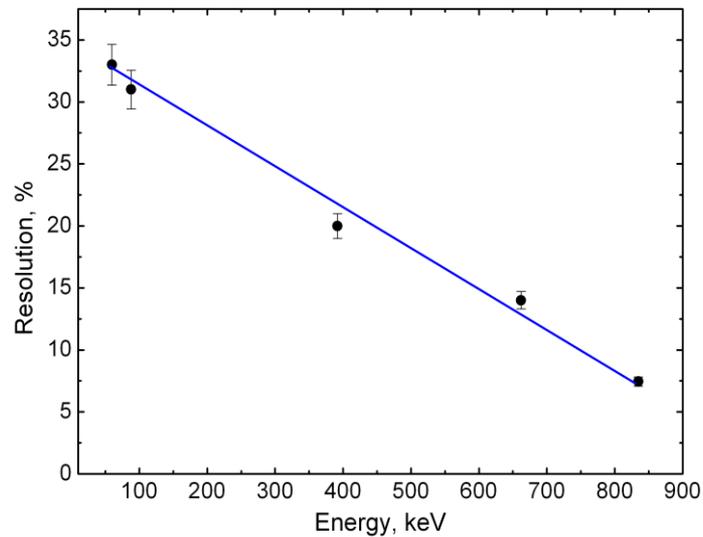
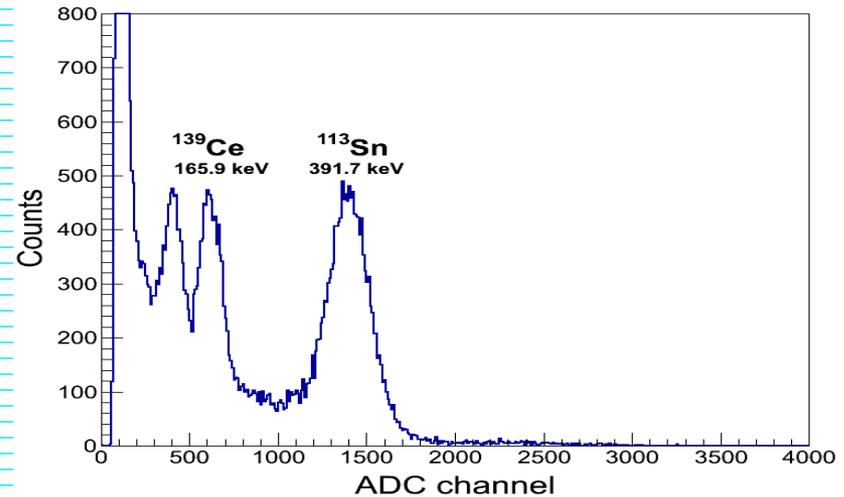
Сцинтилляционные детекторы на основе ГЛФД

Спектры разных типов радиоактивности с использованием LFS-8 сцинтиллятора (3*3*0.5 мм). ГЛФД дает хорошую линейность до 1 МэВ (гамма).

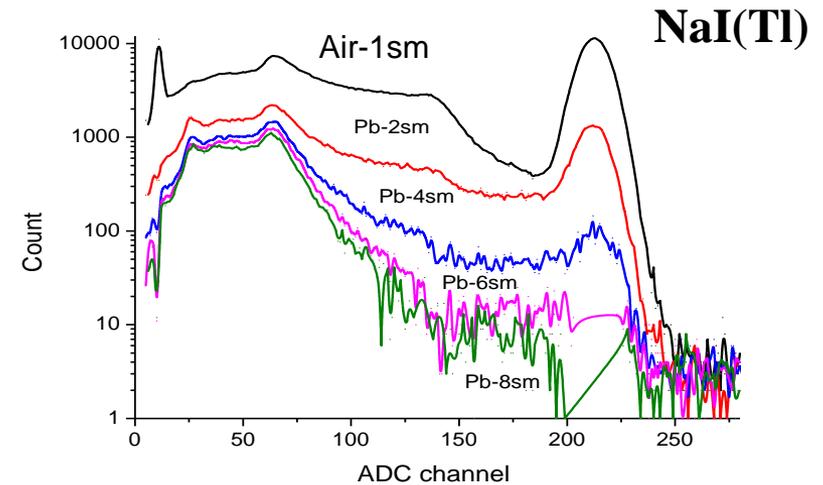
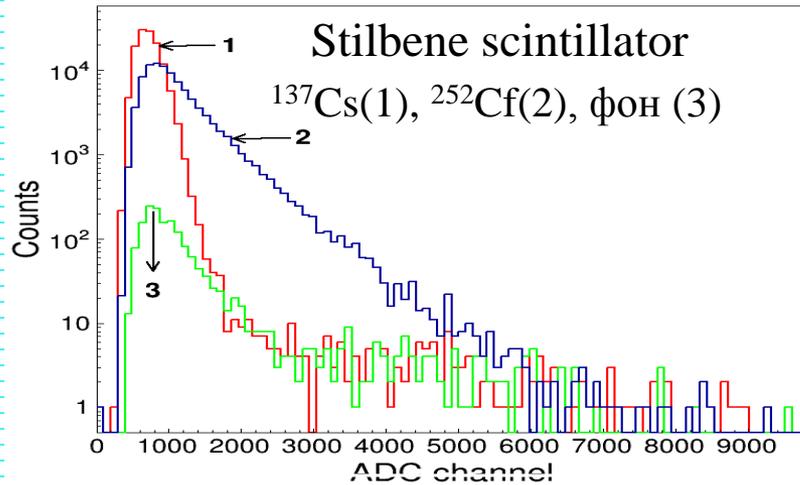


Сцинтилляционные детекторы на основе ГЛФД и LFS-8 сцинтиллятор

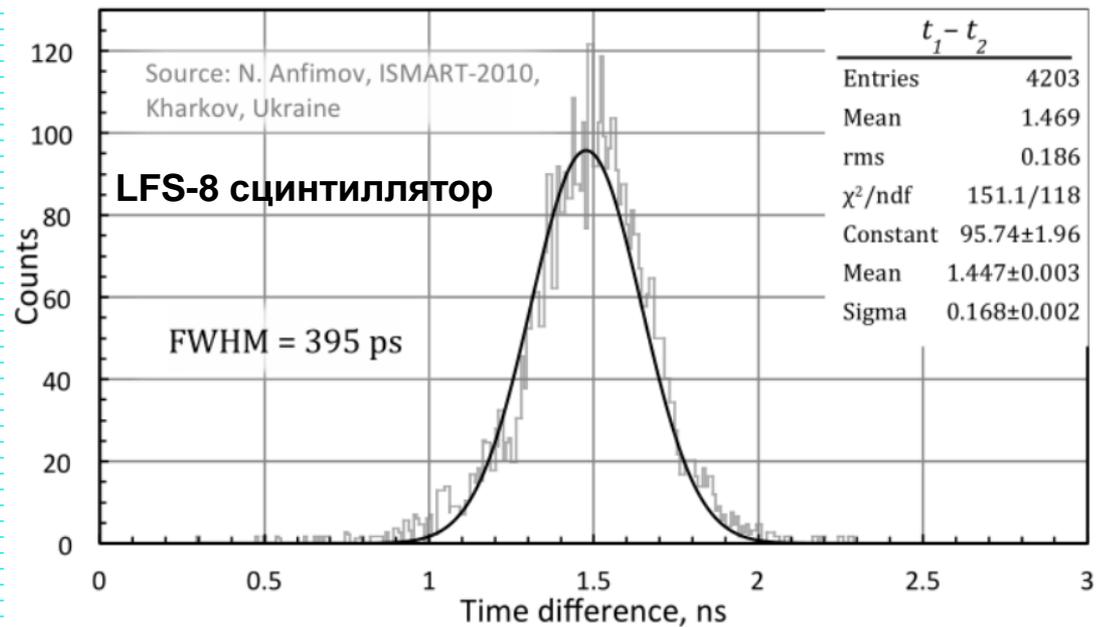
ГЛФД дает хорошую линейность до 1 МэВ (гамма)



Сцинтилляционные детекторы на основе ГЛФД

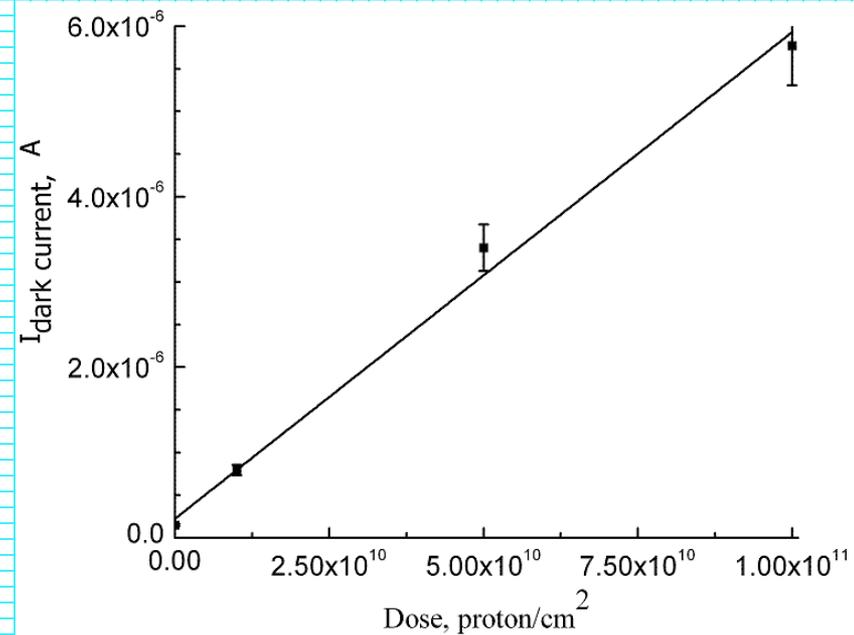
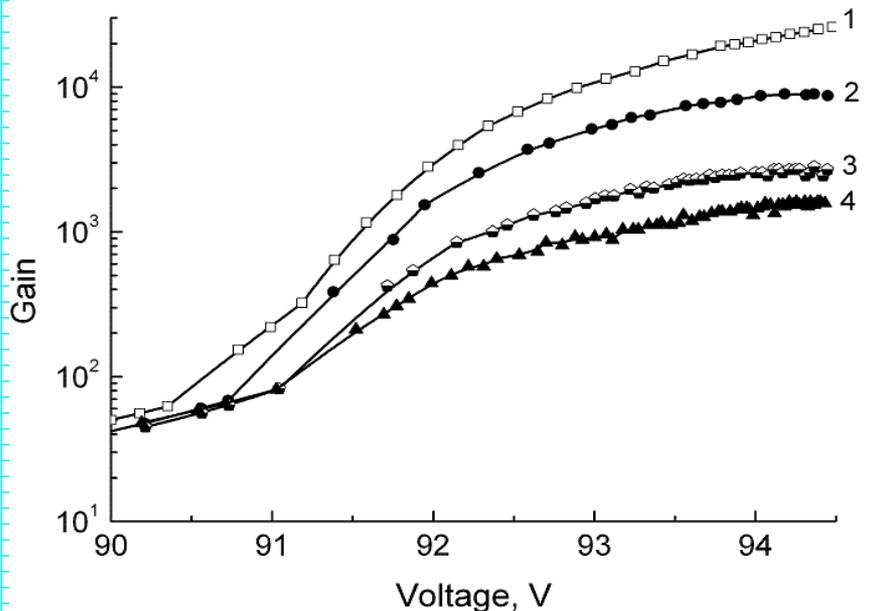
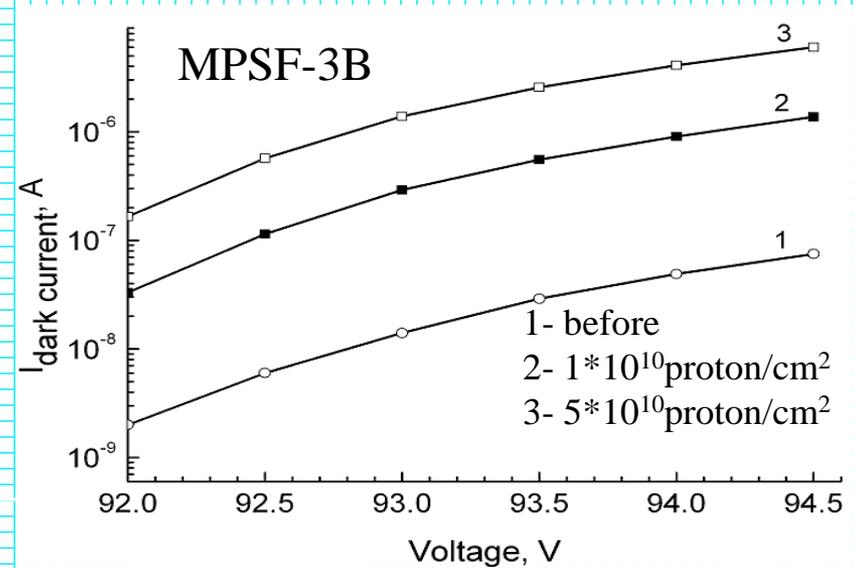
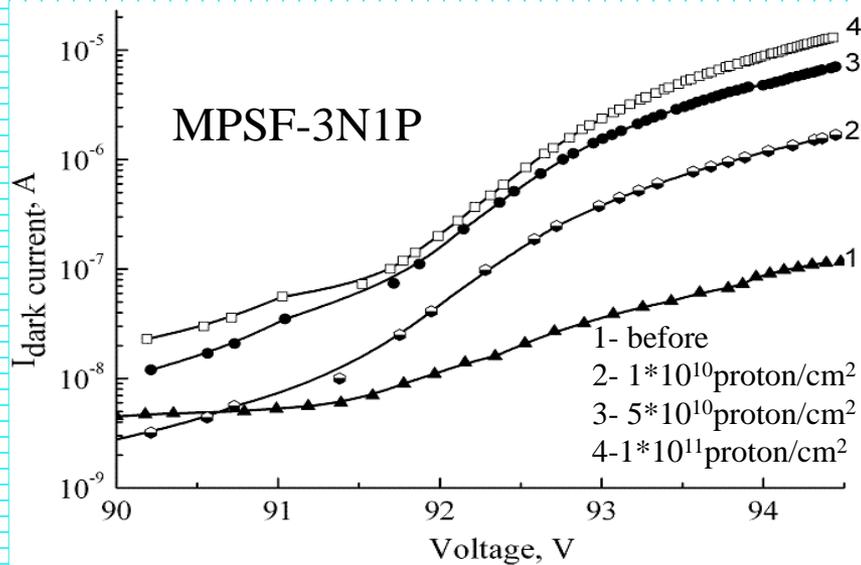


Временная характеристика ГЛФД
для PET томографии



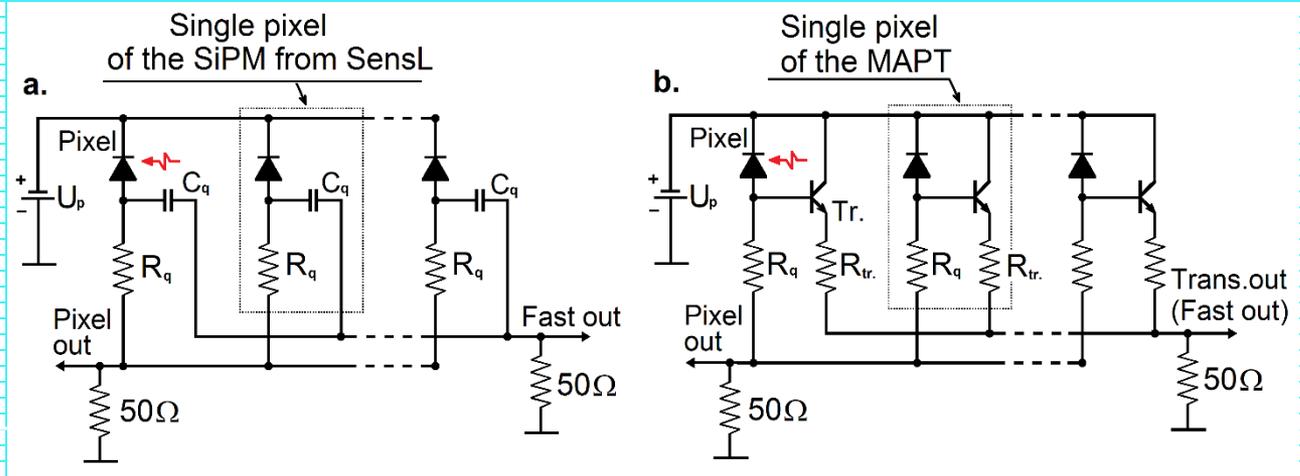
Радиационной стойкости ГЛФД

Диоды облучались с 150МэВ протонами на ускоритель Фазатрон (ЛЯП, ОИЯИ)



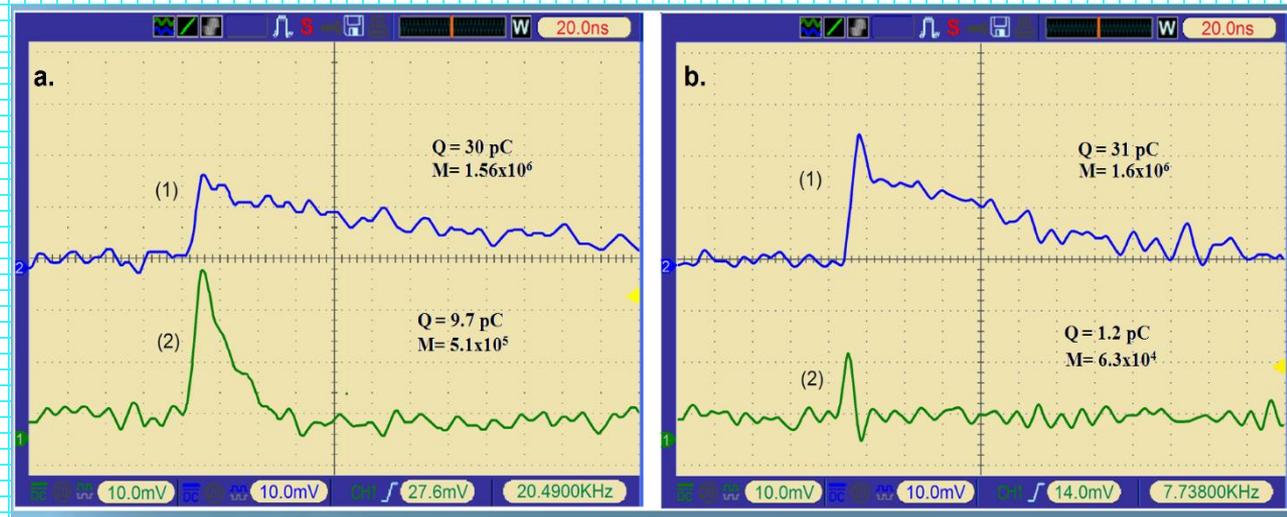
Новые микропиксельные лавинные фототранзисторы

Электрические эквивалентные схемы SiPM от фирмы SensL и разработанного нами МЛФТ



Осциллограммы одноэлектронных сигналов, полученных с приборов МЛФТ и SiPM от фирмы SensL

Сигналы усиливались двумя идентичными усилителями с полосой пропускания 80 МГц и коэффициентом усиления 120, а затем подавались на двухлучевой осциллограф с полосой пропускания 200 МГц. Амплитуда сигнала по заряду, снимаемого с быстрого выхода МЛФТ превышает в (9,7рС/1,2рС) ≈ 8 раз амплитуды соответствующего сигнала, снимаемого от SiPM фирмы SensL.



Спасибо за внимание!

Зависимость эффективности регистрации фотонов от диаметра пикселей

