

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

5182

28/10-82

P9-82-573

А.Д.Степанов

ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА И ЭНЕРГИИ
ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ

Направлено в журнал
"Приборы и техника эксперимента"

1982

Для калибровки различных измерителей тока I_0 и заряда Q_0 электронных пучков обычно применяются датчики с коллекторными преобразователями /цилиндры Фарадея, зонды, мишени и т.д./^{1/}. Для электронных сгустков датчики такого типа имеют коаксиальную конструкцию^{2/}, что позволяет получить полосу пропускания $\Delta f \div 10^{10}$ Гц, т.е. разрешающую способность $\tau \div 10^{-10}$ с.

При энергии электронов $\mathcal{E}_0 > 1$ МэВ применение таких датчиков зачастую невозможно, т.к. толщины коллектора и коллиматора, необходимые для достижения заданной точности измерений, становятся больше допустимых из условия исключения влияния датчика на переменные магнитные поля и движение электронов. Ограничена также и величина допустимой плотности тока измеряемого сгустка вследствие опасности электрических пробоев, особенно в переходном процессе.

Известны также устройства^{1/} для измерения тока и энергии электронных пучков, включающие датчик в виде набора металлических пластин. Принцип их действия основан на использовании зависимости экстраполированного пробега $R_э$ или коэффициента прохождения T электронов через пластины от \mathcal{E}_0 . Такие датчики в той или иной мере имеют указанные выше недостатки и, кроме того, - низкую разрешающую способность из-за наличия собственной индуктивности и емкости пластин.

В данной работе предлагается расчет и конструкция датчика с величиной $\Delta f \div 10^{10}$ Гц, позволяющего измерять токи сгустков до 10^4 А при $0,2 < \mathcal{E}_0 < 30$ МэВ. Его коллектор /см.рис.1/ содержит набор металлических пластин 2,3,4 толщиной $D \leq R_э$, расположенных нормально к траектории электронов, последовательно одна за другой. Ширина пластин H и расстояния между ними P выбраны из условия равенства волнового сопротивления ρ_{Π} полосковой линии, образованной пластинами, и волнового сопротивления $\rho_{\text{л}}$ соответствующей коаксиальной линии передачи 11,12. Соединение указанных выше линий выполнено через полосковый переход 6-9. Расчет и конструирование полосковых устройств^{3/}, величина τ будут определяться полосой пропускания линий, что соответствует пикосекундному диапазону^{4/}. Величина разности потенциалов ΔU между пластинами, возникающая при прохождении сгустка, равна:

$$\Delta U = K \rho_{\Pi} \Delta Q / \Delta t, \quad /1/$$

где K - эмпирический коэффициент, $\Delta Q / \Delta t$ - величина разности зарядов, поглощенных пластинами за время Δt . Как видно из /1/, для увеличения максимальной величины тока $I_{0 \max}$, допустимой

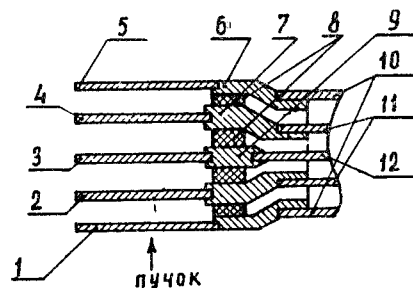


Рис.1. Конструкция датчика: 1 и 5 - экран из алюминиевой фольги толщиной 0,06 мм. 2-4 - пластины, образующие симметричную полосковую линию. Соответственно: 2 - танталовая, толщиной 0,75 мм, 3 - медная - 0,55 мм, 4 - танталовая - 0,22 мм, 6-9 - детали полоскового перехода, 10 - экран линии передачи, 11,12 - коаксиальная линия передачи.

из условия электрической прочности $\Delta U < U_{\text{пр}}$, где $U_{\text{пр}}$ - величина напряжения пробоя, нужно уменьшать ΔQ . Это достигается выбором соотношений между толщинами пластин из условия приблизительно равенства их потенциалов, которое можно записать в виде:

$$Q_i(d_i, \mathcal{E}_0, Z_i) \approx \text{const} \quad i = 1, 2, \dots, S, \quad /2/$$

где Q_i - заряд, поглощенный i -той пластиной, d_i - ее толщина, Z_i - атомный номер вещества пластины, S - число пластин датчика.

В этом случае электрическая прочность будет определяться линией передачи и нагрузкой. Вторым путем уменьшения ΔQ является уменьшение d_i , что необходимо и для исключения влияния датчика на переменные магнитные поля: $\sum_{i=1}^S d_i \ll \delta$, где δ - толщина скин-слоя проникновения переменного магнитного поля в пластины датчика. Чтобы при этом не ухудшалась точность измерений заряда крайних пластин Q_k из-за увеличения доли вторичных электронов^{1/}, введены две дополнительные внешние пластины 1 и 5 /экран/ толщиной $d \ll R_э$, соединенные через переход 6 с экраном 10 коаксиальной линии передачи 11,12. Баланс токов вторичных электронов любой внутренней пластины будет уравновешен. Например, для второй пластины: $q = q_{1В} + q_{3Н} - q_{2Н} - q_{2В}$, где $q_{1В}$, $q_{2В}$, $q_{2Н}$, $q_{3Н}$ - вторично-эмиссионный заряд первой, второй и т.д. пластин, испускаемый вперед /в/ или назад /н/. Т.к. $d_i \ll R_э$, то изменение энергии электронов на каждой пластине невелико, т.е. коэффициент вторичной эмиссии остается практически постоянным, и значит, можно записать следующее равенство:

$$|q_{1В}| \approx |q_{2В}|; \quad |q_{3Н}| \approx |q_{2Н}|,$$

т.е. $q \approx 0$. Это позволяет снизить величину Q_k на порядок, до $Q_k \approx 0,03 Q_0$. Все рассмотренные выше меры дают возможность в 50-100 раз увеличить величину $I_{0 \max}$ и исключить влияние

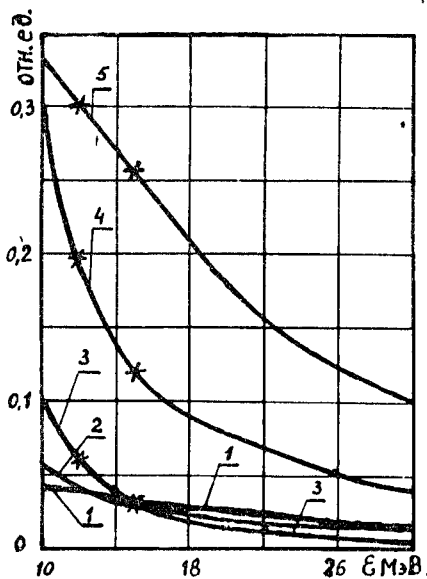


Рис. 2. Зависимость величин $(Q_4 - Q_3)/Q_0$; $(Q_2 - Q_3)/Q_0$; Q_3/Q_0 ; $(Q_2 + Q_4)/Q_0$ от энергии ϵ_0 . Соответственно кривые 1-5; x - точки калибровки датчика.

датчика на переменные магнитные поля, сохранив при этом точность измерений. Величины d_1 , удовлетворяющие условию /2/, определяются из зависимости Q_1 от d_1 , ϵ_0 , Z_1 . Анализ экспериментальных данных работ /5-8/ показал, что для $12 \leq Z_1 \leq \text{const} \leq 82$; $0,2 < \epsilon_0 < 30$ МэВ с точностью $\pm 5\%$ эту зависимость можно представить формулой из работы /5/:

$$T_N = 1 - \sum_{i=1}^N Q_i / Q_0 = \exp[-a(\sum_{i=1}^N X_i)^b], \quad N = 1, 2, 3, \dots, S; \quad /3/$$

где $X_i = d_i / R_3$; T_N - коэффициент прохождения электронов через N пластин, a, b - параметры, определяемые из экспериментальных кривых $T = T(X_1, \epsilon_0, Z_1)$

$$a = -\ln T(X=1); \quad b = (1 - \ln a) / \ln X(T=0,7). \quad /4/$$

При пластинах с разными Z_1 в расчетные формулы вместо Z_1 подставляют величину $Z_{\text{эф}}$, /см. /7/ / и методом последовательных приближений находят толщину каждой последующей пластины, удовлетворяющей условию /2/. Задаваясь величинами $\Delta Q / Q_0$ или $U_{\text{пр}}$, ϵ_0 , T_N , Z_1 по /3-4/ и данными работ /5-8/, находим a, b, R_3, X_i , удовлетворяющие /2/, зависимости величин $(Q_4 - Q_3)/Q_0$ и $(Q_2 - Q_3)/Q_0$ от ϵ_0 /см. рис. 2 кривые 1 и 2 соответственно/, позволяющие определить область энергий, где $\Delta U < U_{\text{пр}}$. Аналогично рассчитываются зависимости величин Q_3/Q_0 , $(Q_2 + Q_4)/Q_0$, $Q_3/(Q_2 + Q_4)$ от ϵ_0 /см. рис. 2, кривые 3, 4, 5 соответственно/, позволяющие по измеренным величинам Q_2, Q_3, Q_4 определить энергию и заряд электронного сгустка. Временная зависимость тока сгустка и его величина определяются из измеренных стандартными способами формы импульса напряжения ΔU /см. /1// при согласованной нагрузке и величины Q_3 при емкостной нагрузке.

Расчет по изложенной выше методике при $\epsilon_0 = 15$ МэВ, $T_2 = 0,06$, $Z_1 = Z_5 = 13$, $Z_2 = Z_4 = 73$, $Z_3 = 29$, $\rho_{\text{п}} = 50$ Ом, $\Delta Q / Q_0 \leq 0,05$,

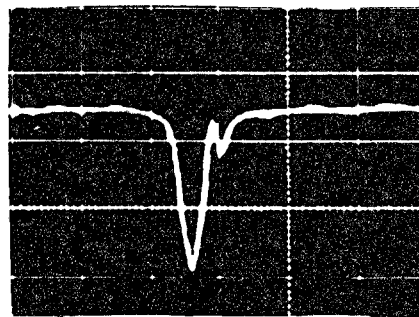


Рис. 3. Осциллограмма с датчика импульса тока электронов с энергией $\epsilon_0 = 12$ МэВ на модели коллективного ускорителя. Кабель РК-50-4-13 длиной 42 м. Развертка 100 нс/дел, 100 мВ/дел.

$d_1 = d_5 = 0,06$ мм, дает такие параметры датчика: $d_2 = 0,75$ мм, $d_3 = 0,55$ мм, $d_4 = 0,22$ мм, $H_3 = 8$ мм, $H_2 = H_4 = 12$ мм, $R = 2$ мм. В диапазоне энергий

электронов $12 \leq \epsilon_0 \leq 20$ МэВ, $I_{0 \text{ max}} \leq 3 \cdot 10^8$ А.

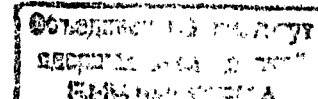
Для проверки работоспособности датчика были проведены калибровочные измерения величины Q_1 на микротроне при $\epsilon_0 = 15$ МэВ /точки на рис. 2 обозначены x. Измерения на модели коллективного ускорителя /9/, при $\epsilon_0 = 12$ МэВ, длине кабеля 42 м, в присутствии мощных импульсных магнитных полей, показали, что датчик не вносил заметных искажений магнитного поля и позволил измерить форму тока пучка без частотных искажений /см. рис. 3/. Амплитудно-частотная и переходная характеристики в полосе частот до $1,4 \cdot 10^9$ Гц были измерены стандартными методами и соответствуют расчетным. Точность измерений величины ϵ_0 равна 5%, тока - 10%.

Надежность, малые габариты, простота конструкции и методики измерений, возможность измерений в импульсных магнитных полях позволят широко использовать предлагаемый датчик в ускорительной технике.

В заключение автор выражает благодарность В.П.Рашевскому, А.К.Каминскому, А.Г.Белову, Н.И.Жарову за помощь при разработке, изготовлении и испытании датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москалев В.А., Сергеев Г.И., Шестаков В.Г. Измерение параметров пучков заряженных частиц. Атомиздат, М., 1980, с.78-81.
2. Альбинов З.А., Веретенников А.И., Козлов О.В. Детекторы импульсного ионизирующего излучения. Атомиздат, М., 1978, с.14-37.
3. Конструирование и расчет полосковых устройств /под ред. И.С.Ковалева/. Сов.радио., М., 1974, с.23-84.
4. Глебович Г.В., Ковалев И.П. Широкополосные линии передачи импульсных сигналов. Сов.радио, М., 1973, с.10-45.
5. Ebert P.J., Lauzon A.F., Lent E.M. Phys.Rev., 1969, 183, No2, 422.
6. Harder D., Poschet G. Phys.Lett., 1967, 24b, No10, 519.



7. Вторичное электронное излучение /под ред. В.В.Смирнова/. Изд. РИАН СССР им. В.Г.Хлопина, Ленинград., 1977, с.94-112.
8. Баранов В.Ф. Дозиметрия электронного излучения. Атомиздат., М., 1979.
9. Дерендяев Ю.С., Иванов И.Н., Каминский А.К. ОИЯИ, Р9-9140, Дубна, 1975.

Степанов А.Д.

P9-82-573

Датчик для измерения тока и энергии электронных сгустков

Описано устройство широкополосного датчика тока и энергии электронных сгустков, выполненного в виде полосковых линий, образованных набором изолированных металлических пластин и согласованных с линиями передач сигнала. Работа датчика основана на использовании зависимости коэффициента прохождения электронов через вещество от их энергии. Дан способ увеличения допустимой плотности тока измеряемого сгустка и уменьшения толщины крайних пластин, без ухудшения точности измерений.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Stepanov A.D.

P9-82-573

Pick-Up Device for Measuring Current and Energy of Electron Bunches

The device of a wide-band pick-up of electron bunch current and energy, made as slab line and formed by a set of isolating metallic plates and matched with the signal transmission lines, is described.

The pick-up performance is based on the usage of dependence of electron passing via matter on their energy.

The way of increasing available current density of the measuring bunch and decreasing the thickness of the edged plates without deteriorating the measurement accuracy, is presented.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1982

Рукопись поступила в издательский отдел
22 июля 1982 года.

Перевод О.С.Виноградовой.