

УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТРАЖЕННЫХ И ПРЕЛОМЛЕННЫХ ПУЧКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ПЕРЕСЕКАЮЩИХ ТОНКУЮ ПЛОСКУЮ МИШЕНЬ ПОД МАЛЫМ УГЛОМ К ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

А. В. Серов^{a}, И. А. Мамонов^b, А. В. Кольцов^{a**}*

*^a Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия*

*^b Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 13 мая 2015 г.

Приведены результаты экспериментального исследования рассеяния электронов на фольгах из алюминия, меди и свинца, а также на биметаллических фольгах, составленных из слоев алюминия и свинца и из слоев алюминия и меди. Источником электронов являлся микротрон с энергией частиц 7.4 МэВ. Падение на мишень под малыми углами приводит к расщеплению потока частиц на частицы, отраженные фольгой — отраженный пучок, и частицы, пересекающие фольгу — преломленный пучок. Исследовалось влияние материала и толщины фольги, а также угла между начальной траекторией пучка и плоскостью мишени на направление движения и угловую расходимость пучка, пересекающего фольгу, и пучка, отраженного фольгой. Кроме того, изучалось влияние порядка следования слоев металла в биметаллических фольгах на углы преломления и отражения пучков.

DOI: 10.7868/S0044451015100028

1. ВВЕДЕНИЕ

Решение некоторых задач предполагает знание закономерностей рассеяния релятивистских электронов, пересекающих тонкую мишень под малым углом к ее поверхности. Одной из таких задач является задача описания переходного излучения, возбуждаемого частицами, пересекающими сложные поверхности перехода (двугранный угол [1] или коническую поверхность [2]). При падении пучка под малым углом к поверхности происходит расщепление начального потока на отраженные частицы и частицы, пересекающие переходную поверхность. Пучки — и отраженный, и прошедший через поверхность — изменяют свои поперечные размеры и отклоняются от направления первоначального движения. Характеристики излучения в этом случае будут зависеть не только от начальных параметров пучка,

но и от изменения этих параметров при пересечении тонкого слоя, т. е. от материала и толщины пересекаемой поверхности, от направления движения частиц. Поэтому для описания переходного излучения таких радиаторов необходимо знать распределения как частиц, отраженных поверхностью, так и частиц, пересекающих поверхность радиатора.

Другой задачей, при решении которой необходимо принимать во внимание изменение параметров пучка при пересечении тонкой пластины, является исследование излучения релятивистского пучка, пересекающего структуру, состоящую из одного или двух аморфных слоев и одного кристаллического слоя [3, 4].

Исследованию угловых и энергетических спектров тяжелых заряженных частиц (протонов, α -частиц, мюонов и др.), прошедших через плоские рассеиватели конечной толщины при скользящем падении потока на его поверхность, посвящены как теоретические [5, 6], так и экспериментальные [7, 8] работы. Рассматривалось прохождение и отражение протонов с энергиями 10–25 кэВ, падающих на

*E-mail: serov@x4u.lebedev.ru

**E-mail: koltsov@x4u.lebedev.ru

формваровую пленку. Было обнаружено, что при пересечении поверхности максимум углового распределения плотности прошедших частиц смещается относительно первоначального направления в область больших углов. Смещение увеличивается при уменьшении угла инжекции.

Экспериментально исследовалось прохождение и релятивистских электронов с энергией 7.4 МэВ через фольги из алюминия и меди [9]. Пересечение плоских мишеней релятивистскими электронами также вызывает преломление первоначальной траектории пучка в сторону увеличения угла между направлением, под которым плотность пучка, пересекающего мишень, достигает максимума, и выходной поверхностью мишени. Были исследованы зависимости угла преломления θ_d от угла инжекции α .

В настоящей работе экспериментально исследовано прохождение и отражение релятивистского электронного пучка, падающего под различными углами α на плоские металлические и биметаллические поверхности. Измерены зависимости углов преломления θ_d и отражения φ_r от материала и толщины мишени δ , от угла инжекции α . Изучалось влияние порядка следования слоев в биметалле на направление движения преломленных и отраженных пучков.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментов приведена на рис. 1. Использовались электронные сгустки микротрона с энергией 7.4 МэВ, ток в импульсе длительностью 4 нс составлял 40 ма. Ось z направлена вдоль траектории частиц, ось x лежит 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 имел толщину 50 мм и пролетное отверстие диаметром 3 мм. Фольгу F можно было поворачивать относительно вертикальной оси y на угол α . На расстоянии L от точки пересечения частиц с фольгой располагался детектор D.

На рис. 1 пучок, падающий на рассеивающую поверхность, обозначен через e , пучок, пересекающий мишень — e_d , а пучок, отраженный мишенью — e_r . За направление движения пучка частиц принималось то направление, под которым угловое распределение электронов имеет максимум. Углом преломления θ_d считался угол между траекторией падающего пучка и направлением движения пучка, прошедшего

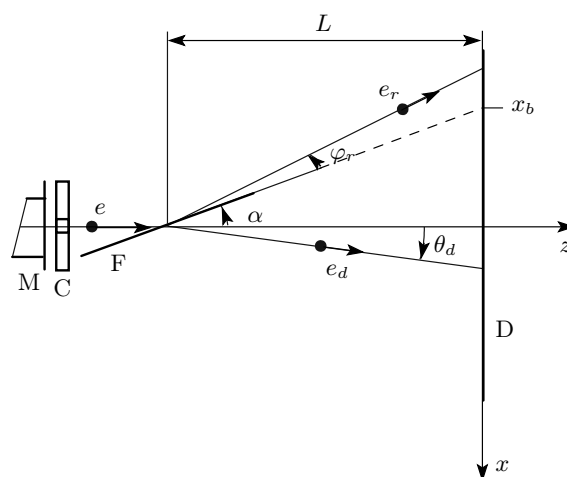


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. М — фланец микротрона, С — коллиматор, F — фольга, D — детектор, e — инжектируемые электроны, e_d — электроны, пролетевшие через мишень, e_r — электроны, отраженные мишенью, α — угол инжекции, θ_d — угол преломления, φ_r — угол отражения

через мишень, а углом отражения φ_r — углом между входной плоскостью мишени и направлением движения отраженного пучка.

Точка, в которой прямая, проведенная через мишень, пересекает плоскость детектора, на рис. 1 обозначена через x_b . Из геометрии задачи следует, что поперечные 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 от мишени до детектора L и углом инжекции α .

Детектором являлась многопроволочная пропорциональная камера, позволяющая измерить пространственное распределение преломленных и отраженных электронов. Камера состояла из трех рамок, анодная рамка располагалась между двумя катодными. Рамки в камере находились на расстоянии 5 мм одна от другой. Проволоки рамок имели диаметр 20 мкм и располагались параллельно на расстоянии 1 мм друг от друга. Плоскости рамок перпендикулярны направлению движения пучка. В первой рамке проволоки располагались вертикально, в третьей — горизонтально. Такая конструкция позволяла измерить распределения в горизонтальном (вдоль оси x) и вертикальном (вдоль оси y) направлениях. Сигнал пропорциональной камеры подавался на осциллограф. Временная структура сигнала формировалась последовательным считыванием зарядов катодных проволок камеры: вначале прово-

лок, расположенных вертикально, а затем проволоки, расположенных горизонтально.

Пропорциональная камера располагалась на расстоянии $L = 180\text{--}250$ мм от точки пересечения пучком фольги. В проведенных экспериментах угол α между траекторией инжектированных частиц и поверхностью фольги изменялся от 5° до 30° .

Характерные осциллограммы сигналов камеры приведены на рис. 2. Первый импульс осциллограмм описывает горизонтальное распределение, второй — вертикальное. Ширина каждого импульса по основанию соответствует расстоянию 64 мм вдоль оси x для первого импульса и вдоль оси y для второго. Обработка осциллограмм позволяет определить ширину пучка, положение его оси, характер зависимости плотности частиц от расстояния до оси пучка.

Осциллограммы на рис. 2 получены при расстоянии от фольги до камеры $L = 90$ мм. На рис. 2а показаны распределения выведенного из микротрона и прошедшего через коллиматор пучка, на рис. 2б — распределения в случае, когда выведенный пучок пересекает фольгу из меди толщиной $\delta = 50$ мкм, расположенную перпендикулярно траектории инжектированных частиц, на рис. 2в — распределения в случае, когда фольга из меди толщиной $\delta = 50$ мкм расположена под углом $\alpha = 10^\circ$ к траектории падающего пучка. Сравнение рис. 2а, б, в показывает, что пересечение мишени под углом $\alpha = 90^\circ$ (рис. 2б) приводит к увеличению угловой расходимости пучка, а падение на мишень под углом $\alpha = 10^\circ$ (рис. 2в), кроме того, вызывает расщепление падающего пучка на отраженный ($x < x_b$) и преломленный ($x > x_b$) пучки. В этом случае горизонтальное распределение частиц имеет два максимума. Максимум преломленного пучка сдвигается относительно оси инжектированного пучка на расстояние Δx_d , а максимум отраженного пучка — на расстояние Δx_r . Из осциллограмм, представленных на рис. 2, следует, что положение максимума вертикального распределения частиц не изменяется.

Измерив угол инжекции α , расстояние от точки пересечения электронами фольги до пропорциональной камеры L , положения максимумов интенсивности преломленного Δx_d и отраженного Δx_r пучков относительно оси инжектируемого пучка, углы преломления θ_d и отражения φ_r можно вычислить по формулам

$$\theta_d = \arctg\left(\frac{\Delta x_d}{L}\right), \quad \varphi_r = \arctg\left(\frac{\Delta x_r}{L}\right) - \alpha. \quad (1)$$

Распределения позволяют вычислить угловой разброс, вносимый в пучок мишенью, и оценить от-

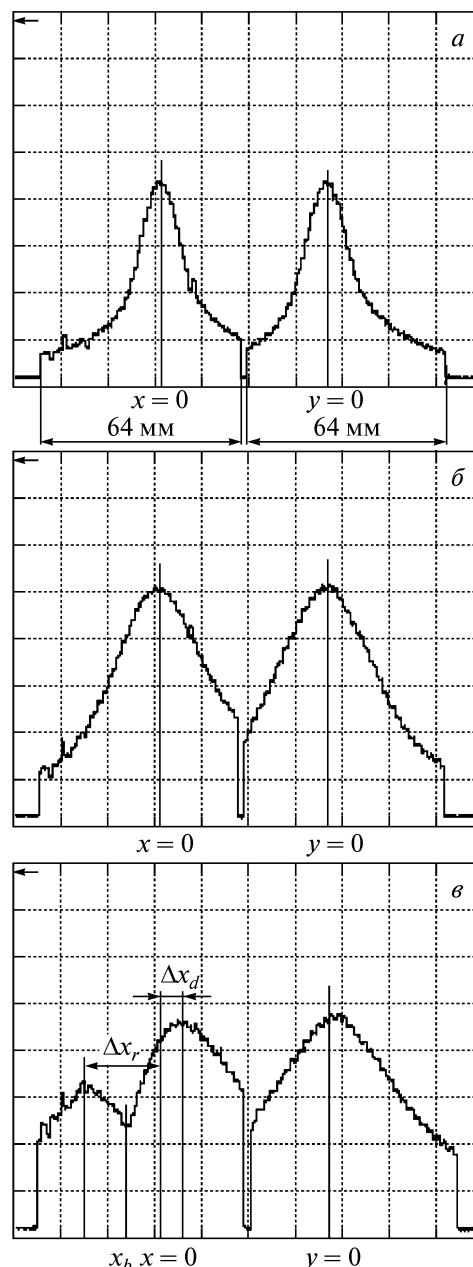


Рис. 2. Поперечные распределения электронов. а) $L = 90$ мм, нет фольги, б, в) фольга из меди толщиной 50 мкм расположена под углом $\alpha = 90^\circ$ (б), 10° (в) к траектории частиц

ношения потоков падающих, отраженных и преломленных частиц. При описании угловой расходимости преломленного пучка предполагалось, что поперечное распределение частиц в пучке является гауссовским. В проведенных экспериментах это предположение хорошо согласуется с измерениями в тех случаях, когда частицы выходят из коллиматора и дви-

жуются в воздухе (рис. 2а) или пересекают фольгу под углами инъекции $\alpha > 15^\circ$ (рис. 2б). При меньших углах инъекции (рис. 2в) влияние асимметрии поперечного распределения начинает оказывать заметное влияние на геометрические параметры преломленного и отраженного пучков. Поэтому для адекватного описания такого пучка необходимо знать не только направление его движения (θ_d или φ_r), его ширину (среднеквадратичное отклонение σ), но и величину, характеризующую асимметрию распределения (коэффициент асимметрии Sk) [10]. Но и в экспериментах с углом инъекции $\alpha < 15^\circ$ значение σ является полезной характеристикой и использовалось нами при измерении угловой расходимости пучка.

Из осциллограммы, показанной на рис. 2в, видно, что коэффициенты асимметрии Sk распределения отраженных и преломленных частиц имеют противоположные знаки. Распределение отраженного пучка сильно вытянуто влево от оси пучка, что соответствует отрицательной асимметрии ($Sk < 0$). У распределения преломленного пучка положительная асимметрия ($Sk > 0$), так как его интенсивность плавно уменьшается справа от оси пучка.

3. РАССЕЯНИЕ НА ОДНОСЛОЙНЫХ ФОЛЬГАХ

Были исследованы зависимости углов преломления θ_d и отражения φ_r от угла инъекции α . Результаты измерений, проведенных с фольгами из алюминия толщиной $\delta = 600$ мкм (162 мг/см^2), меди при $\delta = 100$ мкм (89 мг/см^2) и свинца при $\delta = 70$ мкм (79 мг/см^2), показаны на рис. 3. Измеренные значения $\theta_d(\alpha)$ показаны на рисунке точками, а кривые аппроксимируют данные экспериментов экспоненциальной зависимостью $\theta_d = a \exp(-b\alpha)$. Коэффициенты a и b аппроксимирующей функции имеют следующие значения: для Al $a = 20.8$, $b = 0.08$; для Cu $a = 24.4$, $b = 0.07$; для Pb $a = 25.1$, $b = 0.054$.

Из графиков рис. 3 следует, что при увеличении угла инъекции величина угла преломления θ_d резко уменьшается. Отметим, что толщины фольг, выраженные в единицах мг/см^2 , удовлетворяют условию $\delta_{\text{Al}} > \delta_{\text{Cu}} > \delta_{\text{Pb}}$, а углы отражения во всем диапазоне изменений удовлетворяют противоположному условию $\theta_{d\text{Al}} < \theta_{d\text{Cu}} < \theta_{d\text{Pb}}$.

При заданном токе инъекции была измерена зависимость угловой расходимости пучка $\Delta\theta_d$ от угла инъекции α . Эксперименты проводились с алюминием при $\delta = 200$ мкм (54 мг/см^2) и медью при

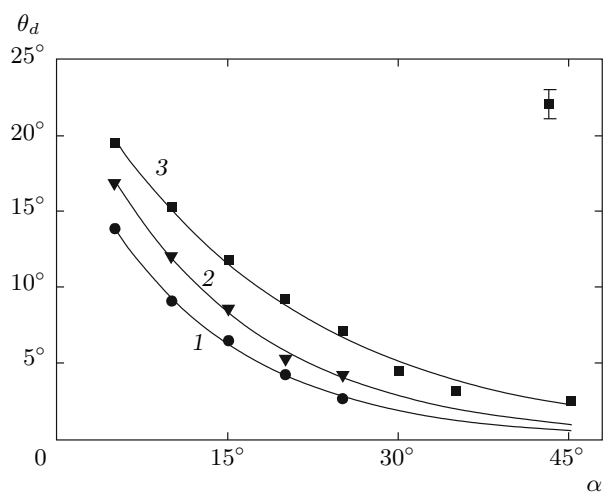


Рис. 3. Зависимости угла преломления θ_d от угла инъекции α . Материал фольги Al (1), Cu (2), Pb (3) и ее толщина 162 (1), 89 (2), 79 (3) мг/см^2 . Точки — результаты эксперимента, кривые — аппроксимация функцией $\theta_d = a \exp(-b\alpha)$

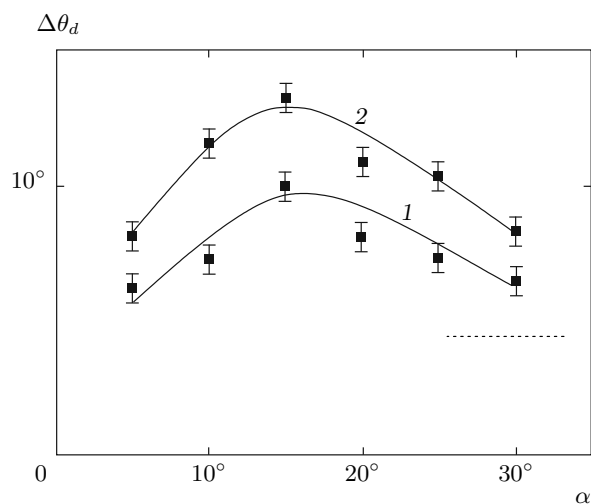


Рис. 4. Зависимости угловой расходимости пучка $\Delta\theta_d$ от угла инъекции α . Материал фольги и ее толщина: Al, 200 мкм (1), Cu, 180 мкм (2)

$\delta = 180$ мкм (160 мг/см^2). Измеренные зависимости показаны на рис. 4. На рисунке пунктиром показано значение угловой расходимости инжектируемого пучка. Эксперименты показали, что при уменьшении угла инъекции уменьшается максимальная плотность частиц преломленного пучка. Это объясняется увеличением длины пути, проходимого частицей в фольге, увеличением числа рассеяний частицы и, следовательно, расходимости пучка. Рост уг-

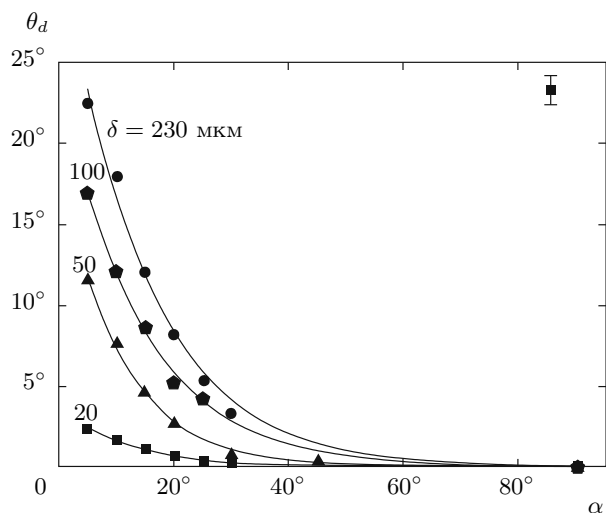


Рис. 5. Зависимости угла преломления траектории θ_d от угла инжекции α при различных значениях толщины δ медной мишени. Точки — результаты эксперимента, кривые — аппроксимация функцией $\theta_d = a \exp(-b\alpha)$

ловой расходимости потока приводит к тому, что увеличивается число частиц, отражаемых поверхностью, т. е. частиц, вылетающих из фольги в полупространство, из которого происходит инжекция. В результате пучок, пересекающий фольгу, уменьшает интенсивность, но уменьшает и свой угловой разброс. Из рис. 4 следует, что при уменьшении угла от $\alpha = 90^\circ$ до $\alpha \approx 15^\circ$ расходимость пучка увеличивается, а дальнейшее уменьшение приводит к уменьшению расходимости.

На рис. 5 приведены результаты измерений зависимости $\theta_d(\alpha)$ для медных фольг различной толщины (точки), и кривые, аппроксимирующие данные экспериментов экспоненциальной зависимостью $\theta_d = a \exp(-b\alpha)$. Если углы α и θ_d измерять в градусах, то коэффициенты a и b , полученные при аппроксимации, имеют значения, представленные в таблице. Из таблицы следует, что с ростом толщины фольги амплитуда a увеличивается почти на порядок, в то время как коэффициент b в показателе степени изменяется незначительно в пределах 30 %.

Наряду с исследованиями параметров преломленных пучков измерялись также направления движения отраженных электронных пучков. На рис. 6 показаны зависимости угла отражения пучка φ_r от угла инжекции α для алюминиевых фольг различной толщины. На рисунке пунктиром показана прямая $\varphi_r = \alpha$. Из рисунка следует, что при толщине фольги 600 мкм в диапазоне $5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ в преде-

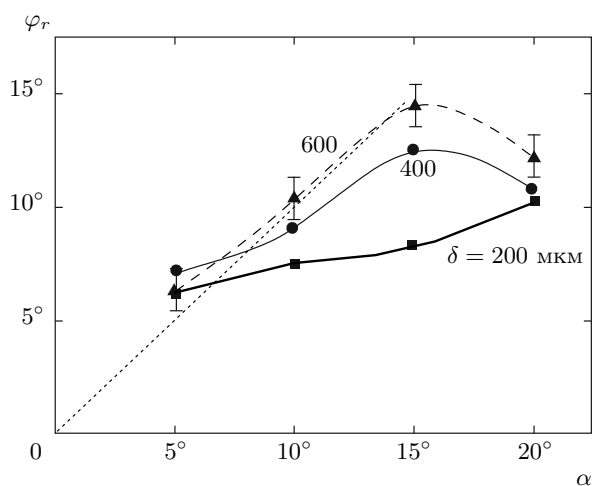


Рис. 6. Зависимости угла отражения φ_r от угла инжекции α при различных значениях толщины δ алюминиевой мишени

Таблица

δ , мкм	20	50	100	230
a	3.7	18.9	24.3	33.0
b	-0.082	-0.095	-0.070	-0.069

лах точности измерений угол отражения совпадает с углом инжекции, а при $\alpha > 15^\circ$ угол отражения φ_r становится меньше угла падения α . При толщинах 400 мкм и 200 мкм угол отражения меньше угла инжекции α во всем диапазоне измерений.

Зависимости угла отражения от толщины мишени приведены на рис. 7. Измерения были выполнены с мишенями из алюминия и меди при угле падения $\alpha = 10^\circ$. Из рисунка следует, что при малой толщине мишеней угол отражения меньше угла инжекции. С увеличением толщины угол отражения φ_r возрастает, при $\delta > 300$ мкм рост угла уменьшается. В случае алюминиевой фольги угол отражения стремится к $\varphi_r \approx 10^\circ$ — углу падения, а при медной фольге — к углу $\varphi_r \approx 13^\circ$, который больше угла падения.

Рисунок 7 иллюстрирует изменение характера зависимости $\varphi_r(\delta)$ от угла инжекции частиц, пересекающих медную фольгу. При инжекции под малым углом $\alpha = 5^\circ$ зависимость близка к линейной. Увеличение угла приводит к явно выраженному нелинейному характеру зависимости. Следует отметить, что при $\alpha = 5^\circ$ угол отражения при всех значениях δ больше угла инжекции, а при $\alpha = 15^\circ$ — всегда

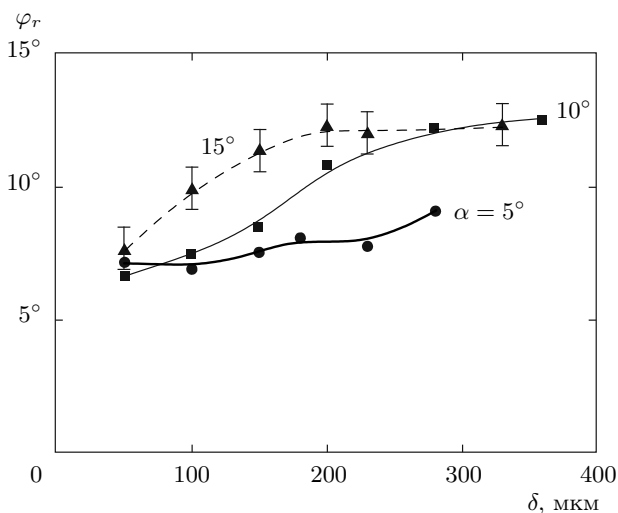


Рис. 7. Зависимости угла отражения φ_r от толщины медной фольги δ при различных углах инъекции α

меньше.

4. РАССЕЯНИЕ НА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОЛЬГАХ

Были измерены углы преломления θ_d и углы отражения φ_r пучков электронов, падающих на тонкие плоские биметаллические фольги. Эксперименты проведены с фольгами, состоящими из алюминия и свинца и из алюминия и меди. Измерения выполнены при различных ориентациях биметалла относительно траектории пучка. В первом случае частицы при своем движении через фольгу вначале пересекали слой алюминия, а затем слой металла, имеющего более высокую плотность (медь или свинец). Во втором случае частицы инжектировались в слой меди или свинца, а затем пересекали слой алюминия. Первые эксперименты показали, что при некоторых углах инъекции α порядок следования слоев металла существенно влияет на величины углов преломления θ_d и отражения φ_r [11].

В настоящей работе представлены результаты измерений углов преломления в случаях, когда увеличивается толщина одного из слоев металла (более плотного Cu и менее плотного Al). На рис. 8а приведены зависимости $\theta_d(\alpha)$ для биметаллических фольг, состоящих из алюминия и меди (Al+Cu), а на рис. 8б — для фольг из алюминия и свинца (Al+Pb). Подписи у кривых обозначают материал слоев биметалла, их толщину в микронах и порядок следо-

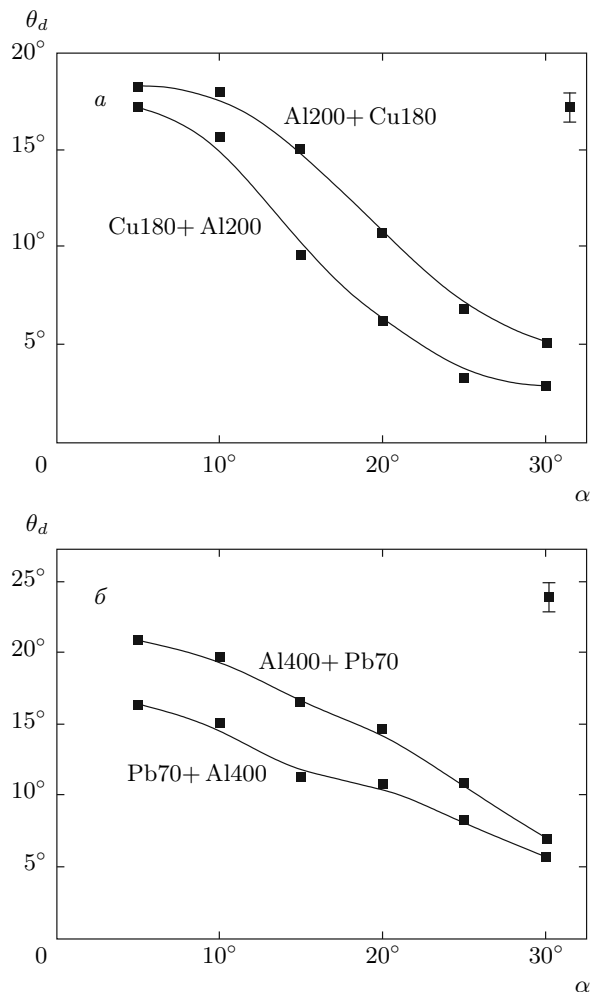


Рис. 8. Зависимости угла преломления траектории θ_d от угла инъекции α . Биметаллическая фольга алюминий + медь (а), фольга алюминий + свинец (б). Подписи у кривых обозначают материалы биметалла, толщину слоев в микронах и порядок их следования вдоль траектории

вания 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 инъекции α величина угла преломления θ_d больше, если при движении электронов вначале пересекается слой металла с меньшей плотностью, в нашем случае алюминий.

Эксперименты, проведенные ранее, показали [11], что при пересечении биметалла из алюминия толщиной $\delta = 200$ мкм (54 мг/см^2) и меди толщиной $\delta = 50$ мкм (45 мг/см^2), разность углов преломления

$\Delta\theta_d = \theta_{d(\text{Al}+\text{Cu})} - \theta_{d(\text{Cu}+\text{Al})}$ мала. Увеличение толщины меди (металла с более высокой плотностью) до $\delta = 180$ мкм (160 мг/см²) (рис. 8а) приводит к заметному росту $\Delta\theta_d$, особенно при углах инжекции $\alpha > 10^\circ$. В случае рассеяния на биметалле из алюминия и свинца (рис. 8б) разность углов преломления $\Delta\theta_d = \theta_{d(\text{Al}+\text{Pb})} - \theta_{d(\text{Pb}+\text{Al})}$ максимальна при малых углах инжекции. С увеличением α различие углов преломления уменьшается.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано рассеяние релятивистских электронов, падающих на тонкую плоскую мишень, состоящую из однородных металлов (алюминий, медь, свинец) и биметаллов, под малыми углами к ее поверхности. Рассмотрено влияние угла инжекции, материала и толщины мишени на угловой разброс и направление движения пучков, пролетевших через мишень и отраженных мишенью. Полученные результаты указывают на возможность изменения интенсивности и направления движения пучка путем модуляции толщины мишени или угла, под которым пересекается плоскость мишени.

Измерения показали, что добавление к мишени второго слоя, имеющего другую плотность, приводит к новой особенности в рассеянии релятивистских электронов. В биметаллической фольге появляется зависимость углов преломления и отражения от последовательности расположения слоев металла вдоль траектории пучка. Эта особенность рассеяния может быть использована для диагностики структуры мишени.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Серов, ЖЭТФ **135**, 679 (2009).
2. А. В. Кольцов, А. В. Серов, ЖЭТФ **143**, 844 (2013).
3. С. В. Блажевич, А. В. Носков, ЖЭТФ **145**, 633 (2014).
4. С. В. Блажевич, Р. Л. Загороднюк, А. В. Носков, ЖЭТФ **146**, 730 (2014).
5. А. И. Кузовлев, В. С. Ремизович, Письма в ЖТФ **9**(12), 710 (1983).
6. Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, Письма в ЖТФ **17**(20), 6 (1991).
7. С. Н. Бохуленков, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В материалах IX Всесоюзной конференции «Взаимодействие атомных частиц с твердым телом», т. 1, ч. 1, Москва (1989), с. 61.
8. Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, ЖТФ **67**(5), 81 (1997).
9. А. В. Кольцов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **99**, 6 (2014).
10. Е. С. Вентцель, *Теория вероятностей*, Наука, Москва (1969).
11. А. В. Кольцов, И. А. Мамонов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **101**, 486 (2015).