

# Экспериментальное исследование рассеяния электронов с энергией 7.4 МэВ, пересекающих фольгу под углом 10–45 градусов к ее поверхности

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

Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 25 октября 2013 г.

После переработки 2 декабря 2013 г.

Измерены угловые распределения электронов, пересекающих фольгу из алюминия толщиной 40 и 120 мкм и из меди толщиной 60 мкм. Источником электронов являлся микротрон с энергией частиц 7.4 МэВ. Изучалось влияние материала и толщины фольги, а также направления инжекции на пространственное распределение прошедших частиц. Измерения показали, что пересечение фольги под малыми углами к ее поверхности не только приводит к увеличению поперечных размеров пучка, но и изменяет направление его движения.

DOI: 10.7868/S0370274X14010019

В экспериментальных [1, 2] и расчетных [3, 4] работах, посвященных исследованию прохождения электронов с энергией 3–14 МэВ через плоские мишени, традиционно рассматривалось рассеяние частиц, инжектированных перпендикулярно поверхности. На практике существуют задачи, решение которых предполагает знание закономерностей рассеяния частиц, падающих на поверхность под углом, существенно меньшим прямого. Такой задачей, например, является задача возбуждения переходного излучения электронами, пересекающими двугранный угол [5] или коническую поверхность [6]. Поверхностью перехода может служить тонкий слой какого-нибудь вещества (майлара, металлов). В этом случае характеристики излучения 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, а также от направления движения частиц. Влияние свойств поверхности перехода на рассеяние будет тем сильнее, чем меньше угол между направлением движения частиц и поверхностью. Целью настоящей работы являлось изучение влияния направления инжекции частиц на параметры пучка, пересекающего слой металла различной толщины.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Ось  $z$  направлена вдоль траектории частиц, а ось  $x$  лежит в горизонтальной плоскости. В исследованиях использовались электронные сгустки микротрона с энергией 7.4 МэВ. Ток в импульсе длительно-

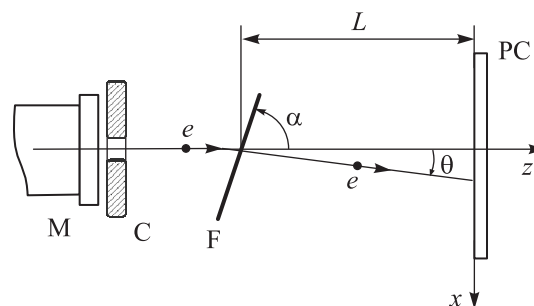


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

стью 4 мкс составлял 40 мА. 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 15 мм имел отверстие диаметром 3 мм. Фольга поворачивалась относительно вертикальной оси  $y$  на угол  $\alpha$ . Распределение электронов измерялось многопроволочной пропорциональной камерой РС. Камера состояла из трех рамок размером  $60 \times 60 \text{ мм}^2$ . Анодная рамка располагалась между двумя катодными. Рамки в камере находились на расстоянии 5 мм одна от другой. Проволоки рамок имели диаметр 20 мкм. Они располагались параллельно на расстоянии 1 мм друг от друга. Плоскости рамок были перпендикулярны направлению движения пучка. В первой рамке проволоки располагались вертикально, в третьей – горизонтально. Такая конструкция позволяла измерить распределение частиц в горизонтальном (вдоль оси  $x$ ) и в вертикальном (вдоль оси  $y$ ) направлениях. Камера распола-

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

галась на расстоянии  $L = 300$  мм от точки пересечения пучком фольги. Сигнал пропорциональной камеры подавался на осциллограф. Временная структура сигнала формировалась последовательным считыванием зарядов катодных проволок камеры, вначале – расположенных вертикально, а затем – горизонтально.

В проведенных экспериментах угол  $\alpha$  между траекторией инжектированных частиц и поверхностью фольги изменялся от  $45^\circ$  до  $10^\circ$ . Измерения проводились с медной фольгой толщиной  $\delta = 60$  мкм и с алюминиевыми фольгами толщиной  $\delta = 40$  и  $120$  мкм.

Характерные осциллограммы сигналов камеры приведены на рис. 2 и 3. Первый импульс осцил-

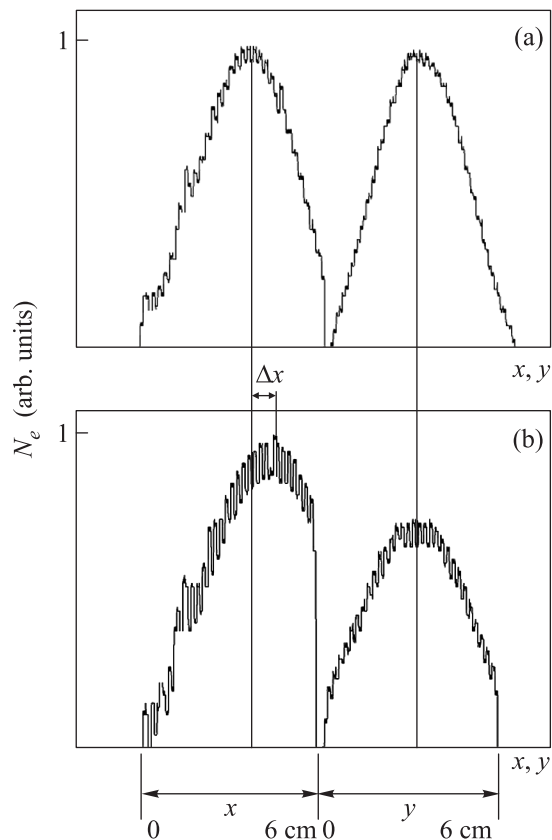


Рис. 2. Горизонтальное ( $x$ ) и вертикальное ( $y$ ) распределения электронов. (а) – частицы движутся в свободном пространстве. (б) – Частицы пересекают алюминиевую фольгу толщиной  $120$  мкм под углом  $\alpha = 10^\circ$  к ее поверхности

лограмм описывает горизонтальное распределение частиц, второй – вертикальное. Ширина каждого импульса по основанию соответствует расстоянию  $60$  мм (вдоль оси  $x$  для первого импульса и вдоль оси  $y$  для второго). Обработка осциллограмм позволяет определить ширину пучка, положение его оси и ха-

рактер зависимости плотности частиц от расстояния до оси пучка.

Рис. 2а показывает распределение в случае, когда между коллиматором С и камерой РС нет фольги, а рис. 2б – когда за коллиматором расположена алюминиевая фольга толщиной  $\delta = 120$  мкм под углом  $\alpha = 10^\circ$  к оси  $z$ . Рассеяние электронов на фольге приводит к увеличению ширины пучка. Кроме того, как показывает сравнение рисунков, в нашем случае пересечение фольги приводит к смещению положения максимума горизонтального распределения ( $\Delta x$  на рис. 2б). Это говорит о том, что пересечение фольги изменяет направление движения сгустка частиц относительно первоначального направления. Происходит отклонение траектории пучка на угол  $\theta = \Delta x/L$ . Положение максимума вертикального распределения практически не изменяется. Следовательно, преломление траектории происходит только в горизонтальной плоскости.

Влияние угла  $\alpha$  на отклонение траектории иллюстрируют осциллограммы рис. 3. Измерения проводились при пересечении пучком медной фольги толщиной  $60$  мкм под углами  $45^\circ$  (а),  $30^\circ$  (б),  $20^\circ$  (с) и  $10^\circ$  (д). Видно, что при уменьшении  $\alpha$  отклонение  $\theta$  увеличивается. Зависимость  $\alpha(\theta)$  имеет нелинейный характер (увеличение отклонения при изменении  $\alpha$  от  $20^\circ$  до  $10^\circ$  сильнее, чем при его изменении от  $45^\circ$  до  $30^\circ$ ).

По результатам измерений были построены зависимости угла отклонения оси пучка  $\theta$  от угла инжекции  $\alpha$  (рис. 4). Квадратами на рисунке показаны результаты измерений на фольге из меди толщиной  $\delta = 60$  мкм, кружками – на алюминиевой фольге толщиной  $\delta = 120$  мкм. Треугольником обозначен угол преломления оси пучка, пересекающего алюминиевую фольгу толщиной  $\delta = 40$  мкм.

Из рис. 4 следует, что при увеличении угла  $\alpha$  отклонение траектории  $\theta$  уменьшается. При перпендикулярном падении пучка на поверхность ( $\alpha = 90^\circ$ ) угол отклонения оси пучка равен нулю и распределение рассеянных частиц становится аксиально-симметричным. Видно, что при инжекции частиц под малыми углами к поверхности ( $\alpha \leq 20^\circ$ ) отклонение  $\theta$  траектории пучка, пересекающего тонкую медную фольгу ( $\delta = 60$  мкм), в три раза превышает отклонения на алюминиевой фольге, толщина которой в два раза больше ( $\delta = 120$  мкм). Измерения также показали, что увеличение толщины алюминиевой фольги от  $40$  до  $120$  мкм приводит к росту угла преломления  $\theta$ .

Эффект поворота пучка, пересекающего наклонную фольгу, можно объяснить особенностями рассе-

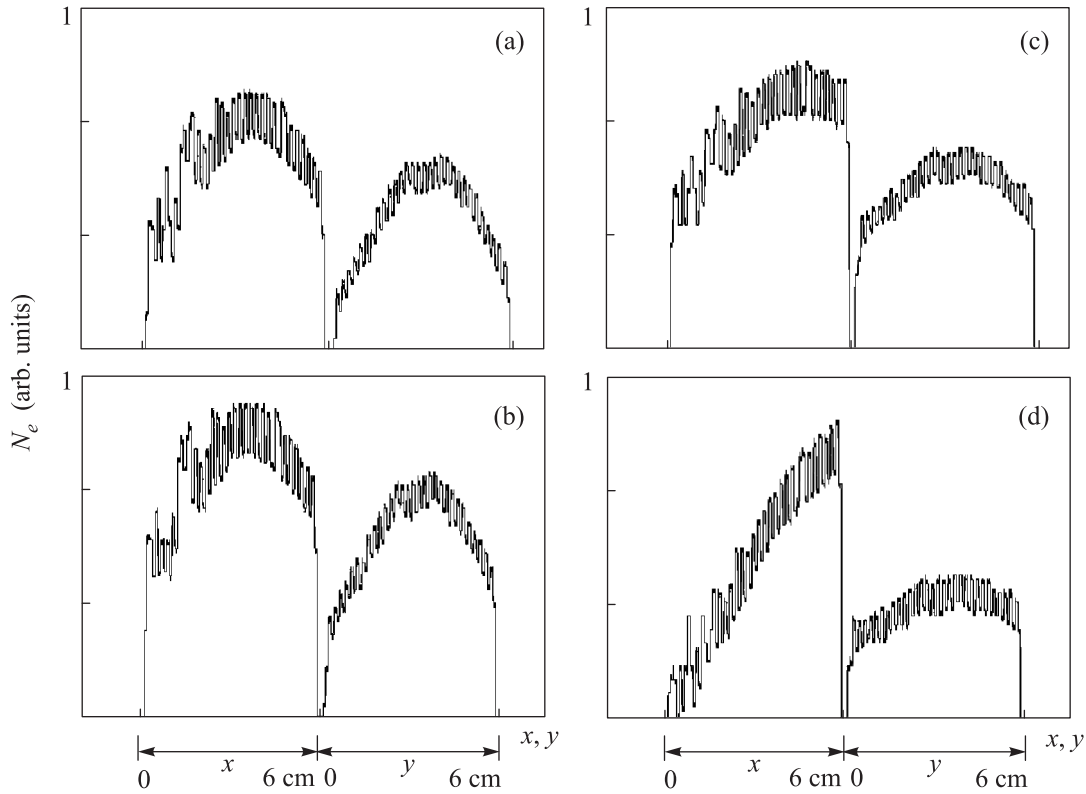


Рис. 3. Поперечные распределения электронов, пересекающих медную фольгу толщиной 60 мкм под углом  $\alpha = 45^\circ$  (а),  $30^\circ$  (b),  $20^\circ$  (c) и  $10^\circ$  (d) к ее поверхности

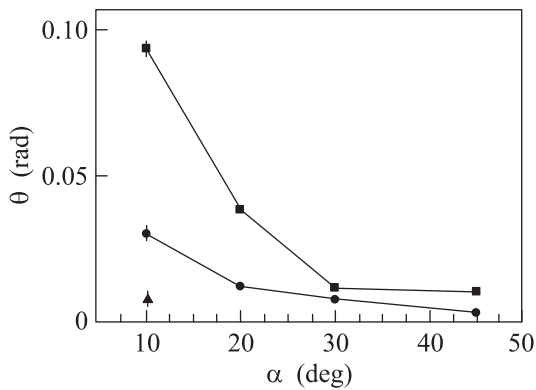


Рис. 4. Зависимость угла отклонения оси пучка  $\theta$  от угла  $\alpha$  между начальной траекторией пучка и плоскостью фольги. Квадраты – медная фольга толщиной 60 мкм, кружки и треугольники – алюминиевые фольги толщиной 120 и 40 мкм соответственно

яния частиц, движущихся достаточно долго вблизи границы фольги. В этом случае влияние направления рассеяния на параметры пучка вылетающих частиц значительно увеличивается.

Рассмотрим две группы частиц, вылетающих из фольги под углом  $\theta$ . Частицы первой группы дви-

жутся слева от оси  $z$ . Частицы второй группы рассеиваются на тот же угол  $\theta$ , но движутся справа от оси  $z$  (см. рис. 1). Можно заметить, что путь в фольге частиц первой группы больше пути частиц второй группы. Разницу в путях частиц первой и второй групп можно записать в виде

$$\Delta l = \frac{\delta}{\sin(\alpha - \theta)} - \frac{\delta}{\sin(\alpha + \theta)}. \quad (1)$$

Если считать, что углы  $0 < \alpha < 1$  и  $\theta < 1$ , и ограничиваться в разложении членами второго порядка, то выражение (1) преобразуется к виду

$$\Delta l = \delta \frac{\theta (2 - \alpha\theta)}{\alpha^2 - \theta^2}. \quad (2)$$

При пересечении фольги толщиной  $\approx 100$  мкм пучок практически не изменит своих поперечных размеров. Однако рассеяние на фольге приведет к увеличению углового разброса пучка. Увеличение углового разброса при малых толщинах пропорционально  $\sqrt{l}$ , где  $l$  – длина пути, пройденного электроном в фольге. Поэтому первая группа частиц при вылете из фольги имеет больший угловой разброс и, следовательно, меньшую плотность по сравнению с части-

цами второй группы. Это приводит к смещению направления движения сгустка в горизонтальной плоскости. Сравнение рис. 3а и d показывает, что при рассеянии на медной фольге указанное смещение больше угловой расходимости начального пучка.

Моделирование процессов рассеяния релятивистских частиц, пересекающих фольгу под малыми углами к ее поверхности, дало результаты, качественно совпадающие с экспериментом.

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

---

1. T. Tabata, Phys. Rev. **162**(2), 336 (1967).
2. P. J. Ebert, A. F. Lauson, and E. M. Lent, Phys. Rev. **183**(2), 422 (1969).
3. В. В. Кудинов, В. В. Смирнов, *Прохождение электронов с энергией 2–8 МэВ в материалах и выход тормозного излучения из слоев материалов различной толщины*, МИФИ, М. (2006).
4. В. В. Кудинов, В. В. Смирнов, *Пространственные и энергетические характеристики электронов с энергией 10–300 МэВ за толстыми мишенями*, МИФИ, М. (2006).
5. А. В. Серов, ЖЭТФ **135**(4), 679 (2009).
6. А. И. Кольцов, А. В. Серов, ЖЭТФ **143**(5), 844 (2013).