

УДК 539.1.074.822.3

ВРЕМЯАМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОСТЕННЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК (СТРОУ) ДЛЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ArCO_2 С ДОБАВКАМИ CF_4 И O_2

В. М. Луценко, В. В. Мялковский, В. Д. Пешехонов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приведены результаты исследований времяамплитудных характеристик тонкостенных дрейфовых трубок (строу) различного диаметра для газовых смесей ArCO_2 с добавками CF_4 и O_2 . Показано существенное уменьшение времени чувствительности строу при добавке CF_4 , особенно с увеличением диаметра строу. Добавка O_2 незначительно влияет на временные параметры строу. Добавки CF_4 или O_2 , обладающие так называемыми чистящими свойствами, представляют интерес для оптимизации параметров детекторов с малым временем чувствительности в условиях высоких нагрузок.

Results of researches of time-amplitude characteristics of thin-walled drift tubes (straws) of various diameter for gas mixtures ArCO_2 with additives CF_4 and O_2 are described. Essential time of sensitivity reduction for additive CF_4 for straws is shown, especially with increase of their diameter. Additive O_2 influences time parameters of straws insignificantly. Additive CF_4 or O_2 , possessing the so-called cleaning properties, is of interest for detectors with small sensitivity time in conditions of high loadings.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в экспериментах на ускорителях все шире применяются детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок (строу) как для получения трековой информации о заряженных частицах, так и для идентификации электронов и пионов. В зависимости от целей и задач конкретного эксперимента необходима оптимизация времяамплитудных параметров детекторов, определяемых в значительной мере газовым наполнением детекторов.

Целью данной работы является изучение влияния на эти характеристики добавок CF_4 и O_2 в газовую смесь ArCO_2 для строу различного диаметра, используемых, в частности, в создаваемой установке эксперимента ATLAS [1] на LHC и в действующем спектрометре COMPASS [2] на SPS в ЦЕРН.

1. УСТАНОВКА

Исследования времяамплитудных характеристик строу различного диаметра проводились с использованием источников β -электронов ^{106}Ru и γ -квантов ^{55}Fe . В первом случае с помощью сцинтилляционных счетчиков отбирались срабатывания строу от быстрых β -электронов. Для измерений применялись строу диаметром 4; 6; 9,56 и 15 мм,

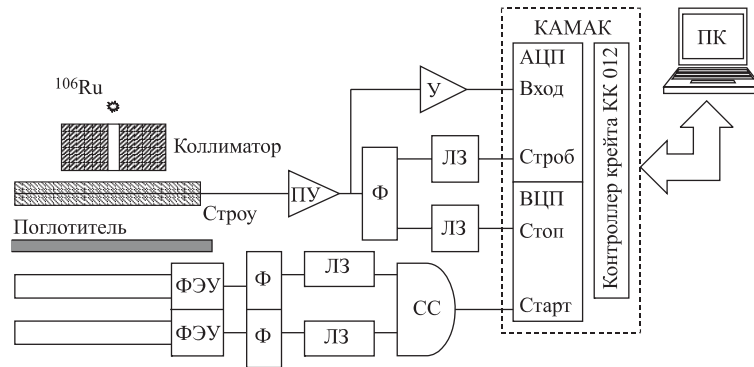


Рис. 1. Блок-схема установки: ПУ — предварительный усилитель; У — усилитель; Ф — формирователь; ЛЗ — линия задержки; СС — схема совпадений

изготовленные тождественным способом из каптоновой пленки [3]. Толщина стенок строу была около 70 мкм. В качестве анода использовалась золоченая вольфрамовая проволока диаметром 30 мкм. Сигналы считывались с анодов исследуемых строу быстрым токовым усилителем с входным сопротивлением 300 Ом. Порог чувствительности регистрирующей электроники соответствовал 750 эВ.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Исследуемый прототип содержит слой склеенных между собой разных строу — по два строу каждого диаметра. Анодные проволоки каждой строу находятся в единой горизонтальной плоскости. Все строу продуваются со скоростью 10 л/ч газовой смесью, поступающей в общий для них газовый коллектор. Прототип размещен над сцинтилляционными счетчиками, задающими стартовые сигналы при временных измерениях. Над счетчиками установлен стеклотекстолитовый поглотитель с целью обрезания медленной составляющей пучка β -электронов. Для облучения строу при измерении временных характеристик был изготовлен специальный щелевой коллиматор из свинца, обеспечивающий в плоскости анодных проволок ширину пучка по основанию около 800 мкм. Специальное устройство с микрометрическим винтом обеспечивало перемещение коллиматора с точностью позиционирования центра его щели, расположенной параллельно анодной проволоке, не хуже 50 мкм.

Использовалась считывающая электроника в стандарте КАМАК; получаемые данные поступали на персональный компьютер через контроллер крейта КК 012.

2. АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Амплитудные спектры источника γ -квантов ^{55}Fe (5,9 кэВ) на исследуемых строу измерялись при равномерном облучении их по диаметру. Величина анодного напряжения исследуемых строу при всех этих измерениях соответствовала газовому усилению $G = 1,4 \cdot 10^4$.

На рис. 2 показаны расчетные значения напряженности электрического поля E в зависимости от расстояния r_i для исследуемых строу с радиусом r_s :

$$E = (1/r_i)V(1 - \ln(r_i/r_a)/\ln(r_s/r_a)),$$

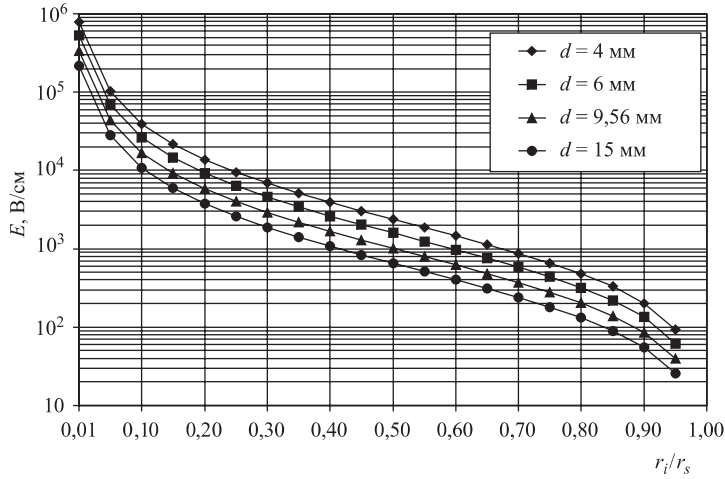


Рис. 2. Значения напряженности электрического поля вдоль радиуса строу диаметром 4; 6; 9,56 и 15 мм для газовой смеси ArCO_2 (70/30). Значения анодного напряжения соответствуют $G = 1,4 \cdot 10^4$ для каждого строу

где V — анодное напряжение строу; r_a — радиус анодной проволоки. Видно, что с увеличением диаметра строу для обеспечения одинакового значения величины газового усиления необходимо некоторое увеличение напряженности электрического поля. Кроме того, с возрастанием диаметра строу увеличивается область низкой напряженности. Так, для строу диаметром 4 мм напряженность поля менее 100 В/см имеет место вблизи поверхности катода на расстоянии менее 3% радиуса строу. Для строу диаметром 15 мм область напряженности поля менее 100 В/см увеличивается до 15% радиуса.

На рис. 3–6 приведены амплитудные спектры источника γ -квантов ^{55}Fe (5,9 кэВ) для строу диаметром 4; 6; 9,56 и 15 мм при продуве их газовой смесью ArCO_2 с добавками CF_4 (рис. 3, а — б, а) и с добавками O_2 (рис. 3, б — б, б). Увеличение на 1% парциального давления CF_4 в газовой смеси ухудшает энергетическое разрешение на величину около 0,7% (табл. 1). Добавки с определенным парциальным давлением CF_4 практически не влияют на энергетическое разрешение строу диаметром от 4 до 15 мм, тогда

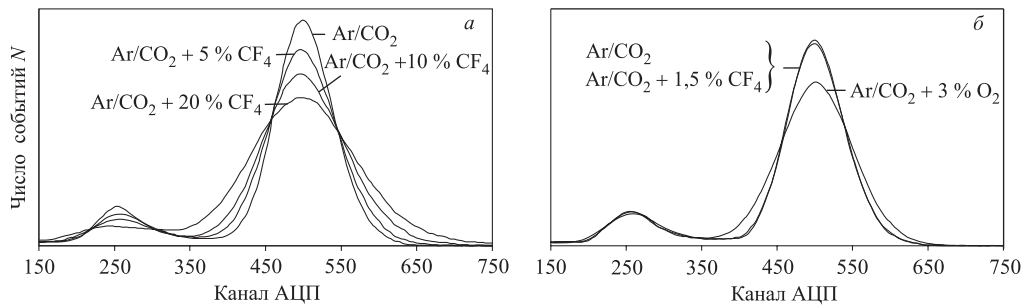


Рис. 3. Амплитудный спектр строу диаметром 4 мм при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ. Газовая смесь ArCO_2 с добавками CF_4 (а) и O_2 (б), $G = 1,4 \cdot 10^4$

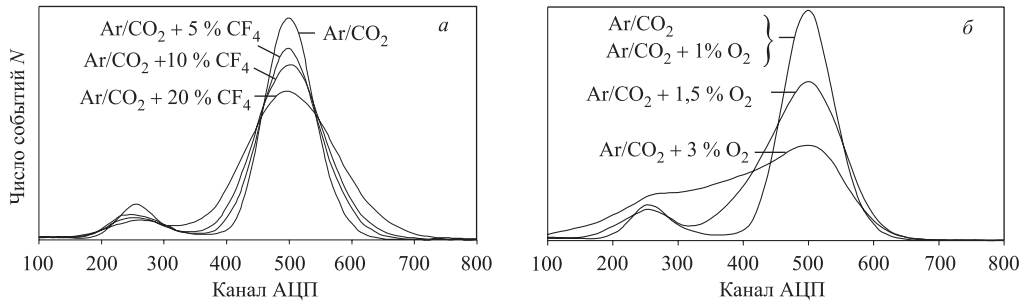


Рис. 4. Амплитудный спектр строу диаметром 6 мм при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ. Газовая смесь ArCO_2 с добавками CF_4 (а) и O_2 (б), $G = 1,4 \cdot 10^4$

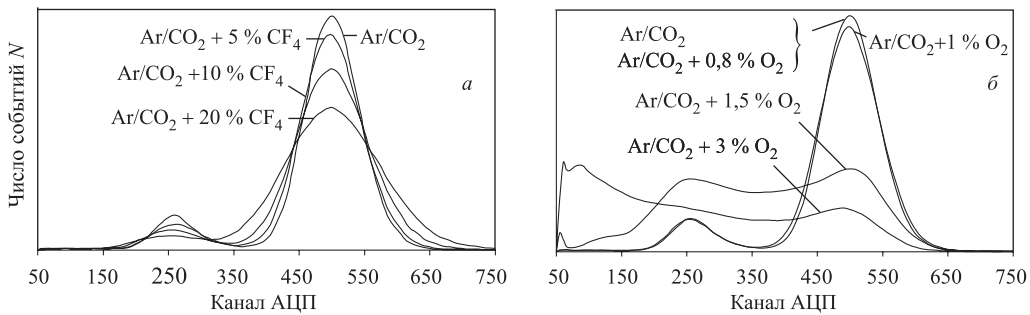


Рис. 5. Амплитудный спектр строу диаметром 9,56 мм при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ. Газовая смесь ArCO_2 с добавками CF_4 (а) и O_2 (б), $G = 1,4 \cdot 10^4$

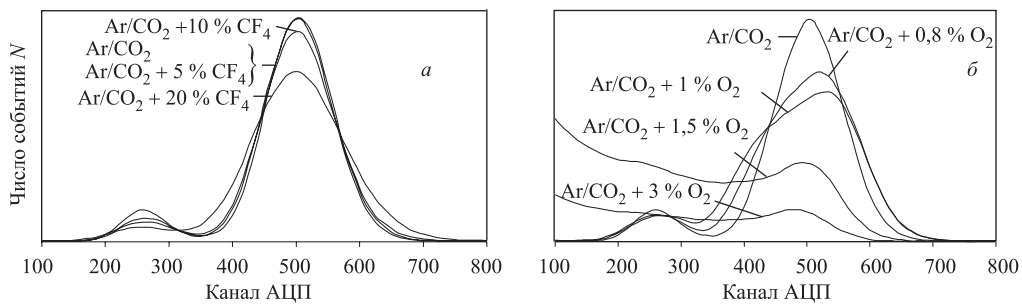


Рис. 6. Амплитудный спектр строу диаметром 15 мм при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ. Газовая смесь ArCO_2 с добавками CF_4 (а) и O_2 (б), $G = 1,4 \cdot 10^4$

как в случае смеси ArCO_2 без CF_4 энергетическое разрешение сохраняется для строу диаметром до 10 мм. Добавка CF_4 не оказывает влияния на эффективность регистрации как γ -квантов, так и β -электронов.

Добавка до 1,5% O_2 практически не влияет на энергетическое разрешение строу диаметром 4 мм. С увеличением парциального давления O_2 и/или диаметра строу энерге-

тическое разрешение резко ухудшается и появляется неэффективность регистрации событий. Видно, что строу диаметром до 10 мм могут работать без потери эффективности и ухудшения энергетического разрешения при добавке до 1% O₂.

Таблица 1. Энергетическое разрешение строу диаметром d при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ. $G = 1,4 \cdot 10^4$

Газовая смесь	Процентное содержание	$dE/E, \%$			
		$d = 4$ мм	$d = 6$ мм	$d = 9,56$ мм	$d = 15$ мм
Ar/CO ₂	70/30	18,6	18,8	19,2	26
Ar/CO ₂ /CF ₄	63/32/5	22,5	22,5	22	25
Ar/CO ₂ /CF ₄	63/27/10	26	26,4	26	27
Ar/CO ₂ /CF ₄	63/17/20	33	33,5	33,6	34,5
Ar/CO ₂ /O ₂	(70/30)/0,8	18	18,8	21	35,5
Ar/CO ₂ /O ₂	(70/30)/1	18	19	21,3	41,3
Ar/CO ₂ /O ₂	(70/30)/1,5	19,4	28	—	—
Ar/CO ₂ /O ₂	(70/30)/3	23	—	—	—

В табл. 1 приведены измеренные значения величин энергетического разрешения строу различного диаметра при регистрации γ -квантов с энергией 5,9 кэВ при газовом усилении $G = 1,4 \cdot 10^4$.

3. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Временные параметры измерялись при облучении строу источником ¹⁰⁶Ru при напряжении, соответствующем газовому усилению $G = 10^5$. Строу различного диаметра продувались газовой смесью с различным парциальным давлением CF₄ и O₂. При этом они облучались равномерно вдоль диаметра. На рис. 7 представлены зависимости макси-

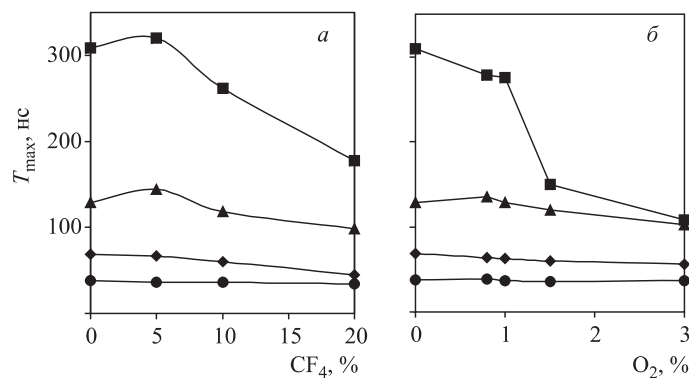


Рис. 7. Максимальное время дрейфа электронов в зависимости от парциального давления CF₄ (а) или O₂ (б) в газовой смеси ArCO₂ (табл. 2 и 3): ■ — для строу диаметром 15 мм; ▲ — 9,56 мм; ◆ — 6 мм; ● — 4 мм

Таблица 2. Время дрейфа электронов T_{\max} для различного процентного содержания CF_4 в газовой смеси ArCO_2CF_4

Состав газовой смеси	T_{\max} , нс			
	$d = 4$ мм	$d = 6$ мм	$d = 9,56$ мм	$d = 15$ мм
ArCO_2 (70/30)	38	68,4	129	309
ArCO_2CF_4 (63/32/5)	36,5	66,7	144	320
ArCO_2CF_4 (63/27/10)	36	60	119	262
ArCO_2CF_4 (63/17/20)	34	45	99	178

Таблица 3. Время дрейфа электронов T_{\max} для различного процентного содержания добавки O_2 в газовой смеси ArCO_2O_2 , а также эффективность регистрации γ -квантов (ε_γ , %) в строу диаметром 4, 6, 9,56, 15 мм в случаях неполной их эффективности

Состав газовой смеси	T_{\max} , нс, и ε_γ , % (в скобках)			
	$d = 4$ мм	$d = 6$ мм	$d = 9,56$ мм	$d = 15$ мм
ArCO_2 (70/30)	38	68,4	129	309
ArCO_2O_2 (70/30)/0,8	38,7	64,1	135 (99,7)	278,7 (78,3)
ArCO_2O_2 (70/30)/1	37	63,2 (99,6)	129 (89,9)	275,3 (72,6)
ArCO_2O_2 (70/30)/1,5	36,5	59,5 (99,4)	119,7 (70,1)	149,6 (62,6)
ArCO_2O_2 (70/30)/3	36	56,2 (99,3)	102,6 (66,6)	108,5 (59,6)

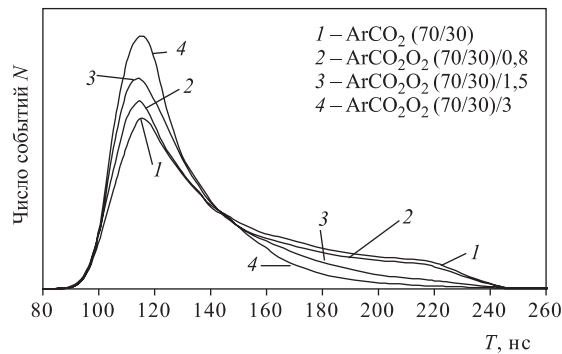


Рис. 8. Влияние парциального давления O_2 на время дрейфа электронов в строу диаметром 9,56 мм при газовом усилении $G = 10^5$

мального времени дрейфа T_{\max} электронов ионизации, равного времени чувствительности строу, от парциального давления добавок.

Добавка 20 % CF_4 уменьшает время чувствительности на 10 % для строу диаметром 4 мм и на 42 % для строу диаметром 15 мм. Добавка O_2 практически не влияет на время чувствительности строу при условии сохранения эффективности регистрации.

Значения максимальных времен дрейфа T_{\max} в строу приведены в табл. 2 и 3. Типичные временные спектры, полученные при равномерном облучении строу, показаны на рис. 8, 9.

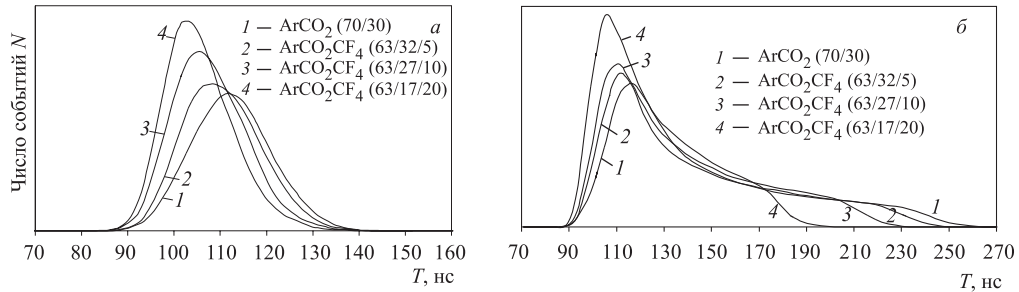


Рис. 9. Влияние парциального давления SF_4 на время дрейфа электронов для строу диаметром 4 мм (а) и 9,56 мм (б)

Представленные на рис. 8 временные спектры показывают, что при использовании токового усилителя с входным сопротивлением 300 Ом добавка 3 % O_2 приводит к уменьшению времени нарастания переднего фронта временных распределений в среднем до 3,5 нс.

Видно, что смесь с добавкой SF_4 является более быстрым газом (рис. 9), так как нарастание переднего фронта распределений уменьшается на 7–8 нс с увеличением добавки SF_4 от 0 до 20 %.

4. СКОРОСТЬ ДРЕЙФА

Для оценки величины скорости дрейфа в различных точках вдоль радиуса строу проводилось их облучение β -источником ^{106}Ru через щелевой коллиматор, расположенный параллельно анодным проволокам прототипа. Облучались строу диаметром 6, 9,56 и 15 мм, ширина пучка по основанию составляла около 0,8 мм.

На рис. 10 приведены типичные временные спектры в разных точках облучения по радиусу строу диаметром 9,56 мм для газовой смеси ArCO_2CF_4 (63/17/20).

Зависимости центров тяжести временных спектров от расстояния r_i между центром коллиматора и анодной проволокой строу показаны на рис. 11. Так же как и приведенные

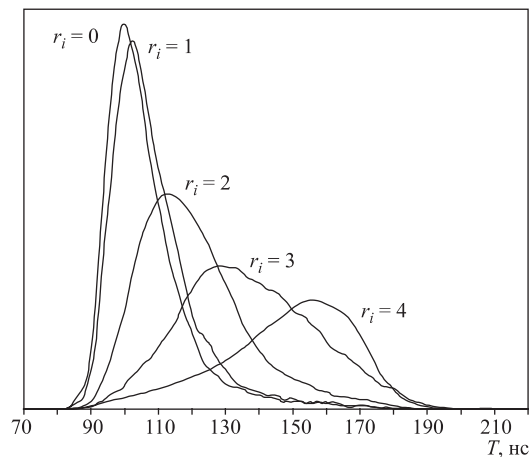


Рис. 10. Изменение положения центра тяжести пика временного спектра при облучении строу диаметром 9,56 мм в различных точках r_i (мм)

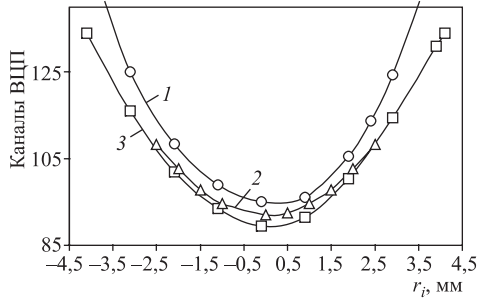


Рис. 11. Зависимость центров тяжести временных спектров от r_i для строу с $d = 9,56$ мм. Газовые смеси: \circ , 1 — ArCO_2 (70/30); \square , 2 — ArCO_2CF_4 (63/17/20); \triangle , 3 — ArCO_2O_2 (70/30)/3. $G = 10^5$. Цена канала ВЦП равна 1,14 нс

на рис. 9 временные спектры сигналов строу, полученные при их равномерном облучении по диаметру, эти зависимости говорят о более быстрых процессах сбора зарядов при добавлении в состав газовой смеси CF_4 . Добавка O_2 (кривая 2 на рис. 11) незначительно ускоряет сбор зарядов для малых дрейфовых расстояний, на которых еще не проявляется процесс захвата электронов, приводящий к большой неэффективности регистрации.

Оценка средней скорости дрейфа электронов в некоторых интервалах напряженности электрического поля ΔE_i при облучении строу в разных точках вдоль их диаметра определялась выражением

$$\langle W_i \rangle = (r_i - r_{i-1}) / (M_i - M_{i-1}),$$

где r_i — расстояние от центра щелевого коллиматора до анодной проволоки строу; M_i — значение задержки центра тяжести пика соответствующего временного спектра относительно сигнала «старт» ВЦП. На рис. 12–14 приведены зависимости средней скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля для газовых смесей с добавками CF_4 и O_2 при газовом усилении $G = 10^5$. Видно, что для строу разного диаметра при одинаковой газовой смеси и в «точках» с одинаковым значением E средние значения скорости дрейфа электронов равны только в области высокой напряженности,

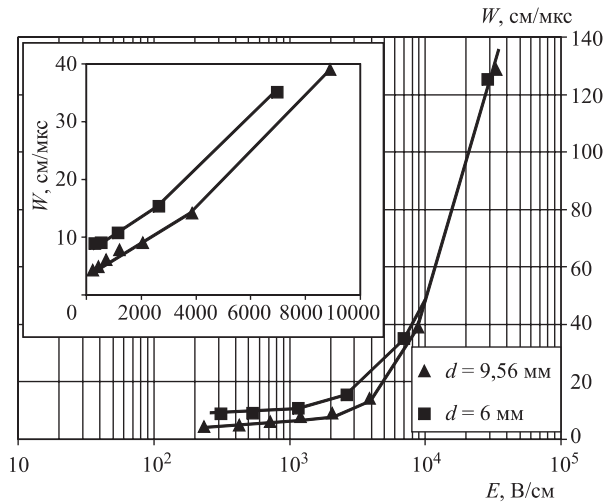


Рис. 12. Зависимости средней скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля E в строу диаметром 6 и 9,56 мм. Газовая смесь ArCO_2O_2 (70/30)/3, $G = 10^5$

Рис. 13. Зависимости средней скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля E в строу диаметром 6; 9,56 и 15 мм. Газовая смесь ArCO_2CF_4 (63/17/20), $G = 10^5$

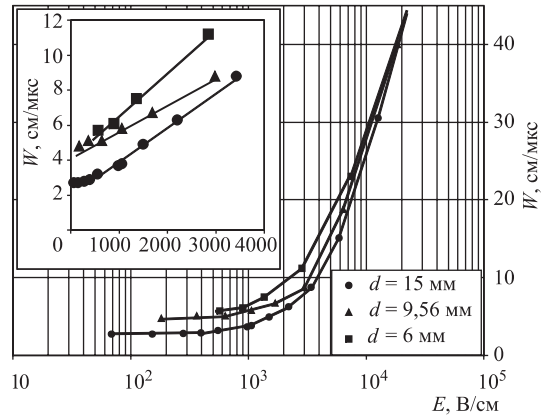
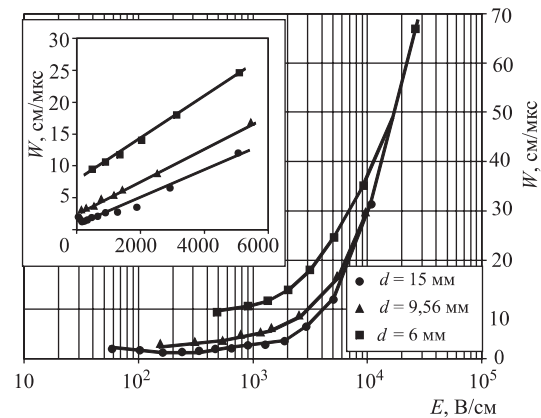


Рис. 14. Зависимости средней скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля E в строу диаметром 6, 9,56 и 15 мм. Газовая смесь ArCO_2 (70/30), $G = 10^5$



как результат того, что скорость дрейфа электронов W пропорциональна напряженности электрического поля в соответствии с выражением [4]

$$W \sim (E/P)^b, \text{ где } 1/2 < b < 1.$$

В области высокой напряженности поля $b \sim 1/2$, и в области низкой напряженности поля b приближается к 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование времяамплитудных характеристик строу диаметром до 15 мм для смеси ArCO_2 с добавками CF_4 и O_2 показало, что добавка CF_4 уменьшает время чувствительности всех строу при сохранении эффективности регистрации, но с некоторым ухудшением энергетического разрешения.

Добавка $\text{O}_2 \leq 1\%$ незначительно уменьшает время чувствительности строу диаметром до 10 мм, не влияя при этом на энергетическое разрешение и эффективность регистрации.

Для 15-мм строу добавка 0,8 % O_2 снижает эффективность регистрации приблизительно на 20 %. Добавка O_2 до 3 % возможна только при работе со строу диаметром не более 4 мм с незначительным ухудшением энергетического разрешения.

Для получения высокого пространственного разрешения с использованием строу различного диаметра необходимо определять корреляционные времякоординатные коэффициенты для строу каждого диаметра независимо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ATLAS Collab.* ATLAS Inner Detector Technical Design Report. CERN/LHCC/97-16. 1997.
2. COMPASS. CERN/SPSLC/96-14, SPSLC/P297. 1996.
3. *Bychkov V. N. et al.* Construction and Manufacture of Large Size Straw-Chambers of the COMPASS Spectrometer Tracking System // Part. Nucl., Lett. 2002. No. 2[111].
4. *Калашикова В. И., Козодаев М. С.* Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966.

Получено 18 августа 2004 г.