

ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ПАДАЮЩИХ НА ПЛОСКУЮ ФОЛЬГУ ПОД МАЛЫМ УГЛОМ К ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

А. В. Серов^{a}, И. А. Мамонов^{a,b}*

^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 5 октября 2017 г.

На дозиметрической пленке выполнены фотографии поперечных сечений электронного пучка, рассеянного тонкой вольфрамовой мишенью в направлении, противоположном первоначальному направлению движения. Обработка изображений позволила получить пространственное распределение обратно отраженных частиц. Измерены углы обратного отражения θ_{br} пучков электронов, отраженных фольгами. Источником электронов являлся микротрон с энергией частиц 7.4 МэВ. Эксперименты проведены с фольгами из вольфрама толщиной 386 мг/см² (200 мкм) и тантала толщиной 1328 мг/см² (800 мкм). Инжекция частиц проходила под углом $\alpha = 10^\circ$ к поверхности фольги. Методом Монте-Карло моделировались процессы рассеяния релятивистских электронов, падающих на плоскую мишень под малыми углами к ее поверхности. Представлены результаты расчетов пространственного и энергетического распределений потоков обратно отраженных частиц как прошедших через мишень, так и отраженных мишенью. Рассмотрены зависимости потоков от направления инжекции частиц, материала и толщины мишени.

DOI: 10.7868/S004445101804003X

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование рассеяния заряженных частиц на плоской мишени конечной толщины рассматривалось в ряде теоретических [1–4] и экспериментальных [5–8] работ. Изучалось влияние материала мишени, ее толщины, угла, под которым частицы падают на мишень, на движение как отраженного пучка, так и пучка, пересекающего мишень. Аналитически решалась задача о прохождении и отражении частиц от плоской мишени конечной толщины при скользящем падении.

Ограниченность толщины мишени значительно усложняет аналитическое описание рассеяния, поскольку в этом случае необходимо одновременно вычислять распределения как частиц, отраженных мишенью, так и частиц, прошедших через мишень. Это делает необходимым использование упрощающих предположений. При некоторых начальных услови-

ях эти предположения мешают выявлению особенностей пространственного распределения зарядов в пучках. Так, в большинстве работ полученные выражения описывают параметры пучков, усредненные по азимутальному углу. Но эксперименты [8] показали, что при падении частиц под углом к поверхности меньше 15° пространственное распределение теряет азимутальную симметрию. Азимутальная симметрия разрушается как у потока электронов, отраженного мишенью, так и у потока, пересекающего мишень.

Для дальнейшего развития теории рассеяния актуальной остается задача более подробного исследования пространственных распределений частиц. На практике возникают задачи, решение которых экспериментальными методами часто затруднено. Поэтому наряду с аналитическими широко используются численные методы расчета динамики частиц в мишени. При исследовании взаимодействия частиц с поверхностью численными методами широко используется моделирование электронных траекторий методом Монте-Карло. Применение метода показало, что полученные с его помощью характери-

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

ки пучка являются достаточными для решения многих практических задач [4]. Дальнейшее совершенствование этого метода сводится к учету все большего числа процессов, влияющих на движение частиц. Сравнение характеристик пучка, полученных при расчетах, с экспериментальными данными позволяет судить об адекватности используемых методов и о степени влияния того или иного процесса на динамику частиц.

В настоящей работе представлены результаты измерения пространственного распределения обратно отраженных частиц, т.е. частиц, которые в результате рассеяния выходят из мишени в направлении, противоположном направлению падающего пучка. Проведено сравнение результатов экспериментов и численных расчетов. При численном исследовании динамики рассеянных частиц был использован пакет программ Livermore GEANT4 10.2 (GEometry ANd Tracking) [9], учитывающий основные физические процессы, происходящие при движении частиц в веществе. Livermore GEANT4 10.2 моделирует доминирующие процессы, которые могут возникнуть в диапазоне значений энергии от 1 кэВ до 15 ПэВ для электромагнитных взаимодействий. При моделировании взаимодействий гамма-квантов учитываются процессы рождения электрон-позитронных пар, комптоновское рассеяние, фотоэффект, фотоделение ядер тяжелых элементов.

2. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВ ОБРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Электроны e с энергией $E = 7.4$ МэВ выводились из микротрона М вдоль продольной оси z в атмосферу через алюминиевую фольгу. Ось x лежала в горизонтальной плоскости, а ось y — в вертикальной. Выведенный пучок проходил через свинцовый коллиматор С толщиной 110 мм с пролетным отверстием диаметром 3 мм. За коллиматором на расстоянии $L = 100$ мм располагалась фольга F, которую можно поворачивать, изменяя угол падения α между траекторией инжектируемого пучка и поверхностью фольги.

При падении на фольгу электронный поток расщеплялся: часть частиц пересекала мишень, образуя преломленный пучок e_d , другая часть отражалась от мишени, формируя отраженный пучок e_r . При этом преломленный и отраженный пучки отклоня-

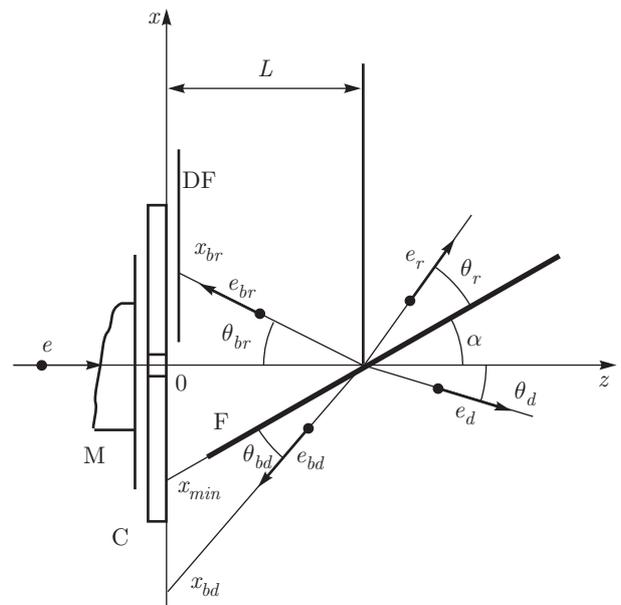


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: М — фланец микротрона, С — коллиматор, F — фольга, DF — дозиметрическая пленка, e — инжектируемые электроны, α — угол инжекции, e_d — преломленные электроны, e_r — отраженные электроны, e_{bd} — обратно преломленные электроны, e_{br} — обратно отраженные электроны, θ_r — угол отражения, θ_d — угол преломления, θ_{br} — угол обратного отражения, θ_{bd} — угол обратного преломления

лись от направления движения падающего пучка. За направление движения пучков принималось то направление, при котором распределение преломленных и отраженных электронов имеет максимум. Углом преломления θ_d считался угол между направлением первоначального движения (ось z) и направлением движения пучка, пролетевшего через фольгу, а углом отражения θ_r — угол между плоскостью мишени и направлением отраженного пучка.

В потоках отраженных и преломленных частиц имеются электроны, движущиеся в обратном направлении, т.е. в направлении, противоположном направлению первоначального движения. За угол обратного отражения θ_{br} принимался угол между осью z и направлением движения обратно отраженных частиц, а за угол обратного преломления θ_{bd} — между плоскостью мишени и направлением движения обратно преломленных частиц. На рис. 1 они обозначены как e_{bd} — обратно преломленные электроны и e_{br} — обратно отраженные электроны. Именно эти потоки частиц регистрировались в экспериментах и принимались во внимание при численных расчетах. За угол обратного отражения θ_{br} принимался угол между осью z и направлением, при

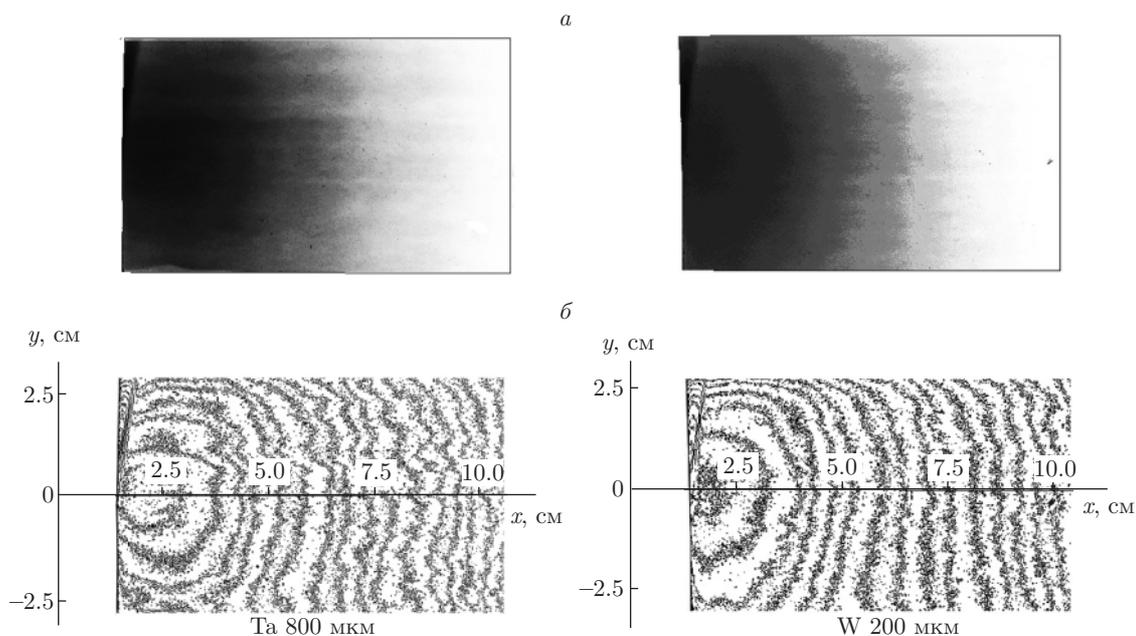


Рис. 2. Фотографии поперечных сечений электронных пучков, обратно отраженных фольгами (*a*) и линии уровня этих дозиметрических фотографий (*б*). Справа — фольга из вольфрама толщиной 200 мкм, слева — фольга из тантала толщиной 800 мкм

котором интенсивность обратно отраженных частиц имеет максимум.

Пространственное распределение электронов фиксировалось на многослойной дозиметрической пленке DF. Один из слоев пленки состоит из мономера субмикронных размеров, чувствительного к воздействию заряженных частиц. Пленка располагалась за коллиматором и была смещена в горизонтальном направлении относительно пролетного отверстия коллиматора (как показано на рис. 1). При таком положении на пленку попадали не первичные электроны, вылетевшие из микроотрона, а только электроны, рассеянные на мишени, или вторичные, выбитые из мишени падающими частицами.

На рис. 2*a* приведены фотографии поперечных сечений пучков, отраженных от вольфрамовой фольги толщиной 200 мкм (фотография справа) и танталовой фольги толщиной 800 мкм (фотография слева). Электроны падали на мишень под углом $\alpha = 10^\circ$ к ее поверхности. Видно, что поперечные сечения представляют собой эллипсы, большая ось которых направлена вертикально, а оси отраженных пучков смещены относительно оси z , вдоль которой происходит инжекция электронов из микроотрона. На рис. 2*б* представлены линии уровня, полученные после обработки фотографий.

Измерения показали, что при изменении материала фольги и ее толщины направление движения обратно отраженного пучка меняется незначительно. В обоих случаях пучок двигался под углом $\theta_{br} = 15^\circ - 19^\circ$. К сожалению, в наших экспериментах можно было фиксировать и изучать только качественные изменения. Для количественных оценок были проведены численные расчеты взаимодействия частиц с материалом мишени и изучено влияние различных параметров на пространственные и энергетические характеристики рассеянных пучков.

3. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ОБРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ

В ходе движения релятивистских электронов в материале мишени за счет основных процессов взаимодействия непрерывно образуются и поглощаются электроны и гамма-кванты, причем электроны подвергаются многократному рассеянию. При расчетах учитывались не только электроны, инжектированные из микроотрона (первичные электроны), но и электроны, образовавшиеся при ионизации материала мишени и в результате конверсии гамма-квантов в электрон-позитронные пары (вторичные электроны). Также учитывались потери электронов, вызванные их торможением и поглощением. В резуль-

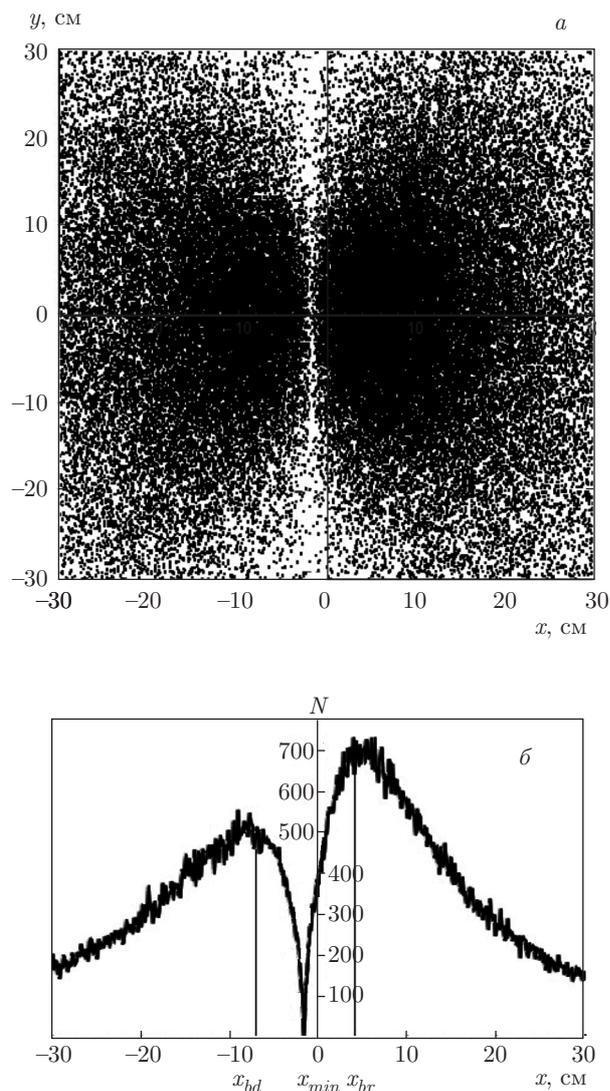


Рис. 3. Изображающие точки электронов на плоскости xy (а), горизонтальное распределение частиц (б)

тате вычислялись координаты и скорости всех электронов, долетевших до детектора. Кроме того, имелась возможность регистрировать только первичные электроны. Это позволяло оценить вклад вторичных процессов в интенсивность рассеянного пучка.

Предполагалось, что пучок имеет диаметр 2 мм и угловую расходимость 0.001 рад, а распределение по поперечным координатам полагалось изотропным. Такие размеры и расходимость близки к параметрам пучка, выходящего из коллиматора, используемого в экспериментах. В зависимости от требуемой точности определения пространственного распределения частиц число первичных электронов варьировалось от $1.5 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^6$.

На рис. 3а показаны изображающие точки электронов на плоскости xy , а на рис. 3б — горизонтальное распределение частиц, рассчитанное для пучка с энергией 7.4 МэВ, падающего на вольфрамовую мишень толщиной 200 мкм под углом $\alpha = 10^\circ$. Видно, что после взаимодействия с плоской мишенью первичный электронный поток распадается на два пучка с явно выраженными границами. Первый пучок представляет собой поток преломленных электронов — частиц, которые после движения в мишени вылетают в противоположное полупространство. Частицы второго пучка (отраженные электроны) — это частицы, которые после взаимодействия с мишенью возвращаются в то же самое полупространство, из которого проходила инжекция.

Граница между этими пучками хорошо видна на рис. 3а. Это вертикальная полоса, в которой нет изображающих точек электронов. В эту область электронам трудно попасть, поскольку для этого частице нужно пройти в материале мишени очень большой путь. В большинстве случаев этот путь много больше длины пробега частицы. Справа от границы находятся изображающие точки отраженных частиц, слева — преломленных. Видно, что поперечное сечение и отраженного, и преломленного пучков представляет собой эллипс.

На рис. 3б показано распределение частиц N по горизонтали x . Отмечено несколько характерных точек горизонтального распределения. В точке x_{min} , лежащей на границе между отраженным и преломленным пучками, плотность частиц минимальна. В точках x_{br} и x_{bd} плотность частиц проходит через максимум. Точке x_{br} соответствует максимум плотности отраженных частиц, точке x_{bd} — максимум плотности преломленных частиц. Зная координаты этих точек, углы обратного отражения θ_{br} и обратного преломления θ_{bd} можно вычислить по формулам

$$\theta_{br} = \arctg \frac{X_{br}}{L}, \quad \theta_{bd} = \arctg \frac{X_{bd}}{L} - \alpha. \quad (1)$$

Были выполнены расчеты рассеяния частиц при различных углах инжекции частиц α . На рис. 4 показана зависимость угла обратного отражения θ_{br} от угла инжекции α электронов с энергией 7.4 МэВ, пересекающих вольфрамовую мишень толщиной 200 мкм. Видно, что уменьшение угла инжекции приводит к увеличению угла обратного отражения, но зависимость имеет нелинейный характер. В некотором диапазоне изменение угла инжекции мало изменяет угол отражения. Сравнение показыва-

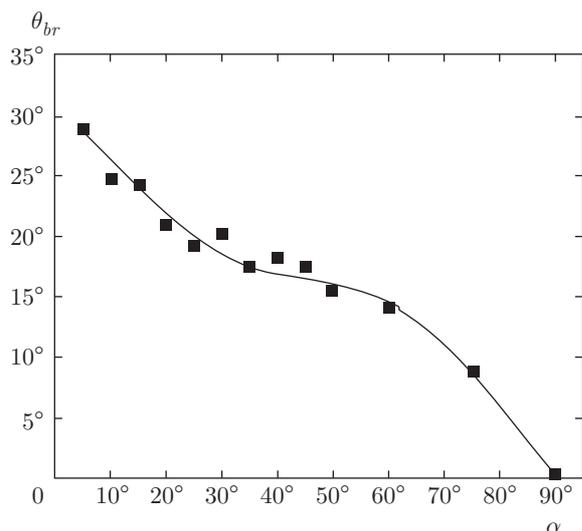


Рис. 4. Зависимость угла отражения θ_{br} от угла инжекции α . Мишень из вольфрама толщиной 200 мкм

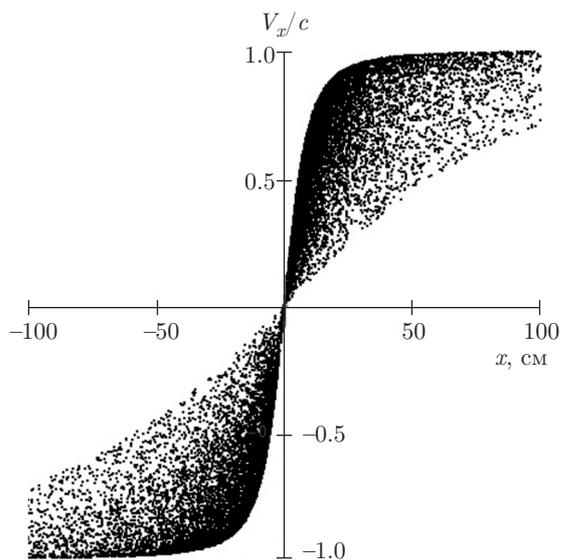


Рис. 5. Изображающие точки обратно отраженных электронов на плоскости $x-V_x$, где x — горизонтальная координата, V_x — горизонтальная скорость

ет, что расчетное значение угла θ_{br} на 20–25 % больше измеренного.

Результаты расчетов позволяют получить некоторые энергетические характеристики пучков. На рис. 5 показано положение изображающих точек электронов как отраженного, так и преломленного пучка на фазовой плоскости $x-V_x/c$, где x — горизонтальная координата, V_x/c — относительная горизонтальная скорость, c — скорость света. Области фазовой плоскости, занятые изображающими точ-

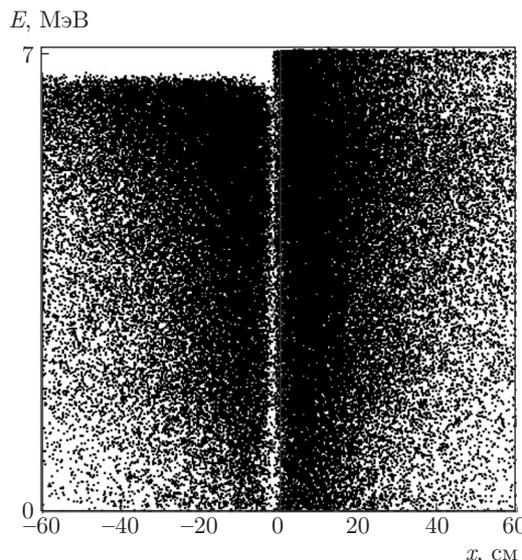


Рис. 6. Изображающие точки обратно отраженных электронов на плоскости $x-E$, где x — горизонтальная координата, E — энергия

ками отраженных и преломленных частиц, имеют серповидную форму. И хотя область, занятая частицами, имеет значительный размер по оси V_x/c , подавляющая часть точек занимает узкие полоски во внешней части серпа.

В нашем случае с некоторыми допущениями можно считать площади, занятые изображающими точками, горизонтальными эмиттантами пучков. Допущение заключается в том, что, говоря об эмиттансе, обычно полагают малый разброс энергий частиц. В нашем случае разброс по энергии большой. Расчеты показывают, что в спектре обратно отраженных электронов присутствуют все энергии: от нулевой до энергии, близкой к максимальной. Так что в большом диапазоне углов вылета присутствует широкий энергетический спектр.

На рис. 6 показаны изображающие точки электронов на фазовой плоскости $x-E$, где x — горизонтальная координата, E — энергия. Видно, что преломленный пучок имеет заметно меньшую энергию, а максимальная энергия наблюдается в нем в более широком диапазоне поперечных координат чем в отраженном пучке. Следует отметить меньший вклад в общий преломленный поток частиц с очень малой энергией (меньше 1 МэВ).

По результатам расчетов было определено, какая часть из всех рассеянных частиц движется в обратном направлении. А поскольку расчеты позволяли выделить первичный пучок, был исследован процент вторичных электронов в потоке обратно от-

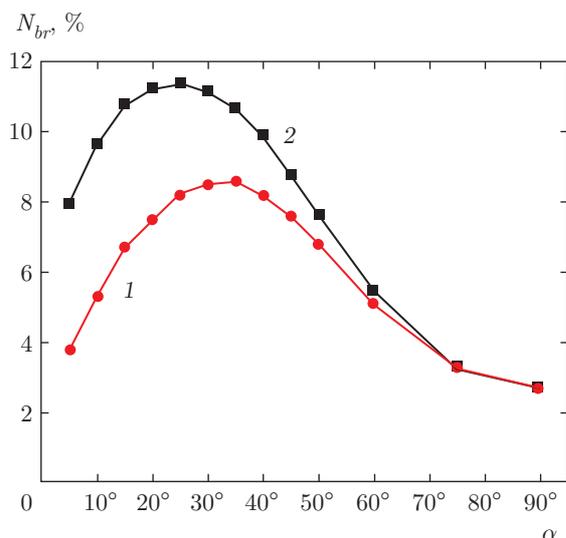


Рис. 7. Процент обратно отраженных электронов в зависимости угла инжекции: 1 — учитывается отражение только первичных электронов, 2 — учитывается отражение всех электронов (первичных и электронов, образовавшихся в результате прохождения первичного пучка)

раженных частиц. На рис. 7 показана зависимость вклада (в процентах к числу первичных электронов) всех обратно отраженных (первичных и вторичных) частиц от угла инжекции α . Из рисунка следует, что при малых углах инжекции вклад вторичных частиц в обратно отраженный поток равен потоку первичных обратно отраженных частиц. При угле инжекции $\alpha = 5^\circ$ вклад первичных и вторичных частиц составляет 4%. При увеличении угла инжекции вклад вторичных частиц уменьшается, и при инжекции перпендикулярно поверхности мишени в обратном направлении практически отражаются только первичные электроны. По-видимому, в этом случае вторичные электроны образуются на такой глубине, с которой они не могут выйти к поверхности, поскольку энергия вторичных электронов меньше, чем у первичных.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены экспериментальные измерения поперечного пространственного распределения релятивистских электронов, отраженных от металлической фольги в направлении, противоположном направлению первоначального движения. Экс-

перименты выполнены с вольфрамовой фольгой толщиной 200 мкм и танталовой фольгой толщиной 800 мкм. Проведены численные расчеты динамики частиц в подобных фольгах. Результаты эксперимента и расчета достаточно хорошо согласуются. Изучались зависимости отклонений преломленного и отраженного пучков от первоначального направления движения от угла инжекции. Оценен вклад вторичных процессов в материале мишени в изменение интенсивности рассеянного пучка.

Авторы благодарны В. А. Карпову, Г. Г. Субботину, С. А. Ралко за помощь при проведении экспериментов. Один из соавторов (А. В. Серов) выражает особую благодарность З. Г. Джиоеву и Л. П. Андреевой за профессиональную работу, которая позволила выполнить представленное здесь исследование.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Кузовлев, В. С. Ремизович, Письма в ЖТФ **9**, 710 (1983).
2. Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, Письма в ЖТФ **17**(20), 6 (1991).
3. Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, ЖТФ **67**(5), 81 (1997).
4. 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, Москва (2005).
5. А. В. Кольцов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **99**, 6 (2014).
6. А. В. Кольцов, И. А. Мамонов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **101**, 486 (2015).
7. А. В. Серов, И. А. Мамонов, А. В. Кольцов, ЖЭТФ **148**, 658 (2015).
8. А. В. Серов, И. А. Мамонов, ЖЭТФ **150**, 268 (2016).
9. J. Apostolakis, *Cern Program Library Long Writeup*, w5013, Tech. rep., CERN, GEANT library, (1993); <http://wwwinfo.cern.ch/asd/geant/>.