

Лабораторная работа

Газовые электронные умножители

Цель: исследование спектрометрических характеристик трехкаскадного газового электронного умножителя.

Введение

Интерес к детекторам на основе каскадных газовых электронных умножителей (ГЭУ) постоянно растет. В частности, каскадные ГЭУ находят применение в трековых детекторах, быстрых детекторах для триггерных систем, торцевых детекторах для время-проекционных камер, черенковских детекторах, нейтронных детекторах, детекторах синхротронного излучения, газовых фотодетекторах. Криогенные лавинные детекторы на основе каскадных ГЭУ предполагается применить для регистрации нейтрино, темной материи и когерентного рассеяния нейтрино на ядрах.

В Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ планируется использование данного вида детекторов в экспериментах по научной программе проекта NICA (международные эксперименты «Многоцелевой детектор для изучения плотной барионной материи» (MPD) и «Барионная материя на нуклотроне» (BM@N)).

Устройство ГЭУ

Газовый электронный умножитель (ГЭУ), или Gas Electron Multiplier (GEM) был изобретен Ф. Саули в 1996 г. В ГЭУ используется газовое усиление в отверстиях. Газовый электронный умножитель представляет собой тонкую диэлектрическую каптоновую* пленку, толщиной ~20-50 мкм, покрытую с обеих сторон медной фольгой толщиной ~5-20 мкм, с регулярной структурой отверстий диаметром от нескольких десятком до нескольких сотен мкм. (Каптон – это полиамидная пленка. Каптон остается стабильным в широком диапазоне температур. У него хорошие

диэлектрические свойства, низкий уровень дегазации. Он доступен в виде тонких листов.) На Рис.1 представлено увеличенное изображение среза такой пленки.

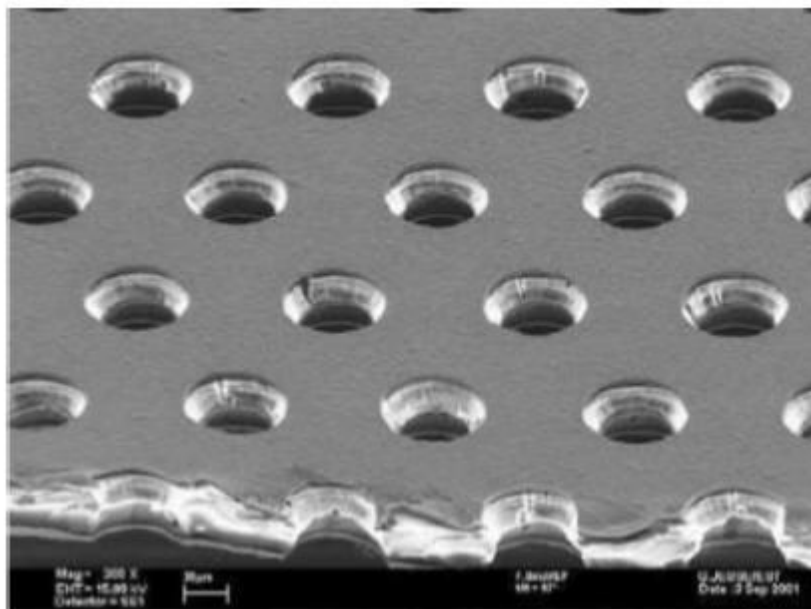


Рис.1 Разрез основного элемента ГЭУ - полиимидной пленки с медным покрытием

Отверстия имеют форму двойного конуса и расположены друг от друга на расстоянии от сотни до тысячи мкм. При подаче разности потенциалов между металлическими электродами в отверстиях образуется сильное электрическое поле – порядка десятков кВ/см. Типичная картина электрического поля показана на рис. 2. Первичные электроны, рожденные излучением в газовом промежутке перед ГЭУ, дрейфуют вдоль силовых линий и фокусируются в отверстия, в которых под действием сильного электрического поля развиваются электронные лавины. Таким образом, каждое отверстие представляет собой независимый пропорциональный счетчик.

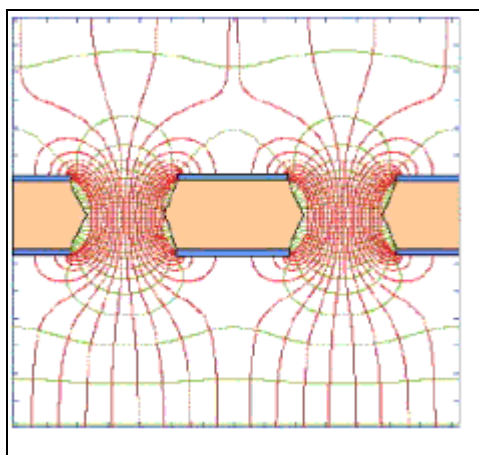


Рис. 2. Электрическое поле в ГЭУ.

На рис. 3. показана схема однокаскадного ГЭУ. В верхней части рисунка изображен катод, за ним следует дрейфовый промежуток, далее – ГЭУ. После ГЭУ возникшие в нем электронные лавины проходят индукционный промежуток и попадают на секционированный анод.

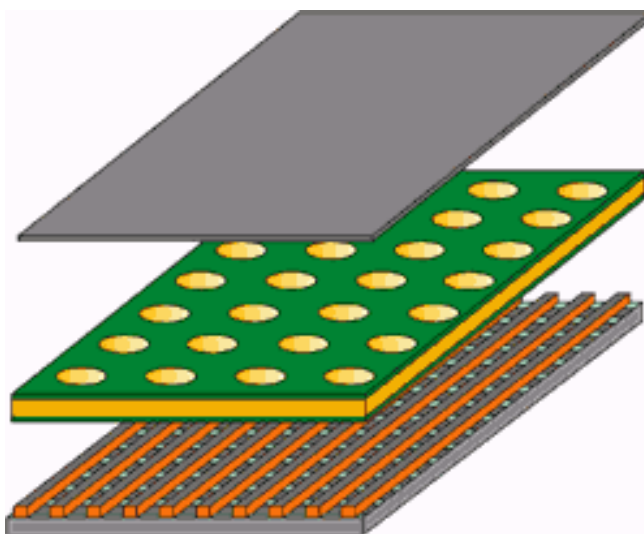


Рис. 3. Схема однокаскадного ГЭУ

Характерными особенностями ГЭУ являются:

- Быстрый сигнал (см.Рис 4), образуемый дрейфом электронов в индукционном промежутке, отсутствие ионных хвостов, возможность работы в пучках частиц интенсивностью $\sim 10^4$ Гц/мм²

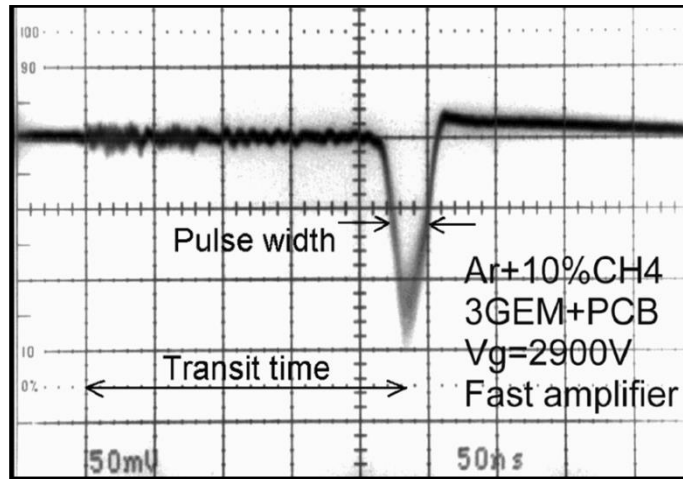


Рис.4 Характерный сигнал с ГЭУ

- Высокое пространственное разрешение – до 40 мкм (RMS) – см. Рис.5

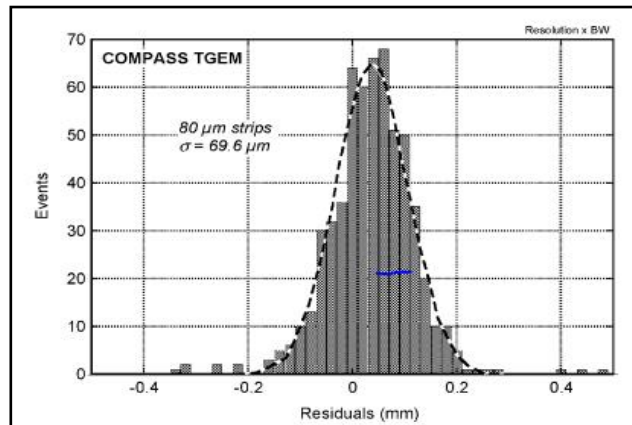


Рис.5 Пространственное разрешение ГЭУ (эксперимент COMPASS, CERN)

- Возможность двухкоординатного съема информации см.Рис.6

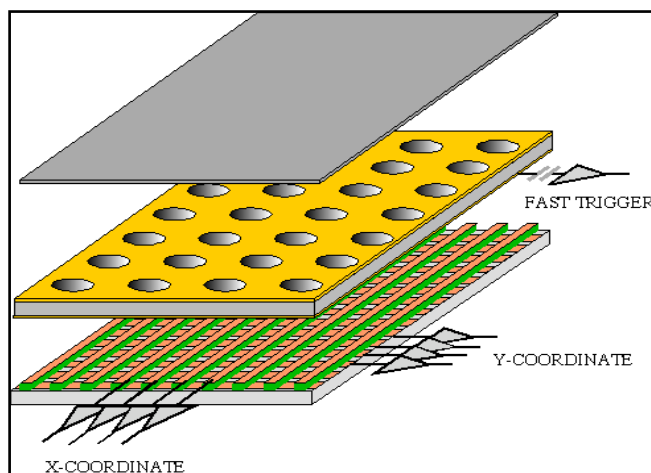


Рис.6 Иллюстрация возможности двухкоординатного съема информации

При исследованиях характеристик газовых детекторов на основе таких пленок были обнаружены проблемы - при коэффициентах размножения электронов более 10^3 попадание в детектор частиц с высокой удельной ионизацией (например, альфа частицы) приводило к пробоям, которые с высокой вероятностью вызывали образование проводящих дорожек в отверстиях пленок, что приводило к появлению высоких утечек по высокому напряжению.

Для устойчивости детекторов к пробоям на больших напряжениях было решено использовать каскады усиления. Данное решение позволило снизить рабочее напряжение на каждом ГЭУ. Наибольшее распространение получили трехкаскадные ГЭУ рис. 7.

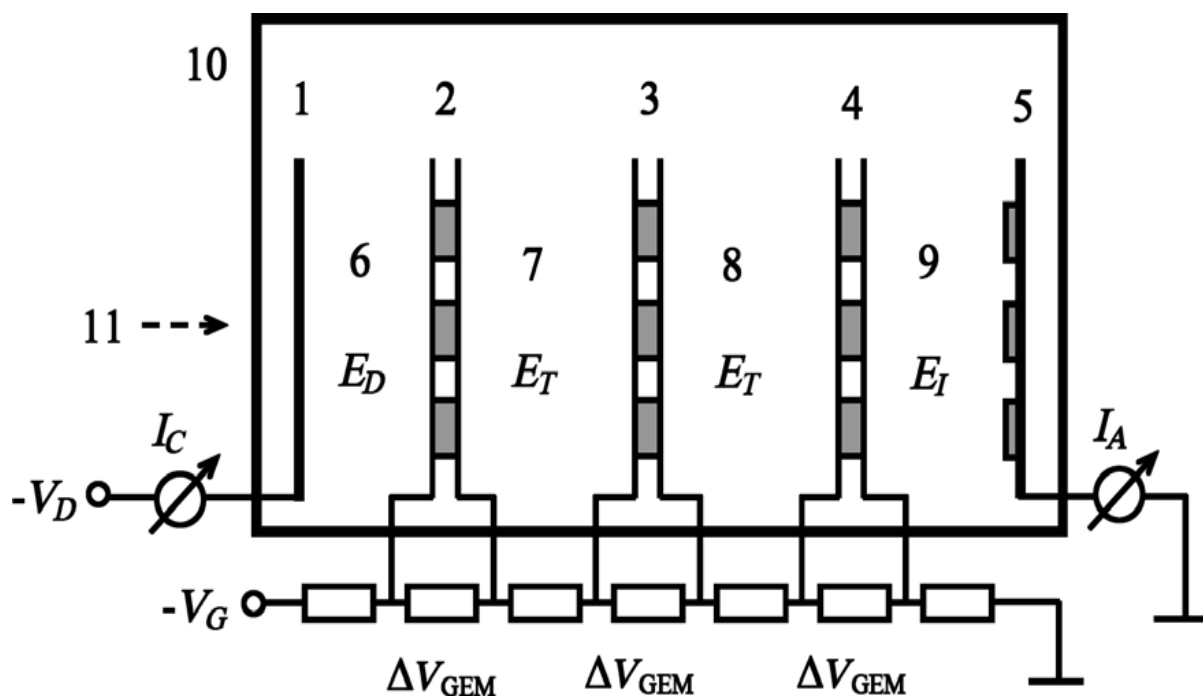


Рис. 7. Типичная схема трехкаскадного ГЭУ [2]: 1 – катод; 2 – первый ГЭУ; 3 – второй ГЭУ; 4 – третий ГЭУ; 5 – анод (считывающий электрод); 6 – дрейфовый промежуток; 7, 8 – транспортные промежутки; 9 – индукционный промежуток; 10 – корпус детектора; 11 – излучение; ΔV_{GEM} – напряжение на одном ГЭУ; E_D – дрейфовое поле; E_T – транспортное поле; E_I – индукционное поле; V_G – напряжение на делителе; V_D – напряжение на катоде; I_C – катодный ток; I_A – анодный ток

Работает трехкаскадный ГЭУ следующим образом: излучение входит через катод (1) в дрейфовый промежуток (6) и производит там ионизацию газа. Освобожденные при этом электроны попадают в первый ГЭУ (2) где и далее во втором (3) и третьем (4) ГЭУ их количество размножается. Вышедшие из последнего ГЭУ электроны направляются электрическим полем в сторону анода (5) и индуцируют на нем электрический заряд. Анод предназначен только для сбора заряда – усиления заряда после 3 ГЭУ не происходит. Типичная длительность сигнала, которая получается на аноде ГЭУ – 30-50 нс. Рис.7 демонстрирует уникальную возможность работы ГЭУ в каскадной конфигурации, позволяющая достичь газового усиления до 10^6

Уникальной возможностью ГЭУ является возможность работы с газовыми смесями, состав которых может широко меняться, при этом ГЭУ способны работать с чистыми благородными газами.

Важным параметром ГЭУ является коэффициент газоусиления M_{max} .

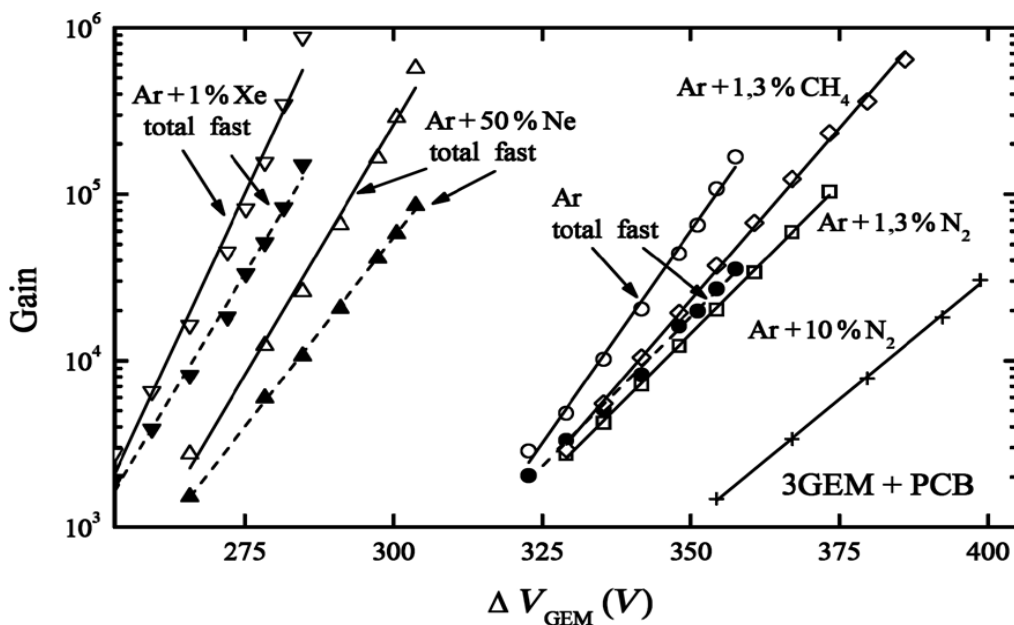


Рис. 8. Усиление трехкаскадного ГЭУ в зависимости от напряжения на одном ГЭУ в смесях на основе Ar, включая смеси чистых благородных газов, при атмосферном давлении

На рис.8 показан график зависимости коэффициента газоусиления трехкаскадного GEM от приложенного напряжения для разных смесей с аргоном. Как мы видим, меняя концентрацию того или иного газа в составе можно добиваться различных необходимых коэффициентов усиления для различных значений напряжения.

Пример использования ГЭУ в современном эксперименте в физике высоких энергий – эксперимент BM&N – ОИЯИ, Дубна

Схема расположения экспериментальных установок на нуклотроне ОИЯИ



ЭКСПЕРИМЕНТ BM@N

Эксперимент **BM@N** является первым экспериментом в составе комплекса **NICA** по изучению свойств барионной материи в экстремальных условиях. Полномасштабный тестовый физический запуск установки состоялся весной 2018 г.

Установка BM@N включает в себя:

- 1) Детекторы для формирования триггеров T0, T1 и мониторы пучка;
- 2) Центральный трекер (Si + GEM) внутри анализирующего магнита для восстановления взаимодействий AA;
- 3) Внешний трекер (CSC, DCH) за магнитом для соединения центральных треков с TOF-детекторами;
- 4) Времяпролетная система (ToF) на основе детекторов mRPC (ToF 400 и ToF 700) и TO для идентификации адронов и легких ядер;
- 5) Калориметр ZDC для измерения центральности столкновений AA;
- 6) Электромагнитный калориметр для γ , e^+ и e^- .

Параметры пучка НУКЛОТРОНА:

- ядра от **p** до **Au**
- энергия от **1** до **6** ГэВ/н
- интенсивность до **10⁷**/сек Au

Сеанс весной 2018. Три пучка: C (4 ГэВ/н), Ar (5.2 ГэВ/н), Kr (2.8 ГэВ/н)

Программа:

- Неупругие реакции Ar(Kr) + мишень \rightarrow X; мишени: Al, Cu, Sn, Pb;
- Рождение гиперонов в центральном трекаре;
- Идентификация заряженных частиц и фрагментов ядер в ToF;
- Идентификация гамма-квантов в ECal

II. Описание лабораторной установки

- ГЭУ 10x10 см.

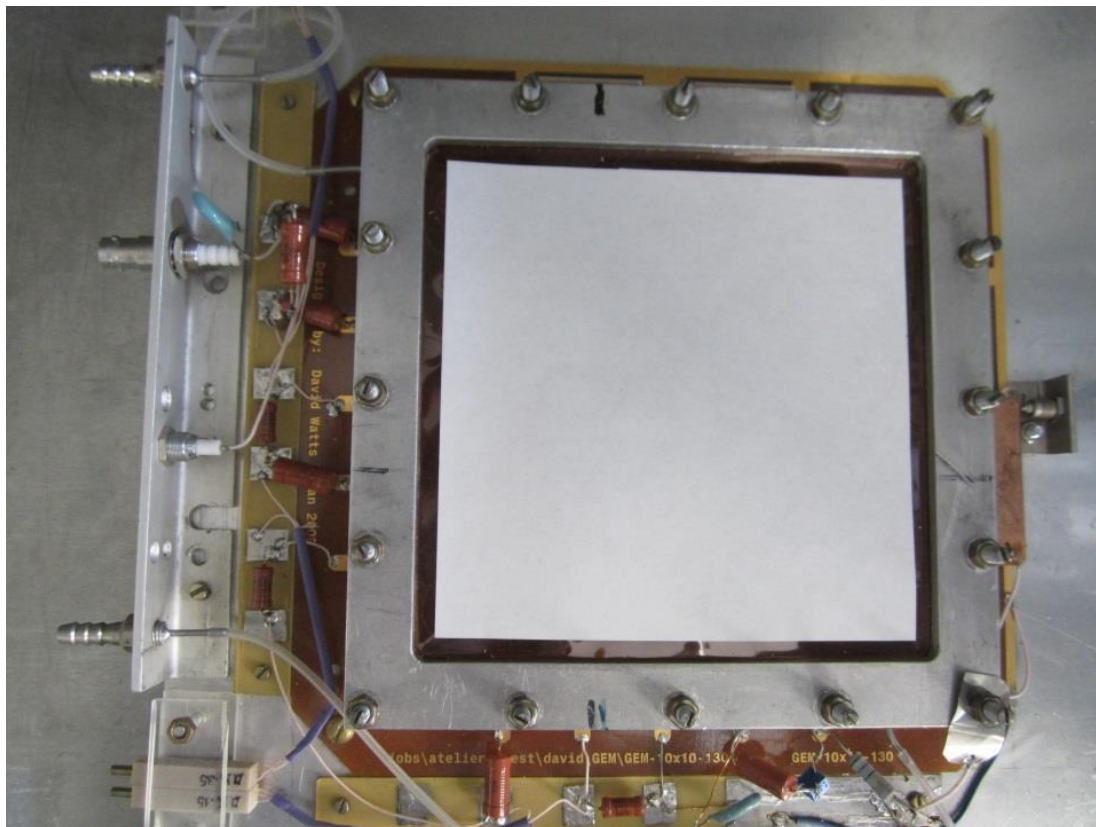


Рис.9. Трехкаскадный ГЭУ, позволяющий работать при коэффициенте газоусиления порядка 10^6

Характеристики ГЭУ:

Внешние размеры: 230x230x30 мм.

Объем газа: 157x157x12 мм. ($\sim 300 \text{ мм}^3$)

Считывание: есть возможность двухкоординатного считывания, в лабораторной работе каналы объединены и подключены к одному предусилителю

Схема ГЭУ представлена на рис. 10.

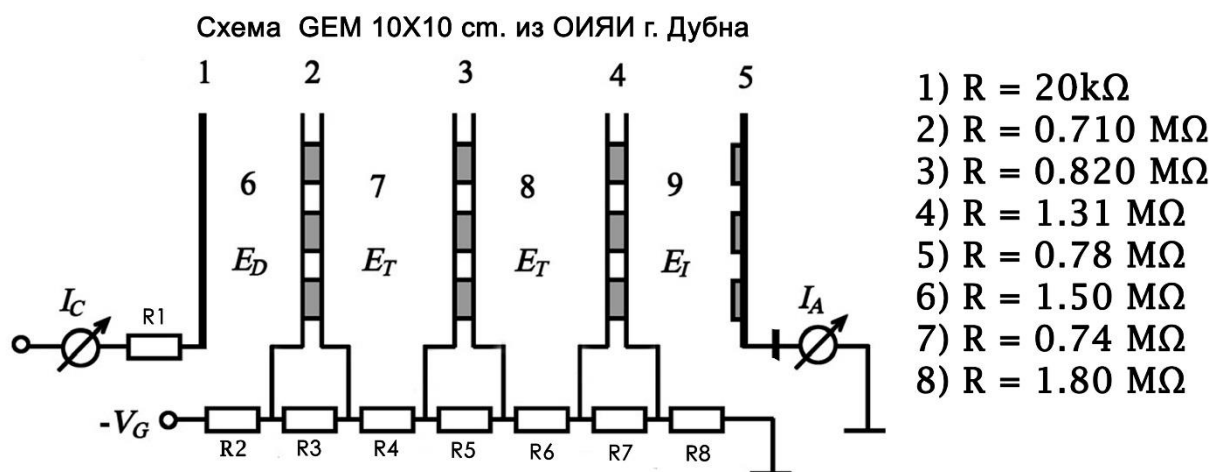


Рис.10 Электрическая схема трехкаскадного ГЭУ, позволяющего работать при коэффициенте газоусиления порядка 10^6

- Источники ионизации.

В качестве источника ионизации в исследовании характеристик ГЭУ в лабораторно работе могут быть использованы:

1. Рентгеновская трубка АМРТЕК Mini - X (Рис. 11), со следующими характеристиками:



Рис.11 Рентгеновская трубка АМРТЕК

Выходная мощность: 4Вт;
Напряжение на трубке: до 50кВ;
Ток на трубке: до 80 мкА;
Катод: Серебро (Ag);
Выходное окно: Бериллий (Be).

На Рис.12 представлен спектр излучения трубки при напряжении 50 кВ

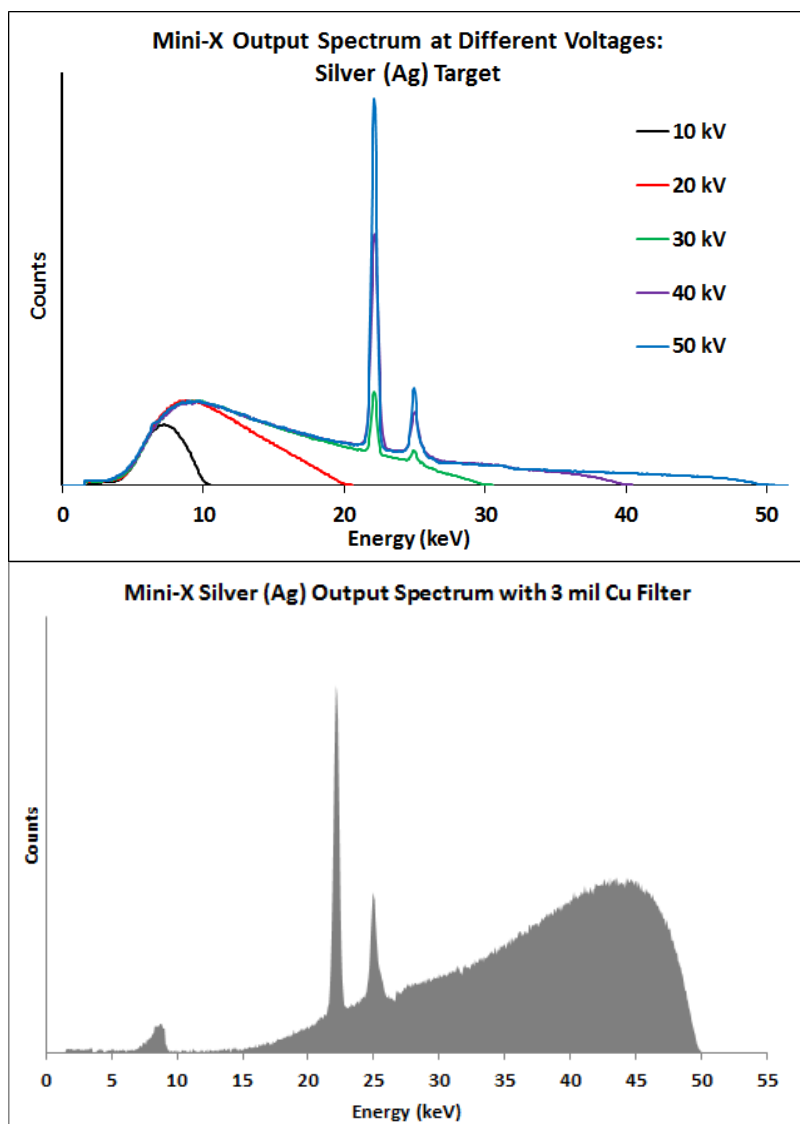


Рис.12 Спектр излучения трубки АМРТЕК при напряжении 50 кВ

- **2. Рентгеновская трубка Oxford Instruments с медным фильтром,**



Рис.13. Рентгеновская трубка Oxford Instruments. На коллиматоре виден медный фильтр

Характеристики рентгеновской трубки Oxford Instruments

Напряжение на трубке: до 50кВ;

Ток на трубке: до 100 мкА;

Катод: Медь (Cu);

Выходное окно: Бериллий (Be).

3. Гамма-источник ^{55}Fe , имеющий в своем спектре излучения монолинию с энергией гамма-квантов 5,98 кэВ

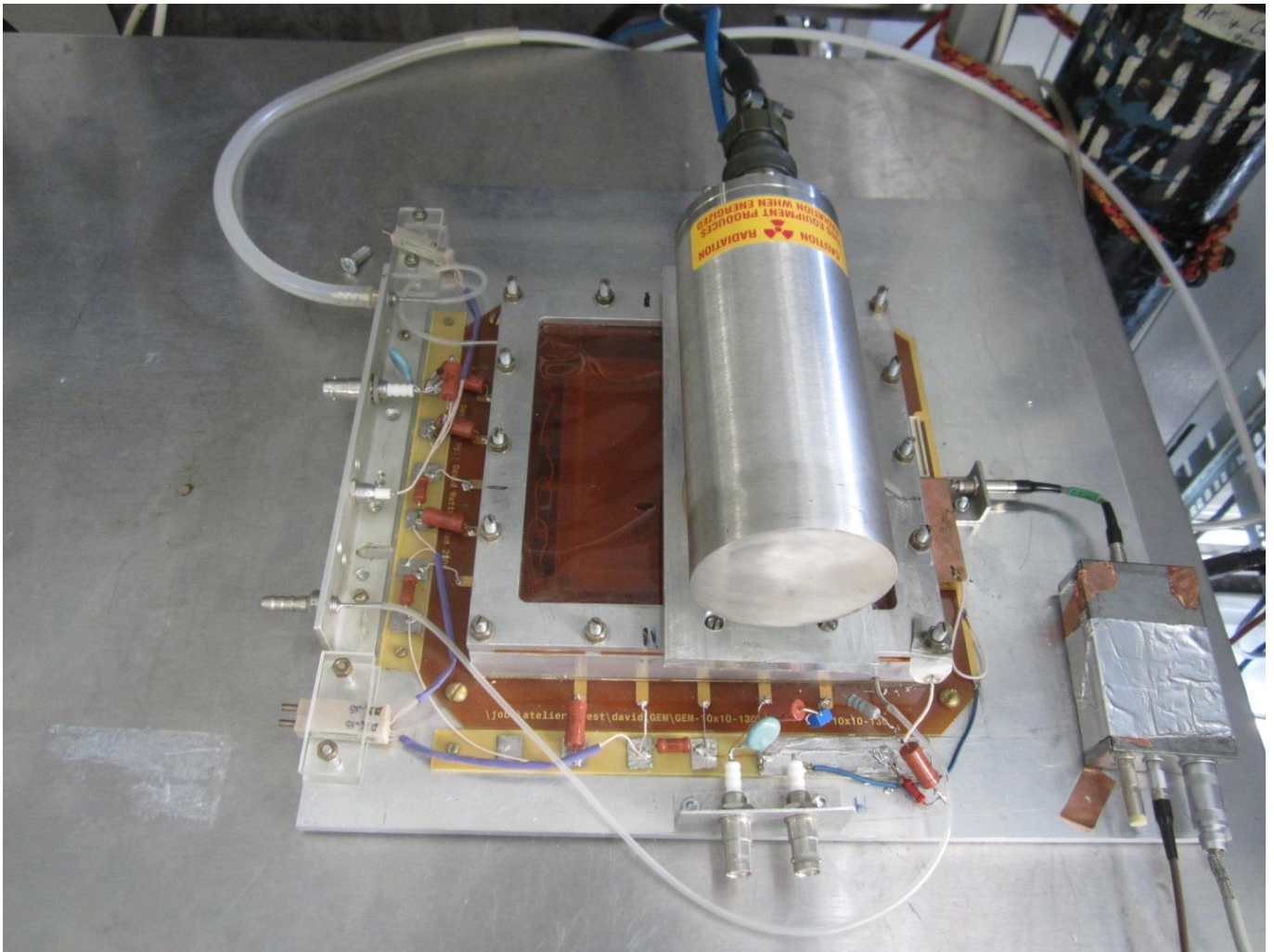


Рис.14 Трехкаскадный газовый усилитель с рентгеновской трубкой и предусилителем

- Газовая система



Рис.15. Газовая система, используемая в лабораторной работе

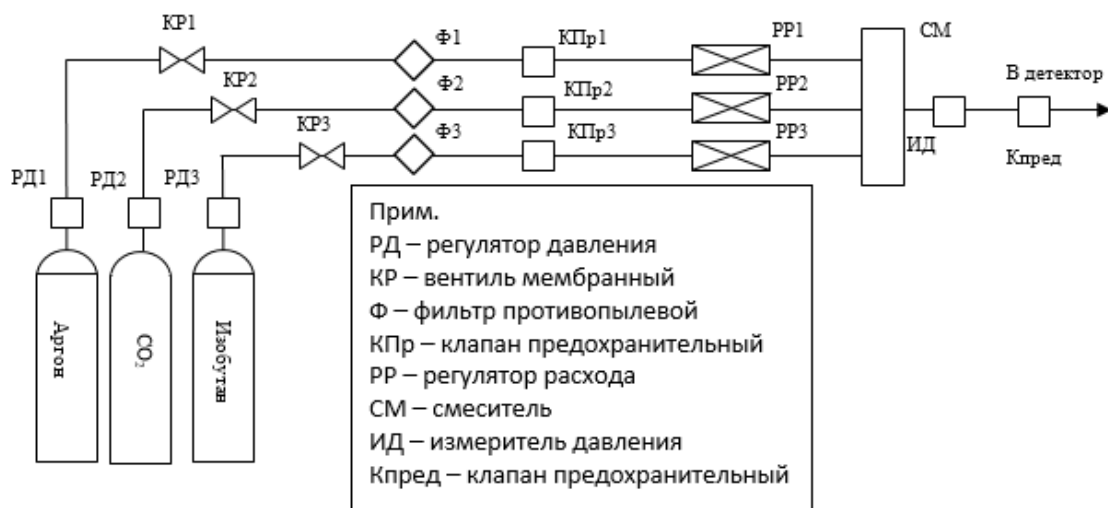


Рис. 16 Схема газовой системы

Лабораторная работа предоставляет возможность контроля состава смеси используемой для работы газового усилителя. Измерение состава смеси проводится при помощи газового анализатора - хроматографа SRI 8610C



Рис.17 Газовый анализатор SRI 8610C

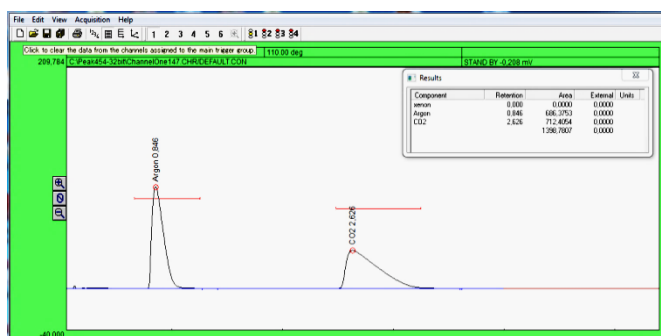


Рис.18 Выдача программы контроля анализатора

Контроль работы газоанализатора проводится с помощью специальной программы, работающей на подключенном с анализатору компьютере. На Рис. 18 представлена выдача программы контроля анализатора, позволяющая рассчитать состав газовой смеси.

- Электронный тракт лабораторной работы



Рис. 17 Электронный тракт лабораторной работы

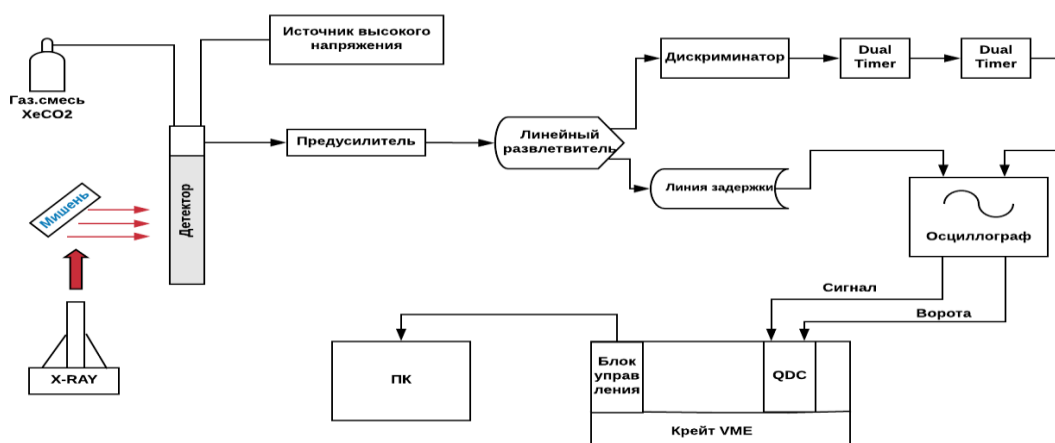


Рис.18 Схема электронного тракта для исследования характеристик ГЭУ

Сигнал после токового предусилителя на основе чипа HML HDX 81 поступает на вход активного разветвителя FANINFANOUT. С выхода разветвителя один сигнал направляется на вход дискриминатора для

формирования ворот (Gate) для зарядового оцифровщика (QDC), второй аналоговый сигнал через линию задержки подается на вход зарядового оцифровщика (QDC) в стандарте VME.



Рис.19. Сигналы с электронного тракта установки, подготовленные для зарядового оцифровщика (аналоговый и цифровой - Gate) Далее в блоке VMI информация оцифровывается и считывается в персональный компьютер для обработки и представления.

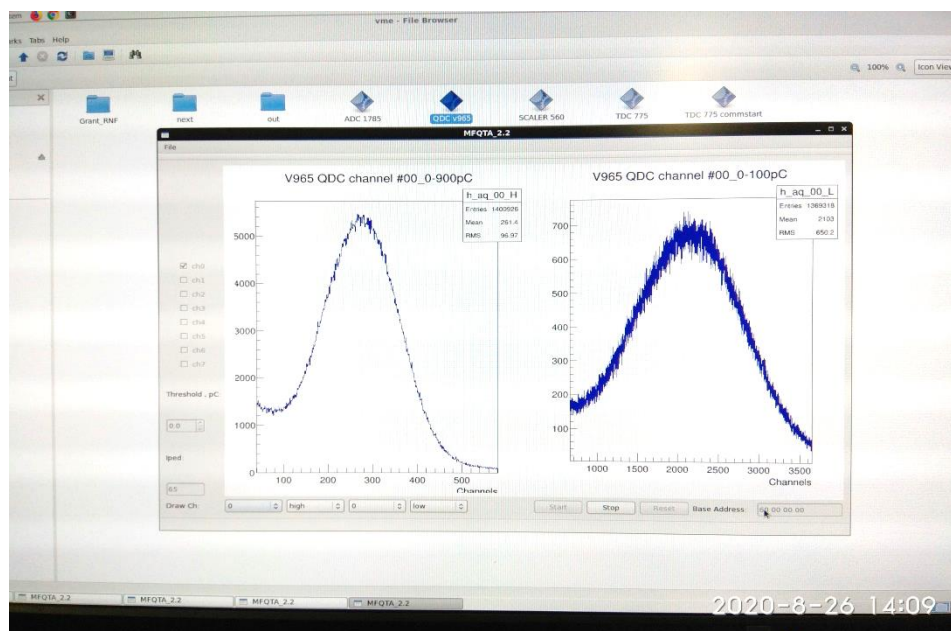


Рис.20. Выдача амплитудных распределений сигналов с ГЭУ с персонального компьютера.

На Рис.20 представлена выдача амплитудного распределения сигналов с ГЭУ с персонального компьютера. Шкала зарядового оцифровщика

откалибрована в единицах заряда, что позволяет рассчитать значение коэффициента газоусиления.

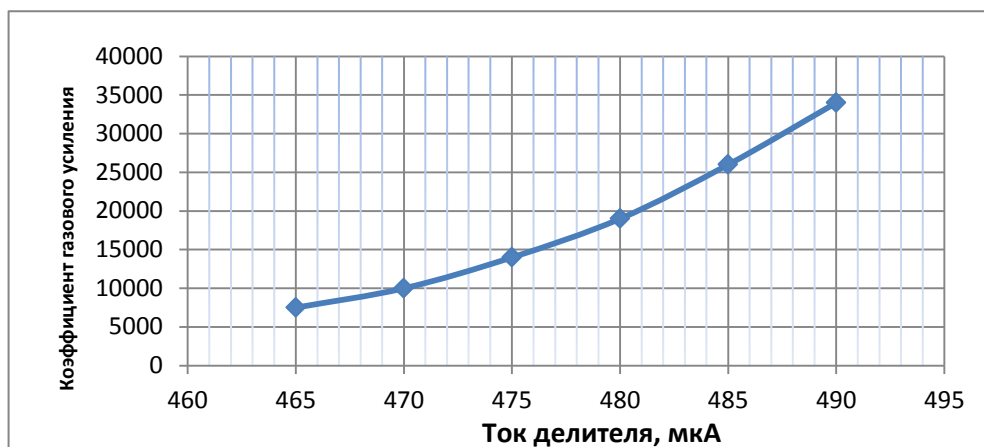


Рис.20 Экспериментальная зависимость коэффициента газоусиления от напряжения для смеси ArCO₂



Рис.21 Общий вид лабораторной работы

«Газовые электронные умножители»

Внимание! Все переключения на установке осуществляются только под руководством и с ведома проводящих занятие преподавателя и учебного инженера.

1. Убедитесь по показанию приборов, что давление в рабочей камере ГЭУ соответствует рабочему.
2. С помощью преподавателя подать заданное рабочее напряжение на камеру; включить источник рентгеновского излучения.
3. Убедиться в работоспособность и готовность измерительной техники.
4. Снять вольт-амперную характеристику ГЭУ, выставляя заданные преподавателем значения рабочих напряжений.
5. Провести калибровку тракта с использованием данных с VME.
6. Провести расчет коэффициента газоусиления в соответствии с рекомендациями Приложения 1.
7. Оформить отчет.

Контрольные вопросы:

- Принцип работы ГЭУ
- Характерный особенности ГЭУ
- Области использования ГЭУ, современные эксперименты, использующие ГЭУ в качестве трековых и иных детекторов
- Характерный особенности газовой системы для питания ГЭУ
- Особенности рентгеновской трубки как источника облучения ГЭУ

Содержание ОТЧЕТА

- Описание ГЭУ
- Краткое описание использованной установки, газовой системы и электронного тракта детектора
- Вольт-амперная характеристика ГЭУ, полученная экспериментально
- Расчет коэффициента газоусиления
- Амплитудное разрешение ГЭУ, полученное экспериментально.
- Заключение

Задание для самостоятельного выполнения

- Изучение работы рентгеновской трубки как источника излучения

Список литературы для самостоятельного изучения:

1. *Sauli F.* A new concept for electron amplification in gas detectors // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. Vol. A386.
2. *Bondar A., Buzulutskov A., Shekhtman L., Vasiljev A.* Study of ion feedback in multi-GEM structures // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. Vol. A496.
3. *Bencivenni G., Felici G., Murtas F.* et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. 488. P. 493.
4. *Breskin A., Buzulutskov A., Chechik R.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. 483. P. 670.
5. *Bondar A., Buzulutskov A., Sauli F.* et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. 419. P. 418.
6. *Orthen A., Warner H., Besch H. J.* et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. 512. P. 476.
7. *Buzulutskov A., Dodd J., Galea R.* et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. 548. P. 487.
8. *Бузулуцков А. Ф.* Детекторы излучений на основе газовых электронных умножителей // Вестник НГУ 2008
9. *Buzulutskov A., Breskin A., Chechik R.* et al. Further studies of the GEM photomultiplier // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. Vol. A442. P. 68–73.

Приложение 1.

Пример расчета коэффициента газоусиления ГЭУ.

Для проведения расчета коэффициента газоусиления K необходимо знать среднюю энергию гамма-квантов излучения рентгеновской трубки E_{γ} , а также частоту срабатывания ГЭУ ν и величину тока I , протекающего через индукционный промежуток ГЭУ.

Качественно формула выглядит след. образом:

$$K \sim I / E_{\gamma} \times \nu \text{ или } K = I / N_e \times \nu \quad (1)$$

где N_e - среднее количество электронов ионизации, образованных в газе при поглощении гамма кванта от рентгеновской трубки.

$$N_e = E_{\gamma} / E_0, \quad (2)$$

где E_0 - средняя энергия на образование пары электрон - ион в данной газовой смеси. Для смесей на основе аргона с небольшими добавками молекулярных газом E_0 равна 29 эВ. Т.е при поглощении 1- го гамма кванта с энергией 10 кэВ в газе образуется $10^4/29 = 345$ пар электрон+ион

Т.е. коэффициент газоусиления - это безразмерная величина, прямо пропорциональная току, текущего через ГЭУ, и обратно пропорциональная произведению средней энергии гамма квантов, излучаемых рентгеновской трубкой на частоту срабатывания детектора. Для вычисления все величины в формуле 1 нужно представить в одной системе единиц. Для системы СИ, средней энергии гамма-квантов 10 кэВ, частоты 10 кГц и тока через ГЭУ 10 нА имеем :

$$K = 10^{-8} / 10^4 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 10^4/29 = 1,818 \times 10^4$$