

Измерение энергии пучка заряженных частиц с помощью аксиально – секционированного цилиндра Фарадея

П.М.Рябка, В.С.Балагура

ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ, г. Харьков

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Распространенным и самым точным методом определения энергии заряженных частиц есть измерения при помощи электромагнитного анализатора, который основан на зависимости между импульсом P частицы и радиусом ее круговой орбиты r в магнитном поле с индукцией B :

$$P[\text{МэВ}/c] = 3 \cdot 10^{-8} B r. \quad (1)$$

В настоящее время ускорители заряженных частиц используются во многих технологических процессах, где не требуется высокой точности измерения энергии пучка. Поэтому получили распространение простые методы, не требующие громоздкого оборудования.

В настоящей работе для измерения энергии ускоренных частиц использованы явление многократного рассеяния электронов на выходной фольге ускорителя и разработанный нами аксиально–секционированный цилиндр Фарадея (АСЦФ), способный работать в атмосферных условиях. Он выполнен из отдельных концентрично-расположенных и изолированных друг от друга и от экранирующего кольца секций и позволяет измерять девять параметров пучка, в том числе и его среднеквадратичный радиус [5]. Зная среднеквадратичный радиус разброса частиц, можно однозначно определить и среднеквадратичный угол многократного рассеяния, а, следовательно, и начальную энергию пучка [6].

Для корректных измерений толщина фольги должна быть достаточно велика, чтобы процесс рассеяния можно было считать многократным, а с другой стороны достаточна мала, чтобы потерями энергии в ней можно было пренебречь. Первое условие выполняется при [7]:

$$t \gg \{(\pi n Z(Z+1)m^2 c^4 r_0^2)/E_0^2\}^{-1} (\lambda/a), \quad (2)$$

где t – толщина фольги, см; n – количество атомов в 1 см^3 фольги; Z – атомный номер вещества фольги; E_0 – энергия пучка, МэВ r_0 – классический радиус электрона, см; λ – комптоновская длина электрона, см; $a = 5.3 \cdot 10^{-9} Z^{-1/3}$ – радиус атома вещества фольги, см., например, для $E_0 = 5$ МэВ и титановой фольги (2) сводится к условию $t \gg 70$ мкм, а для алюминия $t \gg 170$ мкм. Обычно выходная фольга ускорителей изготавливается из титана или алюминия толщиной 50–

70 мкм. Поэтому для осуществления условия (2) необходимо при измерении энергии пучка за выходной фольгой устанавливать дополнительный рассеиватель, толщина которого должна удовлетворять второму условию:

$(\Delta E/E_0) \ll 1$, где $\Delta E = \Delta E_u + \Delta E_r$ – полные потери энергии частиц; ΔE_u – ионизационные потери энергии; ΔE_r – радиационные потери. Для $E_0 = 5$ МэВ это условие выполняется при $t \ll 0.6$ см для титана и $t \ll 0.34$ см для меди.

ТЕОРИЯ

Из многочисленных литературных данных по теоретическому и экспериментальному исследованию рассеяния заряженных частиц в конденсированных средах следует, что между среднеквадратичным углом рассеяния в тонкой фольге $\langle \theta^2 \rangle^{1/2}$ и энергией падающих на нее частиц E_0 имеет место соотношение:

$$\langle \theta^2 \rangle^{1/2} = k / E_0, \quad (3)$$

где k – либо независимая от энергии постоянная (как следует из теории многократного рассеяния разработанной Росси [8]), либо медленно изменяющаяся от энергии функция (как следует из теории Вильямса [9]). Кроме того, среднеквадратичный угол связан с проекционным углом:

$$\langle \theta^2 \rangle^{1/2} = 2^{1/2} \sigma / L, \quad (4)$$

где σ – среднеквадратичный радиус рассеянного пучка, измеренный на расстоянии L от фольги. Поскольку функция распределения рассеянных частиц в плоскости, перпендикулярной оси пучка, имеет гауссовский профиль [10], полный ток пучка I_0 , максимальная плотность потока j_0 и дисперсия распределения σ связаны между собой: зависимостью:

$$j_0 = I_0 / 2\pi \sigma^2. \quad (5)$$

Из выражений 3-5 получим:

$$E_0 = kL (\pi j_0 / I_0)^{1/2} \quad (6)$$

Если плотность потока измеряется в см^{-2} , а ток в микроамперах, то

$$E_0 = kL (\pi j_0 / I_0)^{1/2} / 2.5 \cdot 10^6 = K (j_0 / I_0)^{1/2} \quad (7)$$

Таким образом, параметр

$$K = E_0 (I_0 / j_0)^{1/2} = kL \pi^{1/2} / 2.5 \cdot 10^6 \quad (8)$$

является определяющей константой в нашей методике измерения энергии с помощью АСЦФ.

Из анализа теоретических моделей и выражений для расчетов среднеквадратичных углов рассеяния, мы остановили свой выбор на решении задачи по Мольеру [11,12]. Эта теория разработана с наименьшими допущениями и достаточно хорошо описывает процесс не только многократного рассеяния, но и кратного. Согласно Мольеру [13]

$$\langle \theta^2 \rangle = \theta_1^2 \cdot B, \quad (9)$$

$$\theta_1^2 = 0.157 Z(Z+1) \rho t / A E_0^2, \quad (10)$$

где В является корнем трансцендентного уравнения

$$B - \ln B = \lg(\theta_s / \theta_1)^2 - 0.1544. \quad (11)$$

В свою очередь

$$(\theta_s / \theta_1)^2 = 7800 \rho t (Z+1) Z^{1/3} / A(1+3.35 \alpha^2), \quad (12)$$

где $\alpha = Z/137$. Здесь приняты следующие обозначения: А - атомная масса вещества рассеивателя; ρt - толщина мишени, г/см²; θ_1 - некоторый максимальный угол, выбираемый из статистических соображений [13]; θ_s - угол экранирования атома.

Из выражений (9) и (10) следует, что для рассматриваемой теории:

$$K = (0.157 \cdot Z(Z+1) \cdot \rho t B / A)^{1/2}. \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В таблице приведены экспериментальные результаты расчетов коэффициента К, полученные по данным измерений полного тока пучка и его плотности для семи различных энергий пучка E_0 . Измерения плотности потока в максимуме кривой распределения j_0 производились на расстоянии $L=86$ см от рассеивателя, состоящего из выходной фольги ускорителя из титана толщиной 50 мкм и дополнительной медной фольги толщиной 180 мкм. Начальная энергия измерялась с помощью магнитного анализатора с точностью ~0.1%.

E_0 , МэВ	I_0 , мкА	j_0 , см ⁻² ·с ⁻¹	$K = E_0 (I_0 / j_0)^{1/2}$, МэВ·рад
5	0.88	$1.65 \cdot 10^9$	$1.15 \cdot 10^{-4}$
10	1.23	$9.60 \cdot 10^9$	$1.13 \cdot 10^{-4}$
15	1.00	$1.70 \cdot 10^{10}$	$1.15 \cdot 10^{-4}$
20	1.05	$3.30 \cdot 10^{10}$	$1.12 \cdot 10^{-4}$
25	1.00	$4.52 \cdot 10^{10}$	$1.17 \cdot 10^{-4}$
30	0.88	$5.50 \cdot 10^{10}$	$1.20 \cdot 10^{-4}$
35	0.82	$7.37 \cdot 10^{10}$	$1.17 \cdot 10^{-4}$

Среднее значение равно $K_{cp} = (1.16 \pm 0.02) \cdot 10^{-4}$ МэВ·рад. Как следует из таблицы, относительная ошибка измерений коэффициента К составит:

$$(\Delta K / K_{cp}) \cdot 100\% = 1 / K_{cp} \sum |K_{cp} - K| \cdot 100\% = 1,7\%.$$

Таким образом, можно сделать вывод о достаточно хорошей точности как измерения коэффициента К, так и для решения обратной задачи – измерения энергии пучка. К этому необходимо добавить, что расчетные значения $K=1.161 \cdot 10^{-4}$ МэВ·рад, рассчитанные по модели Мольера, практически совпали с экспериментом. В заключение следует отметить, что такое совпадение результатов позволяет сделать вывод не только об уникальных возможностях АСЦФ как многофункционального датчика параметров пучка, но и о его универсальности, что открывает перспективу радикального упрощения систем формирования и индикации пучков ускорителя. Кроме того, метод настройки ускорителя с помощью единственного датчика наилучшим образом поддается процессу автоматизации.

Литература

1. Бенфорд А. Транспортировка пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1969.
2. Гришаев И.А. и др. Атомная энергия. 29, Вып.2, 138(1970).
3. Балашев А.П. ПТЭ. 11, 27(1974).
4. Дронин В.И., Милованов О.С., и др. Доклады 4 Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Ленинград. 28-30.08. 2, 170(1992).
5. Рябка П.М., Солодовник В.Г. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 3-5 октября, Дубна. 1, 67(1992).
6. Калиновский А.Н., Мохов Н.В. и др. Прохождение частиц высоких энергий через вещество. М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. Мотт Н., Месси Г. Теория атомных столкновений. М.: МИР, 1969.
8. Росси Б. Частицы больших энергий. М: Гостехиздат, 1955.
9. Williams E.J. Phys.Rev. 58, 292(1940).
10. Грицина В.Т., Рябка П.М. Дозиметрия ионизирующих излучений. Ташкент: ФАН, 46, 1976.
11. Moliere Z. Zs.Naturforsch. 2a, 133(1947).
12. Bethe H.A. Phys.Rev. 89, 1256(1953).
13. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. М.: ИЛ, т.1, 1955.
14. Радиационная дозиметрия: Электронные пучки с энергией от 1 до 50 МэВ: Доклад 35 МКРЕ: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Статья поступила в редакцию 25 мая 1998 г.,
в издательство 1 июня 1998 г.