

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПУЧКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ОТРАЖЕННЫХ И ПРЕЛОМЛЕННЫХ ТОНКОЙ ФОЛЬГОЙ

*А. В. Серов<sup>a\*</sup>, И. А. Мамонов<sup>b</sup>*

*<sup>a</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук  
119991, Москва, Россия*

*<sup>b</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 6 февраля 2016 г.

На дозиметрической пленке были получены фотографии поперечных сечений электронного пучка, рассеянного тонкими фольгами. Обработка изображений позволила получить пространственное распределение частиц как отраженных фольгой, так и пересекающих фольгу. Приведены результаты измерений пространственного распределения электронов, падающих на алюминиевые, медные и свинцовые фольги, а также на биметаллические фольги, составленные из слоев алюминия и свинца и из слоев алюминия и меди. Исследовалось влияние материала и толщины фольги, а также угла между начальной траекторией пучка и плоскостью мишени на пространственное распределение электронов. Изучалось влияние порядка следования слоев металла в биметаллических фольгах на распределения пучков. Источником электронов являлся микротрон с энергией частиц 7.4 МэВ.

DOI: 10.7868/S0044451016080071

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением выполненных ранее экспериментальных исследований рассеяния релятивистских электронов, падающих на фольгу под малыми углами к ее поверхности [1–3]. В предыдущих работах изучалось влияние материала фольги, ее толщины и угла инжекции на движение как отраженного пучка, так и пучка, пересекающего фольгу. С этой целью в заданной геометрии измерялись распределения частиц в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Измерения выполнялись многопроволочной пропорциональной камерой, проволочки которой были расположены на расстоянии 1 мм одна от другой. Пропорциональная камера позволяла регистрировать интегральные характеристики пучка, такие как направление его движения, поперечные размеры и расходимость. Однако при решении некоторых задач необходимо знать особенности пространственного распределения частиц по поперечному сечению сгустка.

Такие знания необходимы, например, для описания переходного излучения, возбуждаемого частицами, пересекающими сложные поверхности перехода (двугранный угол [4] или коническую поверхность [5]), и при исследовании излучения релятивистского пучка, пересекающего структуру, состоящую из одного или двух аморфных слоев и одного кристаллического слоя [6, 7].

Построению теории отражения и прохождения частиц через плоские рассеиватели при скользящем падении потока на поверхность посвящен ряд работ [8–12]. Существенный вклад в развитие теории обратного рассеяния заряженных частиц внесла работа [8], в которой рассматривалась теория отражения частиц от полубесконечной среды. В этой статье получено усредненное по азимуту угловое распределение отраженных частиц без учета потерь энергии. В более поздней работе [9] были получены выражения, описывающие усредненные по азимуту угловые и энергетические спектры отраженных пучков. Переход в задачах рассеяния от полубесконечной среды к рассеянию на плоской мишени конечной толщины радикально усложняет задачу, поскольку возника-

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

ет необходимость одновременного вычисления распределения как частиц отраженных мишенью, так и частиц, прошедших через мишень. Были получены зависимости коэффициентов отражения и прохождения от толщины рассеивающего слоя [10], проинтегрированные по азимутальному углу распределения заряженных частиц, прошедших через плоский рассеиватель [11]. В работе [12] оценивалась роль различных факторов в формировании энергетического спектра протонов с энергией 10–25 кэВ и ионов средних энергий, прошедших через тонкую мишень. Угол между траекторией инжектируемого пучка и поверхностью мишени  $\alpha$  варьировался в диапазоне  $15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ .

Сложность аналитического решения задачи, учитывающего все факторы, влияющие на динамику частиц, делает необходимым использование упрощающих предположений. Эти предположения в некоторых случаях мешают выявлению особенностей пространственного распределения зарядов в пучках. Так, в большинстве работ полученные выражения описывают параметры пучков, усредненные по азимутальному углу. Но измерения распределений релятивистских электронов, рассеянных на тонких фольгах, показали [1, 3], что при углах инжекции  $\alpha < 15^\circ$  пучки теряют азимутальную симметрию. Ширина распределения отраженных и преломленных частиц вдоль оси  $x$  (оси, перпендикулярной направлению инжекции и лежащей в плоскости угла инжекции) существенно меньше, чем вдоль оси  $y$ . Кроме того, распределение по  $x$  асимметрично относительно направления движения как отраженного, так и преломленного пучка, в то время как распределение вдоль оси  $y$  остается симметричным. Следовательно, в большинстве случаев при малых углах инжекции плотность рассеянных частиц существенно изменяется при перемене азимутального угла. Эта особенность распределения не может быть описана теорией, предполагающей азимутальную однородность пучка.

Для дальнейшего развития теории рассеяния актуальной остается задача более подробного измерения пространственных распределений частиц. В настоящей работе представлены результаты исследования зависимости пространственного распределения отраженных и преломленных релятивистских электронов от угла между направлением движения падающего пучка и плоскостью пересекаемой поверхности от толщины и материала фольги. Изучено влияние порядка следования слоев в биметаллической фольге на распределения.

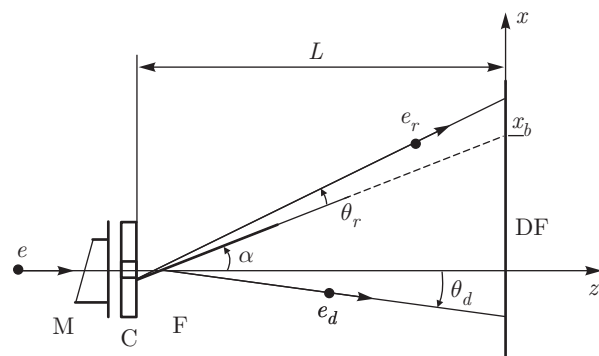


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: М — фланец микротрона, С — коллиматор, F — фольга, DF — дозиметрическая пленка,  $e$  — инжектируемые электроны,  $e_d$  — электроны, пролетевшие через мишень,  $e_r$  — электроны, отраженные мишенью,  $\alpha$  — угол инжекции,  $\theta_d$  — угол преломления,  $\theta_r$  — угол отражения

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Электроны  $e$  с энергией 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 располагалась фольга F, которую можно было поворачивать относительно оси  $y$ , изменяя угол  $\alpha$  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 отклонялись от направления движения падающего пучка. За направление движения пучка принималось то направление, под которым 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  $\theta_r$  — угол между плоскостью мишени и направлением отраженного пучка.

Пространственное распределение электронов фиксировалось на многослойной дозиметрической пленке DF. Один из слоев этой пленки состоит из мономера субмикронных размеров, чувствительного к воздействию заряженных частиц. При падении электронов на мономер происходит его

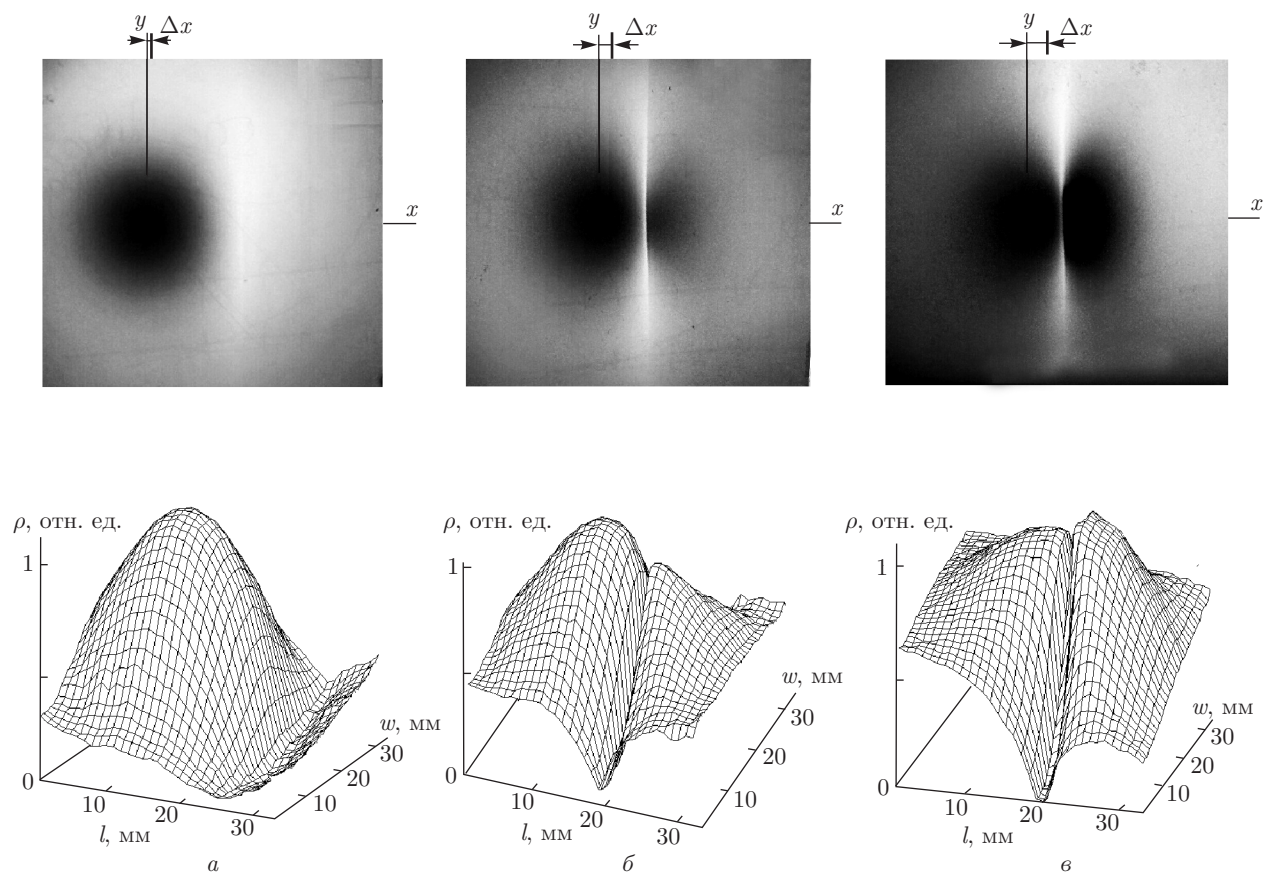


Рис. 2. Фотографии поперечного сечения пучков, рассеянных на медной фольге (верхний ряд) и пространственные распределения плотности электронов  $\rho$  в плоскости дозиметрической пленки DF.  $\delta = 50$  мкм,  $\alpha = 30^\circ$  (а),  $15^\circ$  (б),  $5^\circ$  (в)

полимеризация. Количество полимера и глубина изменения его цвета пропорциональны числу падающих частиц. Полимеризация не переходит от кристалла к кристаллу, поэтому изображение, формируемое на пленке пучками, имеет микронное пространственное разрешение. Дозиметрическая пленка DF располагалась на расстоянии  $L$  от коллиматора, и ее плоскость была перпендикулярна оси  $z$ .

Точка, в которой прямая, проведенная через мишень, пересекает плоскость пленки, 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  $L$ , диаметром пролетного отверстия коллиматора  $d$  и углом инжекции  $\alpha$ . Отметим, что плотность частиц вблизи вертикальной линии, лежащей в плоскости пленки и пересекающей горизонтальную ось в точке  $x_b$ , минимальна, так как в эту область попадает малое число электронов. Это только те электроны, кото-

рые пролетают в мишени максимальное расстояние, но не набирают за время движения результирующего смещения или угла рассеяния, достаточного для вылета из плоскости фольги.

Полученные изображения обрабатывались в среде MatLab, что позволяло построить распределение плотности электронов  $\rho = f(l, w)$  в плоскости дозиметрической пленки DF, а также линии уровня на плоскости  $(l, w)$  — линии, в каждой точке которых плотность частиц имеет заданное значение  $\rho_0$ .

Проведенные эксперименты позволили исследовать влияние угла инжекции  $\alpha$ , толщины фольги  $\delta$  и материала фольги на пространственное распределение рассеянных частиц. В качестве рассеивателя использовались фольги из меди, алюминия и свинца, а также биметаллические фольги из меди и алюминия и из свинца и алюминия. В экспериментах угол между траекторией инжектированных частиц и поверхностью фольги  $\alpha$  изменялся от  $2^\circ$  до  $30^\circ$ .

### 3. РАССЕЯНИЕ НА ОДНОРОДНЫХ ФОЛЬГАХ

На рис. 2 представлены фотографии поперечного сечения потока электронов, падающего под различными углами на медную фольгу (верхний ряд), и распределения плотности частиц  $\rho$  на плоскости фотографий  $l, w$  (нижний ряд). На фотографиях показано положение осей  $x$  и  $y$ . Фольга толщиной  $\delta = 44.5$  мг/см<sup>2</sup> (50 мкм) размерами  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup> пересекалась пучком под углом  $\alpha = 30^\circ, 15^\circ, 5^\circ$ . Расстояние от коллиматора до пленки  $L = 30$  мм. Светлые вертикальные полосы на фотографиях соответствуют той области пространства, в которую не попадают ни отраженные, ни преломленные электроны, а только электроны, вылетевшие из торцевой поверхности фольги. Плотность частиц в этой полосе минимальна. Эта полоса является границей между преломленным и отраженным пучками. На пленку слева от полосы попадали частицы, пересекающие мишень (преломленный пучок), справа — частицы, отраженные мишенью (отраженный пучок).

Видно, что при угле инъекции  $\alpha = 30^\circ$  (рис. 2а) распределение плотности частиц, пересекающих мишень, практически азимутально симметрично относительно направления движения преломленного пучка, а число отраженных частиц мало. Уменьшение угла инъекции приводит к увеличению числа отраженных частиц и к разрушению азимутальной симметрии в пространственных распределениях плотности и преломленного, и отраженного пучков. Высота пучка (размер по оси  $y$ ) существенно больше его ширины (размера по оси  $x$ ). Кроме того, максимум плотности частиц, пересекающих фольгу, смещается в горизонтальном направлении на расстояние  $\Delta x$ , т.е. меняется направление движения преломленного пучка. Из рис. 2 следует, что при уменьшении угла инъекции  $\alpha$  увеличивается смещение пучка  $\Delta x$  и, следовательно, угол преломления  $\theta_d$ .

В последующих экспериментах частицы инжектировались на фольги размером  $100 \times 40$  мм<sup>2</sup> под углом  $\alpha = 7^\circ$  к их поверхности, а дозиметрическая пленка находилась на расстоянии  $L = 100$  мм от коллиматора.

Обработка фотографий распределения рассеянных частиц позволила построить линии уровня заданной плотности пучков — линии, на которых плотность частиц имеет определенное значение  $\rho_0$ . На рис. 3 показана топография преломленных и отраженных потоков, сформированных при рассеянии на медных фольгах толщиной  $\delta =$

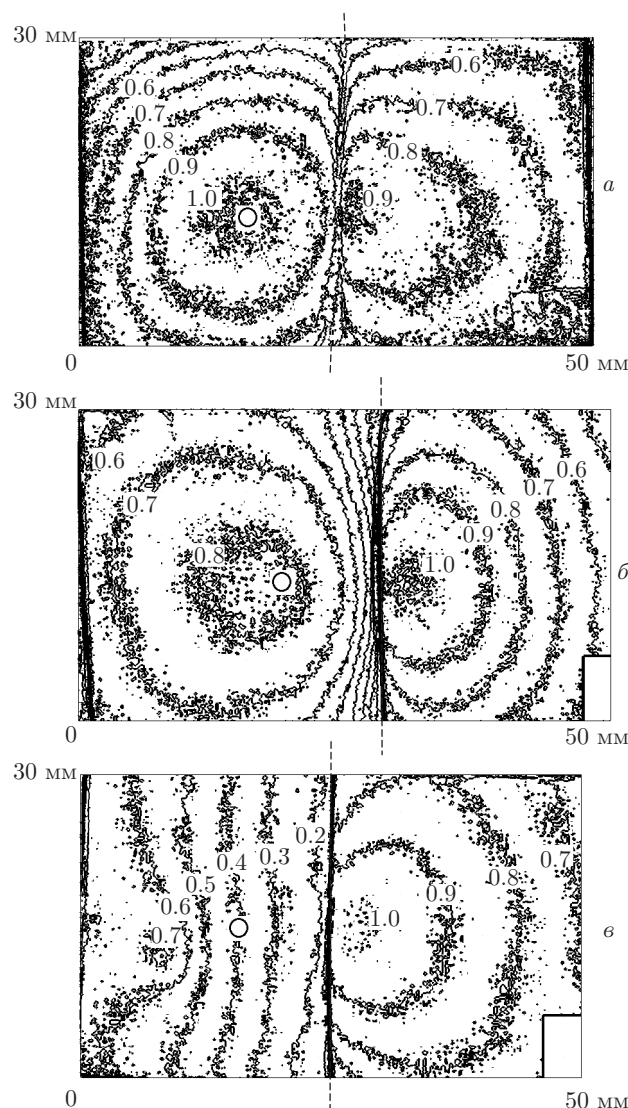


Рис. 3. Зависимости поперечного распределения плотности преломленных и отраженных электронов от толщины медной фольги  $\delta$ .  $\alpha = 7^\circ$ ,  $L = 100$  мм,  $\delta = 20$  (а), 50 (б), 180 (в) мкм. Числа у кривых обозначают относительную плотность частиц  $\rho_0 = \rho/\rho_{max}$  на данной линии уровня. Кружки — положение инжектированного пучка

$= 17.8$  мг/см<sup>2</sup> (20 мкм),  $44.5$  мг/см<sup>2</sup> (50 мкм),  $160$  мг/см<sup>2</sup> (180 мкм). Граничная полоса между преломленными и отраженными частицами отмечена пунктиром. На рис. 3 приведены размеры фотографий, кружком показано положение инжектированного пучка, числа у кривых обозначают относительную плотность частиц  $\rho_0 = \rho/\rho_{max}$  на данной линии. Рисунки позволяют количественно описать поперечное сечение пучка при различных значениях плотности частиц и эволюцию пучка при изменении толщины фольги.

Сравнение рисунков показывает, что увеличение толщины фольги приводит к смещению максимума плотности частиц и вызывает изменение пространственного распределения. В случае, когда толщина  $\delta = 17.8 \text{ мг/см}^2$  (20 мкм) (рис. 3а), плотность электронов, пересекающих фольгу, выше плотности частиц, отраженных фольгой, и при плотностях  $\rho_{max} \geq \rho \geq 0.8\rho_{max}$  формы линии уровня как для отраженных, так и для преломленных пучков близки к окружностям. При толщине  $\delta = 44.5 \text{ мг/см}^2$  (50 мкм) число отраженных частиц превосходит число преломленных, а форма линии уровня для отраженного пучка преобразуется из окружности в эллипс. Видно, что чем меньше плотность частиц на данной линии уровня, тем сильнее вытянут эллипс вдоль вертикальной оси и тем дальше от граничной полосы расположен центр эллипса.

В экспериментах частицы инжектировались под малым углом  $\alpha = 7^\circ$ . Поэтому, если бы угол падения пучка на фольгу  $\alpha$  был равен углу отражения  $\theta_r$ , то на фотографиях область, в которую инжектируется пучок, отмеченная на рисунках кружком, и область максимальной интенсивности отраженного пучка располагались бы симметрично относительно граничной полосы. Видно, что на рис. 3 при всех значениях толщины фольги области максимальной интенсивности отраженного пучка расположены ближе к граничной полосе. Следовательно, в данных условиях при рассеянии на тонкой фольге угол отражения  $\theta_r$  меньше угла падения  $\alpha$ .

На рис. 4 показаны линии уровня пучков, рассеянных на алюминиевой и свинцовой фольгах толщиной соответственно  $54 \text{ мг/см}^2$  (200 мкм) и  $79 \text{ мг/см}^2$  (70 мкм). Из рисунка следует, что угол отражения на свинце  $\theta_r$  (Pb) более чем в два раза больше угла отражения на алюминии  $\theta_r$  (Al). При рассеянии на свинце также больше и угол преломления  $\theta_d(\text{Pb}) > \theta_d(\text{Al})$ , и азимутальная асимметрия пространственного распределения преломленного пучка. Отметим, что только при рассеянии на свинцовой фольге с точностью до ошибки измерения можно считать, что угол падения  $\alpha$  равен углу отражения  $\theta_r$ .

#### 4. РАССЕЯНИЕ НА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОЛЬГАХ

В экспериментах, выполненных ранее [2], было обнаружено, что при некоторых углах инъекции  $\alpha$  порядок следования слоев металла в биметалле существенно влияет на величины углов преломления

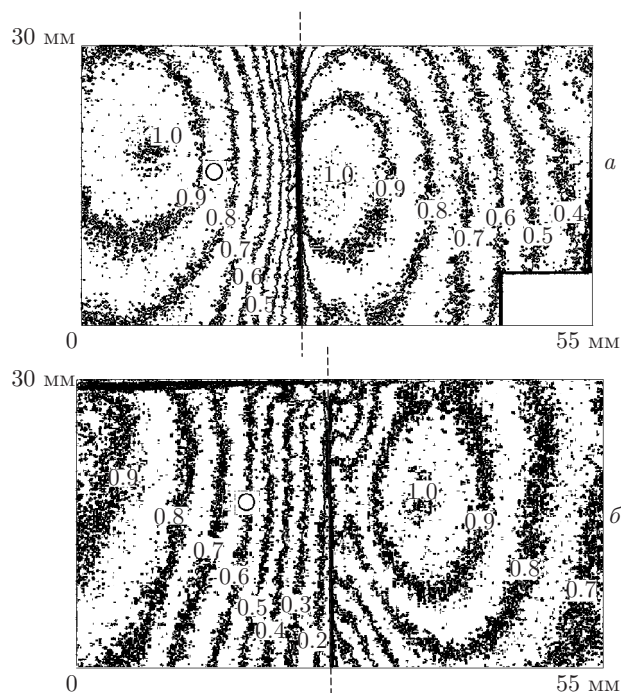


Рис. 4. Поперечные распределения плотности электронов, рассеянных на алюминиевой (а) и свинцовой (б) фольгах.  $\alpha = 7^\circ$ ,  $L = 100 \text{ мм}$ ,  $\delta_{Al} = 200 \text{ мкм}$ ,  $\delta_{Pb} = 70 \text{ мкм}$

$\theta_d$  и отражения  $\theta_r$ . В настоящей работе изучено влияние порядка следования слоев на пространственное распределение преломленного и отраженного пучков.

На рис. 5 приведены линии уровня поперечного сечения пучков, рассеянных биметаллической фольгой, состоящей из алюминия толщиной  $54 \text{ мг/см}^2$  (200 мкм) и свинца толщиной  $79 \text{ мг/см}^2$  (70 мкм). Частицы падали на биметалл под углом  $7^\circ$ . На рис. 5а представлено распределение плотности пучка, пересекающего вначале алюминий, а затем свинец, т.е. биметалл Al + Pb, а на рис. 5б — пучка, пересекающего биметалл Pb + Al. Видно, что пространственные распределения различаются. В первом случае (рис. 5а) углы отражения  $\theta_r$  и преломления  $\theta_d$  больше, чем во втором (рис. 5б). Линии уровня представляют собой эллипсы, эксцентриситет которых также зависит от порядка следования слоев в биметалле. В вертикальном направлении плотность преломленного пучка уменьшается медленнее, чем плотность отраженного.

На рис. 6 представлены линии уровня для пучков, инжектированных под углом  $\alpha = 4^\circ$  на биметаллическую фольгу, состоящую из алюминия толщиной  $54 \text{ мг/см}^2$  (200 мкм) и меди толщиной

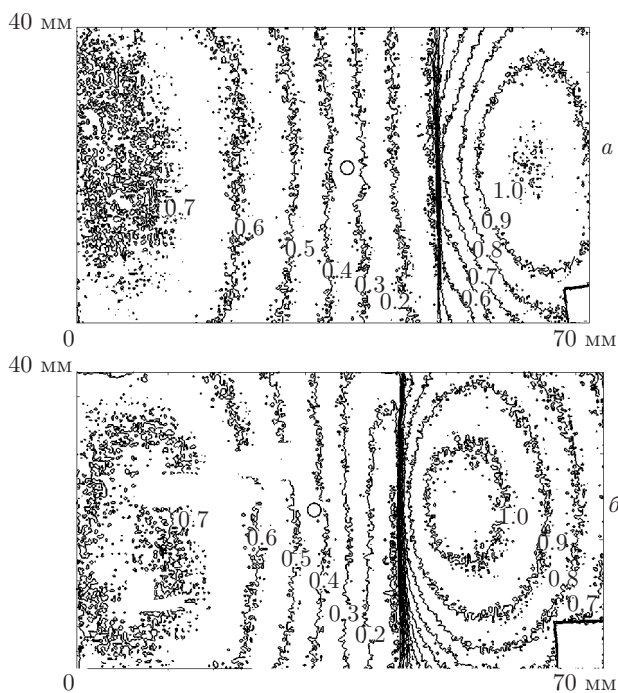


Рис. 5. Линии уровня пространственных распределений плотности электронов  $\rho$ , рассеянных биметаллическими фольгами Al + Pb (а) и Pb + Al (б).  $\alpha = 7^\circ$ ,  $L = 100$  мм,  $\delta_{Al} = 200$  мкм,  $\delta_{Pb} = 70$  мкм

160 мг/см<sup>2</sup> (180 мкм). Рисунок 6а иллюстрирует рассеяние на биметалле Al + Cu, а рис. 6б — на биметалле Cu + Al.

Сравнивая кривизну линий уровня для преломленных пучков, можно сделать вывод о том, что угол преломления  $\theta_d$  при пересечении фольги из биметалла Al + Cu больше, чем при пересечении фольги Cu + Al. Распределения отраженных пучков также зависят от порядка следования слоев. Видно, что эллипсы, описывающие линии уровня, имеют больший эксцентриситет при отражении от Cu + Al, чем при отражении от Al + Cu.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано пространственное распределение релятивистских электронов, рассеянных тонкой фольгой. Измерены распределения как частиц, пересекающих фольгу, так и частиц, отраженных фольгой. Рассмотрено влияние на параметры пучков материала и толщины фольги, угла инъекции, порядка следования слоев в биметаллической фольге.

Измерения показали, что увеличение толщины мишени  $\delta$  приводит к тому, что линии уровня, пред-

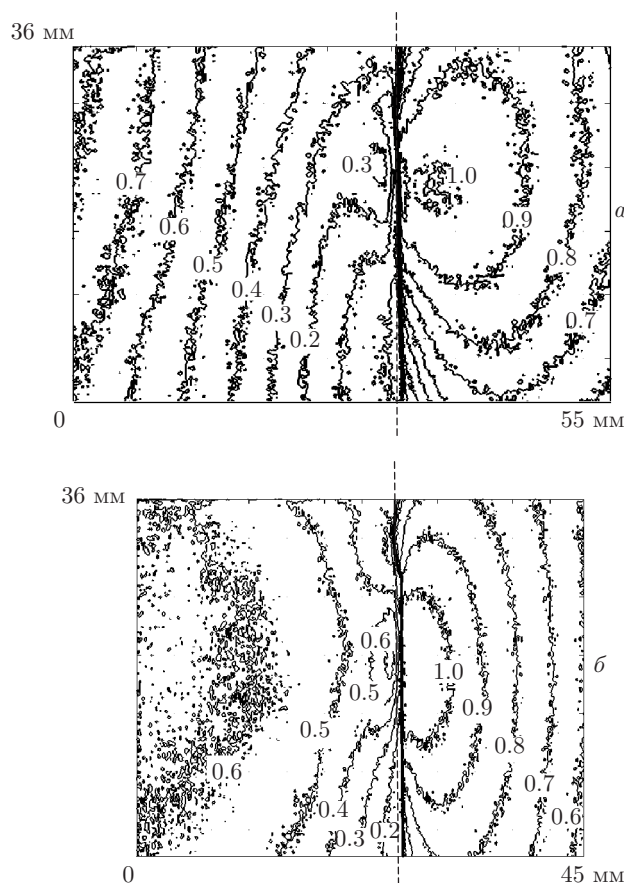


Рис. 6. Распределения плотности электронов, рассеянных биметаллическими фольгами Cu + Al (а) и Al + Cu (б).  $\alpha = 7^\circ$ ,  $L = 100$  мм,  $\delta_{Al} = 200$  мкм,  $\delta_{Cu} = 180$  мкм

ставляющие собой окружности при малой толщине, преобразуются в эллипсы, вытянутые в вертикальном направлении. Увеличение длины пути частицы в материале путем изменения угла инъекции  $\alpha$  приводит к аналогичной зависимости: при уменьшении угла инъекции  $\alpha$  и, следовательно, увеличении пути частицы в фольге эксцентриситет эллипса возрастает.

В случае биметаллической фольги появляется зависимость пространственного распределения преломленных и отраженных частиц от последовательности расположения слоев металла вдоль траектории пучка. Изменяются не только углы преломления  $\theta_d$  и отражения  $\theta_r$ , но и характер распределения.

Авторы благодарны Г. Г. Субботину, С. А. Ралко за помощь при проведении экспериментов и А. Н. Елисееву за создание, наладку и восстановление электроники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Кольцов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **99**, 6 (2014).
2. А. В. Кольцов, И. А. Мамонов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **101**, 486 (2015).
3. А. В. Серов, И. А. Мамонов, А. В. Кольцов, ЖЭТФ **148**, 658 (2015).
4. А. В. Серов, ЖЭТФ **135**, 679 (2009).
5. А. В. Кольцов, А. В. Серов, ЖЭТФ **143**, 844 (2013).
6. С. В. Блажевич, А. В. Носков, ЖЭТФ **145**, 633 (2014).
7. С. В. Блажевич, Р. Л. Загороднюк, А. В. Носков, ЖЭТФ **146**, 730 (2014).
8. О. Б. Фирсов, ЖЭТФ **61**, 1452 (1971).
9. В. С. Ремизович, М. И. Рязанов, И. С. Тилинин, ЖЭТФ **79**, 448 (1980).
10. А. И. Кузовлев, В. С. Ремизович, Письма в ЖТФ **9**(12), 710 (1983).
11. Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, Письма в ЖТФ **17**(20), 6 (1991).
12. Н. Н. Коборов, А. И. Кузовлев, В. А. Курнаев, В. С. Ремизович, ЖТФ **67**(5), 81 (1997).