

5817

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9-5817



В.Ф. Сиколенко

ДАТЧИКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ
ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
НА УСКОРИТЕЛЯХ

(Обзор по опубликованным материалам)

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

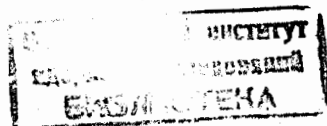
1971

9-5817

В.Ф. Сиколенко

**ДАТЧИКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ
ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
НА УСКОРИТЕЛЯХ**

(Обзор по опубликованным материалам)



В В Е Д Е Н И Е

При строительстве новых и модернизации уже существующих ускорителей в настоящее время большое внимание уделяется применению вычислительной техники для сбора информации о режимах систем и параметрах пучка ускоряемых и выводимых частиц. В связи с этим проявляется повышенный интерес к устройствам измерения параметров пучков. Разработке этого вопроса посвящен ряд публикаций ведущих физических лабораторий мира, доклады на конференциях и симпозиумах по ускорительной технике.

Целью настоящего обзора является попытка систематизировать сведения по датчикам измерителей параметров пучков на основе новейших публикаций, доступных автору. Приводится библиография по теме обзора.

Оснащение аппаратурой измерения параметров пучков в наиболее крупных лабораториях мира иллюстрируется таблицей № I /1,2/. Ниже будут рассмотрены основные типы датчиков, упомянутые в таблице, а также принципы их работы и основные характеристики.

КАМЕРЫ ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ

Датчики рассматриваемого типа применяются для измерения интенсивности и основаны на эффекте появления низкоэнергетичных электронов ($5 + 10 \text{ эВ}$) при пролете заряженной частицы через тонкую металлическую фольгу. Эффект вторичной эмиссии является поверхностным явлением, не зави-

ТАБЛИЦА № I

Параметры пучка	Метод измерения		
	Циркулирующий пучок	Быстрый вывод	Медленный вывод
ИНТЕНСИВНОСТЬ	ЦЕРН-трансформатор тока: - быстрый 100кГц-100мГц; - средний 0,3Гц-3мГц; - медленный 10^{-4} Гц-10кГц; - электростатический датчик; БНЛ - камера вторичной эмиссии	ЦЕРН-трансформатор с временем нарастания 5мксек; - камера вторичной эмиссии; - активированная фольга; АНЛ - камера вторичной эмиссии	ЦЕРН- камера вторичной эмиссии - трансформатор тока; - электронная эмиссия с мишеней и пластин; - активированная фольга АНЛ - камера вторичной эмиссии - ионизационная проволочная камера. БНЛ - камера в торичной эмиссии
ПОЛОЖЕНИЕ ЦЕНТРА МАССЫ ПУЧКА	ЦЕРН- электростатические электроды: - электромагнитный датчик; АНЛ - ионизационная камера, использующая остаточный гах; БНЛ - сканирующая проволочная мишень	ЦЕРН- электростатические датчики: - электромагнитный датчик; - камера вторичной эмиссии с фольговой сеткой (на накопительных кольцах)	ЦЕРН- камера вторичной эмиссии с фольговой сеткой; - ионизационная камера. АНЛ - ионизационная проволочная камера
ПОЛОЖЕНИЕ ПУЧКА И ЕГО РАЗМЕРЫ	ЦЕРН- специальные мишени, дающие размер пучка только на плоской части магнитного поля; - ИВГ - датчик измерения положения и размеров пучка в течение цикла АНЛ - ионизационная камера, использующая остаточный газ; БНЛ - сканирующая проволочная мишень	ЦЕРН - камера вторичной эмиссии с фольговой сеткой. - малая сканирующая мишень (цилиндр) - флуоресцирующие экраны и телевидение	ЦЕРН - камера вторичной эмиссии с фольговой сеткой; - малая сканирующая мишень (цилиндр); - флуоресцирующие экраны и телевидение; - ИВГ - с частотой сканирования 50 Гц АНЛ - ионизационная проволочная камера

Параметры пучка	Метод измерения		
	Циркулирующий пучок	Быстрый вывод	Медленный вывод
	ЦЕРН- широкополосный электростатический электрод с временем нарастания 400 псек. - электромагнитный датчик с временем нарастания 1нсек.		ЦЕРН - мишени, дающие временную структуру; - рубиновые сцинтилляторы

сящим от толщины материала /3,18/. Для выделения явления в чистом виде необходима минимальная толщина фольги, хорошая чистота поверхности и достаточно высокий вакуум.

При толщине фольги 5 мкм и вакууме 10^{-9} тор вклад δ - электронов и ионизации остаточного газа не превышает $2 + 3\%$ на энергии 19,2 Гэв/с для камеры, состоящей из 20 электродов. В докладе /19/ упоминается о применении электродов из тонкой органической алюминированной пленки. Однако для исключения накопления поверхностного заряда алюминирование пленки производится с двух сторон.

Схематическое устройство камеры вторичной эмиссии приведено на рис. 1. Эффективность одной пары таких электродов при измерении интенсивности составляет $2,5\%$ /3,18/. Под эффективностью понимают отношение числа эмиттированных электронов к числу падающих на фольгу протонов. Для увеличения эффективности камеры вторичной эмиссии как измерителя интенсивности увеличивают число эмиттирующих фольг. В таблице № 2 приведены параметры трех камер SEC 5, SEC 20, SEC 40, применяемых в ЦЕРНе /3,18/. На рис. 2 изображена внутренняя часть камеры вторичной эмиссии SEC 40. Как следует из фотографии, часть электродов камеры содержит отверстия с диаметром, несколько превышающим размеры пучка. Сигналы с датчика считаются достоверными лишь при отсутствии сигналов с электродов, имеющих отверстия. В противном случае измеряемый пучок не сфокусирован и может облучать арматуру камеры вторичной эмиссии, что вносит чрезвычайно большую погрешность в измерения.

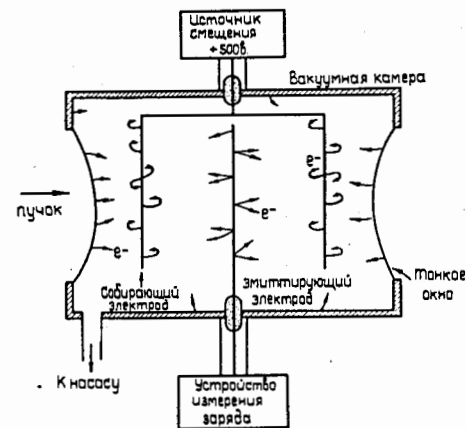


Рис.1. Схематическое устройство камеры вторичной эмиссии.

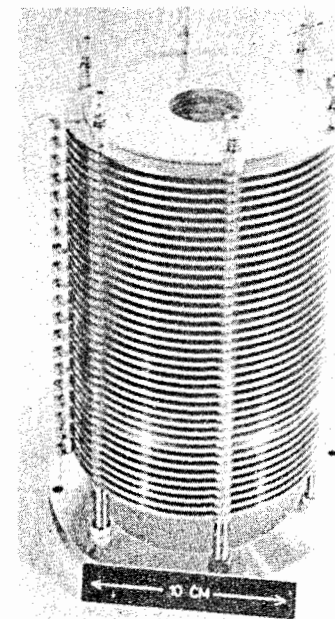


Рис.2. Внутренняя часть камеры вторичной эмиссии.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕР ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ

Модель	Число электродов общее имитирующ.	Материал и толщина	Материал и толщина окон	Общее коли- чество материа- ла на пути. 2 пучка мг.см	Полезный диаметр мм	Примечания
SEC 5	5	Al 5мкм.	Нержавеющая сталь 25 мкм	45	62	
SEC 20	21	Al 5мкм	"-	69	120	+ 20 фольг, измеряющих отверстия диаметром 40 мм
SEC 40	41	Al 5мкм	"-	109	62	2 секции по 10 имитирую- щих электродов каждая.

Основным преимуществом камер вторичной эмиссии является линейность в широком диапазоне энергий и интенсивностей (рис.3), сравнительно высокая точность измерений и хорошее отношение сигнала к шуму (при интенсивности пучка 10^{12} протонов за цикл, выходное напряжение с датчика около вольта).

Недостатками такого типа датчиков являются сложность конструкции и высокие требования к вакууму: $10^{-8} + 10^{-9}$ торр (применение масляных диффузионных насосов недопустимо ввиду возможного загрязнения поверхности электродов маслом). Конструкция камеры должна выдерживать отжиг при температуре не менее 200°C .

Явление вторичной эмиссии положено в основу измерителя профиля пучка, выполненного в виде двух решеток (в вертикальной и горизонтальной плоскостях). Решетки представляют собой полоски алюминиевой фольги (15шт.) толщиной 20 мкм, шириной 2 мм, натянутые с шагом 5 мм на керамическую рамку (рис.4). Эмиттированные электроны собираются на двух коллекторных электродах, выполненных из фольги, толщиной 5 мкм. Датчик используется для измерения эмиттанса в ионопроводах накопительных колец ЦЕРНА и работает в ультравысоком вакууме (10^{-10} торр) /4/.

Заряды, собранные на коллекторных электродах, измеряются с помощью электрометрических усилителей с большим входным сопротивлением: $10^{10} + 10^{12}$ ома. Такие усилители выполняются с применением полевых транзисторов, которые могут обеспечить входное сопротивление до $10^{13} + 10^{14}$ ома.

ИЗМЕРИТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ЯВЛЕНИЕ ИОНИЗАЦИИ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА

Датчики подобного типа используются в основном для измерения положения и профиля пучка, как циркулирующего, так и выведенного.

При давлении в камере ускорителя 10^{-6} торр в одном кубическом сантиметре содержится около $3,2 \cdot 10^{10}$ молекул газа^{7,8/}, что при токе циркулирующего пучка 300 ма (соответствующего $\sim 10^{12}$ протонов за цикл для ускорителя Аргонской национальной лаборатории (АНЛ)) образуется $\sim 6,5 \cdot 10^{10}$ протонов в секунду на сантиметр длины пути протонов. На принципе сбора полученных таким образом зарядов основан измеритель профиля пучка, применяемый в АНЛ. Схематическое изображение датчика приведено на рис. 4.

Ионы, образованные в результате взаимодействия пучка протонов с молекулами остаточного газа, ускоряются при прохождении через сетку и собираются на верхнем разрезном электроде. Одновременно такая сетка выполняет роль электростатического экрана. Вторая сетка, находящаяся под отрицательным потенциалом, служит для возвращения вторичных электронов на разрезной электрод. Ионный ток, собранный каждым элементом разрезного электрода, пропорционален мгновенному значению тока пучка в соответствующем сечении камеры ускорителя. Разрезной электрод состоит из десяти частей. Датчик используется для определения размеров пучка в камере синхротрона и выведенного пучка. Длина электродов (вдоль пучка) — от 2,5 см до 5,1 см. Для увеличения сигнала детектора используется явление электронной

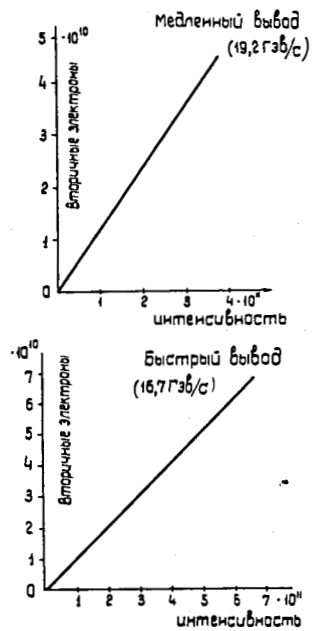


Рис.3. Характеристика камеры вторичной эмиссии:

- для медленно выведенного пучка протонов,
- для быстро выведенного пучка протонов.

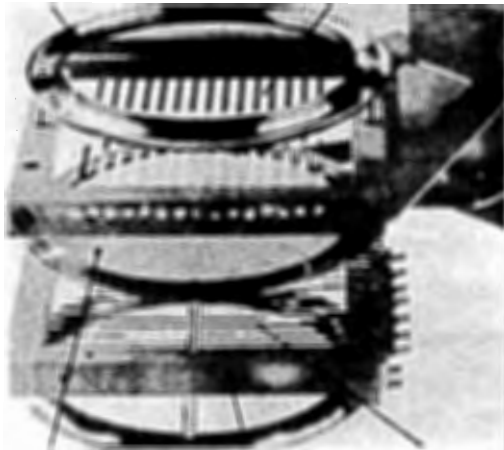


Рис.4. Конструкция измерителя профиля пучка, использующего эффект вторичной эмиссии.

эмиссии, вызываемое некоторым дополнительным ускорением ионов, образуемых пучком протонов. Выходной сигнал датчика может использоваться либо для подачи на электрометрический усилитель, либо на экран, светящийся под ударами вторичных электронов. В этом случае ионы ускоряются до нескольких кэВ и взаимодействуют с алюминиевой пластиной, находящейся под высоким потенциалом. В результате вторичные электроны, выбитые ионами, возвращаются обратно на экран, увеличивая его свечение, вызванное первичными электронами. Свечение экрана наблюдается с помощью телевизионной установки. Выходное напряжение электрометрических усилителей используется для вывода информации на осциллографы и на ЭВМ, применяемую для вычисления радиального и вертикального размеров пучка. При указанных параметрах циркулирующего пучка на сантиметр длины электрода датчика возбуждается ионный ток в $10,4$ на.

Для определения положения пучка используется более простая система электродов (рис.6) /8/.

Описанная выше система определения профиля пучка имеет ограниченные возможности по скорости и частоте измерений вследствие неизбежно большой постоянной времени измерительных электрометрических усилителей (при входном сопротивлении $10^{10} + 10^{12}$ ом существенное влияние на постоянную времени оказывает даже небольшая паразитная емкость). Разрешающая способность такой системы зависит от числа электродов.

От указанных недостатков свободна система сканирования, используемая в ЦЕРНе для мгновенных измерений профиля циркулирующего и выведенного пучков /3,9,18/. Система получила название IBS (The Ionization Beam Scanner).

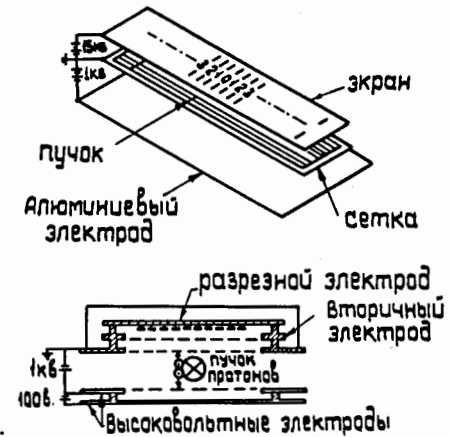


Рис.5. Измеритель профиля циркулирующего пучка, использующий явление ионизации остаточного газа в камере ускорителя.

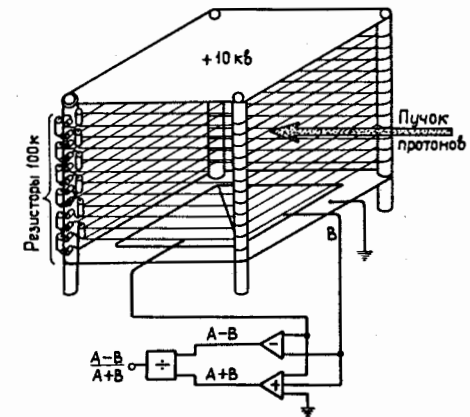


Рис.6. Измеритель положения пучка.

Пучок протонов проходит между двумя электродами, к которым приложено электрическое поле, меняющееся во времени по пилообразному закону. Вдоль пучка направлено магнитное поле (рис.7). Под влиянием пересекающихся электрического и магнитного полей электроны, возникшие в результате ионизации пучком протонов остаточного газа, движутся по циклоидной траектории в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{B} . Скорость дрейфа электронов пропорциональна величине $\frac{E}{B}$ в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой расположены векторы \vec{E} и \vec{B} . Радиус траектории определяется:

$$R = \frac{[\dot{x}_0^2 + (\dot{y}_0 + \frac{E}{B})^2]^{\frac{1}{2}}}{\frac{e}{m} B},$$

где $\frac{e}{m}$ - отношение заряда электрона к его массе;
 \dot{x}_0 - начальная скорость электрона в направлении электрического поля;
 \dot{y}_0 - начальная скорость электрона в направлении, перпендикулярном к плоскости, в которой расположены векторы электрического и магнитного полей.

Соответствующим выбором величин B и E можно получить скорость перемещения электронов вдоль нулевой электрической эквипотенциали (рис.7) около 10^{-8} см/сек при радиусе $R = 2$ мм. Такие значения достигаются при $E \approx 200$ в/см; $B = 100 + 150$ гс. При этом получено среднее время сбора электронов $50 + 100$ нсек. Собранные электроны направляются в электронный умножитель.

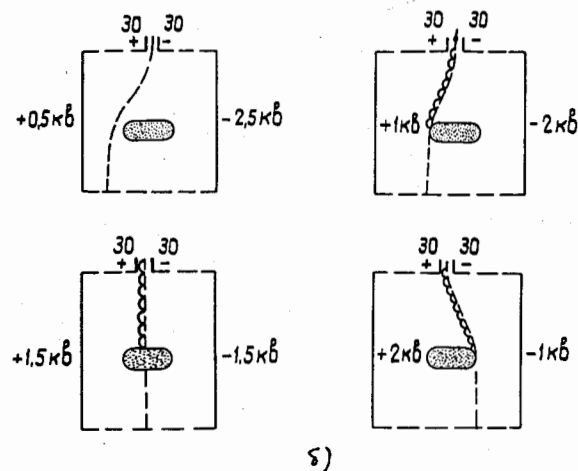
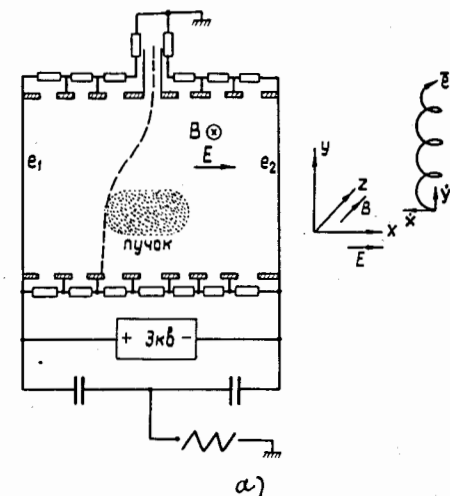


Рис.7. Принцип работы сканирующего датчика измерения профиля пучка.

Пространственное разрешение системы лучше 1 мм ^{/3/}. Система сканирования используется:

1. Для определения вертикального и горизонтального положения циркулирующего пучка в ускорителе (эксплуатационные параметры). Частота сканирования от 100 гц до 10 кгц. Давление остаточного газа от $5 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-7}$ торр.

2. Для определения вертикального и горизонтального положения циркулирующего пучка в камере ускорителя (в целях изучения). Частота сканирования 100 гц - 500 кгц.

3. Для определения размеров медленно выведенного пучка при давлении остаточного газа 10^{-1} торр. Частота сканирования 50 гц.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ

Электромагнитные датчики используются в основном для измерения интенсивности пучка заряженных частиц. Датчик можно рассматривать как широкополосный трансформатор, в котором ток пучка образует первичную обмотку, а вторичная обмотка подключена к низкоомному входу усилителя с большим коэффициентом усиления, охваченному глубокой обратной связью. Увеличение полосы пропускания системы измерения улучшает свойства датчика, но ухудшает его шумовые характеристики. По этой причине весь диапазон длительностей контролируемого пучка перекрывается несколькими датчиками ^{/2/}. Для импульсов большой длительности (медленный вывод) низкочастотная характеристика датчика обеспечивается введением третьей обмотки в цепь обратной связи (*Hereward transformer*) ^{/10/}.

Принцип действия датчика иллюстрируется рис. 8. Для расширения полосы пропускания в области высоких частот трансформатор Харворда выполняется с малым числом витков, малой распределенной емкостью и дополняется магнитным модулятором /II/. Конструктивно трансформатор Харворда выполнен на наборе тороидальных сердечников (рис.9) из высококачественного пермаллоя ("Ultraperm - 10", $\mu = 120.000$) размером 130x90x90 мм. Сигнальная обмотка содержит 15.000 витков. При токе пучка 0,25 мкА (что соответствует интенсивности выведенного пучка 10^{12} протонов при длительности вывода 200 мсек) выходное напряжение датчика составляет 7,5 мкВ. Коэффициент усиления усилителя (Philbrick SP 656 с разомкнутой петлей обратной связи) около $2 \cdot 10^8$.

Малые выходные сигналы обуславливают жесткие требования к экранировке (рис.9) и собственным шумам усилителей. По этой причине такие датчики целесообразно применять при сравнительно больших точках пучка (циркулирующий пучок и т.п.) Использование электромагнитных датчиков для измерения интенсивности выведенных пучков связано с техническими трудностями, обусловленными указанными выше причинами.

Для измерения интенсивности и структуры циркулирующего пучка в накопительных кольцах ЦЕРНа применены трансформаторы Харворда с магнитным модулятором (рис.10)/II/. Полоса пропускания такого датчика 0 + 200 мгц (время нарастания сигнала несколько наносекунд).

Используются в основном для измерения интенсивности пучков заряженных частиц. Принцип работы основан на измерении заряда пучка, проходящего между двумя электродами /II/.

Рис. II иллюстрирует работу такого датчика. Выходное напряжение датчика определяется:

$$U = \frac{N_0 l e}{v \cdot t \cdot C_d}$$

- где N_0 - число протонов в импульсе;
 e - заряд протона;
 l - длина электрода;
 v - скорость протонов;
 t - длительность импульса вывода;
 C_d - емкость датчика.

Для интенсивности $5 \cdot 10^{11}$ протонов в цикле и длительности вывода 200 мсек при емкости датчика 27 пф выходное напряжение составляет 37 мкв на сопротивлении $10^8 \pm 10^9$ ом /II/. Основными недостатками электростатических датчиков являются их большие размеры и подверженность воздействию внешних помех. Отношение сигнала к помехе для электростатических датчиков хуже, чем для электромагнитных /II/.

ФЛЮОРЕСЦИРУЮЩИЕ ЭКРАНЫ

Применяются для наблюдения положения профиля пучка с помощью телевизионных камер. Такие измерители используются для наблюдения пространственных характеристик выведенных пучков (быстрый и медленный вывод) /4,5/.

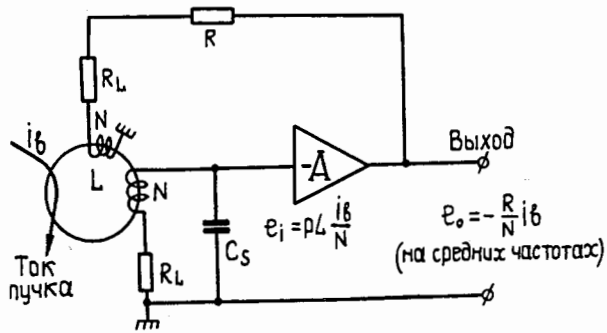


Рис.8. Принцип действия трансформатора Хареворда.

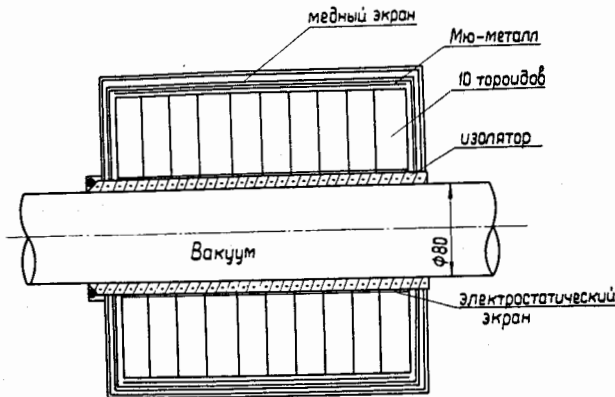


Рис.9. Конструкция трансформатора Хареворда.

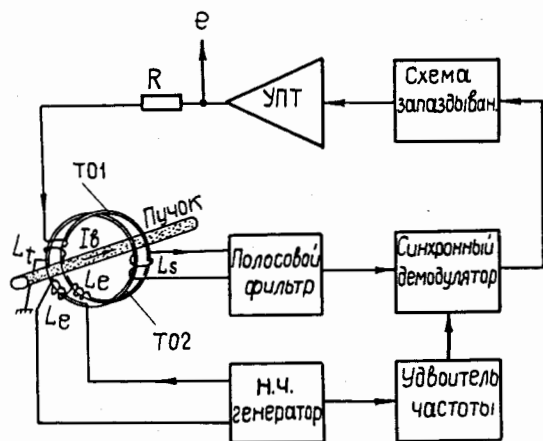


Рис.10. Схема широкополосного измерителя с полосой пропускания 0-200 мГц.

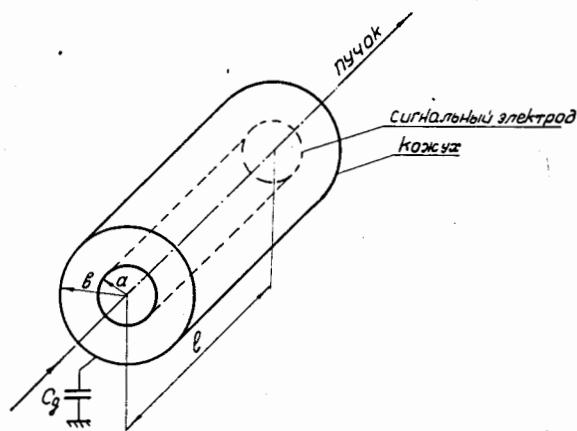


Рис.11. Электростатический датчик.

Обычно экран выполняется из тонкой алюминиевой фольги, покрытой тонким слоем активированного ZnS на подходящем связующем материале. Однако такие экраны теряют чувствительность после экспозиции приблизительно 10^{17} протонов на 1 см^2 и неприменимы для ультравысокого вакуума.

Величина минимального тока пучка, вызывающего свечение экранов из других материалов, достаточное для наблюдения телевизионной камерой с объективом $F : 4,5$ при оптимальных условиях, приведена в таблице 3 /4/. Литиевое стекло $NE 90I$ — наиболее подходящий для экрана материал. Его чувствительность (для диска толщиной в 1 мм) лишь в два раза меньше чувствительности экранов с покрытием из ZnS . Угол рассеяния, вносимый таким экраном (10^{-4} рад. для 28 ГэВ/с), может быть уменьшен, если применить нити толщиной $0,3 \text{ мм}$ с шагом 4 мм (угол рассеивания $5 \cdot 10^{-5}$ рад.).

Сапфир (Al_2O_3) в два раза менее чувствителен, чем литиевое стекло.

Кварц малочувствителен, но достаточно стоек.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ КАМЕРЫ

Датчик работает на принципе сбора электронов или ионов, образованных при прохождении частиц через газовую смесь, наполняющую камеру. Конструктивно такие камеры выполнены так же, как пропорциональные, но работают с малыми значениями коэффициента газового усиления.

В Аргоннской национальной лаборатории с помощью таких камер измеряется профиль, положение и интенсивность пучка /14,16,17/. По данным, полученным при измерении профиля в нескольких точках, рассчитывается эмиттанс пучка.

ТАБЛИЦА № 3

	ZnS	Литиевое стекло NE90I	Сапфир	Кварц
Наноампер/см ² (пост. ток)	0,1 мм покрытие	1 мм диск	1 мм диск	1 мм пластина
	10	20	40	140
	0,2 мм нити	9.10 ¹⁰	5.10 ¹⁰	1.8.10 ¹¹
Протонов/см ²	10 ¹⁰	2.10 ¹⁰	9.10 ¹⁰	5.10 ¹⁰
Цена \$	5	100	30	150
				20

Схематическое устройство ионизационной камеры приведено на рис. 12.

Один из электродов используется для измерения профиля в горизонтальной плоскости, второй электрод - высоковольтный. Третий используется для измерения профиля пучка в вертикальной плоскости.

В отличие от искровых и пропорциональных камер ^{x)} прибор не имеет окон и открыт для атмосферы /14/. При напряжении 1,5 кв максимальное значение тока с проволоки - 240 на при интенсивности $2,5 \cdot 10^{11}$ протонов в импульсе и длительности вывода 500 мсек.

Схема измерений сигналов с проволочек камеры приведена на рис. 13. Каждая проволочка камеры (48 штук в каждой плоскости) подключена к электронному переключателю образованному двумя полевыми транзисторами с МОП-структурой (Silicon G116F или FACHILD 3701), один из которых соединен последовательно, а другой параллельно с измерительным усилителем, входное сопротивление которого равно 10^7 ом. Указанные транзисторы в закрытом состоянии обладают сопротивлением $\sim 10^8$ ома, а в открытом $\sim 10^3$ ома. Открывая последовательные и запирая параллельные транзисторы специальными импульсами, производят последовательное подключение проволочек к измерительному усилителю. Съем информации с вертикальной и горизонтальной плоскостей

^{x)} Для измерений пространственных характеристик пучка вторичных частиц в ЦЕРНе используется пропорциональная камера /20/, однако ее временные характеристики (разрешающее время 60 нсек) не позволяют производить измерений на высокоинтенсивных пучках.

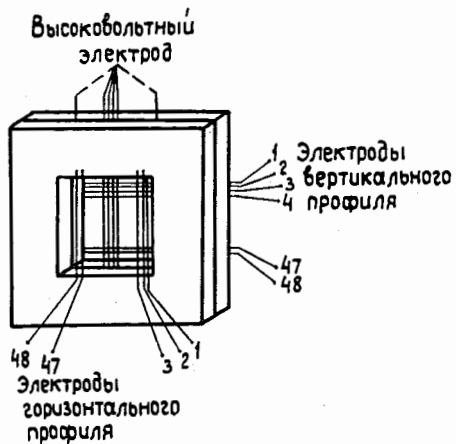


Рис.12. Схематическое устройство ионизационной камеры

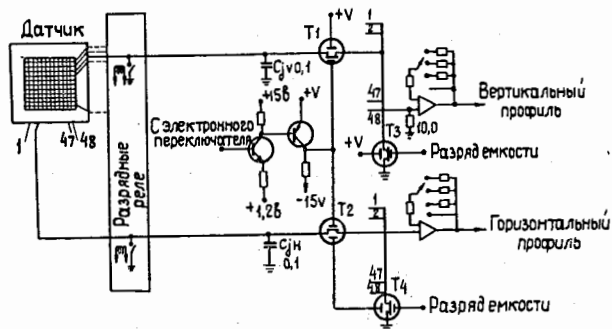


Рис.13. Схема измерений сигналов с ионизационной камеры.

производится одновременно. Частота переключений проволочек - 2 кгц. Выходное напряжение измерительного усилителя через аналого-цифровой преобразователь заводится в ферритовую память /16/ с последующей обработкой на ЭВМ. В течение вывода (600мсек) можно произвести до 20 измерений профиля.

Интегрирование может производиться либо в цифровом виде /16/, либо в аналоговом с помощью емкости C_j (за несколько циклов медленного вывода) (рис.13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках допустимого объема не представляется возможным подробно рассмотреть методы расчетов, конструирования и калибровки рассмотренных типов датчиков. В обзоре не приводятся сведения о наиболее типичных помехах на ускорителе /10/, что представляет несомненный интерес для специалистов. Указанные недостатки в какой-то мере могут быть восполнены подробной библиографией, приведенной в обзоре.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. IEEE Transactions on Nucl. Science. Vol.NS-16,N 3 (840-938), 1969.
2. V.Agoritsas, S.Battisti, C.D.Johnson, G.Schneider. CERN/MPS/CO 70-6, 17 Aug.,1970.
3. V.Agoritsas."Secondary Emission Chambers for Monitoring the CPS Ejected Beam". CERN MPS/Int. C/ 68-9, 20 May,1968.
4. D.A.G.Neet. "Beam Profile Monitors for Fast and Slow Extracted Proton Beams ". IEEE Transactions on Nucl. Science, vol.NS-16, N 3 (914-918), June 1969.
5. J.D.Fox, G.W.Bennett, G.S.Levine et al. "Instrumentation and Control of AGS Slow External Beam". IEEE Transactions on Nucl. Science, vol. NS-16, N 3 (832-836), June 1969.
6. U.Vogel. "The Measurement of AGS Spatial Beam Density Distributions by Means of Flipping Targets". IEEE Transactions on Nucl. Science, vol. NS-16, N 3 (905-908), June 1969.
7. W.H.Delica. "Beam Detection Using Residual Gas Ionization". IEEE Transactions on Nucl. Science, vol. NS-16, N 3 (813-822), June 1969.
8. Quarterly Report, April 3, June 1968. Argonne National Lab., QR 68-2.
9. C.D.Johnson, L.Thorndahl. "The CPS Gas-Ionization Beam Scanner". IEEE Transactions on Nucl. Science, vol. NS-16, N 3 (909-913), June 1969.
10. H.Zulliger. "Investigations with the Use of Electromagnetic and Electrostatic Beam Monitors in the Slow Ejected Beam of the CPS". CERN MPS/Int. DL64-21, 1964.
11. K.Unser. "Beam Current Transformer with D.C. to 200 MHz Range". IEEE Transactions on Nucl. Science, vol. NS-16, N 3 (934-938), June 1969.

12. R. Hohbach, S. Mauge. "An Inductive Beam Monitor for the Extracted Proton Beam of the CERN Synchro-Cyclotron". CERN 67-6, 1967.
13. H. Annoti, A. Cordaillat, A. J. Herz et al. "Methode de Mesure du Profil d'un Faisceau Pour des Intensites Elevees de Particules ($10^{12}/\text{cm}^2$)". CERN 70-27, 1970.
14. F. Hornstra, J. R. Simanton. "A Simple, Nondestructive Profile Monitor for External Proton Beams". Nucl. Instr. & Meth., vol. 68, N 1 (138-140), 1969.
15. V. Agoritsas, S. Battisti, C. Bovet et al. "Measurement and Monitoring of the Ejected Proton Beam "58" of the CERN Proton Synchrotron". CERN, MPS/Int. DL67-2, 1967.
16. F. Hornsta, J. R. Simanton. "A Multichannel Integrator and Scanner for Wire Plane Beam Profile Displays". Nucl. Instr. & Meth., vol. 77, N 2 (303-305), 1970.
17. J. R. Simanton, R. F. Marquardt, F. Hornsta. "A Fast, Wire-Plane Profile Monitor for Extracted Proton Beams". Nucl. Instr. & Meth., vol. 68, N 2 (209-212), 1969.
18. Symposium on Beam Intensity Measurement. Daresbury, 22-26 April, 1968. Proceedings. DNPL/RI, 1968.
19. R. L. Redgrave. "Diagnostic Equipment in High Energy Beam Lines". (49-57), DNPL/RI, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел

24 мая 1971 года.