

**Газоразрядные микро-детекторы нового поколения.**

**Основы работы, построения и перспективы их производства в ПИЯФ**

Кудин Л.Г., семинар ОФВЭ, 5.03.2012

# Производство в ПИЯФ в настоящее время.

*События 90-х существенно изменили подход к производственным задачам. Непосредственное участие и полученный опыт в работах в Saclay, BNL, DESY, и далее в CERN , а также вечный вопрос : **Что делать?** предопределили наш выбор и цели.*

*Базой для нас явилась технология ПП и фотолитография –ставшие основой в производстве ряда физических детекторов.*

## Что у нас изменилось:

- Численность;
- Процессы;
- Используемые материалы;
- Производственное оборудование

*В настоящее время численность составляет 8 человек (было 140).*

*Доля ПП для электроники составляет ~50% (это дань традиции -опытные и единичные образцы), остальные 50% - элементы детекторов. В дальнейшем мы намерены все больше ориентироваться на детекторы и интегрированную с детекторами Front-End электронику*

# Производство в ПИЯФ в настоящее время. Процессы.

*Проектирование на базе САПР, разработка технологического регламента и оснастки, подготовка ЧПУ обработки*

## *Технологические процессы*

*Прецизионная фотолитография (+/-40 мкм)*

*Производство ФШ*

*Механическая ЧПУ обработка*

*Глубокое (до 500мкм) рельефное травление металлов*

*Прецизионное травление стекла*

*Нанесение покрытий, жидких, пленочных, диэлектриков, металлов*

*Герметизация с использованием HV компаундов*

*Продукция на 100% нестандартная –опытные образцы и уникальные разработки.*



*Горячее прессования пластиков, ламинирование.*

*Изготовление гибких и гибко-жестких плат*

*Прямая металлизация отверстий (“Black Holes”)*

*Технология “Blind Holes”*

*Изготовление THGEM, RETGEM, монолитных THGEM и приборов на базе THGEM*

*Изготовление MICROMEGAS*

*УЗ мойка, вакуумная и ИК сушка*

*Предварительные физ. испытания и тесты*

# Производство в ПИЯФ в настоящее время. Используемые материалы.

✚ *Стеклотекстолиты FR4,5,6;*

✚ *Фольгированные фторопласты;*

✚ *Полиимидные пленки (Kapton, Du Pont, Sheldah);*

✚ *Фольгированные материалы на базе полиимидов (Arlon);*

✚ *Керамика (Masor);*

✚ *Металл (алюминий, бронза, медь) –прокат до 0,5мм;*

✚ *Препреги для горячего прессования;*

✚ *Фотопленки, фотопластины, фоторезисты;*

✚ *Жидкие фоторезисты и лаки;*

✚ *Сетки для MICROMEGAS;*

✚ *Прецизионный обрабатывающий инструмент;*

✚ *Химикаты для обработки ПП и ФШ ,*

✚ *Материалы для пайки (пасты, дозаторы) ...;*

✚ *Компоненты компаундов;*

✚ *Клеи, включая фоточувствительные*

*Это современные материалы. Они все опробованы в производстве и могут использоваться для решения задач экспериментальной физики.*

# Новое оборудование

## Сверльно-фрезерно-гравировальный станок лабораторного типа



● Рабочая область (X/Y/Z)	229x305x38 мм
● Управление в рабочей области	2 ½ D
● Разрешение (X/Y)	0.25 µm
● Повторяемость	±0.001 mm
● Точность привязки (при перевороте платы)	±0.02 mm
● Скорость вращения шпинделя	Max. 100,000 об/м
● Смена инструмента	Автомат. 10 поз.
● Скорость сверловки	150 отв./мин
● Скорость перемещения	Max. 150 mm/sec
● Z Ось	Шаговый двигатель
● Минимальный диаметр сверла	0.2мм
● Мин. дорожка при фрезеровании	0.1мм
● Размеры (W/H/D)	670 x 540 x 760 mm
● Вес	55 кг
● Сжатый воздух	6 атм., 100 л/мин

### Обрабатываемые материалы:

- Пластики (термостойкие)
- Металлы (алюминий, бронза, медь)
- Керамика (MACOR)

➤ Автоматическая смена инструмента

➤ Система оптического зрения

➤ Вакуумный стол

➤ Воздушный прижим заготовки и контролируемый зазор при обработке деликатных поверхностей (контакт только с инструментом)

➤ Программное обеспечение CircuitCAM и BoardMaster обеспечивают необходимый интерфейс к большинству форматов проектирования ПП

# Новое оборудование



**2. Multipress S** (лабораторного типа);

**3. Центрифуга** (нанесение жидкого фоторезиста);

**4. Термошкаф**

(для металлизации отверстий с использованием специальных паст).

# Новое оборудование

## ❁ Установка прямой металлизации MiniContac RS



Предназначена для прямой металлизации отверстий на основе технологии “Black Holes”

Возможность прямой гальванической металлизации отверстий диаметром до 300 мкм на текстолите толщиной 1.5 мм

- ❁ Вытяжные шкафы -2шт;
- ❁ Чистые помещения под фотолитографию

*Получение этого оборудования позволило нам продолжить работы. Это фактически замена старого оборудования, но качественный скачок очевиден. Это особенно касается точных механических работ.*

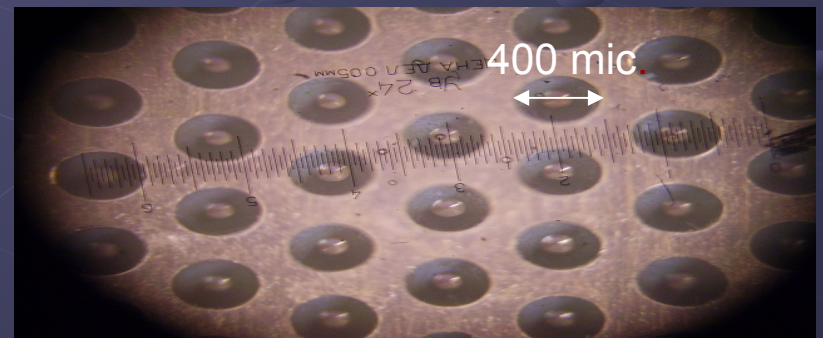
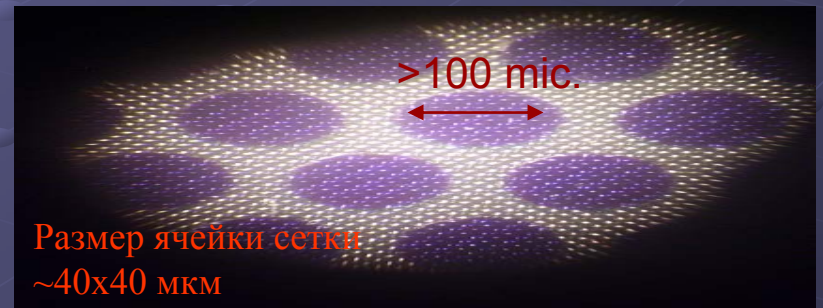
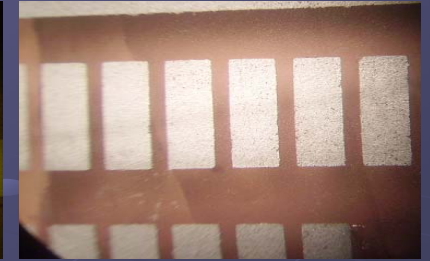
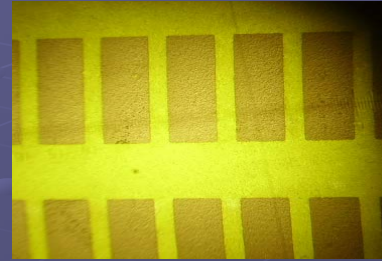
*В отношении фотолитографии, на которую у нас большие надежды в освоении производства детекторов (см. ниже), то здесь необходимы как минимум: фотоплоттер с хорошим разрешением, новая экспонирующая установка и чистые помещения для работы с фотопленками и фотопластинами и жидкими фоторезистами высокого разрешения.*

*Если это выполнить, то мы шагнем в область изготовления элементов ПП величиной ~30 мкм.*

*Стоит также подумать о лазерном оборудовании (сверловка ПП, структурирование поверхностей)*

# Основные направления конструкторско-технологических разработок:

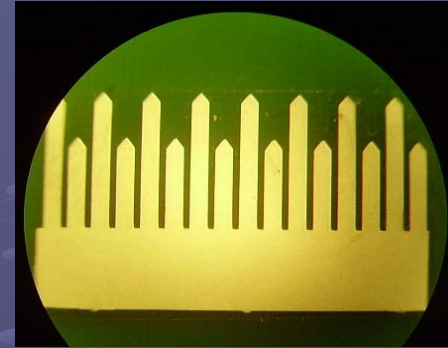
- ➔ ПП на стекле и керамике ;
- ➔ Прецизионные методы клейки с использованием фотолитографии (MICROMEGAS);
- ➔ Формирование «глухих» отверстий на ПП с (герметизация газовых объёмов в детекторах с «падовой» структурой анодов);



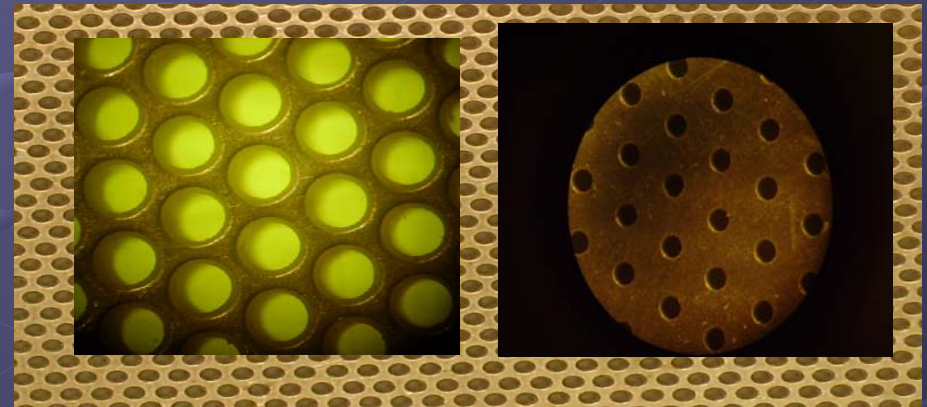


## Основные направления конструкторско-технологических разработок:

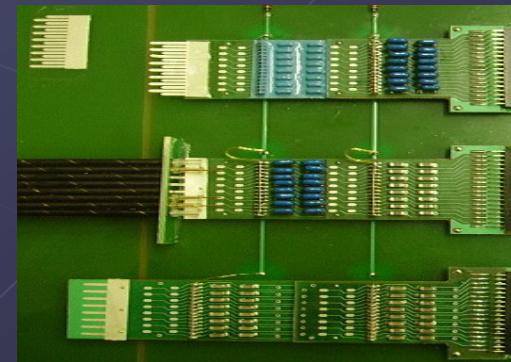
- ➔ Формирование сложных профилей листовых материалов методом встречного травления;



- ➔ Конструирование, производство и испытания THGEM, RETGEM (Thick Gas Electron Multiplier Resistive Gas Electron Multiplier) ;



- ➔ Производство элементов физических детекторов на базе “разделенных Straw” (СВМ, совместно с ОИЯИ)



# Основные направления конструкторско-технологических разработок:

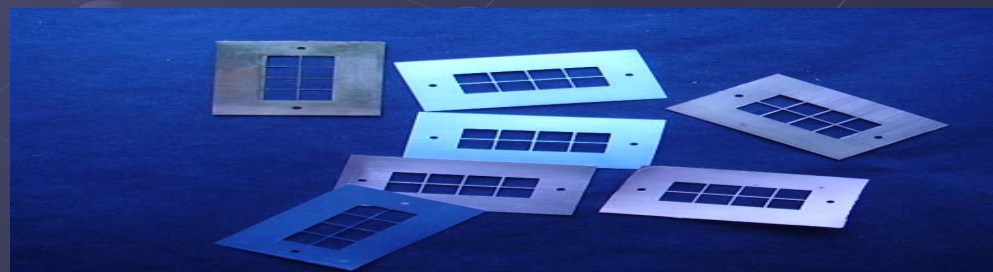
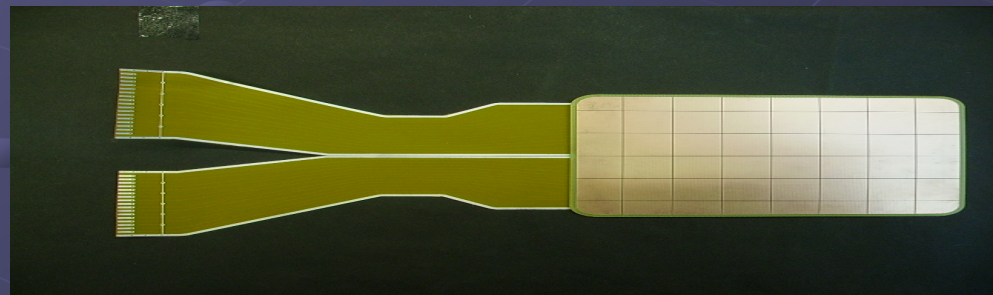
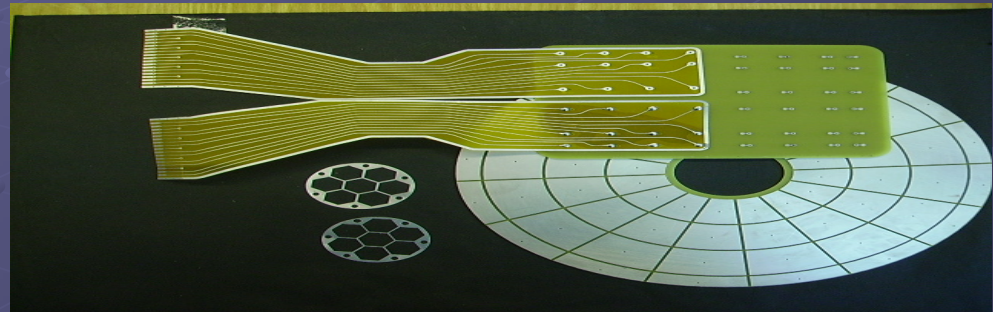
► Производство печатных плат и изделий из листового материала (RF материалы, мель, алюминий и т.п.) на основе механической обработки на ЧПУ станке;

► Химическое осаждение меди и механическая обработка керамики типа MACORE на ЧПУ станке

■ Точность позиционирования +/- 10 мкм;

■ Минимальная ширина «канавки» 150 мкм;

■ Минимальная ширина проводника 100 мкм



# Основные направления конструкторско-технологических разработок:

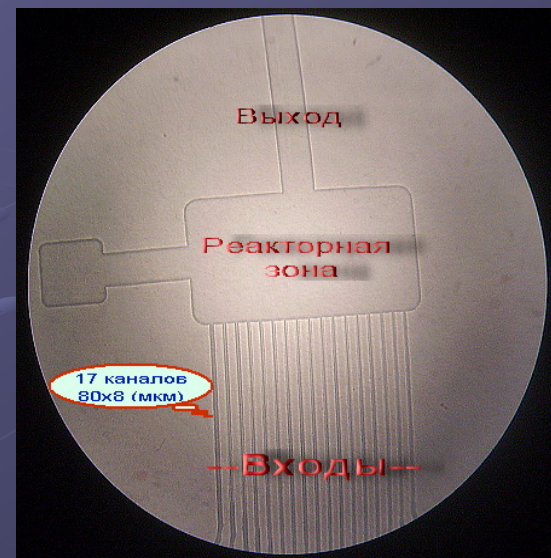
## ➔ Создание элемента основания микрофлюидного ЧИПа.

### Для справки:

Микро-флюидный ЧИП – миниатюрное устройство планарной геометрии, выполненное из материала устойчивого к протекающим хим. реакциям, с разветвлённой сетью микро-каналов. Площадь и линейные размеры каналов от сотен микрон до сотен нанометров.

### Использование микросистем позволяет:

- ✓ Оперировать с количествами жидкостей от нано- до миллилитра;
- ✓ Анализировать параметры индивидуальных клеток в реальном времени;
- ✓ Осуществлять гидродинамическую транспортировку и фиксацию клеток;
- ✓ Интегрировать в чип оптические и оптоэлектронные методы исследований;
- ✓ При химических реакциях извлекать в реальном времени промежуточные результаты реакций, протекающих в несколько стадий;
- ✓ При объединении микро-чипов различной конфигурации в систему можно
- ✓ Построить “на столе” микро-фабрику по производству веществ с уникальными возможностями и многое другое...



Основание микрочипа – стекло, ширина каналов ограничена техническими характеристиками ф/плоттера

**Основание ЧИПа – сложный по исполнению элемент, но не единственный. В этой работе существует ряд непрофильных для нас задач, как управление динамикой потоков, высокие давления, оптические и механические характеристики материалов и т.д., которые требуют интеграции сил многих специалистов. В настоящее время работы приостановлены в связи с увольнением специалиста.**

# Краткий перечень основных типов современных газовых лавинных микро-детекторов, выполненных по технологии печатных плат (ПП).

1. MSGC: Micro-strip Gas Chamber (1988), was invented by Anton Oed (Гренобль);
2. MGC: Micro-gap Chamber (1993) by Ronaldo Bellauini, et. al., (Pisa);
3. MDOT: Microdot Chamber (1995), by Steven Biagi (Liverpool);
4. GEM: Gas Electron Multiplier (1996), Fabio Sauli (CERN);
5. MGD: Micro-Grove Detector (1991), by Amsterdam group;
6. THGEM (2004), Weizmann Institute of Science, Israel;
7. MICROME GAS (1995), was invented by I.Giomataris, G. Charpak;
8. TPC : Time Projection Chamber;
9. Micro-Hole & Strip Plate (MHSP) см. далее

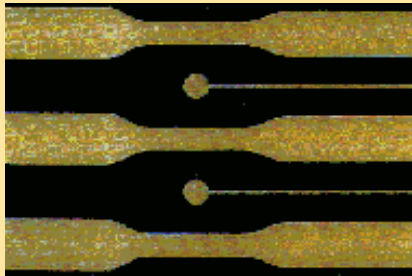
1-4,9 имеют геометрию < 50мкм.  
Требуются чистые помещения и новый ф-плоттер  
4-необходима технология травления полиимида

См. подробно далее

**Приборы 5,8 -принципиальную возможность изготовления в ПИЯФ .**

**Приборы 6,7 - изготавливаются**

# Microstrip Gas Chamber (MSGC)



Дрейфовый электрод

Анодный стрип

Стеклянная подложка

Катодные стрипы

- Возможен 2-мерный съём информации;
- Дрейфовый промежуток 3-4мм;
- Ширина анодных стрипов 10 мкм, шаг – 200 мкм;
- Дрейфовое поле перекрывает внутренний чувствительный объем, но усиление (развитие лавины) происходит только вблизи анода;
- Хорошее пространственное, временное разрешение -  $\sigma_x \sim 30-40$  мкм;  $\sigma_t \sim 15$  ns; (200 мкм- pitch);
- Хорошее энергетическое разрешение ( 15% FWHM) при максимальной загрузке  $10^6$  Hz/mm<sup>2</sup>,

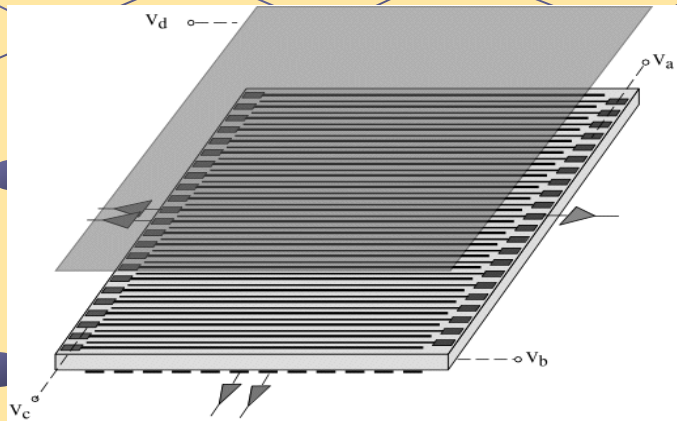
(По данным CMS эксперимента: G – 1700, CERN)

**Но:**

**Неустойчив по отношению к в/в разрядам. Опасность разрушения!**

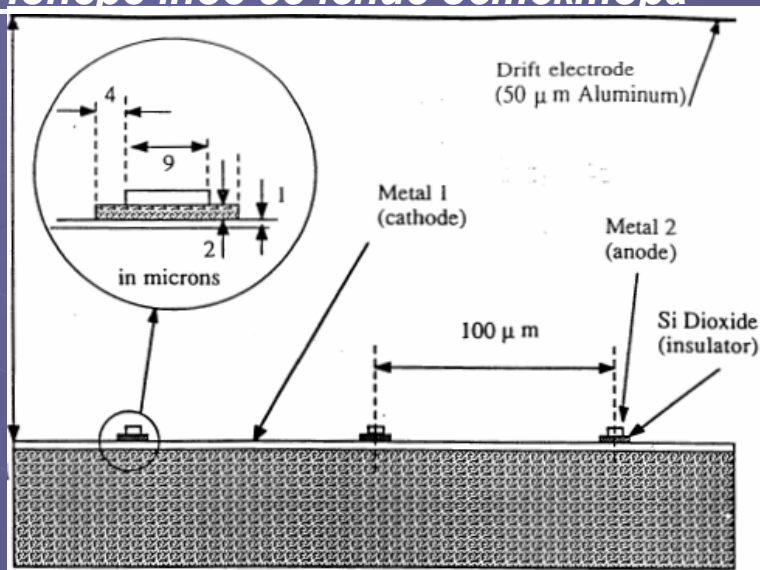
**References:**

1. Cho, et. al., Proc. 5th Int'l. Conf. on Advanced Technology and Particle Physics, Como, Italy, Oct. 1996, p. 258
2. H.S. Cho, et. al., IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 44, No. 3 (1997) 635
3. H.S. Cho, et. al., IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 45, No. 3 (1998) 280



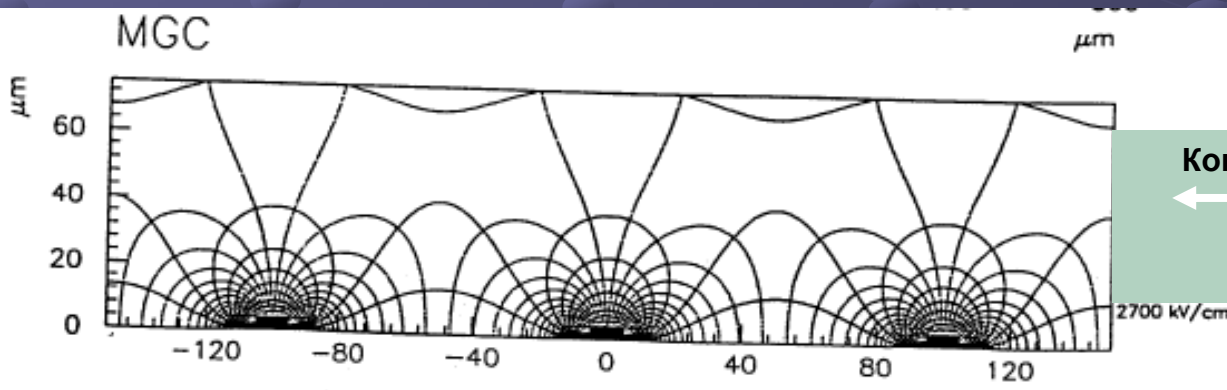
# Microgap Chamber (MGC)

## Поперечное сечение детектора



- Сплошной катод;
- Очень быстрый сигнал и хорошее энергетическое разрешение, как у MSGC;
- Максимальные загрузки  $\sim 10^7$  Hz/mm<sup>2</sup> без накопления заряда на изолирующих поверхностях;
- Пьедестал должен иметь высокую диэлектрическую прочность (обычно SiO);
- Усиление ограничено на уровне 3000 из-за маленького расстояния для образования лавины (2-5 мкм);

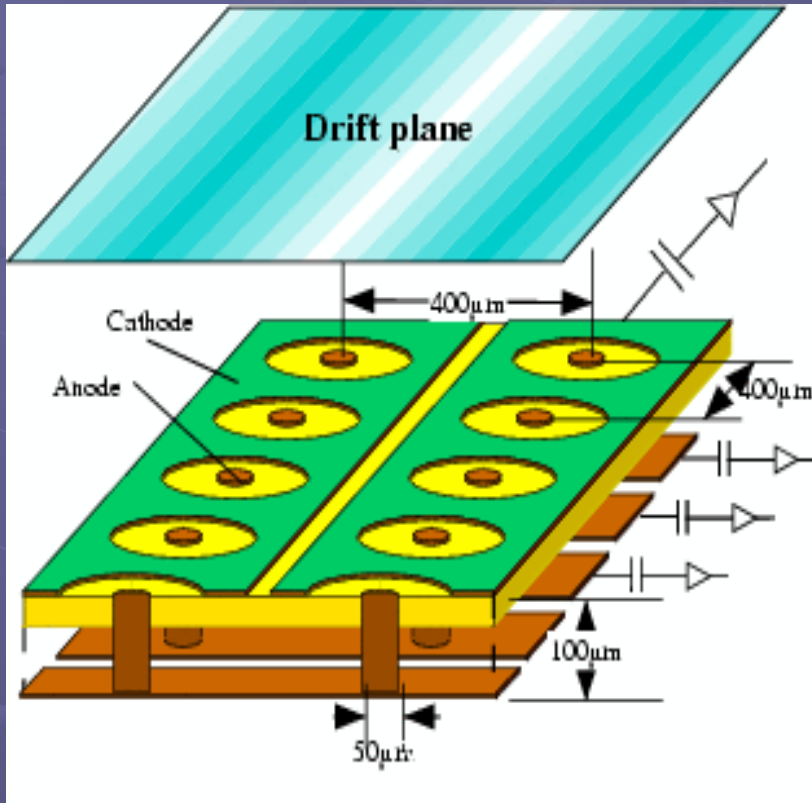
Однако, как и у MSGC - неустойчивость к воздействию искр.



← Конфигурация электрического поля детектора

**$E_{max}=2700\text{kv/cm}$**

# Microdot Chamber (MDOT)

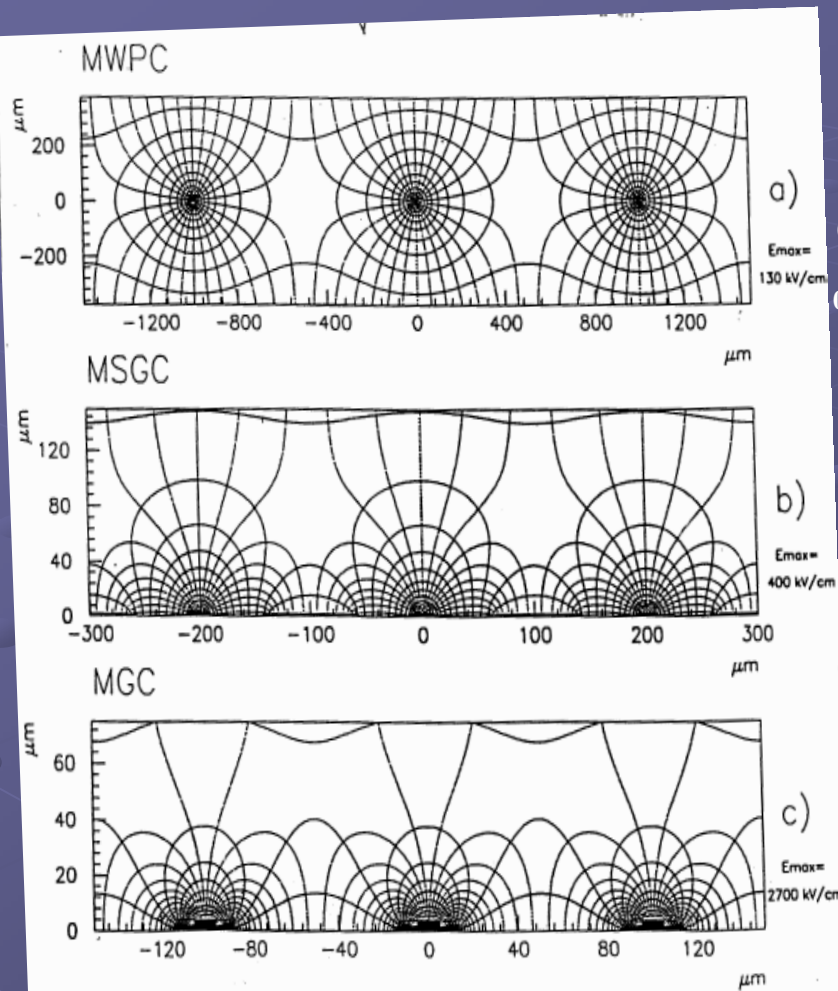


Благодаря 2D геометрии, эл. поле обратно-пропорционально расстоянию от анода и меняется более медленно чем в MSGC и MGC; В соответствии с этим небольшое поле у катода позволяет работать с увеличенным HV, а значит и усилением.  $G_{max} = 30\ 000$ ;

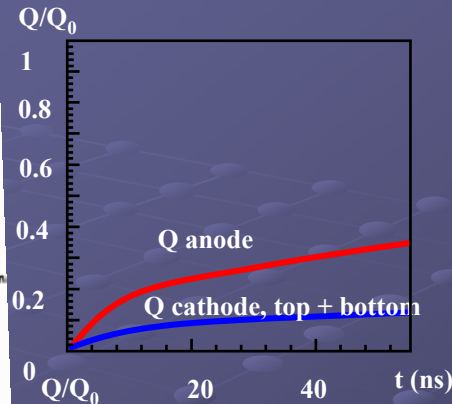
Аноды могут быть объединены в стрипы.

2D съём

# Динамика и распределение заряда между электродами детекторов



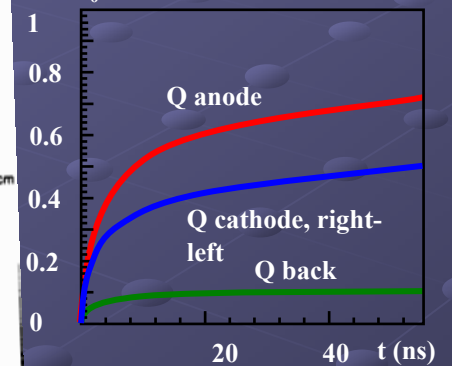
**Введение дополнительного электрода для сбора ионов сильно меняет картину сбора заряда.**



**Для MWPC :  $E_{max} = 130 \text{ kV/cm}$**

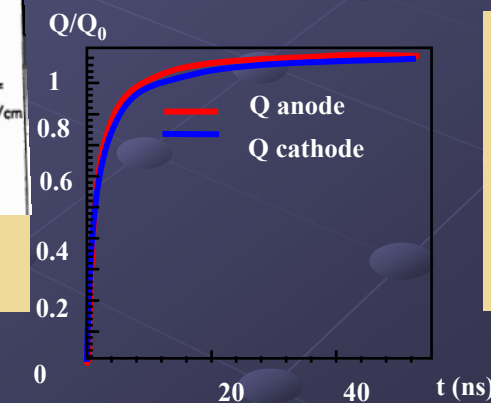
Сигнал анода определяется быстрым сбором электронов и медленным дрейфом ионов (длинные "хвосты").  
 $R_{max} \sim 10^3 \text{ соб./мм}^2\text{сек}$  (очень приблизительно).

Сигналы с анода и катода существенно отличаются по форме и амплитуде



**Для MSGC:  $E_{max} = 400 \text{ kV/cm}$**

Сигнал анода определяется быстрым сбором электронов и достаточно быстрым дрейфом ионов ("хвосты" намного короче).  
 $R_{max} \sim n10^5 \text{ соб./мм}^2\text{сек}$



**Для MGC:  $E_{max} = 2700 \text{ kV/cm}$**

Сигнал анода определяется быстрым сбором электронов и очень быстрым дрейфом ионов (короткие "хвосты").  
 $R_{max} \sim 10^7 \text{ соб./мм}^2\text{сек}$ . Сигналы с анода и катода мало отличаются по форме и амплитуде.



# Gas Electron Multiplier (GEM)

- GEM был задуман by Fabio Sauli (CERN), как газоразрядный прибор в дополнение к MSGC и др. приборам, чтобы получить более устойчивую геометрию прибора к HV разрядам (1996).

## Типичная геометрия GEM:

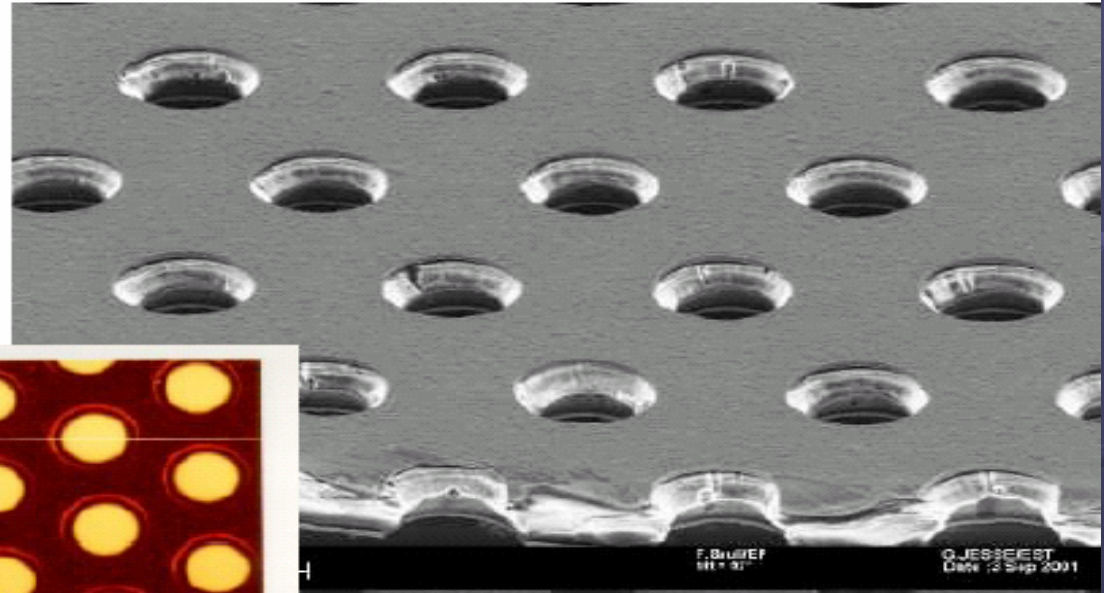
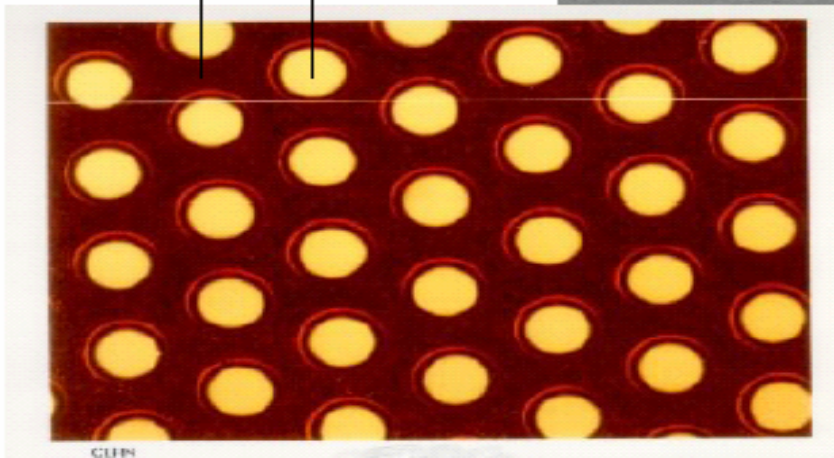
- Тонкий лист каптона 50 мкм толщиной, фольгированный с 2-х сторон медной фольгой (5мкм), имеет протравленные в Каптоне и фольге отверстия 70мкм диаметром с шагом 140 мкм.;
- Изготовленный лист помещается в газовую среду с параллельным полем (Анод-Катод). К фольге GEM с обеих сторон листа прикладывается напряжение, при этом отверстия представляют сетку диполей с высокой напряженностью поля в них;
- Суперпозиция плоско- параллельных полей и полей диполей образуют суммарное поле прибора;
- Самое главное достоинство GEM заключается в его «прозрачности» по отношению к проходящему заряду, что позволяет комбинировать его с другими детекторами .

# GEM. Что это такое?

## Gas Electron Multiplier - GEM

Manufactured with  
technology developed at  
CERN

100-150  $\mu\text{m}$



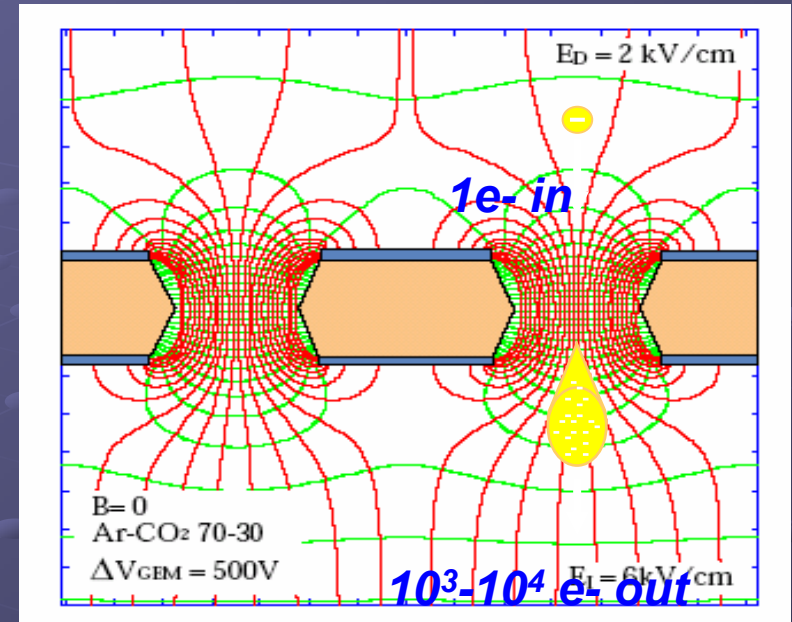
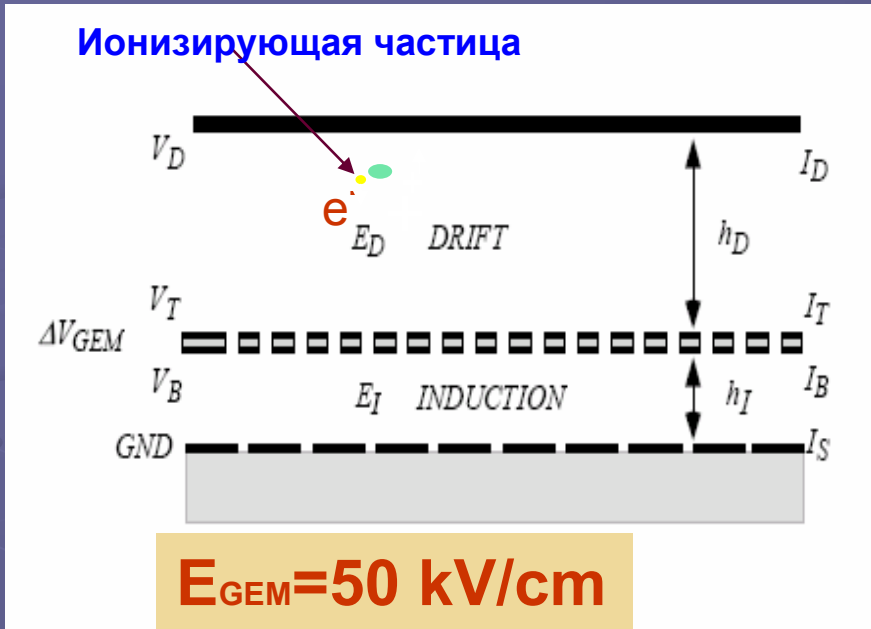
Typical geometry:  
5  $\mu\text{m}$  Cu on 50  $\mu\text{m}$  Kapton  
70  $\mu\text{m}$  holes at 140  $\mu\text{m}$  pitch

4

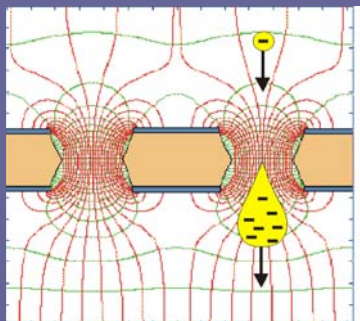
Чтобы избежать эффекта зарядки стенок отверстия внутренний диаметр должен приближаться к наружному, т.к. цилиндрическая форма является оптимальной (2)

- 1 Technology developed by A. Gandi and R. De Oliveira, CERN-EST-MT 2 Tradename of Du Pont Co., Wilmington DE, USA 3 Novaclad G2200 produced by Sheldahl Inc, Northfield MN, USA

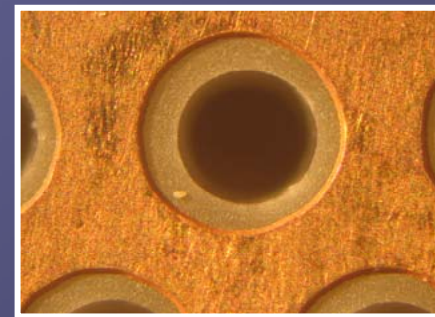
# Принцип работы GEM



- Образовавшийся в дрейфовом промежутке электрон дрейфует вдоль силовых линий и попадает в отверстие с высокой напряженностью электрического поля.
- В отверстиях происходит усиление лавин. Часть электронов лавины достигая анода создают короткий импульс, а часть оседает на нижней обкладке GEM.
- Особенность сигнала с GEM заключается в том, что он содержит “быструю” электронную составляющую, а “хвост” вызванный дрейфом “медленных” ионов, из которых часть дрейфует к катоду, оставшиеся к верхнему электроду GEM.
- ЗАМЕЧАТЕЛЬНОЕ СВОЙСТВО GEM - Разряды на GEM не опасны для электроники



# Thick GEM (THGEM)



- GEM, выполненный на материале толщиной от 0.3 до 2мм и более с укрупненной структурой отверстий от 0.3 до 1.5 и более мм называют Thick GEM (THGEM);
- Этот прибор был создан и исследован группой Chechik et al. (Israel) в 2004г.;

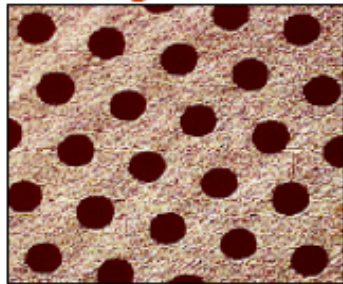
Он имеет следующие замечательные особенности:

- Для изготовления может быть использован любой двусторонний фольгированный материал, имеющий высокие диэлектрические и эксплуатационные свойства;
- Изготовление полностью соответствует процессу изготовления печатных плат (фотолитография, сверловка отверстий, травление фольги, что представляет для нас значительный интерес);
- По геометрии и по конфигурации поля THGEM похож на GEM, но не является его увеличенной копией GEM

**В ПИЯФ первые приборы были изготовлены в 2006 году**

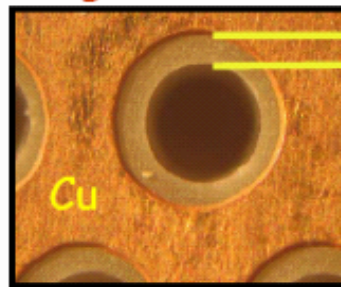
# Thick GEM (THGEM)

Standard GEM  
 $10^3$  gain in  
single GEM



1mm

THGEM  
 $10^5$  gain in  
single-THGEM



Important:  
0.1mm G-10 rim.  
reduces discharges  
-> high gains!

## Is THGEM an "Expanded" GEM ?

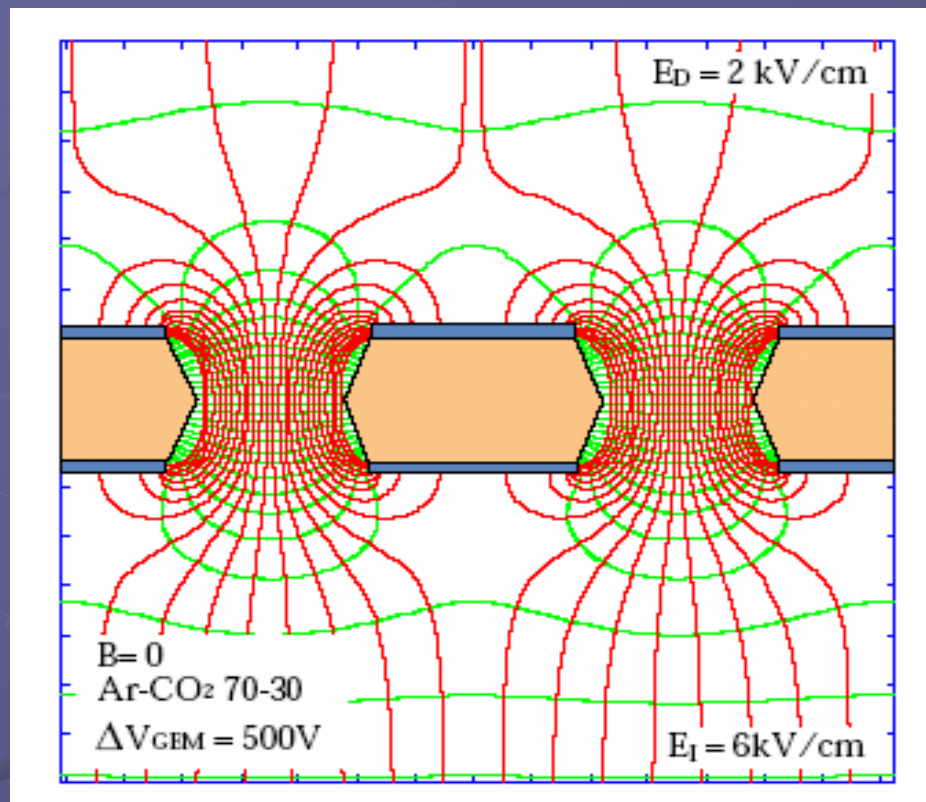
### expanded

- The dimensions

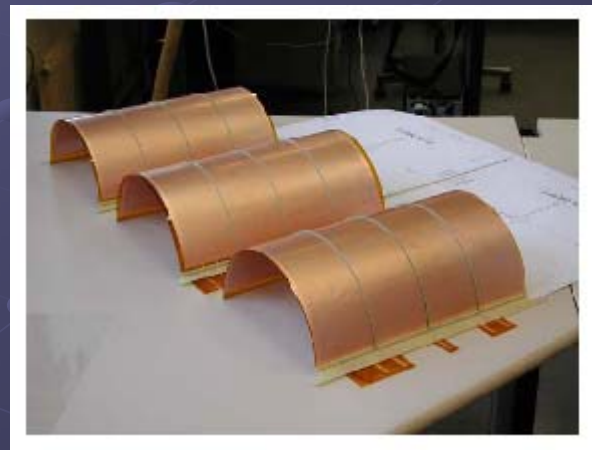
### does not scale up

- Electron diffusion & transport
- Electric fields
- Gain
- Timing properties
- Rate capability
- Ions transport

## Распределение силовых линий электрического поля в структуре GEM согласно модели MAXWELL.

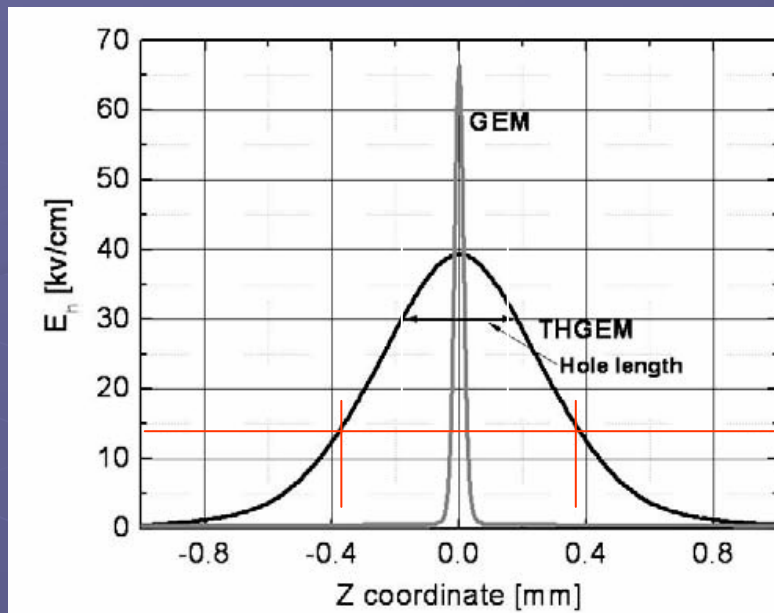


Эта картинка поля характерна для оптимизированного прибора. Но оптимизация должна также учитывать динамику движения заряда в конкретных условиях (состав газа, давление...)



2D - Карта электрического поля, просчитанная исходя из заданной геометрии и величин напряжений (вводится в пакет Garfield).

# Напряженность поля вдоль оси отверстия THGEM(GEM) для различных толщин



$$E_i=0; E_d=0$$

## THGEM

$T_h=0.4\text{мм}, d=0.3\text{мм}, D=0.5\text{мм}, P=0.7\text{мм}$

## GEM

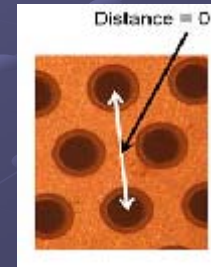
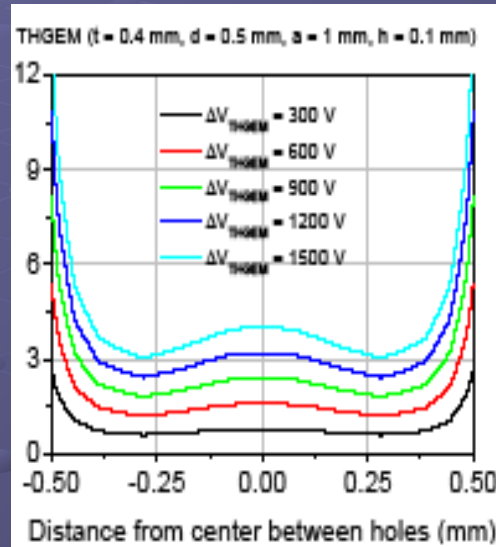
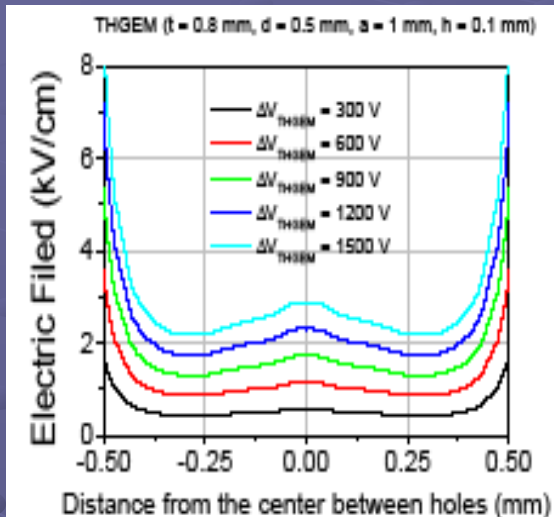
$T_h=0.05, d=0.055, D=0.07, P=0.14$  (mm)

Область образования лавин ( $>15\text{kV/cm}$ )  
слегка выходит за пределы отверстия.

Напряженность поля внутри отверстия вдоль центральной оси по  
MAXWELL для максимальных рабочих напряжений в Ar/CO<sub>2</sub> (70:30).  
 $\Delta V_{THGEM}=2\text{kV}$ ; Standard GEM:  $\Delta V_{GEM}=0.5\text{kV}$  (6)

Каждое отверстие работает как независимый умножитель. Лавина ограничена стенками  
отверстий, что уменьшает вторичный эффект излучения фотонов. Это позволяет  
работать с высоким КГУ в широком диапазоне газов, включая газы с повышенной  
сцинтилляцией, как чистый CF<sub>4</sub>.

# Напряженность поля вдоль оси отверстия и на поверхности THGEM(GEM)



Вычисление напряженности электрического поля по MAXWELL на верхней поверхности THGEM вдоль линии, соединяющей центры 2-х смежных отверстия для различных напряжений  $\Delta\text{THGEM}$ .

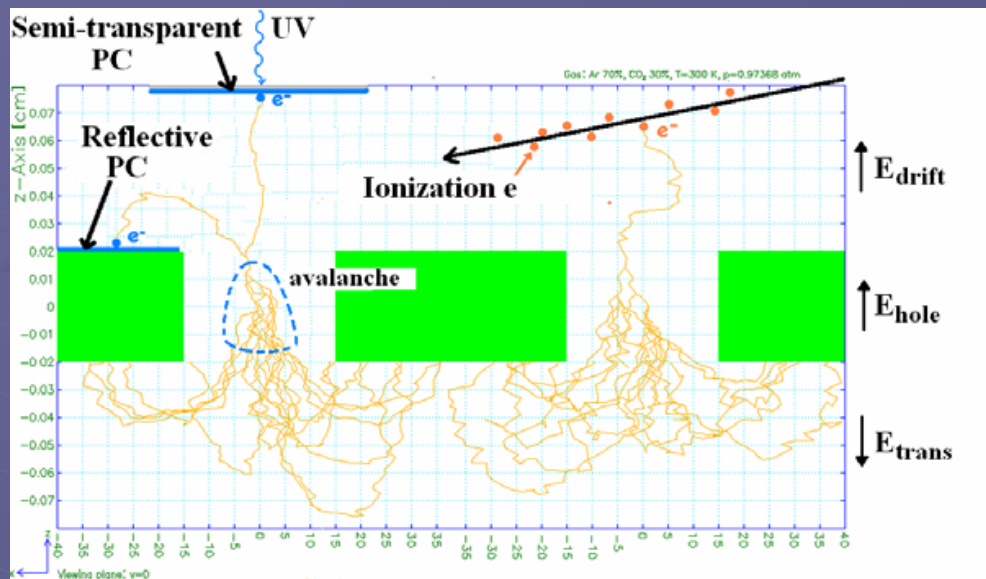
$E_{\text{drift}} = E_{\text{trans}} = 0$  kV/cm.

THGEM1 :  $t = 0.4$  mm,  $d = 0.5$  mm,  $a(R) = 1$  mm,  $r = 0.1$  mm;  
THGEM2 :  $t = 0.8$  mm,  $d = 0.5$  mm,  $a = 1$  mm,  $r = 0.1$  mm.

Величина поля на поверхности диэлектрика зависит от толщины диэлектрика при постоянном напряжении на THGEM.



# Механизм работы THGEM, основанный на модели GARFIELD



Фотоэлектрические процессы:

Для Ref PC  $E_{drift} = 0$ ,

Для ST,  $E_{drift} = 0.1-1$  kV/cm

Энергия необходимая для образования пары электрон-ион зависит от газа и находится в пределах 25-35 eV (8).

(5.9 keV гамма источник).

В случае UV- фотон взаимодействует с CsI фотокатодом и достаточно 5 eV для выхода электрона в газ (8).

Модель Garfield «принимает во внимание» тип газа (с учетом вероятности столкновений и ионизации) и давление и симулирует пути электронов и ионов включая диффузию и размножение электронов внутри отверстия.

Принцип работы THGEM на основе модели GARFIELD [7] при низком КГУ (~30).

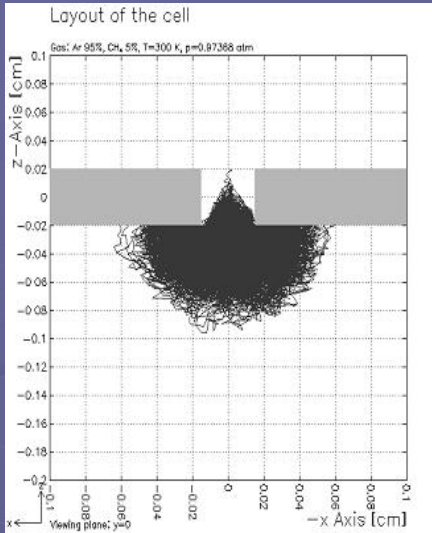
1. Три варианта рождения электронов в газовом объеме:

- из полупрозрачного фотокатода;
- из рефлексивного фотокатода;
- путем прямой ионизации газа.

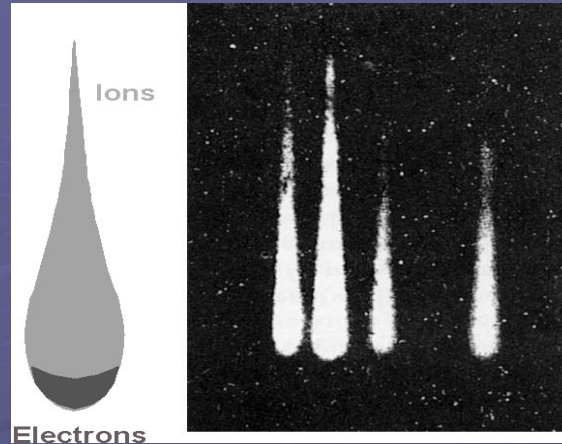
2. Электроны под действием суперпозиции полей  $E_{drift}$  и  $E_{hole}$  фокусируются и размножаются в отверстии, образуя лавину.

3. В зависимости от величины и направления поля  $E_{trans}$  лавина электронов перемещается к считывающему электроду или собираются на нижнем электроде THGEM, как показано на рисунке с реверсированным  $E_{trans}$ .

# Механизм работы THGEM



*Garfield [7] simulation процесс размножения для одиночного электрона (Gain~10<sup>3</sup>), внутри THGEM отверстия*



*Фотография лавины в газе [\*]. Положительные ионы находятся позади быстрого электронного фронта.*

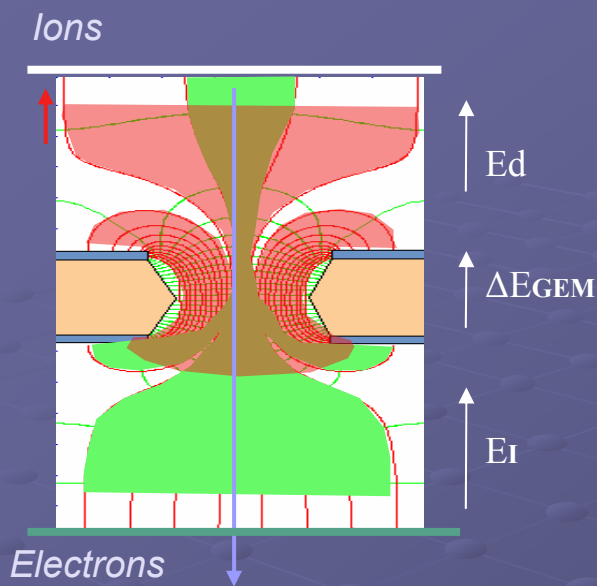
*Скорость дрейфа электрона ~ 5cm/μsec, что на 3 порядка больше скорости иона.*

*Вторичные процессы в лавине, подобные появлению фотонов, индуцирующих вторичные лавины, деформация электрического поля пространственным зарядом (которая сильно возрастает на фронте лавины), в конечном счете являются результатом электрического пробоя.*

*Феноменологический предел усиления перед пробоем установлен Н. Raether [2] :  $M \sim 10^8$  или  $An_0 < 10^8$  электронов, (A-Gain,  $n_0$ -число первичных электронов)*

*В результате статистического распределения энергий электронов обычно устанавливаются рабочие режимы не выше  $10^6$ , чтобы избежать пробоев.. Однако, процесс умножения внутри отверстия значительно уменьшает вторичные эффекты и поэтому можно достичь больших значений коэффициентов усиления чем в проволочных камерах, плоскопараллельных, микростриповых и др. детекторах с открытой геометрией. Реально -выше  $10^7$ . [6]*

# Усиление GEM



Распределение заряда в GEM

От 1/3 до 2/3 электронов собирается на нижней обкладке GEM. «Реальное» усиление, соответствует полному заряду в лавине. «Эффективное» усиление-это усиление измеряемое на аноде

- GEM облучался гамма квантами 6 кэВ;
- Записывались токи на всех электродах;
- Измерялся counting rate R на входе, тогда

$$G_{eff} = I_s (enR)^{-1}$$

– где e-заряд эл-на, n-количество пар электрон-ионов (~220 для 6 кэВ).

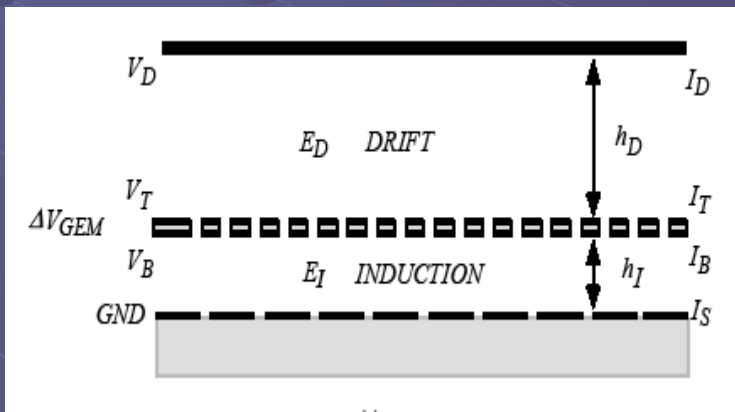
Значение реального gain выше т.к. учитывается та часть электронов, которая остается на нижней обкладке GEM.

При работе с УФ и соответствующими конверторами:

$$G_{eff} = I_B / I_T \text{ для Ref PC}$$

$$G_{eff} = I_B / I_D \text{ для ST PC и прямой ионизации}$$

(Note:  $G_{eff}$  не включает эффективность переноса электронов к аноду).



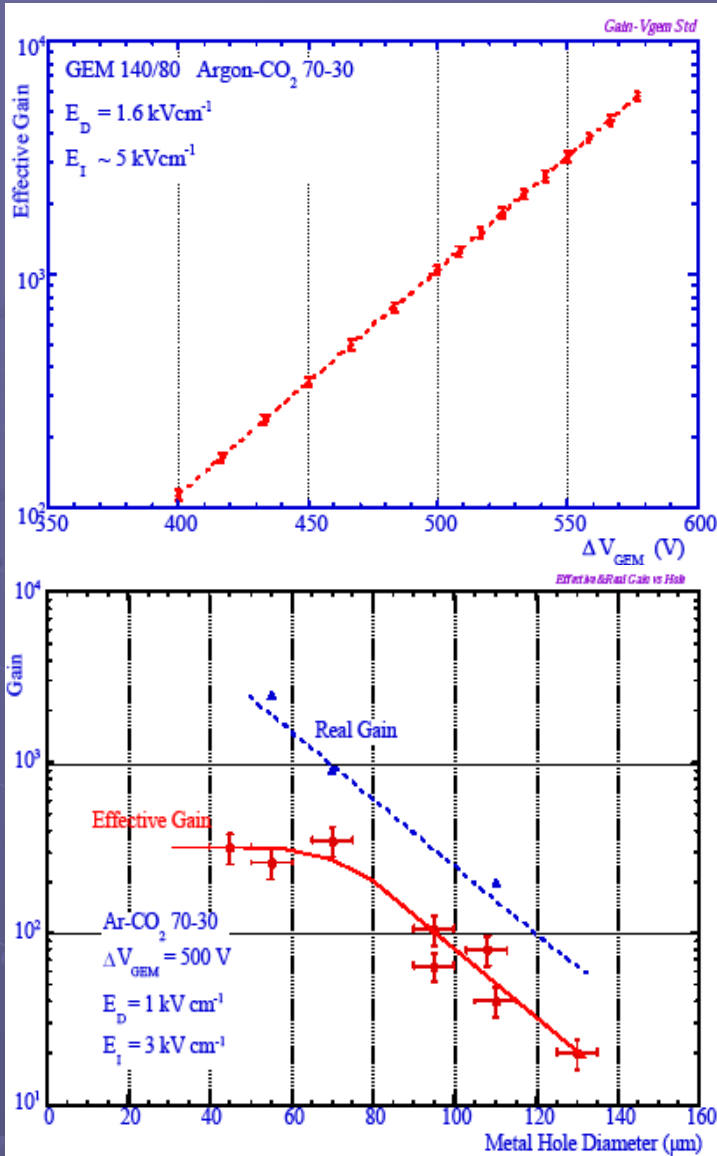
# Усиление GEM

Эффективный Gain возрастает экспоненциально от напряжения на GEM и почти линейно от напряженности индукционного поля (1).

**(Geff выше для меньших диаметров, и не зависит от Pitch при U all=const)**

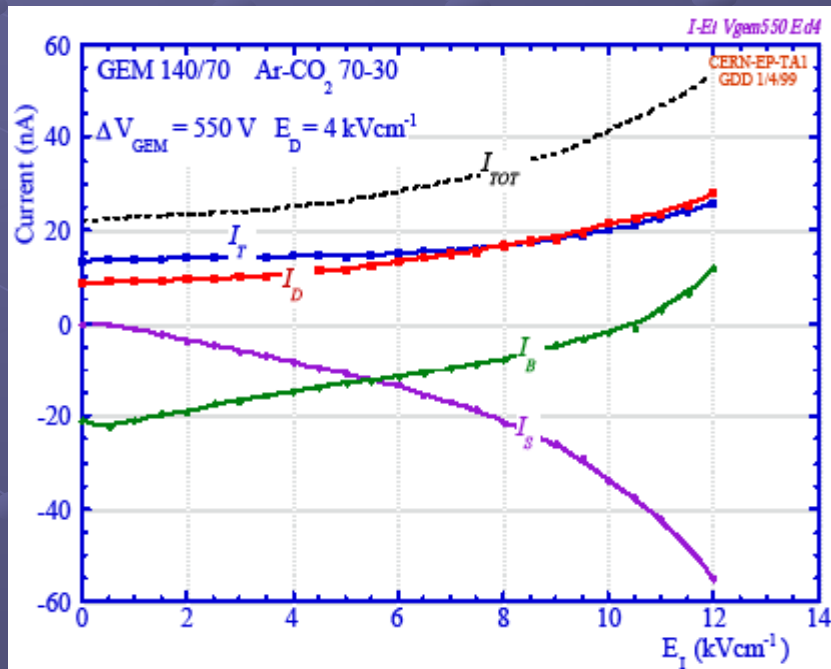
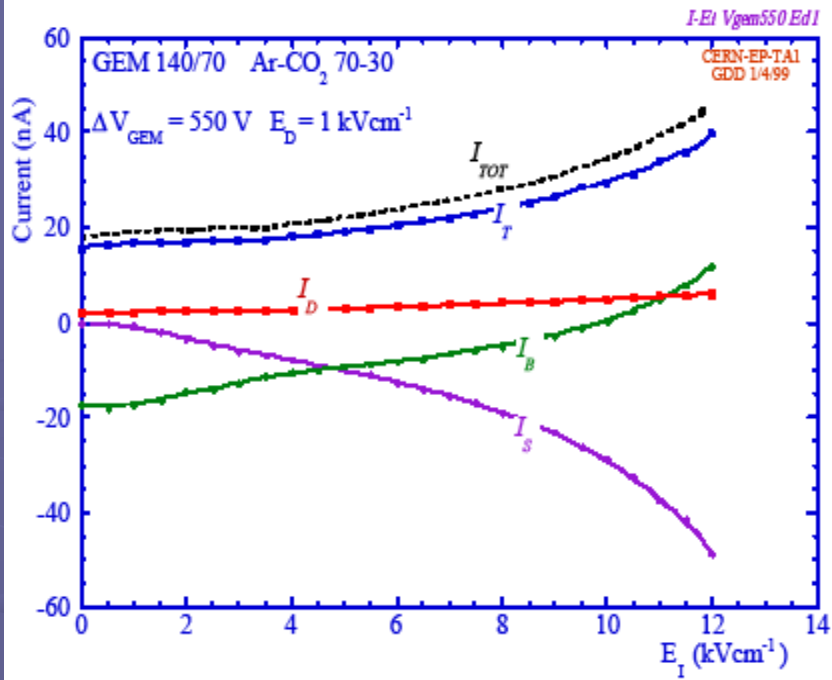
Даже при высоких напряжениях и высоком счете ( выше  $10^5 \text{ mm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) на входе - нет насыщения (Это означает отсутствие объемного заряда) (1)

Рост эффективного усиления останавливается при диаметре отверстия 70 мкм, что обусловлено падением эффективности фокусировки электронов в отверстия из дрейфового промежутка. Поэтому оптимальным значением диаметра отверстий считается 70–80 мкм при толщине подложки 50мкм



Реальное (1) и эффективное (2) усиление однокаскадного GEM в зависимости от диаметра отверстий по металлу в Ag + 30 % CO<sub>2</sub>. [ $\Delta V_{GEM} = 500 \text{ В}$ ;  $E_D = 1 \text{ кВ/см}$ ;  $E_I = 3 \text{ кВ/см}$ ]

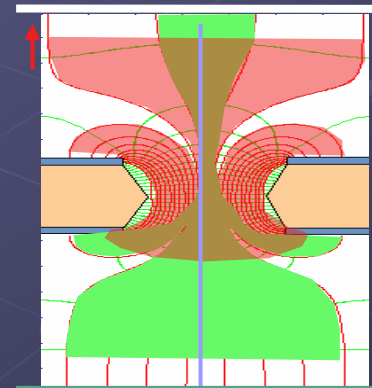
# Усиление GEM



Сумма величин токов -  $I_{TOT} = I_S + I_B$  отражает реальный Gain и увеличивается с  $E_I$ .  
 $G_{eff}$  возрастает почти линейно с  $E_I$ , возрастание  $I_S$  компенсируется уменьшением  $I_B$  (идет перераспределение электронов между нижней обкладкой GEM и анодом).  
 Положительное распределение токов  $I_T$  и  $I_D$  зависит от величины поля  $E_D$ .

В Ar/CO<sub>2</sub> (70/30) при  $E_i > 8 \text{ kV/cm}$  начинается быстрый рост  $G$  и появление положительного тока на нижней обкладке превосходящего ток электронов. Сильное возрастание  $G$  может провоцировать разряд на сигнальный электрод. Более того у сигналов на аноде появляется «хвост» с соответствующим возрастанием осциллограммы (Fig. \*).

Ions



Electrons

$E_D$   
 $\Delta E_{GEM}$   
 $E_I$



Fig. \*

В тонком GEM ситуация плохая, когда  $E_i$  велико или мало- электроны или не фокусируются или не извлекаются (невывраженный диполь, эффект толщины)

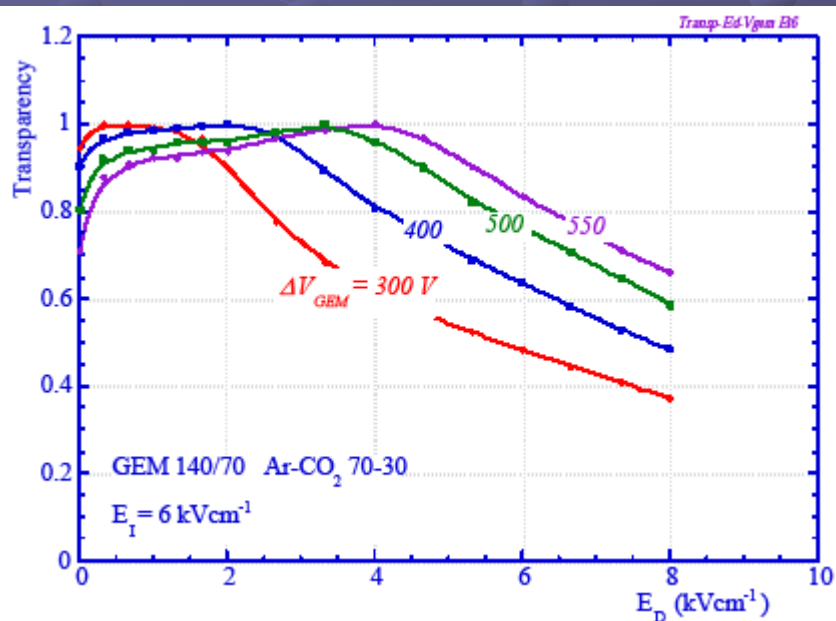
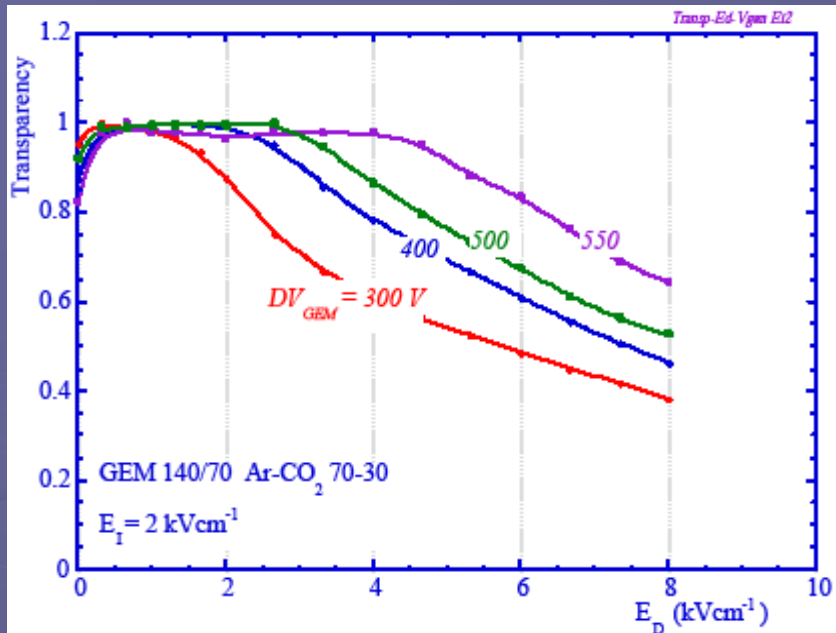
# Усиление GEM

Влияние  $E_d$  на усиление определяется эффективностью фокусировки электронов в отверстия.

При данной GEM геометрии эффективный сбор электронов зависит от напряжения на GEM и почти не зависит от  $E_I$

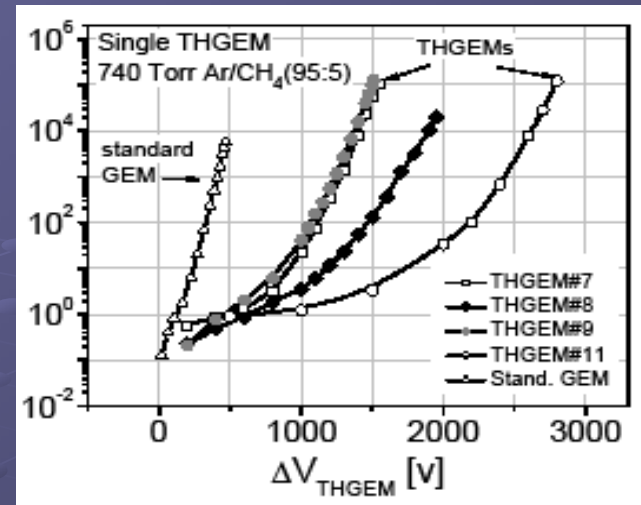
Как видно эффективность сбора заряда (или прозрачность) из дрейфовой области в GEM выше нескольких сотен  $V/cm^{-1}$  величина постоянная и близка к единице вплоть до  $E_d$  до нескольких  $kV/cm^{-1}$ ; предел тем выше чем выше  $E_{gem}$  и для электродов с более высокой оптической прозрачностью (1)

**Фокусировка падает когда отношение  $E_d / E_{GEM}$  возрастает.**

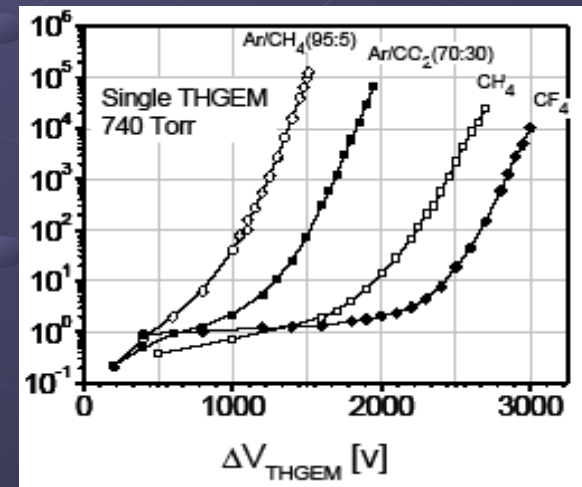


# Усиление GEM

THGEM#	Thickness t [mm]	Drilled hole diameter d [mm]	Etched Cu diameter [mm]	Pitch a [mm]	Ref PC area [%]	Low (L) or Atm (A) pressure
1	1.6	1	1 (no etching)	7	98	L*
2	1.6	1	1 (no etching)	4	94	L*
3	1.6	1	1.2	4	92	L*
4,6	1.6	1	1.2	1.5	42	L*+A
5	3.2	1	1.2	1.5	42	L*
7	0.4	0.5	0.7	1	56	A
8	0.8	0.5	0.7	1	56	A
9	0.4	0.3	0.5	0.7	54	A
10	0.4	0.3	0.5	1.0	77	A
11	2.2	1	1.2	1.5	42	L*
Standard GEM	0.05	0.055	.07	.14	77	



$G_{eff}$  для различных геометрий THGEMs Более высокие значения усиления зафиксированы для THGEMs с  $t/d \sim 1$ .



$G_{eff}$  для различных газов, Геометрия THGEM  $t=0.4$ ;  $d=0.3$ ;  $d1=0.5$ ;  $P=0.7$

Advances in Thick GEM-like gaseous electron multipliers. Part I: atmospheric pressure operation

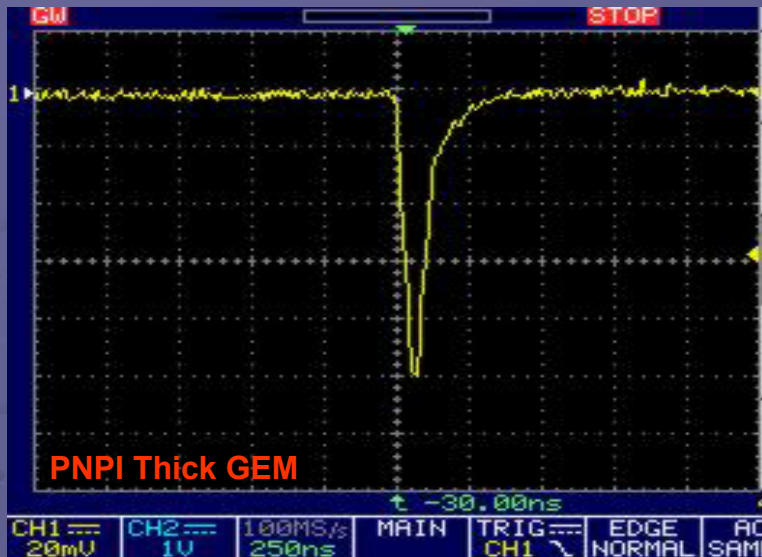
C. Shalem, R. Chechik, A. Breskin and K. Michaeli

Dept. of Particle Physics

The Weizmann Institute of Science, 76100 Rehovot, Israel.

# Усиление GEM

Решающим фактором, влияющим на форму сигнала, является скорость дрейфа электронов. Поэтому в «быстрых» газовых смесях сигнал получается коротким; например в смеси Ar с N<sub>2</sub> [17] и в чистом CF<sub>4</sub> [19] – с шириной импульса менее 10 нс.



«Быстрые» газовые смеси обеспечивают не только быстрый сигнал, но и довольно высокое временное разрешение GEM. Наиболее высокое временное разрешение было получено в газовом фотодетекторе на основе трехкаскадного GEM при работе в чистом CF<sub>4</sub> (19): оно составило 2 нс для одиночных фотоэлектронов и 0,33 нс для 150 фотоэлектронов.

RA source: Fe<sup>55</sup> source (5.9 keV X-rays);

Gas mixture: He-80%; CO<sub>2</sub>-20%

E drift=(1.1) kV/cm;

E trans=(2.8) kV/cm

$\Delta V_{\text{THGEM}}=2.05$  kV

Толщина t=0.4mm;

Диаметр отверстий d=0.4mm;

Шаг (pitch) P=1mm

Структура- гексагональная

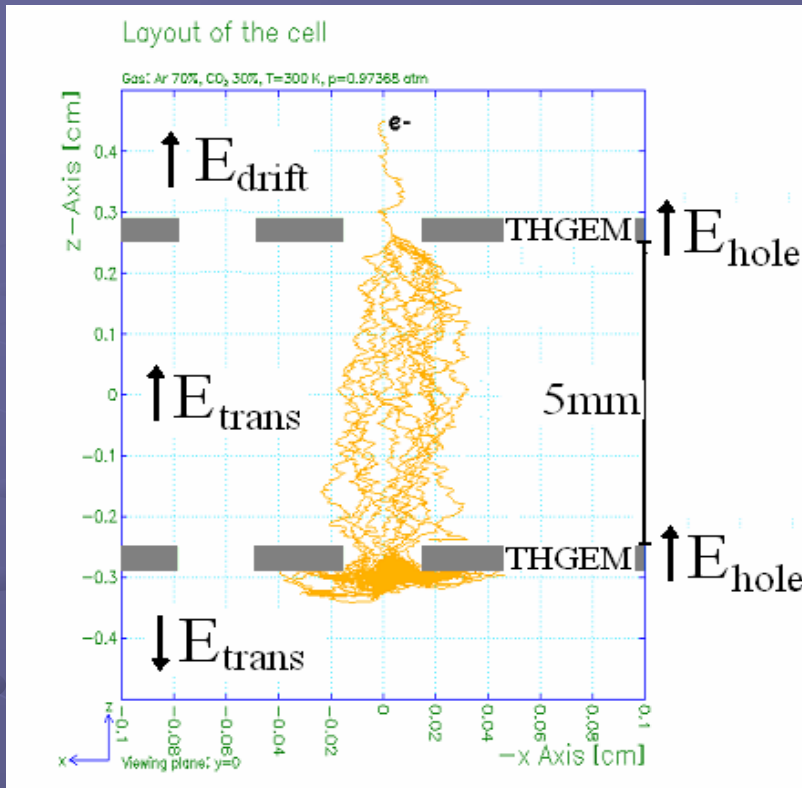
Vsg=100mV;

Tsg=35ns FWHM;

Типичное энергетическое разрешение, достигнутое на Fe<sup>55</sup> ~ 20%, (из разных источников)



# Каскадное включение GEM

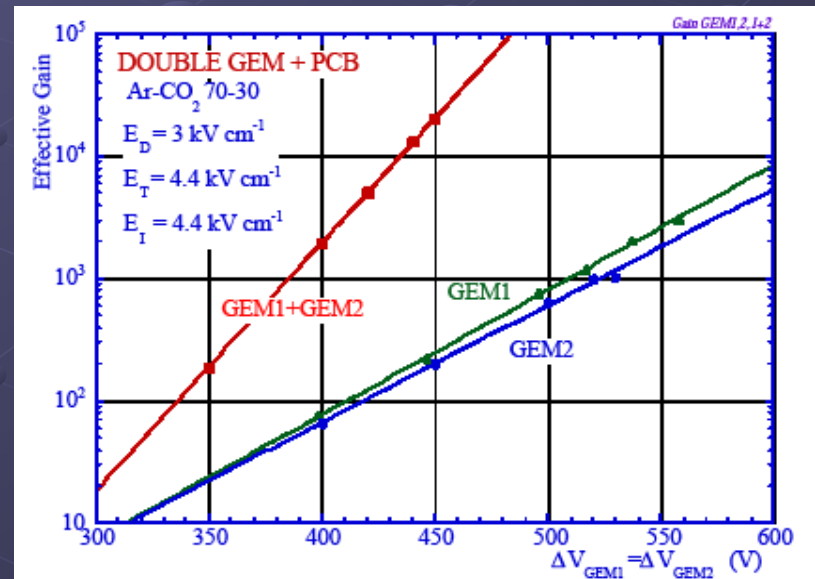


*GARFIELD simulation of the avalanche process in a double- THGEM #9 detector, in atmospheric pressure Ar/CO<sub>2</sub>(70:30); with  $\Delta V_{THGEM}=1350$  V, the multiplication factor of each THGEM is  $\sim 30$ , resulting in a total gain of  $\sim 900$ .*

Два GEM в каскаде – независимы. Диффузия электронов достаточна, чтобы пренебречь структурой отверстий для тонкого(стандартного GEM) (1)

Способность GEM работать в каскадной конфигурации является его главным преимуществом перед другими газовыми детекторами.

Одной из важнейших характеристик трековых детекторов на основе стандартных GEM является неустойчивость к пробоям в интенсивных пучках частиц. Именно неустойчивость однокаскадных стандартных GEM к пробоям, вызванным прохождением сильно ионизирующих частиц – таких, как альфа-частицы и фрагменты ядер, сделал их применение в физике высоких энергий -проблемным [28]. Выход состоит в каскадном включении.



# Физические эффекты в GEM

Основные физические эффекты:

- 1) Обратное рассеяние фотоэлектронов на фотокатод в газе -приводит к уменьшению квантового выхода фотокатода по сравнению с вакуумом [17; 19];
- 2) Фотонная обратная связь на фотокатод вследствие сцинтилляций лавины в отверстиях GEM и пропорциональных сцинтилляций в дрейфовом промежутке, которая приводит к вторичным импульсам [17; 19];
- 3) Ионная обратная связь на фотокатод, вызывающая электронную эмиссию, которая приводит к вторичным импульсам и ограничивает, таким образом, максимальное усиление [17; 22; 24];
- 4) Ионный обратный ток на предыдущие GEM и на фотокатод [18; 21; 23; 25; 26], приводящий к зарядке диэлектрической поверхности отверстий GEM и поверхности фотокатода при больших плотностях анодного тока и, таким образом, к нестабильности усиления [17; 24; 27];
- 5) Ограничение пространственного развития лавины в отверстии GEM (так называемый «конфайнмент» лавины), приводящее к отсутствию оптических связей между отверстиями и к насыщению лавины при сравнительно умеренных усилениях [17; 24], что позволяет GEM работать в чистых благородных газах с высокими усилениями;
- 6) Расширение лавины из отверстия или внутри него при больших усилениях [17, 24], приводящее к уменьшению ионного обратного тока [21,22] и к ограничению на минимальное расстояние между GEM .
- 7) Можно сказать, что по разнообразию физических явлений, происходящих в каскадных GEM, им нет равных(28)

# Эффективность транспортировки электронов

ETE, (Electron Transfer Efficiency) - Вероятность попадания электрона из точки рождения в отверстие.

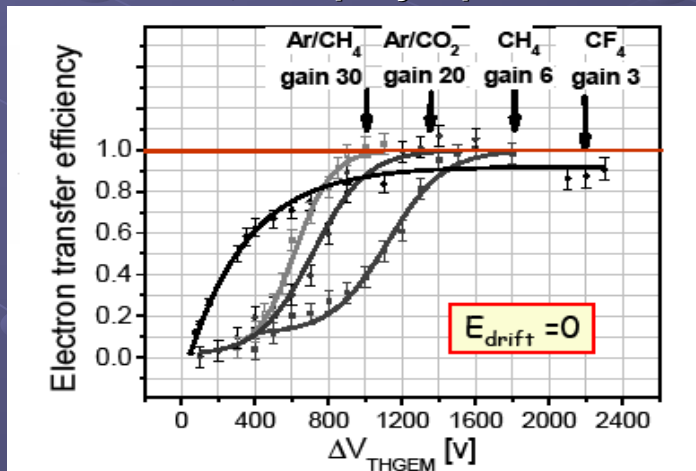
Для электрона, рожденного в газе путём ионизации это только вероятность перемещения. Для фотоэлектрона необходимо учесть вероятность выхода электрона из фотокатода, которая зависит от напряжения на его поверхности (9).

ETE в GEM увеличивается с ростом поля дрейфа достигая плато и для более высоких значений  $E_d$  превышает значение, определяемое его оптической прозрачностью  $t = \pi D^2/2\sqrt{3}P^2$ .

ETE зависит только от отношения полей за пределами и внутри каналов и геометрии THGEM и не зависит от внешних полей

ETE зависит от  $\Delta V_{THGEM}$  и для THGEM достигает 1 уже при небольших значениях Gain. Для стандартного GEM (ref PC), то она достигает 1 при значениях Gain=500 в Ar/CH<sub>4</sub> (95:5) и 5000 в чистом CF<sub>4</sub> [8].

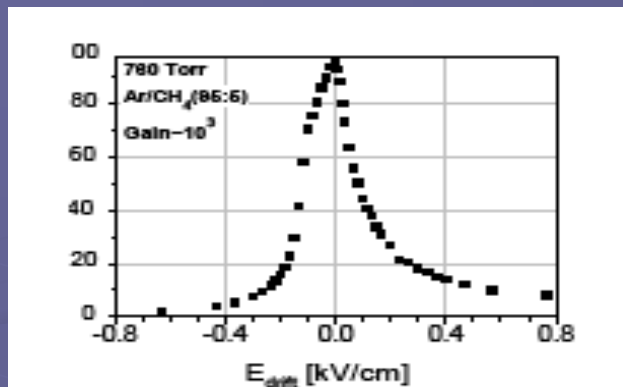
Это объясняется плотностью отверстий на приборе. На THGEM отверстия занимают 46% площади, а на GEM - 22%. Если еще учесть параметры диффузии электрона (~ 100μm), то понятно, что фокусировка в отверстия 300 мкм лучше, чем в отверстия 50-70 мкм(GEM).



THGEM:  $t=0.4$ ;  $d=0.3$ ;  $r=0.1$ ;  $P=0.7$  (мм);  
 $E_{drift}=0$  – включение с Ref PC (\*)

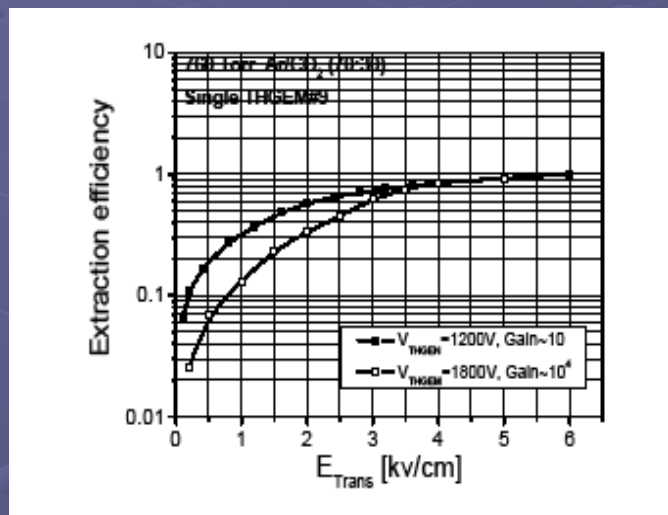
[\*] D. Mormann et al. : Operation principles and properties of the multi-GEM gaseous photomultiplier with Ref photocathode., Nucl. Instr. and Meth. A530(2004)258.

# Эффективность транспортировки электронов



Зависимость ЕТЕ от Ed ( для Ref PC ) .

Поле у верхней обкладки GEM Ed должно быть нулевым, чтобы достичь максимального сбора электронов в отверстии.



При работе в каскаде , заряд переносимый к следующему каскаду зависит не только от ЕТЕ, о котором речь шла выше, но и от эффективности экстракции электронов из первого умножителя в зазор между первым и вторым.

**Эффективность экстракции возрастает с ростом отношения  $E_{trans} / E_{GEM}$**

Экспериментальные данные показаны для Ar/CO<sub>2</sub> (70:30). Для Gain 10<sup>4</sup> 100% эффективность экстракции THGEM1 достигается при  $E_{trans} > 4kV/cm$  .(7)

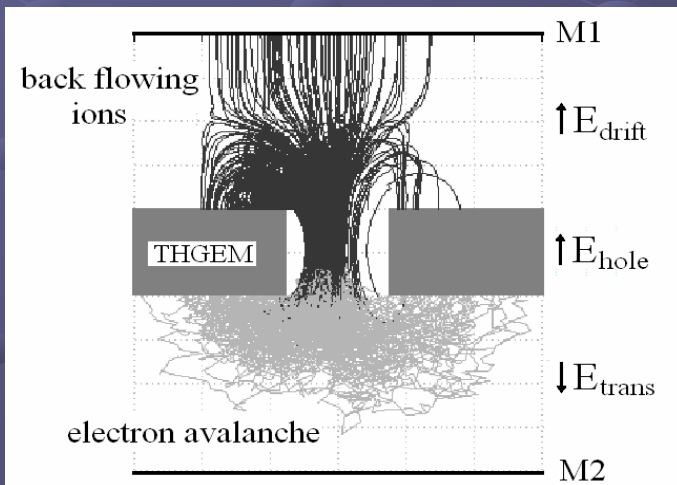
# Обратные связи в THGEM

1. Photon-feedback эффект (важно для GEM с фотокатодом).  
Каскадированные GEM за счет своей геометрии полностью блокируют photon-feedback эффект и позволяют работать в благородных газах, не смотря на высокий выход фотонов.
2. IBF (Ion Back Flow) -Фракция ионов, образовавшихся в финальной лавине, которые возвращаются и собираются на РС (или проходят через область первичной ионизации). Лавины ионов, движущихся в направлении обратном электронам вызывают эффект ограничения по усилению и вторичный эффект искажения поля. Кроме того это один из разрушающих факторов для фотокатода определяющих его старение. Столкновение ионов с фотокатодом вызывает также вторичную эмиссию электронов и вторичные лавины.

IBF – это отношение части ионов движущихся к фотокатоду ко всем иона лавины.

Обратный поток ионов к РС сильно ограничивает коэффициент усиления умножителя. В GEM в котором не предпринимались попытки блокирования лавины ионов усиление было  $< 100$ , и выросло до  $10^6$ , когда ионы блокировались специальными способами (12)

Обратный ток ионов также представляет серьезную проблему и для TPC, где они проникая в дрейфовый объем создают объемный заряд, зависящий от загрузки и вызывающий искажения рабочих электрических полей и и следовательно ухудшающий разрешение TPC (15). Чтобы избежать этой ситуации вместо проволочных камер используют каскадированные GEMs или Micromegas.



## Fractional Ion Feedback

$$FIF = \frac{I_{drift} - I_{primary}}{I_{anode}}$$

По IBF, можно сделаны следующие выводы (28):

1. Доля IBF практически не зависит от состава и давления газа.
2. Доля IBF растет почти линейно с дрейфовым полем. Это означает, что предпочтительнее работать с малыми дрейфовыми полями.
3. Доля IBF достаточно чувствительна к диаметру отверстий GEM; уменьшая диаметр можно существенно уменьшить IBF

# Ion back flow fraction (IBF)

Существуют различные способы подавления эффекта обратного движения ионов.

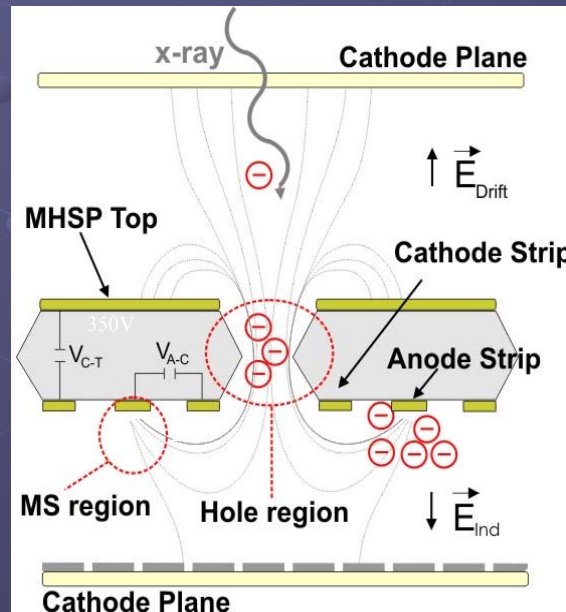
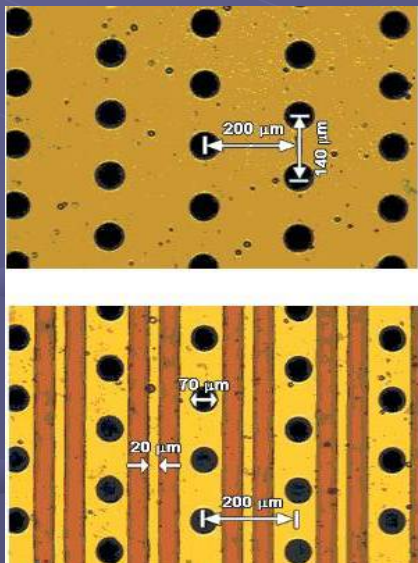
Используя много-каскадный GEM, хоть и нельзя полностью решить проблему обратного тока ионов, но можно существенно снизить фракцию обратных ионов  $\sim 8\%$

Еще более значительный эффект можно получить используя Micro-Hole and Strip Plates (MHSPs) (4)

Micro-Hole & Strip Plate (MHSP) (16) это также новые газовые умножители. MHSP сочетает характеристики GEM и MSGC (micro-strip gas counter).

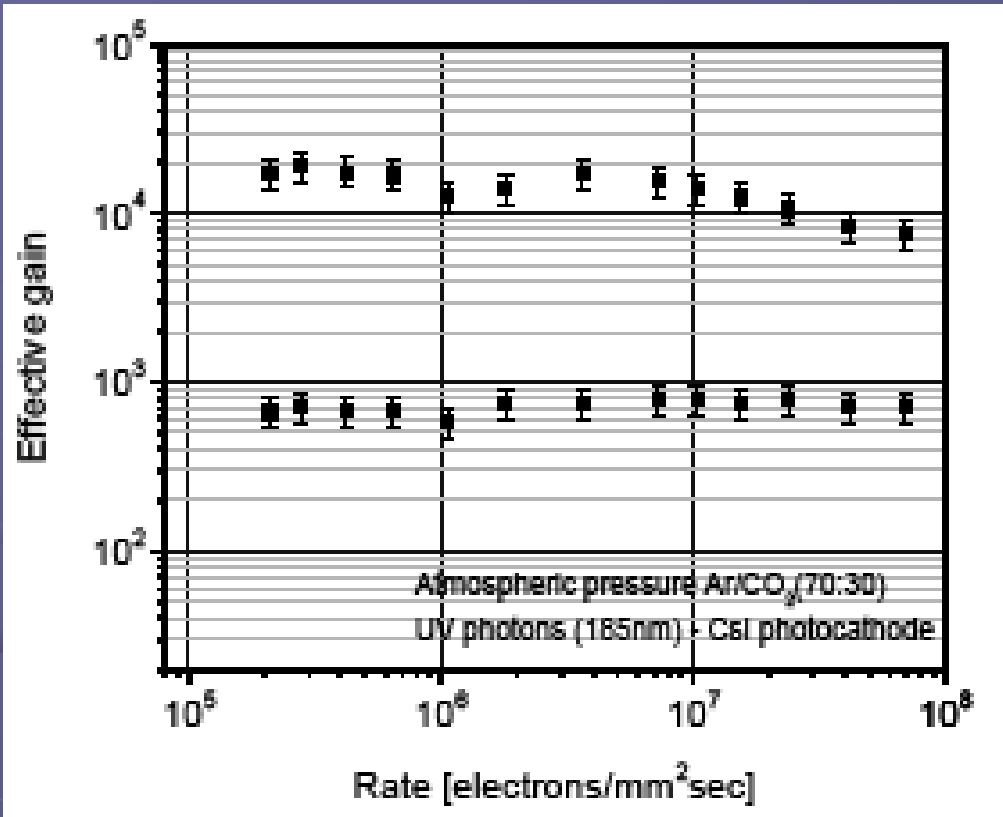
Он состоит из 2-х независимых усилителей заряда выполненных на одной плате. 1-й каскад работает как GEM, второй как MSGC-подобная структура выполнена на нижней стороне платы. Отверстия локализованы на катодных стрипах, а анодные расположены между ними. Поля сверху и снизу управляют транспортом заряда в отверстия и по направлению к аноду.

Финальный заряд собирается на анодных стрипах. В схеме каскадов из 3х GEM последний из которых MHSP, IBF составлял  $\sim 0.03$ .(12)



Из других эффективных способов борьбы с обратным движением ионов следует отметить - Электрический и фотоэлектрический Gates) (12,13,15)

# Зависимость амплитуды импульса от загрузки.

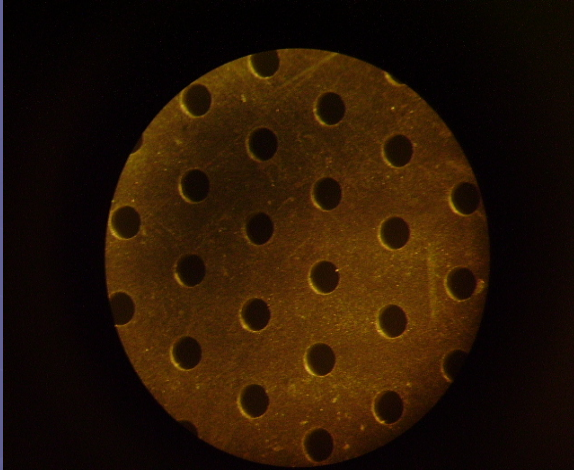


Измерения проводились на UV фотонах с  
одиночным (Gain=10<sup>3</sup>) и двойным в каскаде  
(Gain=10<sup>4</sup>) THGEM .

Одиночный THGEM – плато до  $8 \times 10^7$  эл. мм<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>

Двойной THGEM – плато до  $10^7$  эл. мм<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>

# RETGEM



## New micropatternspark-protected gaseous detectors and their applications to High Energy Physics and Medicine (CERN)

### Collaborators:

T. Franck and XCounter team, Stockholm

C. Icoabeaus, M. Danielsson and KTH –Stockholm team

P. Fonte, LIP, Coimbra, Portugal

J.-M. Bidault, O. Zanet, P. Gally, Pole University, Paris

P. Pietropalo, L. Periale, P. Pichhi, CERN-CARUS

Di Mauro, P. Martinengo, E. Nappi, ALICE-HMPD group

Ecole des Mines, St. Etienne

I. Rodionov, Reagent, Moscow

R. De Oliveira, CERN Workshop

**В 2009 году в ПИЯФ были изготовлены образцы RETGEM и проведены первые исследования, показавшие их принципиальную работоспособность. На этом работы были пока остановлены.**

THGEM с резистивными обкладками, имеющими поверхностное сопротивление от  $10^6$  до  $10^{11}$  Ом\*см



# Итоговые свойства THGEM

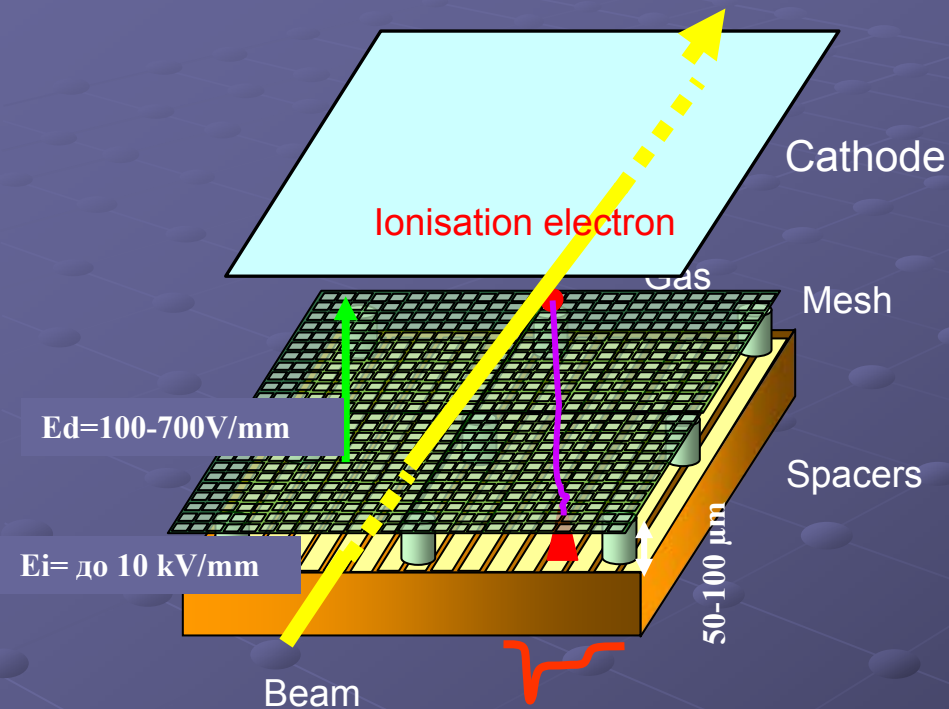
- В THGEM достигается больший коэффициент усиления.
- THGEM благодаря большим отверстиям уменьшают обратную связь по фотонам и обеспечивают эффективный транспорт электронов. С большими отверстиями легче осуществлять фокусировку.
- THGEM свободен от искр в широком диапазоне газов, включая CH<sub>4</sub> and CF<sub>4</sub>, за счет большей толщины по сравнению с стандартным GEM.
- Быстрое развитие лавины обеспечивает быстрый сигнал и Counting-rate в диапазоне ~10MHz/mm<sup>2</sup> при усилении 10<sup>4</sup>.
- Макс напряжения перед искрой на THGEM не масштабируются по сравнению с стандартным (они меньше по сравнению с GEM), но благодаря большим размерам, в особенности большей толщине, значительно большее усиление может быть достигнуто.
- В отличие от GEM с ST PC в которых Ed должно поддерживаться умеренным чтобы избежать отклонения по направлению к металлической поверхности GEM, большие отверстия позволяют работать с очень высокими значениями Ed с хорошей фокусировкой ф-электронов даже при полях 5 kV/cm и G=10<sup>4</sup>. Это важно для эффективной экстракции ф-электронов или вторичном индуцировании электронов особенно в благородных газах где обратное рассеяние электронов в конвертор –велико при низких полях.
- THGEM имеет большую эффективность транспортировки электронов и (поразительно) большую эффективность транспортировки ионов, чем стандартный GEM.
- В каскадированных GEM поле диполя (отверстия) отклоняет электроны к нижней обкладке, но с сильным Etrans электроны передаются в следующий каскад. В стандартном GEM ситуация плохая: когда Etrans велико или мало электроны или не фокусируются или не извлекаются (из-за толщины прибора)(6).
- Лавина развивается не в самой отверсти, а чуть ниже и более подвержена воздействию внешних полей.

**Даже при массовом производстве стандартных GEM и их дешевизне (гипотетически), THGEM останется востребованным из-за уникальности его некоторых характеристик.**

# Micromegas

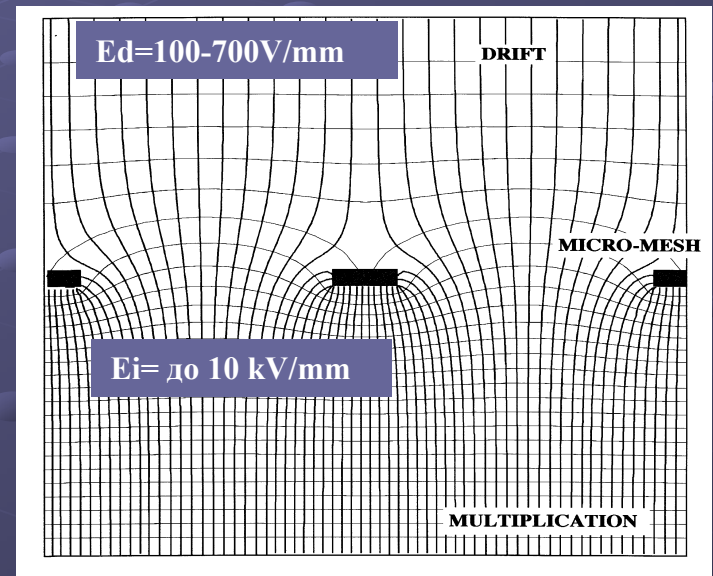
(В ПИЯФ были изготовлены образцы в рамках СВМ проекта)

Micromegas : MICROMesh GAS detector



• ETE – близко к 1;

• маленький зазор обеспечивает быстрый сбор ионов.



Используется целый ряд промышленных сеток с толщиной нити  $\sim 10 \mu\text{m}$  и размером ячейки  $\sim 40 \times 40 \mu\text{m}^2$ .

**Это тканые материалы и наиболее дешёвые.**

Сетки также изготавливаются из металлической фольги путем химического травления, путем сварки нитей или депозитным способом.

# Micromegas

Tests on a 100  $\mu\text{m}$  gap Bulk detector at GSI  
... 2008, october 19th.

Mesh Voltage : 380 V

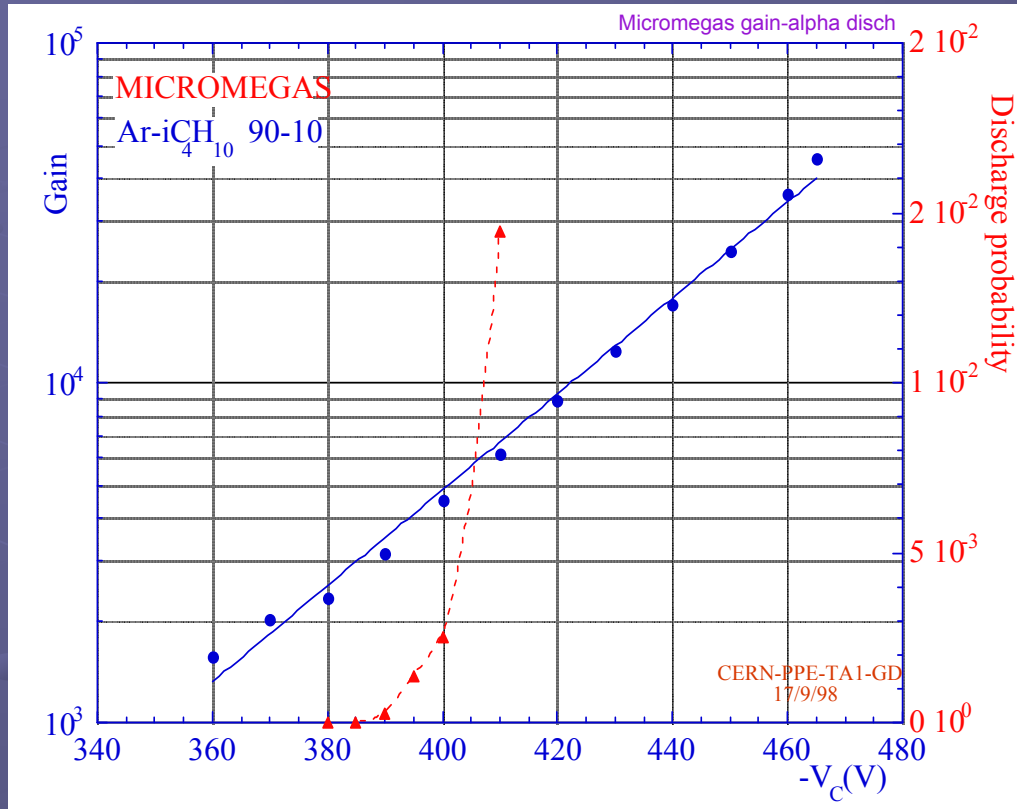
Drift Voltage : 2000V



*Philippe Legou, CEA Saclay – France*

*Krakow, February 2010 2nd*

# Micromegas



A. Bressan et al, Nucl. Instrum. and Meth. A  
424 (1998) 321

Усиление ограничено  
разрядами.

Возможно каскадирование  
с GEM

Типичное энергетическое  
разрешение, достигнутое на  
Fe55 ~ 11%, (из разных  
источников)

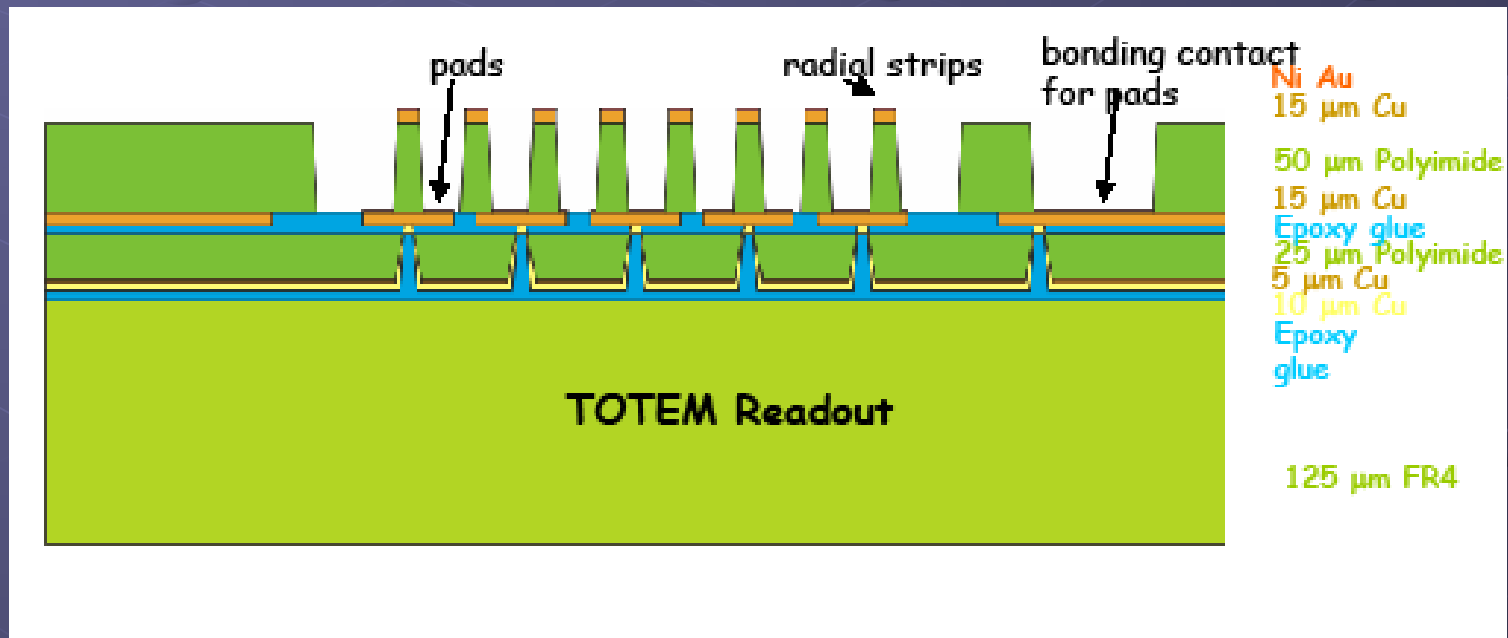
Результаты полученные на пучках SPS (CERN) и ПИЯФ по материалам испытаний THGEM и MICROMEGAS, изготовленных в ПИЯФ, будут представлены на одном из последующих семинаров. Продолжение следует...

# GEM, MICROMEKAS. 2D read-out

## Небольшая иллюстрация:

Технология исполнения это технология ПП для детекторов и пред-детекторной электроники имеет свою специфику, в сравнении с технологией исполнения электронных ПП.

«Глухие» отверстия сочетаются с «глухим фрезерованием» при многослойности и прецизионности изготовления. Здесь необходима техника лазерного структурирования.



# Выводы

Технология развития газовых детекторов в ПИЯФ имеет перспективу в связи с вводом ПИК, как эффективных детекторов заряженных частиц, гамма и УФ излучения и нейтронов, работающих в широком диапазоне давлений и температур.

Производство в настоящее время испытывает трудности по следующим позициям:

- Несовершенство процессов фотолитографии (необходим новый фото-плоттер, фото-экспонирующая установка, фотолаборатория, чистые помещения для работы).
- Нехватка оборудования, связанного с лазерной обработкой материалов на основе УФ лазеров (сверловка, структурирование поверхности).
- Нехватка кадров- эта проблема первостепенная.

Наши ближайшие планы :

- Монолитный THGEM (продолжение работ);
- Технология травления Каптона;
- Micro-Grove Detector (MGD)

## Список статей

1. CHARGE AMPLIFICATION AND TRANSFER PROCESSES IN THE GAS ELECTRON MULTIPLIER S. Bachmann, A. Bressan, L. Ropelewski and F. Sauli (CERN, Geneva, Switzerland) A. Sharma (GSI, Darmstadt, Germany) D. Mormann (Inst. Exp. Kernphysik, Karlsruhe, Germany), CERN-EP/99-48 12.04.1999
2. J. Benlloch, A. Bressan, M. Capeans, M. Gruwe, M. Hoch, J.C. Labbe, A. Placci, L. Ropelewski, F. Sauli, Nucl. Instrum. and Meth. A 419 (1998) 410.
3. A. Bondar, A. Buzulutskov, L. Shekhtman, Vasiljev, 478 (2002) 225 Nucl. Instr. and Meth. A **496** (2003) 325.
4. J.F.C.A. Veloso, F.D. Amaro, J.M. Maia, A.V.Lyashenko, A. Breskin, R. Chechik, J.M.F. dosSantos, O. Bouianov, M. Bouianov, Nucl. Instr. andMeth. A 548 (2005) 375, and references therein.
5. Electric and Photoelectric Gates for ion backflow suppression in multi-GEM structures  
A. Buzulutskov \*, A. Bondar, E-print [www.arxiv.org/physics/0606241](http://www.arxiv.org/physics/0606241)  
Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia
6. Advances in Thick GEM-like gaseous electron multipliers. Part I: atmospheric pressure operation  
C. Shalem, R. Chechik, A. Breskin and K. Michaeli Dec 21, 2005  
Dept. of Particle Physics The Weizmann Institute of Science, 76100 Rehovot, Israel.
7. GARFIELD by R.Veenhof, Nucl. Instr. and Meth. A419(1998)726, Version 6.33, Nov. 1999
8. R&D of a novel gas electron multiplier – the THGEM  
Advised by Prof. Amos Breskin, Dr. Rachel Chechik, March 2005, Submitted to the Scientific Council of the Weizmann Institute of Science Rehovot, Israel
9. A. Breskin, et al., GEM photomultiplier operation in CF<sub>4</sub>, Nucl. Instr. and Meth A 483 (2002) 670.
10. Schmitz J. Preprint IKHEF-H/91-14. Amsterdam, 1991.
11. Микроструктурные газовые координатные детекторы, ФЭЧиАЯ,2002 т.33 в. 5, М.Д. Шафранов, ОИЯИ
12. Advances in ion back-flow reduction in cascaded gaseous electron multipliers incorporating R-MHSP elements.  
A. V. Lyashenko\*, A. Breskina, R. Chechika, J. F. C. A. Veloso, J. M. F. Dos Santos, and F. D. Amaroc
13. A. Bondar et al., Study of ion feedback in multi-GEM structures, Nucl. Instr. and Meth. A **496** (2003) 325.
14. S. Bachmann et al., Charge amplification and transfer processes in the gas electron multiplier, Nucl. Instr. and Meth. A **438** (1999) 376.
15. P. Nemethy et al., Gated time projection chamber, Nucl. Instr. and Meth. A **212** (1983) 273.
16. Noble-gas operation of Micro-Hole and Strip Plate electron multipliers at atmospheric-to-high pressures  
F. Amaro, J.F.C.A. Veloso, J.M. Maia, A. Breskin, R. Chechik, J.M.F. dos Santos
17. Buzulutskov A., Breskin A., Chechik R. et al. The GEM photomultiplier operated with noble gas mixtures // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. Vol. A443
18. Bachmann S., Bressan A., Ropelewski L. et al. Charge amplification and transfer processes in the gas electron multiplier // Nucl. Instrum. and Methods. 1999. Vol. A438.
19. Breskin A., Buzulutskov A., Chechik R. GEM photomultiplier operation in CF<sub>4</sub> // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A483
20. Alfonsi M., Bencivenni G., Simone P. de et al. High-rate particle triggering with triple-GEM detector // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. Vol. A518
21. Bondar A., Buzulutskov A., Shekhtman L., Vasiljev A. Study of ion feedback in multi-GEM structures // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. Vol. A496.
22. Buzulutskov A. Physics of multi-GEM structures // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A494
23. Sauli F., Kappler S., Ropelewski L. Electron collection and ion feedback in GEM-based detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. Vol. 50.
24. Buzulutskov A., Breskin A., Chechik R. et al. Further studies of the GEM photomultiplier // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. Vol. A442. P. 68–73
25. Breskin A., Buzulutskov A., Chechik R. et al. Sealed GEM photomultiplier with a CsI photocathode: ion feedback and ageing // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A478.
26. Mormann D., Breskin A., Chechik R., Bloch D. Evaluation and reduction of ion back-flow in multi-GEM detectors // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. Vol. A516
27. Bressan A., Buzulutskov A., Ropelewski L. et al. High gain operation of GEM in pure argon // Nucl. Instrum. and Methods. 1999. Vol. A423.
28. А. Ф. Бузулуцков, Физические основы работы каскадных газовых электронных умножителей. Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы УДК 539.1.074.23; 537.563 2008
29. DEVELOPMENT OF MICRO-PATTERN GASEOUS DETECTORS – GEM, David Heereman von Zuydtwyck  
Munchen, den 23.11.2010