## Рассеяние релятивистских электронов на тонкой биметаллической фольге

А. В. Кольцов, И. А. Мамонов<sup>+</sup>, А. В. Серов<sup>1</sup>)

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  $\theta_d$  пучков электронов, прошедших через тонкие плоские биметаллические фольги, и углы отражения  $\varphi_r$  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<sup>2</sup> (200 мкм), слой меди – 44 мг/см<sup>2</sup> (50 мкм), слой свинца – 79 мг/см<sup>2</sup> (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,  $\alpha$  – 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  $\theta_d$  от угла инжекции  $\alpha$ . Углом преломления  $\theta_d$  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  $\alpha$  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 М. За фланцем располагались свинцовый коллиматор С и фольга F. Коллиматор толщиной 50 мм имел пролетное отверстие диаметром 3 мм. Фольга поворачивалась относительно вертикальной оси y на угол  $\alpha$ . На рисунке показаны пучок  $e_d$ , пересекающий мишень, и пучок  $e_r$ , отраженный мишенью. За направление движения пучка частиц принималось

<sup>&</sup>lt;sup>1)</sup>e-mail: serov@x4u.lebedev.ru



Рис. 1. Схема экспериментальной установки: М – фланец микротрона, С – коллиматор, F – фольга, PC – пропорциональная камера, e – инжектируемые электроны,  $e_d$  – преломленные электроны,  $e_r$  – отраженные электроны,  $\alpha$  – угол инжекции,  $\theta_d$  – угол преломления,  $\varphi_r$  – угол отражения

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

Пространственное распределение преломленных и отраженных электронов измерялось многопроволочной пропорциональной камерой РС. 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  $\alpha$ .

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  $\theta_d$  и  $\varphi_r$ . В проведенных экспериментах угол  $\alpha$  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  $\delta_{\rm Al} = 54 \, {\rm mr/cm}^2 (200 \, {\rm mkm})$ , слой меди –  $\delta_{\rm Cu} = 44 \, {\rm mr/cm}^2 (50 \, {\rm mkm})$ , слой свинца –  $\delta_{\rm Pb} = 79 \, {\rm mr/cm}^2 (70 \, {\rm mkm})$ .

Письма в ЖЭТФ том 101 вып. 7-8 2015

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). Подпи-



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

си 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 а величина угла преломления  $\theta_d$  больше, если при движении электронов вначале пересекается слой металла с меньшей плотностью (в нашем случае алюминий). В случае фольги из алюминия и свинца (рис. 2а) разница в углах преломления  $\Delta \theta_d = \theta_{d(Al+Pb)} - \theta_{d(Pb+Al)}$  максимальна при малых углах инжекции. С увеличением  $\alpha$  различие в углах преломления уменьшается. Для биметалла из алюминия и меди (рис. 2b) углы преломления различаются значительно меньше и разность  $\Delta \theta_d = \theta_{d(Al+Cu)} - \theta_{d(Cu+Al)}$  слабее зависит от угла  $\alpha$ . Одной из характеристик рассеивателя является величина  $\eta$ , равная отношению толщины мишени  $\delta$  [г/см<sup>2</sup>] к экстраполированному пробегу электронов в материале мишени  $R_{ex}$  [г/см<sup>2</sup>] [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  $\eta_{\rm Pb}/\eta_{\rm Al} = 2.02$ . В биметалле Al + Cu, в котором влияние последовательности слоев оказалось слабым, отношение  $\eta_{\rm Cu}/\eta_{\rm Al} = 1.05$ .

Влияние угла инжекции  $\alpha$  на угол отражения  $\varphi_r$ иллюстрирует рис. 3. Так же как и при измерении



Рис. 3. Зависимости угла отражения  $\varphi_r$  от угла инжекции  $\alpha$ . 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  $\alpha$ .

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  $\theta$ , 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  $\theta$  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 условиям<br/>и $0<\alpha<1$ и $\theta<1,$ разницу в путях частиц можно записать в виде

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

При малых углах инжекции ( $\alpha = 5^{\circ} - 10^{\circ}$ ) длина пути частиц, отраженных вправо и влево, может различаться в 3–5 раз. Следовательно, плот-

Письма в ЖЭТФ том 101 вып. 7-8 2015

ность 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  $\alpha$  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,  $\eta_{Cu}$  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.

- А.И. Кузовлев, В.С. Ремизович, Письма в ЖТФ 9(12), 710 (1983).
- Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, Письма в ЖТФ 17(20), 6 (1991).
- 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.
- Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, ЖТФ 67(5), 81 (1997).
- А. В. Кольцов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ 99(1), 6 (2014).
- 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).