

УДК 537.186.2

## НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ, ОТРАЖЕННЫХ И ПРЕЛОМЛЕННЫХ ФОЛЬГОЙ

А. В. Серов<sup>1</sup>, И. А. Мамонов<sup>2</sup>, А. В. Кольцов<sup>1</sup>

*Экспериментально измерена горизонтальная и вертикальная угловая расходимость пучка релятивистских электронов, пересекающих фольгу и отраженных фольгой. Исследовано влияние угла между электронным пучком и плоскостью фольги на интенсивность и угловую расходимость пучков. Изучалось взаимодействие частиц с фольгой из меди толщиной 50 мкм и алюминия толщиной 200 мкм. В качестве источника электронов использовался микротрон с энергией частиц 7.4 МэВ.*

**Ключевые слова:** релятивистские электроны, фольга, преломление, отражение.

*Введение.* Настоящая работа является продолжением выполненных ранее измерений пространственных распределений релятивистских электронов, падающих на фольгу под малыми углами к ее поверхности [1, 2]. В этих работах было исследовано влияние материала фольги, ее толщины и угла инжекции на направление движения как отраженного пучка, так и пучка, пересекающего фольгу. В данной работе измерены зависимости интенсивности, а также угловой расходимости отраженного и преломленного пучков от угла между направлением движения падающего пучка и плоскостью пересекаемой поверхности.

*Методика эксперимента.* Электроны с энергией 7.4 МэВ выводились из микротрона вдоль продольной оси  $z$  в атмосферу через алюминиевую фольгу. Выведенный пучок проходил через свинцовый коллиматор толщиной 50 мм с пролетным отверстием диаметром 3 мм. За коллиматором располагалась фольга, которую можно было поворачивать относительно вертикальной оси  $y$ , изменяя угол  $\alpha$  между траекторией инжектируемого пучка и поверхностью фольги. При падении на фольгу электронный поток рас-

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр., 53; e-mail: serov@x4u.lebedev.ru.

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: ilya.mamonov@gmail.com.

щеплялся: часть частиц пересекала мишень, образуя преломленный пучок, другая часть отражалась от мишени, формируя отраженный пучок. При этом преломленный и отраженный пучки отклонялись от направления движения падающего пучка. За направление движения пучка принималось то направление, под которым угловое распределение электронов имеет максимум. Углом преломления  $\theta_d$  считался угол между направлением первоначального движения (ось  $z$ ) и направлением движения пучка, пролетевшего через фольгу, углом отражения  $\varphi_r$  – угол между плоскостью мишени и направлением отраженного пучка. На расстоянии  $L = 150 - 250$  мм от коллиматора располагалась многопроволочная пропорциональная камера, позволявшая измерять горизонтальное и вертикальное распределения электронов в плоскости, перпендикулярной первоначаль-

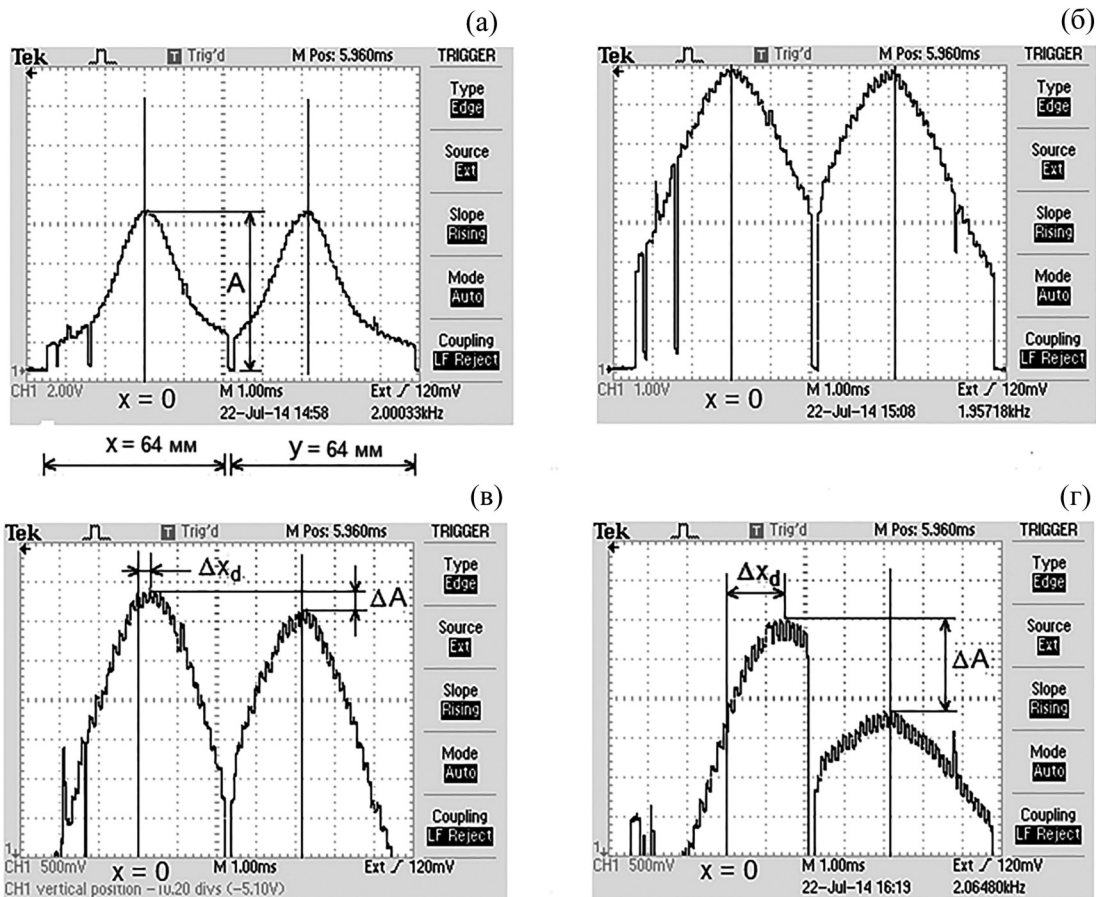


Рис. 1: Распределения плотности электронов в поперечном сечении пучка. Пучок на выходе из коллиматора (а), пучок пересекает фольгу под углом  $\alpha = 90^\circ$  (б),  $\alpha = 45^\circ$  (в),  $\alpha = 10^\circ$  (г). Фольга – медь толщиной 50 мкм.  $L = 150$  мм.

ному направлению движения пучка. Регистрирующая поверхность пропорциональной камеры имела размеры  $64 \times 64$  мм<sup>2</sup>. Сигнал пропорциональной камеры подавался на осциллограф.

На рис. 1 приведены осциллограммы сигналов. Первый импульс осциллограмм описывает горизонтальное распределение плотности электронов (распределение в плоскости угла инжекции  $\alpha$ ), второй – вертикальное. Ширина каждого импульса по основанию соответствует расстоянию 64 мм вдоль горизонтальной оси  $x$  для первого импульса и вдоль вертикальной оси  $y$  для второго. На рисунке тонкой вертикальной чертой показано положение оси инжектируемого пучка, буквой  $A$  обозначена амплитуда импульса, описывающего горизонтальное распределение частиц. Все осциллограммы получены при одном и том же положении пропорциональной камеры, расположенной на расстоянии  $L = 150$  мм от коллиматора. На рис. 1(а) показаны распределения выведенного из микротрона и прошедшего через коллиматор пучка, рис. 1(б) – распределения, когда выведенный пучок пересекает фольгу из меди толщиной  $\delta = 50$  мкм, расположенную перпендикулярно траектории инжектированных частиц, рис. 1(в) – фольга расположена под углом  $\alpha = 45^\circ$  к траектории падающего пучка, а рис. 1(г) – под углом  $\alpha = 10^\circ$ .

Осциллограммы позволяют определить поперечные размеры пучка ( $w_x, w_y$ ) и положение его оси. При вычислении ширины пучка  $w_x$  и  $w_y$  предполагалось, что поперечные распределения частиц в пучке являются гауссовскими. Угловая расходимость пучка определялась по формуле  $\Delta\theta = \arctg(w/2L)$ . Изменения распределения плотности позволяют вычислить угловой разброс, вносимый в пучок мишенью, и оценить отношение потоков падающих, отраженных и преломленных частиц.

Видно, что пучок, выходящий из коллиматора, имеет осесимметричное распределение плотности (рис. 1(а)). Сравнение рисунков показывает, что пересечение фольги под углом  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 1(б)) приводит к увеличению угловой расходимости пучка, но положение оси пучка не изменяется, и распределение плотности остается осесимметричным. Уменьшение угла инжекции до  $\alpha = 45^\circ$  (рис. 1(в)) вызывает смещение оси пучка на детекторе в горизонтальной плоскости на расстояние  $x_d$ , т.е. направление движения изменяется на угол  $\theta_d = \arctg(x_d/L)$ . Кроме того, уменьшается на величину  $\Delta A$  амплитуда импульса, описывающего распределение электронов по вертикали. Это указывает на то, что угловая расходимость пучка в вертикальной плоскости  $\Delta\theta_y$  становится больше расходимости в горизонтальной плоскости  $\Delta\theta_x$ . Таким образом, пересечение фольги под углом вызывает изменение направления движения преломленного пучка и нарушает осевую симметрию распределения частиц. При инжекции под углом

$\alpha = 10^\circ$  (рис. 1(г)) направление движения преломленного пучка изменяется на бóльший угол, и увеличивается разность между вертикальной и горизонтальной расходимостью пучка. Из осциллограмм, представленных на рис. 1, следует, что положение максимума вертикального распределения частиц не изменяется.

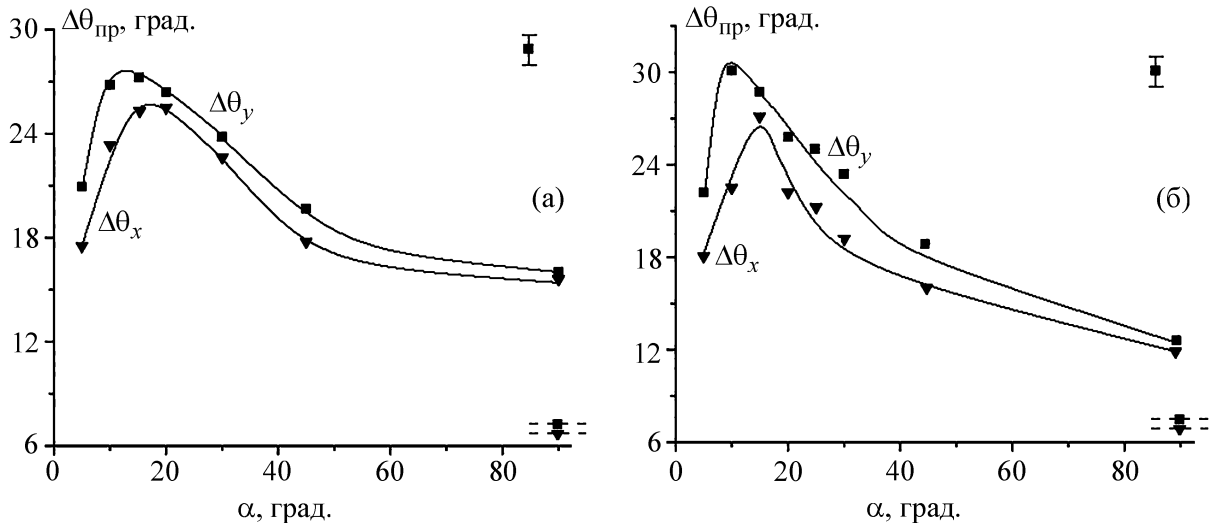


Рис. 2: Зависимость угловых расходимостей преломленного пучка  $\Delta\theta_x$  и  $\Delta\theta_y$  от угла инжекции  $\alpha$ . Медь толщиной 50 мкм (а), алюминий толщиной 200 мкм (б).

*Обсуждение экспериментальных данных.* В проведенных экспериментах в большом интервале изменения угла инжекции  $\alpha$  получены поперечные распределения плотности преломленных и отраженных пучков. На основании этих распределений построены зависимости угловой расходимости пучка в горизонтальной  $\Delta\theta_x$  и вертикальной  $\Delta\theta_y$  плоскостях от угла инжекции  $\alpha$ . На рис. 2 показаны зависимости  $\Delta\theta_x(\alpha)$  и  $\Delta\theta_y(\alpha)$  пучков, пересекающих фольгу из меди, толщиной  $\delta = 50$  мкм (рис. 2(а)) и фольгу из алюминия толщиной  $\delta = 200$  мкм (рис. 2(б)). В правом нижнем углу рисунков пунктиром показаны начальные расходимости пучка, выходящего из коллиматора  $\Delta\theta_x$  и  $\Delta\theta_y$ . В правом верхнем углу на этом и остальных рисунках показан характерный масштаб погрешности измерений. Видно, что после взаимодействия с фольгами расходимость пучков увеличивается в несколько раз. Кривые, описывающие зависимость угловой расходимости пучка от угла инжекции, имеют характерную колоколообразную форму с резким подъемом при малых углах и пологим спадом при увеличении угла инжекции  $\alpha$ .

Такой характер зависимости объясняется влиянием двух факторов, определяющих движение электронов в фольге. С одной стороны, уменьшение угла инжекции  $\alpha$  вызывает увеличение длины пути, проходимого частицей в фольге, и, следовательно, увели-

чивает число рассеяний, которые испытывает частица. Это приводит к росту угловой расходимости. С другой стороны, увеличение расходимости пучка приводит к тому, что увеличивается число частиц, отражаемых поверхностью, т.е. частиц, вылетающих из фольги в полупространство, из которого происходит инжекция. В результате при малых углах инжекции пучок, пересекающий фольгу, уменьшает интенсивность и свой угловой разброс.

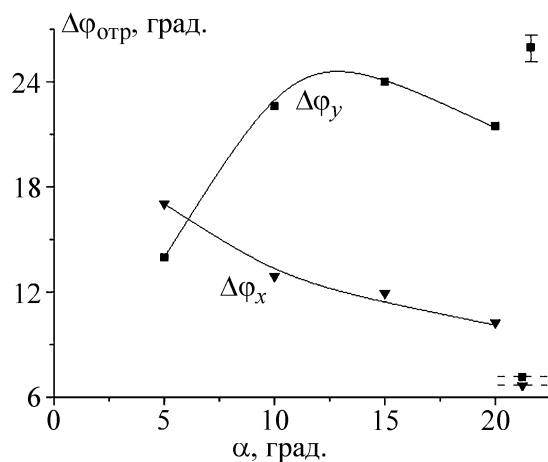


Рис. 3: Зависимость угловых расходимостей отраженного пучка  $\Delta\varphi_x$  и  $\Delta\varphi_y$  от угла инжекции  $\alpha$ . Медь толщиной 50 мкм.

На рис. 3 представлены зависимости угловой расходимости отраженного пучка от угла инжекции  $\Delta\varphi(\alpha)$ . Видно, что в отличие от пучка, пересекающего фольгу, зависимости угловой расходимости отраженного пучка в горизонтальной  $\Delta\varphi_x(\alpha)$  и вертикальной  $\Delta\varphi_y(\alpha)$  плоскостях имеют существенно различный характер. При уменьшении угла инжекции расходимость в горизонтальной плоскости растет, а в вертикальной плоскости падает.

Влияние угла инжекции на амплитуды импульсов, описывающих горизонтальное распределение электронных пучков, как преломленных  $A_{пр}$ , так и отраженных фольгой  $A_{отр}$ , иллюстрирует рис. 4. За единицу плотности принята максимальная плотность пучка на выходе из коллиматора. Представленные результаты были получены в измерениях, выполненных на медной фольге толщиной 50 микрон. Из рисунка следует, что уменьшение угла инжекции приводит к снижению максимальной плотности преломленного пучка и к росту максимальной плотности отраженного пучка.

Во всех проведенных экспериментах использовались достаточно тонкие фольги, в которых поглощение падающих частиц материалом мишени было незначительным. Из-

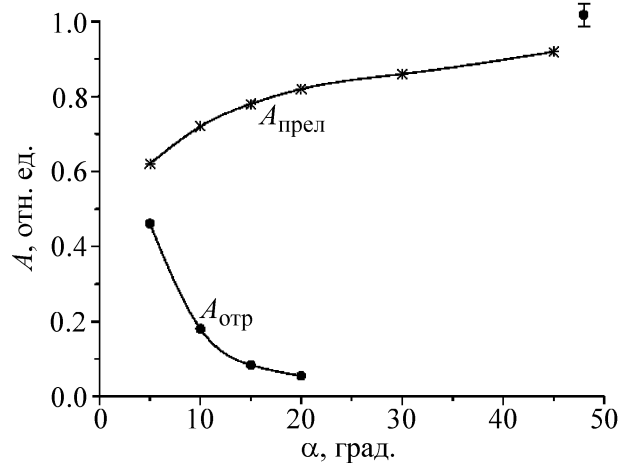


Рис. 4: Зависимость максимальной плотности преломленного  $A_{\text{прел}}$  и отраженного  $A_{\text{отр}}$  пучка от угла инжекции  $\alpha$ . Медь толщиной 50 мкм.

мерения показали, что при углах инжекции в диапазоне  $5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  полное число частиц, вылетающих из фольги (пересекающих + отраженных), изменяется на 5 процентов.

*Заключение.* Исследовано влияние направления инжекции на угловую расходимость релятивистского электронного пучка, пересекающего фольгу и пучка, отражаемого фольгой. Угловые расходимости преломленных пучков резко возрастают при малых углах инжекции и плавно спадают при увеличении угла инжекции. Такие зависимости характерны как для горизонтальной (в плоскости угла инжекции  $\alpha$ ), так и для вертикальной расходимости преломленного пучка. Причем во всем диапазоне изменений угла инжекции расходимость пучка в вертикальной плоскости  $\Delta\theta_y(\alpha)$  выше расходимости в горизонтальной  $\Delta\theta_x(\alpha)$ . В отраженных пучках, в отличие от преломленных, зависимости горизонтальной  $\Delta\varphi_x(\alpha)$  и вертикальной  $\Delta\varphi_y(\alpha)$  расходимости от угла инжекции существенно отличаются.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. В. Кольцов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **99**(1), 6 (2014).  
 [2] А. В. Кольцов, И. А. Мамонов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **101**(7), 486 (2015).

Поступила в редакцию 2 июля 2015 г.