

2312

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2312



ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

А.Т. Матюшин, В.Т. Матюшин

СИММЕТРИЧНАЯ СИСТЕМА
ПРОВОЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ
ИЗОТРОПНОЙ ИСКРОВОЙ КАМЕРЫ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЖЕЛТЫХ

1965

P-2312

А.Т. Матюшин, В.Т. Матюшин

СИММЕТРИЧНАЯ СИСТЕМА
ПРОВОЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ
ИЗОТРОПНОЙ ИСКРОВОЙ КАМЕРЫ

Направлено в ПТЭ

ОИЯИ
БИБЛИОТ КА

Регистрация треков заряженных частиц, движущихся под любым углом к направлению электрического поля, может быть осуществлена с помощью так называемой изотропной искровой камеры^{/1,2/}.

Камера обычно имеет два электрода в виде проводящих плоскостей, разделенных относительно большим (10 и более см) разрядным промежутком. В качестве газового наполнения камеры используется чистый неон. Изотропные свойства камера приобретает при определенном режиме питания, позволяющем задерживать развитие разряда на стадии образования стримеров, локализованных вблизи центров ионизации. Точность определения координат трека-следа частицы зависит от длины стримеров и повышается, вообще говоря, при укорочении их. Получение достаточно коротких стримеров связано с необходимостью формирования на электродах камеры высоковольтного ($E_0=15-20$ кв·см⁻¹) импульса с крутым фронтом нарастания (10-20 нсек) и, особенно, спада (2-10 нсек) при длительности импульса 30-50 нсек.

С этой точки зрения представляет интерес анализ импеданса системы электродов камеры и возможности оптимизации ее конструкции.

1. Несимметричная система

При достаточной протяженности электродов используемая^{/1,2/} камера может рассматриваться по аналогии с полосковыми системами сверхвысоких частот как несимметричная или открытая система^{/3/}. Волновые свойства такой системы можно с достаточной точностью описать, если воспользоваться результатами работы^{/4/}. Использование волновых свойств позволяет рассчитывать на реализацию возможностей согласования камеры с формирующими устройствами при разработке протяженной камеры.

При малой длине камеры можно рассматривать импеданс ее системы электродов как сосредоточенную емкость.

Емкость камеры C_x при используемых разрядных промежутках D и пло-

шадях электродов $S (\sqrt{S} = D)$ определяется, в основном, емкостью, обусловленной краевым эффектом, в свою очередь, близкой к значению собственной емкости C_0 высоковольтного электрода. Для оценки собственной емкости электрода можно воспользоваться расчетной формулой емкости бесконечно тонкого диска ^{/5/}, равной площади.

Тогда

$$C_k = C_D + C_0 \approx C_D \left(1 + 4,5 \frac{D}{\sqrt{S}} \right). \quad (1.1)$$

Здесь (система СИ) $C_D = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{D}$ - расчетная емкость промежутка без учета краевого эффекта, $C_0 = \epsilon_0 \epsilon 4,5 \sqrt{S}$ - собственная емкость соответствующего диска, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф.м⁻¹ - диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ - относительная проницаемость диэлектрика. Как видно, емкость, обусловленная краевым эффектом, может в несколько раз превышать емкость, рассчитанную без учета его. Несимметричная система, как таковая, должна создавать и создает высокий уровень электромагнитного излучения; работоспособность камеры зависит от расположения окружающих предметов, кроме того, открытая система приводит к повышенной опасности поражения высоковольтным импульсным напряжением.

2. Симметричная система

Переход к симметричной системе, т.е. расположению высоковольтного электрода между двумя заземленными пластинами, позволяет исключить перечисленные недостатки открытой конструкции. Расчеты и эксперименты показывают, что при такой системе можно получить дополнительные полезные свойства камеры как физического прибора.

Из (1.1) видно, что при удвоении промежутка емкость камеры не удваивается, т.е. при той же амплитуде высоковольтного импульса и незначительном ухудшении его фронта можно удвоить информационный объем $V = SD$.

При неизменном информационном объеме $V = \text{const}$ переход к симметричной системе приводит к снижению вдвое требуемой амплитуды высоковольтного импульса, что существенно для используемых промежутков, так, например, при $D = 30$ см вместо 800 кв необходимо подать 300 кв. Кроме того, при переходе к симметричной системе можно ожидать улучшения фронта. В самом деле, если считать, что длительность фронта переходного процесса на электродах камеры ограничивается резонансной частотой, определяемой индуктивностью ввода высоковольтного импульса и емкостью камеры, и принять линейную зависимость длины ввода от амплитуды импульса, то квадрат отношения периодов резонансных частот несимметричной T_1 и симметричной T_2 системы составит:

$$\left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 = 2 \frac{1 + 4,5 \frac{D}{\sqrt{S}}}{4 + 4,5 \frac{D}{\sqrt{S}}} \left(1 + \frac{\ln 2}{\ln \frac{\ell_g}{d_g}} \right), \quad (2.1)$$

где ℓ_g - длина ввода в случае симметричной системы, d_g - диаметр ввода, принятый одинаковым в обоих случаях.

Для $\frac{D}{\sqrt{S}} = 1$, $\frac{T_1}{T_2} = 1,2 \div 1,3$.

Волновое сопротивление протяженной камеры можно определить, пользуясь выводами работы ^{/8/}.

$$z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon} \left\{ \frac{a}{xD} + \frac{1}{\pi} \left[\frac{2}{x} \ln \frac{1+x}{x} - (1-x) \ln \frac{1-x^2}{x^2} \right] \right\}},$$

где $x = 1 - \frac{t}{D}$, t - толщина,
 a - ширина высоковольтного электрода.

3. Проволочные электроды

В изотропной камере фотографирование одной из проекций трека (или двух стерео) производится по направлению электрического поля, либо под малым углом к нему, т.е. через соответствующие электроды камеры.

Электроды, через которые производится фотографирование, должны быть достаточно прозрачны. Обычное выполнение электродов для такой цели - полупрозрачный проводящий слой на стекле ^{/7/} или проволочный электрод ^{/1/}, расположенный снаружи камеры (в воздухе) и отделенный от атмосферы разрядного промежутка стеклом.

Такое выполнение электродов не случайно. Проводящий слой, обычно напыленный, находясь в атмосфере разрядного промежутка, интенсивно распыляется, вплоть до потери камерой работоспособности. Механическое перенесение проволочного электрода ^{/1/}, хорошо работающего на воздухе, внутрь камеры также не приводит к удовлетворительным результатам из-за возникающей интенсивной короны, исключающей возможность регистрации треков. С другой стороны, отсутствие замкнутой цепи для тока проводимости при разряде между электродами камеры приводит к возникновению яркого свечения стекла вокруг канала разряда, затрудняющего регистрацию треков. Вид свечения напоминает фигуры Лихтенберга ^{/8,1/}.

Переход к симметричной системе, естественно, наиболее просто может быть сделан путем удвоения промежутка работы ^{/1,7/}. Однако требование обеспечения минимума

количества вещества в камере и необходимость устранения свечения стекла хотя бы на площади электродов затрудняет применение стекла с напыленным проводящим слоем и требует введения проволочных электродов внутрь камеры.

Расчет электростатического поля проволочных электродов, проведенный в /8/, показал, что определенным выбором радиуса проволоки r_0 и расстояния между ними a_0 , опасность возникновения короны на проволоках электрода внутри камеры может быть устранена. Основные расчетные соотношения для рассматриваемых случаев приводятся ниже.

Поскольку края электродов обычно находятся в воздухе и продлены с целью выравнивания поля в разрядном промежутке, то краевой эффект при расчете поля внутри промежутка можно не учитывать. Тогда для несимметричной системы, состоящей из заземленной проводящей плоскости и проволочного электрода, находящегося на расстоянии d от нее, напряженность электрического поля в точке, расположенной на расстоянии r от оси проволоки в направлении нормали к заземленной плоскости выражается следующим образом:

$$E^{(1)}(r) = \frac{1}{1 - e^{-\frac{2\pi r}{a_0}}} \frac{U_0}{d}, \quad (3.1)$$

где U_0 — напряжение, приложенное к электродам камеры,

$$E_{\sigma} = \frac{U_0}{d}.$$

Расчет произведен в предположении, что $d \gg a_0 \gg r_0$. Максимальная напряженность поля на поверхности проволоки:

$$E_{\max}^{(1)} = \frac{a_0}{2\pi r_0} E_0. \quad (3.2)$$

Соответствующая напряженность поля для среднего электрода симметричной системы в тех же предположениях:

$$E_{\max}^{(2)} = 2E_{\max}^{(1)} = \frac{a_0}{\pi r_0} E_0. \quad (3.3)$$

С точки зрения емкости проволочный электрод при $d \gg a_0$ мало отличается от проводящей плоскости.

Из (3.1), (3.2) видно, что в зависимости от a_0 и r_0 напряженность поля на поверхности проволоки может быть во много раз больше E_0 , однако, она быстро спадает, достигая значения $1,1E_0$ на расстоянии $r = a_0$. При увеличении a_0 растут и E_{\max} , и область $E(r) > 1,1E_0$, что приводит к быстрому возникновению короны на проволоках при подаче высоковольтного импульса. Наоборот, для $a_0 = 1$ мм, кроме перечисленных факторов, имеет место эффект увеличения диэлектрической проч-

ности газа /8/. Известно также /8,10/, что при отрицательной полярности проволоки корона возникает позже. Для получения минимума вещества в проволочном электроде необходимо уменьшить радиус проволоки r_0 , даже при одинаковом соотношении a/r_0 . С другой стороны, снижение механической прочности ограничивает применение проволоки с диаметром менее 0,1 мм.

Таким образом, изготавливая электрод из проволоки диаметром 0,1 мм, с шагом $a_0 = 1,2$ мм, можно устранить корону. При этом количество вещества внутри камеры невелико. Эквивалентная толщина такого проволочного электрода в пересчете на сплошной лист составляет ~7 микрон.

Опасным местом в смысле возникновения короны являются края электродов. Правда, в этом случае образование короны затруднено, так как края находятся в воздухе. Для расчета поля на краю электрода можно использовать результаты работы /11/:

$$E_{\max} = \frac{2}{\pi} \frac{U_0}{r_3} = \frac{2}{\pi} \frac{d}{r_3} E_0, \quad (3.4)$$

r_3 — радиус закругления края.

Меняя радиус, можно исключить образование короны и на краях.

4. Оптимальное число промежутков камеры

Принятые исходные допущения — длительность фронта переходного процесса на электродах камеры определяется индуктивностью высоковольтного ввода, длина l_g которого при постоянном диаметре d_g пропорциональна амплитуде импульса, и емкостью камеры — позволяют рассмотреть вопрос об оптимальном числе симметричных промежутков камеры с информационным объемом $V = SD$.

Считая не зависимой от величины промежутка в определенных пределах емкость, обусловленную краевым эффектом, можно записать емкость камеры из n симметричных промежутков, как:

$$C_k = C_0 \cdot n + 4 C_D n^2. \quad (4.1)$$

Индуктивность ввода, общего для n промежутков /12/

$$L_g = 2 \cdot 10^{-9} l_g \left(\ln \frac{4l_g}{d_g} - 0,75 \right), \quad (4.2)$$

$$l_g = \frac{U_0}{E_{np}} = \frac{E_0 D}{2 E_{np} n}$$

Здесь U_0 - амплитуда высоковольтного импульса, E_{np} - пробивная прочность воздуха, определяющая длину ввода, D - высота камеры.

Квадрат периода резонансной частоты:

$$(2\pi)^2 L_g C_k = 2.10^{-9} \frac{E_0 D}{E_{np}} \left(\ln \frac{2 E_0 D}{E_{np} d_g a} - 0,75 \right) (C_0 + 4,5 C_D a). \quad (4.3)$$

Минимальному значению отвечает:

$$\frac{E_0 D}{2,9 E_{np} d_g} = a e^{\frac{C_0}{4 C_D a}}$$

При $\sqrt{S} = D \frac{C_0}{4D} = 1$, а левая часть выражения = 2-3 для реальных конструкций и в первом приближении:

$$a_{opt} = \frac{E_0 D}{2,9 E_{np} d_g} = \frac{0,05 D}{d_g} = 1-3 \quad (4.4)$$

при $E_0 = 20$ кВ/см, $E_{np} = 30$ кВ/см, $D = 10-40$ см.

В случае согласования камеры с формирующим устройством оптимальное число промежутков должно находиться из других соображений.

Экранированная симметричная камера

Переход к симметричной системе и распространение результатов определения краевой емкости работы ^{/13/} на весь периметр высоковольтного электрода позволяют определить значение емкости камеры при окружении высоковольтного электрода прямоугольным коробом - экраном.

$$C_k = 4 C_D \left[1 + 2 \frac{a+L}{\pi a L} \ln \left(1 + \operatorname{cth} \frac{\pi b}{D} \right) \right], \quad (5.1)$$

a - ширина, L - длина электрода, b - расстояние торцов электрода от боковой стенки короба.

Для случая $b = \frac{D}{2}$:

$$C_k = 4 C_D \left(1 + 1,47 D \frac{a+L}{\pi a L} \right), \quad (5.2)$$

как показывают расчеты и измерения, емкость возрастает незначительно, а камера полностью экранируется.

При необходимости фотографирования боковой проекции одна из стенок короба-экрана может заменяться проволочной сеткой.

Экспериментальные результаты

Для проверки работоспособности симметричной системы проволочных электродов, особенно среднего электрода, была изготовлена камера (рис. 1) с $r_0 = 0,1$ мм, $a_0 = 1,2$ мм, $D = 300$ мм. Экранированная камера показана на рис. 2.

Значения рассчитанных и замеренных емкостей камеры совпадают с достаточной степенью точности (10-15%). Камера была испытана с помощью космических частиц.

На рис. 3 приведены типичные фотографии треков при разных углах наклона - вплоть до совпадающих с направлением поля.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что симметричная система проволочных электродов, выполненная в соответствии с вышеприведенными расчетами, работоспособна. Корон на проволоках не наблюдалось, вплоть до $E_{max} = 70-80$ кв·см⁻¹ (рис.3).

2. Точность измерения координат (z - проекция) в камере с симметричной системой электродов выше за счет контролируемого смещения стримеров относительно трека (разнополярность поля в промежутках - рис. 3а).

3. Введение проволочных электродов ($a_0 = 1$ мм) внутрь камеры затрудняет образование фигур Лихтенберга на площади электродов.

4. С точки зрения получения заданного информационного объема камера с симметричной системой электродов выгодно отличается от обычной ^{/1,2/}, кроме того, она легко может быть полностью экранирована, что создает безопасность обращения и минимум электромагнитных излучений.

5. В ряде случаев может оказаться выгодной изотропная камера, состоящая из двух-трех одинаковых симметричных промежутков.

6. Различия в светимости трека в зависимости от относительного угла по направлению к полю представляется менее выраженным, возможно, влияет структура электрода.

7. Результаты работы могут быть распространены на конструкцию камер с большим промежутком и последовательным питанием ^{/14/}.

Л и т е р а т у р а

1. Г.Е.Чиковани, В.Н.Ройнишвили, В.А.Михайлов, "Трековая искровая камера с изотропными свойствами". Препринт ИФАН Гр. ССР, Тбилиси, 1963.
2. Б.А.Долгошеин, Б.Н.Лучков. Новый газоразрядный трековый детектор - стримерная камера. Препринт ФИАН, Москва, 1963.
3. Тай Цзун-у. Теория несимметричной полосковой линии. Полосковые системы сверхвысоких частот. Из-во иностранной литературы, 1959 г., стр. 11-19.
4. Black K.G., Higgins T.I., Trans. IRE MTT-3, 03 March, 1955. "Печатные схемы сантиметрового диапазона". Изд-во иностранной литературы, 1 956 г., стр. 205-248.
5. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред". Изд-во физико-математической литературы, Москва, 1959, стр. 36-40.
6. С.Б.Кок. Характеристическое сопротивление симметричной полосковой передающей линии. "Полосковые системы сверхвысоких частот". Изд-во иностранной литературы, 1959, стр. 33-40.
7. А.Ф.Писарев. "Изучение спиновой корреляции методом разрядных и искровых камер". Кандидатская диссертация, Препринт ОИЯИ, 1955, 1964.
8. Ф.Пик "Диэлектрические явления в технике высоких напряжений". Государственное энергетическое изд-во, Москва - 1934 Ленинград, стр. 85 - 107.
9. А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Электростатическое поле проволочных электродов искровой камеры. Препринт ОИЯИ Р-2364, Дубна, 1965.
10. М.А.Бабиков, Н.С.Комаров, А.С.Сергеев. Техника высоких напряжений. Госэнергоиздат, 1955, стр. 25-59.
11. Б.А.Дальман. Симметричные полосковые линии для сверхвысоких частот. Полосковые системы сверхвысоких частот. Стр. 20-32.
12. П.Л.Калантаров, П.А.Цейтлин. Расчеты индуктивности. Госэнергоиздат, 1955.
13. С.Б.Кок. Экранированная связанная полосковая линия. Плосковые системы сверхвысоких частот. Стр. 174-193, Изд-во иностранной литературы, 1959.
14. Б.Н.Гуськов, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин. Последовательное питание промежутков искровой камеры. Препринт ОИЯИ, Дубна, Р-1937, 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 июля 1965 г.

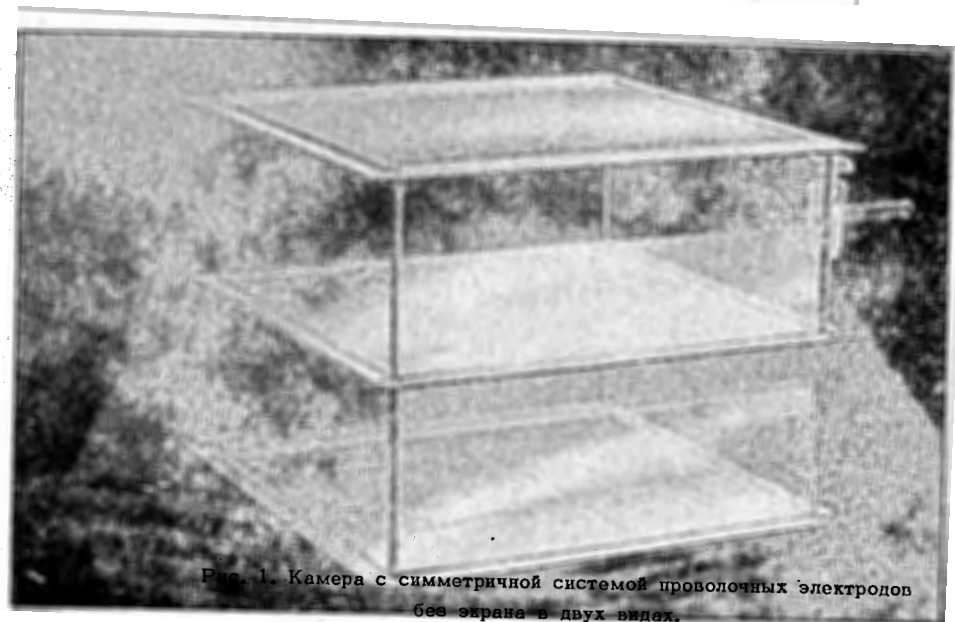
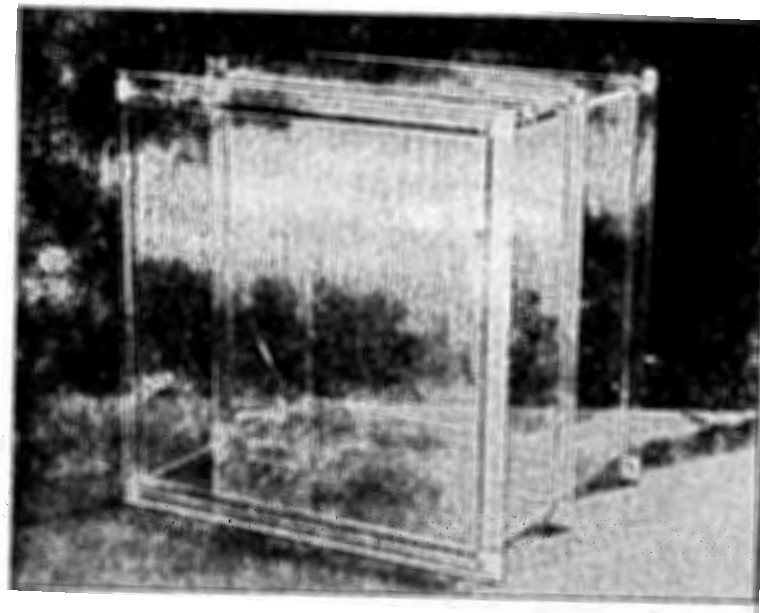


Рис. 1. Камера с симметричной системой проволочных электродов без экрана в двух видах.

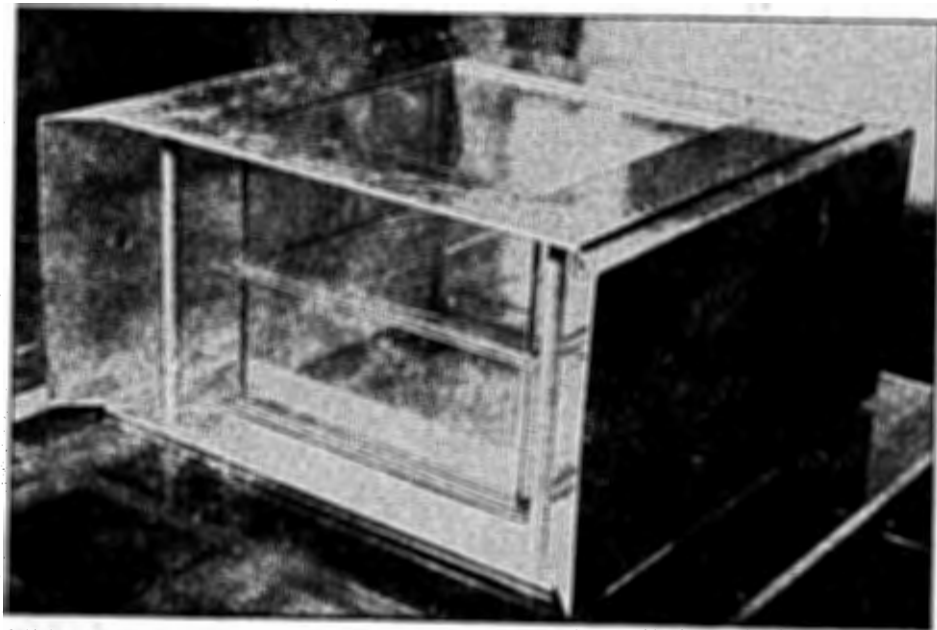


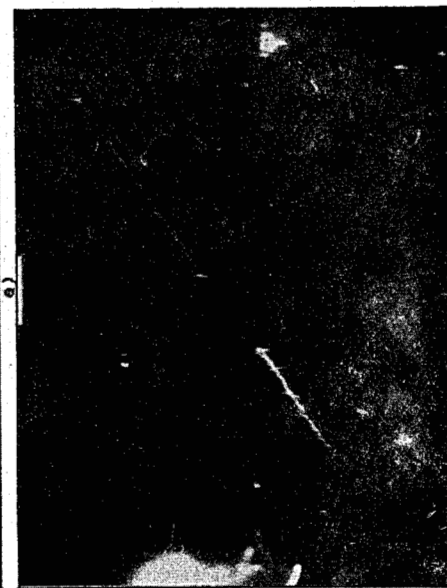
Рис. 2. Камера с экраном.



а)



б)



в)

Рис. 3. Фотографии троек космических частиц.
Аэроплёнка, 1200 ед. ГОСТ, диафрагма
а) 1,5 б) 2,8-3,5.