Письма в ЖЭТФ, том 101, вып. 7, с. 486 – 489

Рассеяние релятивистских электронов на тонкой биметаллической фольге

А. В. Кольцов, И. А. Мамонов[+], А. В. Серов[1)]

Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

[+]НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Россия

Поступила в редакцию 15 декабря 2014 г.

После переработки 9 февраля 2015 г.

Измерены углы преломления θ_d пучков электронов, прошедших через тонкие плоские биметаллические фольги, и углы отражения φ_r пучков, отраженных этими фольгами. Источником электронов являлся микротрон с энергией частиц 7.4 МэВ. Эксперименты проведены с фольгами, состоящими из алюминия и свинца и из алюминия и меди. Слои алюминия имели толщину 54 мг/см^2 (200 мкм), слой меди – 44 мг/см^2 (50 мкм), слой свинца – 79 мг/см^2 (70 мкм). Инжекция частиц проходила под углами $\alpha = 5^\circ - 30^\circ$ к поверхности фольги. Измерения выполнены при различных ориентациях биметалла относительно траектории пучка. В одном случае частицы при своем движении через фольгу вначале пересекали слой алюминия, а затем слой металла, имеющего более высокую плотность (медь или свинец). В другом случае частицы инжектировались в слой меди или свинца, а затем пересекали слой алюминия. Обнаружено, что при некоторых углах инжекции изменение порядка следования слоев металла на противоположный существенно влияет на величины углов преломления и отражения. Аналогичные измерения были выполнены для электронов, падающих на рассеиватели из однородных металлов (алюминий, медь, свинец). Сравнение с экспериментами на биметаллической фольге позволяет оценить вклад каждого из слоев биметалла в преломление и отражение инжектируемого пучка.

DOI: 10.7868/S0370274X15070036

Угловые и энергетические спектры быстрых тяжелых заряженных частиц (протонов, α – частиц, мюонов и т.д.), прошедших через плоские рассеиватели конечной толщины при скользящем падении потока на их поверхность, исследовались в ряде теоретических [1, 2] и экспериментальных [3, 4] работ. Рассматривалось как прохождение, так и отражение протонов с энергиями 10–25 кэВ, падающих на формваровую пленку. Было обнаружено, что при пересечении поверхности максимум углового спектра прошедших частиц смещается относительно первоначального направления в область бо́льших углов. Смещение максимума увеличивается при уменьшении угла инжекции.

Экспериментально исследовалось прохождение и легких релятивистских частиц (электронов с энергией 7.4 МэВ) через фольги из алюминия и меди [5]. Пересечение плоских мишеней релятивистскими электронами также вызывает преломление первоначальной траектории пучка в сторону увеличения угла между направлением максимальной интенсивности прошедшего пучка и выходной поверхностью мишени. Были исследованы зависимости угла преломления θ_d от угла инжекции α. Углом преломления θ_d считался угол между первоначальной траекторией пучка и направлением максимальной интенсивности прошедшего пучка.

В настоящей работе экспериментально исследованы прохождение и отражение электронных пучков, падающих под различными углами α на плоские биметаллические поверхности. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

В эксперименте использовались электронные сгустки микротрона с энергией 7.4 Мэв. Ток в импульсе длительностью 4 мкс составлял 40 мА. Ось z была направлена вдоль траектории частиц, ось x лежала в горизонтальной плоскости. Электроны выводились в атмосферу через алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм на фланце микротрона M. За фланцем располагались свинцовый коллиматор C и фольга F. Коллиматор толщиной 50 мм имел пролетное отверстие диаметром 3 мм. Фольга поворачивалась относительно вертикальной оси y на угол α. На рисунке показаны пучок e_d, пересекающий мишень, и пучок e_r, отраженный мишенью. За направление движения пучка частиц принималось

[1)]e-mail: serov@x4u.lebedev.ru

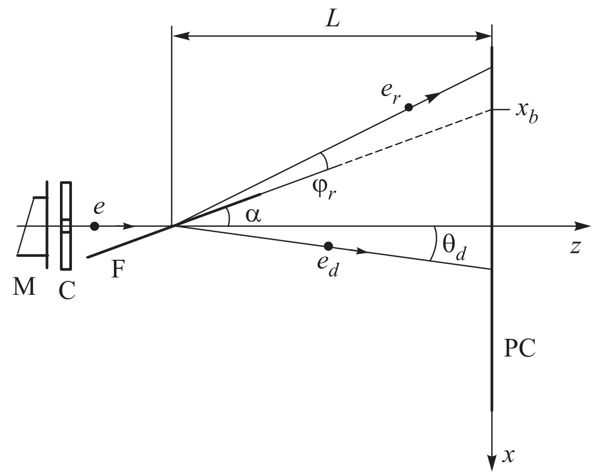

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: M – фланец микротрона, C – коллиматор, F – фольга, PC – пропорциональная камера, e – инжектируемые электроны, e_d – преломленные электроны, e_r – отраженные электроны, α – угол инжекции, θ_d – угол преломления, φ_r – угол отражения

то направление, под которым угловое распределение электронов имеет максимум. Пучок e_d выходил из мишени под углом преломления θ_d к направлению первоначального движения. Отраженный пучок e_r двигался под углом φ_r к плоскости мишени.

Пространственное распределение преломленных и отраженных электронов измерялось многопроволочной пропорциональной камерой PC. На рис. 1 точка, в которой прямая, проведенная через мишень, пересекает плоскость камеры, обозначена как x_b. Из геометрии задачи следует, что на плоскости пропорциональной камеры координаты частиц e_d, пересекающих мишень, удовлетворяют условию $x > x_b$, а координаты отраженных частиц e_r – условию $x < x_b$. Положение x_b определяется расстоянием L от мишени до детектора и углом инжекции α.

Конструкция камеры позволяла измерить распределение в горизонтальном (вдоль оси x) и в вертикальном (вдоль оси y) направлениях. Камера располагалась на расстоянии $L = (180{-}300)$ мм от точки пересечения пучком фольги. Зная положения максимумов преломленных и отраженных частиц, мы определяли углы θ_d и φ_r. В проведенных экспериментах угол α между траекторией инжектированных частиц и поверхностью фольги изменялся от 5° до 30°. Измерения проводились с биметаллическими фольгами, изготовленными из алюминия и свинца и из алюминия и меди. Слои алюминия имели толщину $\delta_{\rm Al} = 54\,$мг/см^2 (200 мкм), слой меди – $\delta_{\rm Cu} = 44\,$мг/см^2 (50 мкм), слой свинца – $\delta_{\rm Pb} = 79\,$мг/см^2 (70 мкм).

На рис. 2 приведены зависимости $\theta_d(\alpha)$ для биметаллической фольги, состоящей из алюминия и свинца (рис. 2a) и из алюминия и меди (рис. 2b). Подписи у кривых обозначают материал слоев биметалла, их толщину в микронах и порядок следования слоев на пути электронов, проходящих через фольгу. Видно, что в случае биметаллического рассеивателя угол, под которым движутся частицы после пересечения фольги, зависит от порядка следования слоев металла вдоль траектории пучка. При заданном угле инжекции α величина угла преломления θ_d больше, если при движении электронов вначале пересекается слой металла с меньшей плотностью (в нашем случае алюминий). В случае фольги из алюминия и свинца (рис. 2a) разница в углах преломления $\Delta\theta_d = \theta_{d({\rm Al+Pb})} - \theta_{d({\rm Pb+Al})}$ максимальна при малых углах инжекции. С увеличением α различие в углах преломления уменьшается. Для биметалла из алюминия и меди (рис. 2b) углы преломления различаются значительно меньше и разность $\Delta\theta_d = \theta_{d({\rm Al+Cu})} - \theta_{d({\rm Cu+Al})}$ слабее зависит от угла α.

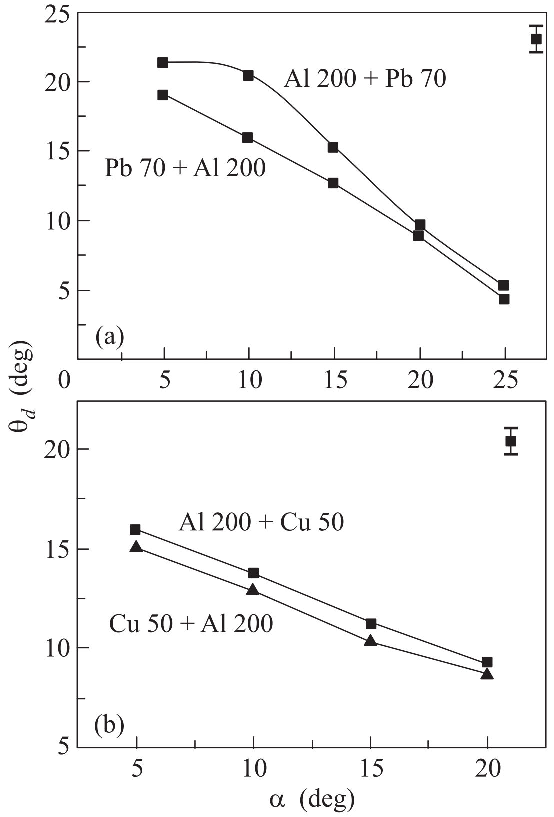

Рис. 2. Зависимости угла преломления θ_d от угла инжекции α для биметаллов Al + Pb (a) и Al + Cu (b). Подписи у кривых обозначают металл, его толщину в микронах и порядок следования в биметалле

Одной из характеристик рассеивателя является величина η, равная отношению толщины мишени δ [г/см^2] к экстраполированному пробегу электронов в материале мишени R_{ex} [г/см^2] [6]. В наших экспериментах соотношения этих величин для слоев, составляющих биметалл, существенно различались. В биметалле Al + Pb, при пересечении которого последовательность расположения слоев в мишени существенно влияла на зависимость $\theta_d(\alpha)$, отношение $\eta_{\mathrm{Pb}}/\eta_{\mathrm{Al}} = 2.02$. В биметалле Al + Cu, в котором влияние последовательности слоев оказалось слабым, отношение $\eta_{\mathrm{Cu}}/\eta_{\mathrm{Al}} = 1.05$.

Влияние угла инжекции α на угол отражения φ_r иллюстрирует рис. 3. Так же как и при измерении

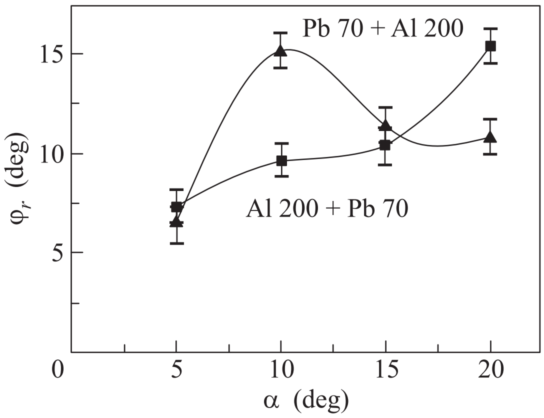

Рис. 3. Зависимости угла отражения φ_r от угла инжекции α. Подписи у кривых обозначают металл, его толщину в микронах и порядок следования в биметалле

углов преломления, эксперименты были проведены на биметаллической фольге Al + Pb, по-разному ориентированной относительно электронного потока. Из рисунка видно, что порядок следования металлов в фольге существенно влияет на направление движения отраженного электронного потока.

Для оценки вклада каждого из слоев биметалла в углы преломления и отражения были проведены измерения с однородными фольгами из алюминия, меди и свинца, имеющими такую же толщину, как и слои в биметаллической фольге. Результаты этих экспериментов представлены на рис. 4: углы преломления $\theta(\alpha)$ – на рис. 4a, углы отражения $\varphi(\alpha)$ – на рис. 4b. Для всех материалов углы преломления максимальны при малых углах инжекции и стремятся к нулю при увеличении α.

Качественно полученные результаты можно объяснить следующим образом. При движении через фольгу электронный поток уменьшает свою плотность из-за торможения и рассеяния, приводящих к

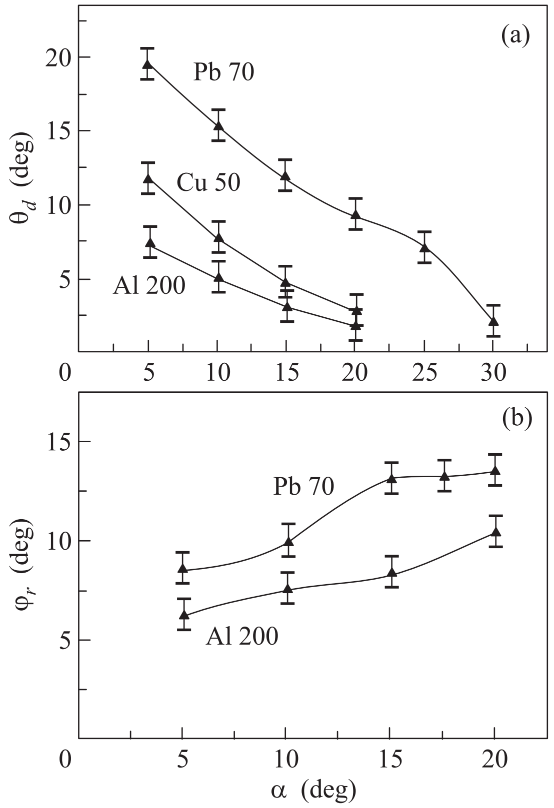

Рис. 4. Зависимости $\theta_d(\alpha)$ (a) и $\varphi_r(\alpha)$ (b) для однородных металлов

увеличению поперечных размеров пучка. Уменьшение числа частиц в потоке описывается соотношением $N = N_0 \exp(-l/R_{ex}) \simeq 1 - (l/R_{ex})$, а увеличение углового разброса пучка – $\Delta\theta \sim \sqrt{l}$, где N_0 – начальное число частиц, l – длина пути в фольге. Из геометрии задачи следует, что длина пути в фольге частицы, рассеянной на угол θ, равна $l_l = \delta/\sin(\alpha - \theta)$, если частица после рассеяния движется слева относительно начальной траектории (см. рис. 1). Если частица после рассеяния на угол θ движется справа от начальной траектории, она проходит в фольге путь $l_r = \delta/\sin(\alpha + \theta)$. Кроме того, частицы, движущиеся слева, имеют большую вероятность быть отраженными, т.е. вылететь из фольги в полупространство, из которого осуществляется инжекция. Это также уменьшает плотность потока, движущегося слева.

Для углов инжекции и отражения, удовлетворяющих условиями $0 < \alpha < 1$ и $\theta < 1$, разницу в путях частиц можно записать в виде

$$\Delta l = l_l - l_r \simeq \delta \, \frac{2\theta}{\alpha^2 - \theta^2}. \quad (1)$$

При малых углах инжекции ($\alpha = 5° - 10°$) длина пути частиц, отраженных вправо и влево, может различаться в 3–5 раз. Следовательно, плотность частиц, отраженных вправо, существенно выше. Это приводит к смещению максимума в угловом распределении электронов в сторону больших углов. Следует заметить, что длина пути в фольге даже при малой ее толщине ($\delta \sim (50-100)$ мкм) может достигать нескольких миллиметров. Для некоторых материалов такие пути в фольге соизмеримы с величиной экстраполированного пробега R_{ex}.

Итак, проведенные эксперименты позволили выявить новые особенности рассеяния релятивистских электронов, обусловленные добавлением слоя металла, имеющего другую плотность. При инжекции частиц под малым углом α к плоскости мишени наблюдается сильная зависимость углов преломления и отражения от последовательности расположения металлов вдоль траектории движения. Большое различие в углах преломления получено в экспериментах со свинцово-алюминиевой фольгой. В этих измерениях толщина слоя свинца, выраженная в долях экстраполированного пробега, η_{Cu} была в два раза больше толщины алюминия. В экспериментах с алюминиево-медной фольгой, у которой толщины слоев приблизительно равны, изменение последовательности расположения металлов влияет на величину угла преломления значительно слабее.

Авторы благодарны А.Н. Елисееву, Г.Г. Субботину, С.А. Ралко за помощь при проведении экспериментов.

1. А. И. Кузовлев, В. С. Ремизович, Письма в ЖТФ **9**(12), 710 (1983).
2. Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, Письма в ЖТФ **17**(20), 6 (1991).
3. С. Н. Бохуленков, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, мат. IX Всес. Конф. *Взаимодействие атомных частиц с твердым телом*, М. (1989), т. 1, ч. 1, с. 61.
4. Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, ЖТФ **67**(5), 81 (1997).
5. А. В. Кольцов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **99**(1), 6 (2014).
6. В. В. Кудинов, В. В. Смирнов, *Прохождение электронов с энергией 2–8 МэВ в материалах и выход тормозного излучения из слоев материалов различной толщины. Справочник*, МИФИ, М. (2005).