

Изобретение относится к преобразователям параметров электронного излучения малой энергии (~10 МэВ) и может быть использовано в ускорительной технике, радиационной технологии и метрологии электронного излучения.

Прототипом изобретения является устройство-преобразователь энергетического спектра и потока электронов, содержащее набор плоских проводящих поглотителей пучка (фолы), в котором производят измерение заряда, полученного каждой фольгой в результате воздействия потока электронов [3].

Недостатком устройства являются относительная сложность осуществления измерений, связанная с необходимостью раздельного сохранения и измерения заряда каждой фольги, ограничение по энергетическому разрешению из-за использования конечного числа фольг с фиксированной толщиной, а также невозможность измерения профиля плотности исследуемого потока электронов.

Задачей, на решение которой направлено изобретение, является такое усовершенствование конструкции устройства, которое обеспечит при упрощении конструкции расширение функциональных возможностей.

Поставленная задача решается тем, что в устройстве, содержащем поглотитель пучка электронов и измеритель, тока проводимости, согласно изобретению, поглотитель пучка электронов выполнен в виде двух гальванически связанных тел с возможностью их одновременного перемещения с одинаковой скоростью навстречу друг другу нормально и симметрично оси пучка по разные стороны общей плоскости скольжения, причем передние по ходу движения части тел имеют форму клина, одна поверхность которого контактирует с плоскостью скольжения, другая образует с ней угол α , который определяется по формуле

$$\alpha = \arctg \left(\frac{R \cdot \frac{\Delta E}{E}}{2\sqrt{2} \Delta x} \right), \quad (1)$$

где R - максимальный пробег электронов в материале поглотителя;

$\frac{\Delta E}{E}$ - энергетическое разрешение преобразователя;

Δx - пространственное разрешение преобразователя, а ширина основания каждого клина составляет R , причем у ближнего к источнику электронов тела клин у основания переходит в плоскопараллельную пластину, имеющую в верхней части под углом 45° к оси перемещения тел прямоугольный вырез глубиной d , при этом

$$d = \frac{1}{2}(h + d\sqrt{2}), \quad (2)$$

где h - поперечный размер поглотителя,
 d - максимальный размер сечения пучка.

На фиг.1 приведен пример конкретного выполнения устройства. Части поглотителя (тела) 1,2 закреплены на каретках 3, 4, которые при помощи ходового винта 5 могут перемещаться вдоль направляющей 6. Винт 5 опирается концами в подшипники 7 (на схеме не показаны), запрессованные в щеки опоры 8, 9, к которым также крепятся концы направляющей 6. К щеке 9 прикреплен двигатель 10, вал которого соединен с винтом 5, разделенным на две симметричные относительно оси пучка части с левой и правой резьбой. Соответствующую резьбу имеют гайки ходового винта кареток 3, 4 (на схеме не показаны). Вся конструкция закреплена на изоляторах 11 и заземлена через измеритель тока проводимости (амперметр) 12.

Принцип работы устройства поясняют фиг.2 и 3. В исходный момент (перед началом измерений) обе части поглотителя разведены и пучок полностью проходит между ними на облучаемый объект (фиг.2). Для проведения измерения поглотители начинают перемещать навстречу друг другу нормально и симметрично оси пучка со средней скоростью V путем подачи напряжения на двигатель 10 (например, шаговый двигатель ШДР 721). При перекрытии частями поглотителя пучка (фиг.3а) амперметр 12 начинает регистрировать ток $I(x')$, величина которого возрастает с ростом общей толщины поглощающих тел при увеличении координаты X вершины клина относительно d пучка, причем, начиная с $x' = d/2$, для всех частиц пучка клиновидная геометрия частей поглотителя обеспечивает равную толщину поглощающего слоя (фиг.3б). Поскольку величина коэффициента поглощения электронов в плоском слое определяется его толщиной, углом наклона поглотителя к оси пучка и энергией электронов, то зависимость $I(x')$ позволяет определить энергетический спектр пучка по формуле

$$I(E) = \frac{R}{2} \operatorname{ctg} \alpha \int_{d/2} I(x') F(x', E) dx', \quad (3)$$

где $I(E)$ - поток частиц, имеющих энергию в единичном интервале вблизи значения E , $F(x', E)$ - функция чувствительности преобразователя, зависящая от величины угла клина и материала поглотителя. Она может быть определена расчетным методом, либо измерена экспериментально, например, с использованием магнитного анализатора энергии.

Перейдя к формуле (3) от интегрирования к суммированию по Δx , где Δx - шаг перемещения поглотителя, для обеспечения энергетического разрешения $\approx \frac{\Delta E}{E}$ необходимо выполнить условие.

$$\frac{R \operatorname{ctg} \alpha}{2 \Delta x} = \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^{-1}, \quad (4)$$

откуда

$$\alpha = \arctg \left(\frac{R \cdot \frac{\Delta E}{E}}{2 \Delta x^1} \right). \quad (5)$$

При величине смещения $x^1 \geq R/(2 \sin \alpha)$ весь пучок, за исключением рассеянных электронов, поглощается. Отсюда величину потока электронов можно определить по формуле

$$\Phi = \frac{K_2(E) I_m}{e}, \quad (6)$$

где I_m - величина максимума тока, измеренная амперметром 12, e - заряд электрона, $K_2(E)$ - поправочный коэффициент, зависящий от эффективного атомного номера $Z_{эф}$ материала поглотителя и эффективной энергии электронов \tilde{E} . Его значение можно установить расчетным путем или провести калибровку преобразователя по потоку электронов методом прямого сличения с образцовым прибором (например, цилиндром Фарадея из состава государственного эталона ГЭТ 72-90). В частности, для снижения коэффициента рассеяния электронов поглотитель целесообразно изготавливать из материала с малым $Z_{эф}$ (графит, Al и т.п.).

На фиг.4 представлен принцип работы преобразователя в режиме измерения профиля плотности потока электронов. Так, в процессе перемещения поглощающих тел наступает момент, когда вырез переднего из них правой стороной приоткрывает часть пучка (фиг.4 а), вследствие чего регистрируемый прибором ток $I(x^1)$ начинает снижаться так, что

$$\frac{\partial I(x^1, x)}{\partial x^1} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^d j(x, y) dy, \quad (7)$$

где $j(x, y)$ - распределение плотности потока электронов в системе координат X, Y , совпадающей с направлениями сторон выреза. Иначе говоря, производя перемещение поглотителя с шагом Δx^1 мы тем самым обеспечиваем зондирование потока электронов в направлении оси X с величиной шага (пространственным разрешением)

$$\Delta x = \frac{\Delta x^1}{\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Аналогичная процедура имеет место при перекрытии пучка левой стороной выреза (фиг.4 б) с той лишь разницей, что в этом случае

$$\frac{\partial I(x^1, y)}{\partial x^1} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^d j(x, y) dx, \quad (9)$$

т.е. $I(x)$ возрастает, причем зондирование пучка производится вдоль оси Y с шагом

$$\Delta y = \frac{\Delta x^1}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Таким образом, с учетом (8), (10) формула (5) приводится к окончательному виду (1).

Восстановление распределения $j(x, y)$ по экспериментальной зависимости $I[x^1, j(x, y)]$ производится следующим образом. Поскольку распределение плотности потока по обеим координатам взаимно независимо, то можем записать

$$j(x, y) = A(x) \cdot B(y), \quad (11)$$

откуда

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -A(x) \int_0^d B(y) dy, \quad (12)$$

$$\frac{\partial I}{\partial y} = B(y) \int_0^d A(x) dx. \quad (13)$$

Решая систему уравнений (12), (13) с учетом

$$\int_0^d \int_0^d j(x, y) dx dy = e \Phi, \quad (14)$$

получаем

$$j(x, y) = -2 \frac{\frac{\partial I(x^1, x)}{\partial x^1} \cdot \frac{\partial I(x^1, y)}{\partial x^1}}{e \Phi}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial I(x^1, x)}{\partial x^1} \text{ и } \frac{\partial I(x^1, y)}{\partial x^1}$$

где - производные тока поглотителя по координате x^1 при его перемещении левой и правой сторонами выреза соответственно.

Из рассмотренного выше принципа работы предлагаемого измерителя профиля плотности потока

электронов вытекает требование к глубине выреза: в случае $a < \frac{1}{2}(h + d\sqrt{2})$ существует интервал времени перемещения поглотителя, когда пучок одновременно взаимодействует с обеими сторонами выреза, что не позволяет разделить во времени зондирование потока по каждой из осей X; Y (формула (15) не работает);

при $a > \frac{1}{2}(h + d\sqrt{2})$ часть времени перемещения пучок свободно проходит / между сторонами выреза, не взаимодействуя с поглотителем, что снижает эффективность работы преобразователя (оперативность проведения измерений). Указанные обстоятельства и определяют соотношение (2) в формуле предполагаемого изобретения.

Из (3), в частности, следует, что в предполагаемой конструкции преобразователя низкоэнергетичная часть спектра электронов с пробегом $\leq d/2 \tan \alpha$ выпадает из рассмотрения. Это обстоятельство становится несущественным, если выполнить условие

$$\frac{d}{2} \tan \alpha \ll R, \quad (16)$$

или, с учетом (1)

$$\frac{\Delta E}{E} \ll \frac{4\sqrt{2}\Delta x}{d}, \quad (17)$$

что определяет соотношение между энергетическим и пространственным разрешением преобразователя и является вполне приемлемым условием. Так, например, в случае характерных параметров пучка технологического ускорителя электронов: $E = 10$ МэВ, $d \cong 20$ мм, частота следования импульсов $f_v = 300$ Гц,

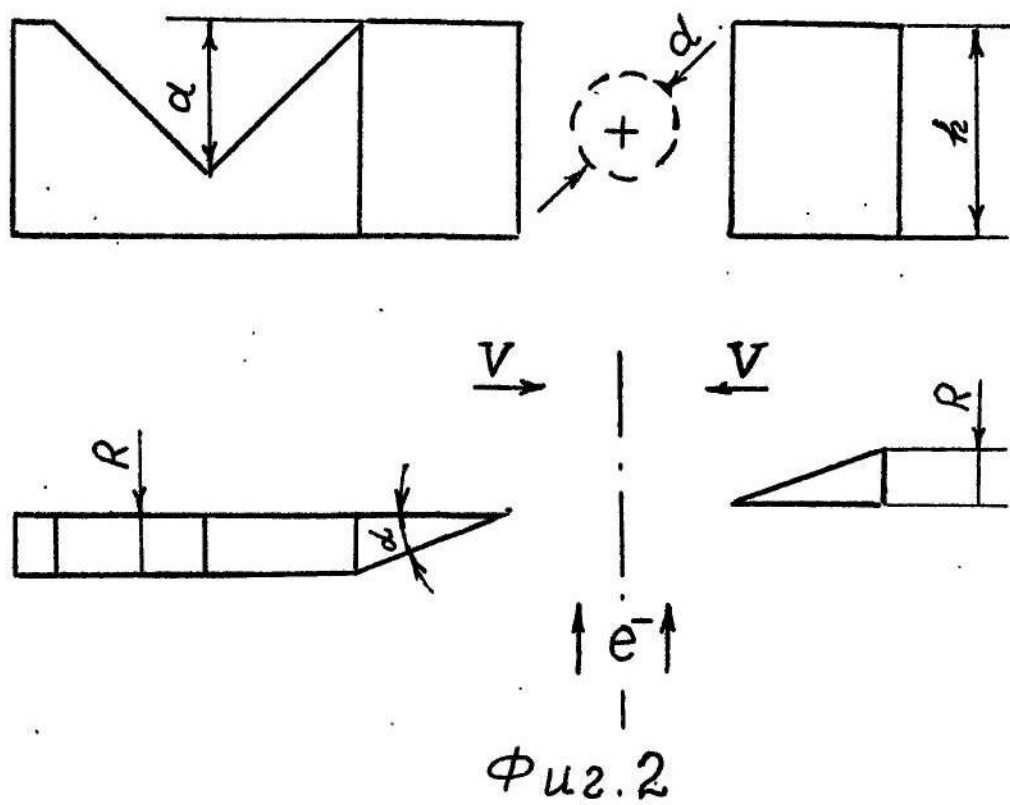
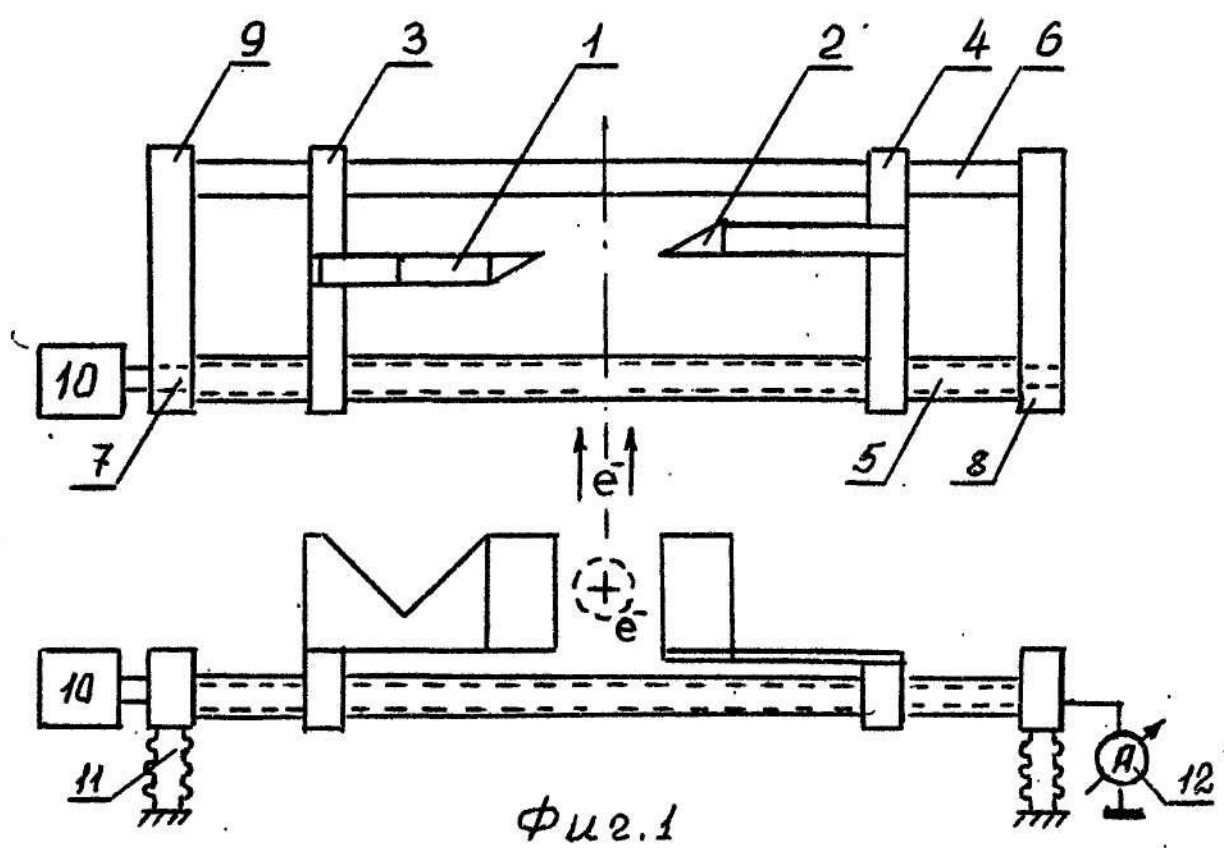
задав $\Delta x = 1$ мм, $\frac{\Delta E}{E} = 3 \cdot 10^{-2}$ для преобразователя поперечным размером $h = 60$ мм из графита ($R \cong 27$ мм) с учетом (1) получаем $\alpha = 16^\circ$. При этом минимальное время, необходимое для проведения измерений, можно оценить по формуле

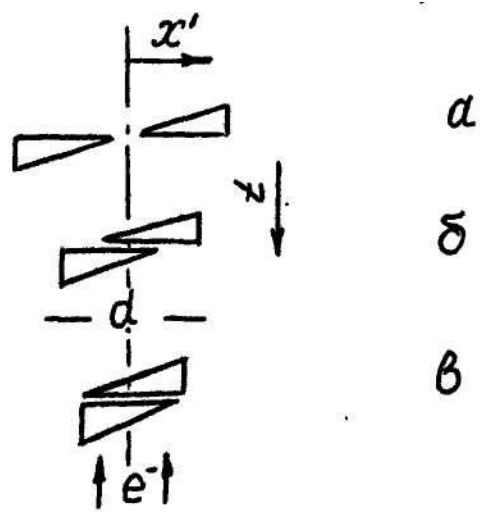
$$\Delta t \approx \frac{R \cos \alpha + h + d\sqrt{2}}{\sqrt{2}\Delta x \cdot f_y}, \quad (18)$$

или в нашем случае $\Delta t < 0,5$ с.

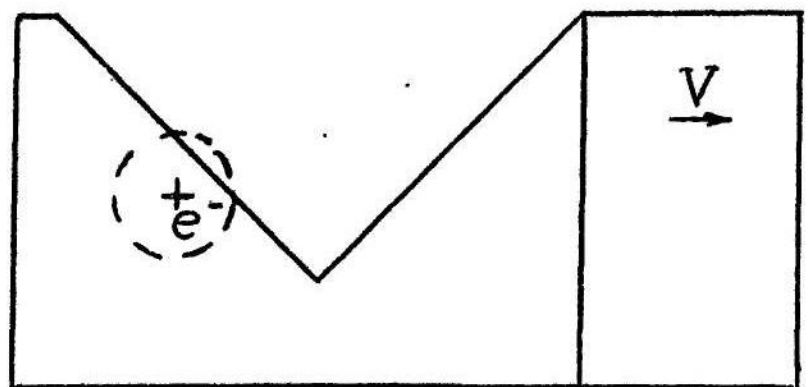
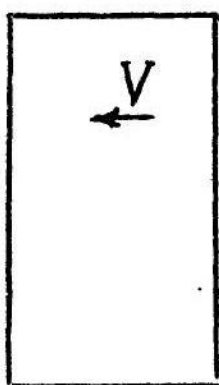
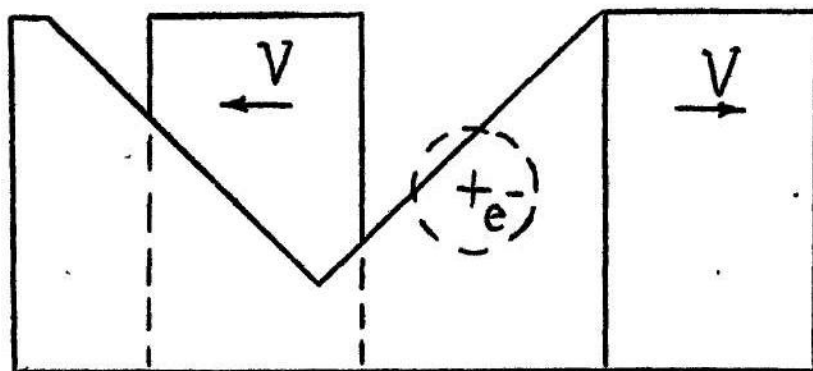
Для повышения точности измерений профиля плотности потока за счет снижения числа электронов, рассеянных через поверхность выреза, путем увеличения коэффициента их отражения от этой поверхности, ее можно покрыть тонким ($\ll \Delta x$) слоем материала с большим $Z_{эф}$, (P_v , T_a , W и т.п.).

Таким образом, предложенная конструкция преобразователя отличается достаточной простотой изготовления и позволяет путем его одномерного перемещения в одном цикле измерений определить основные характеристики пучка электронов - энергетический спектр, величину потока и распределение его плотности. Для выполнения цикла требуется лишь два канала (управления двигателем перемещения преобразователя и измерения зависимости $I(x)$), что значительно облегчает возможность использования преобразователя в автоматизированной системе управления ускорителем. Перечисленные преимущества наряду с высокой радиационной стойкостью позволяют широко использовать преобразователь предлагаемой конструкции в радиационно-ускорительных комплексах.





$\phi_{u2.3}$



$\phi_{u2.4}$