

УДК 537.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 10 кэВ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2014 г. К. А. Вохмянина<sup>1</sup>, П. Н. Жукова<sup>1</sup>, А. С. Кубанкин<sup>1</sup>, Ле Тхи Хоай<sup>1</sup>, Р. М. Нажмудинов<sup>1</sup>,  
А. А. Плесканев<sup>1</sup>, А. Н. Олейник<sup>1</sup>, Н. Н. Насонов<sup>1</sup>, Г. П. Похил<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория радиационной физики НИУ “БелГУ”, Белгород, Россия

<sup>2</sup>НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 17.07.2013 г.

Экспериментально исследовано взаимодействие скользящего пучка электронов с энергией 10 кэВ с плоской поверхностью оргстекла. Также исследовано прохождение электронов через плоские каналы, образованные такими поверхностями. В результате экспериментов с оргстеклом обнаружен эффект управления движением пучка электронов, как и в случае стеклянной поверхности. Однако в случае оргстекла проявляются особенности — наличие начального угла подъема при отрицательных углах наклона пластины. Образование самосогласованного заряда на поверхности оргстекла, как и его стекание при выключении тока, происходит медленнее, чем на стекле, что свидетельствует о различиях в поверхностной проводимости диэлектриков.

DOI: 10.7868/S0207352814040210

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования эффекта управления движением пучка электронов с помощью диэлектрических каналов начали проводиться сравнительно недавно [1–4]. Было предположено, что часть электронов падающего пучка, проходя через диэлектрический канал, образует на стенках канала самоорганизующуюся систему зарядов, обеспечивающую бесконтактное прохождение через канал остальной части пучка. Причем этот механизм реализуется и при повороте диэлектрического канала относительно оси пучка для электронов с энергией до 1 кэВ.

С целью упрощения анализа данного механизма было проведено исследование взаимодействия электронов со стеклянными поверхностями при скользящих углах падения [5]. Эксперименты со стеклянными пластинами выявили ряд особенностей процесса по сравнению с аналогичными экспериментами с ионными пучками — зависимость характера отражения от длины пластины и наличие ореола следа пучка на экране.

Чтобы выяснить, как материал диэлектрика влияет на характер зарядового распределения и скорость его образования, были продолжены исследования плоских поверхностей, изготовленных из органического стекла (полиметилметакрилата).

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема эксперимента показана на рис. 1. Основные детали установки были изготовлены из немагнитных материалов для исключения воз-

можности влияния внешнего магнитного поля на пучок электронов. Образцы крепили в гониометре, позволяющем наклонять их относительно оси пучка на углы в пределах 10 и смещать в горизонтальной плоскости, давая возможность одновременно работать с несколькими образцами и настраивать прямой пучок. На расстоянии 24.5 или 32 см от оси вращения (в зависимости от постановки эксперимента) располагался стеклянный экран, покрытый сцинтиллятором с разметкой 1.5 × 1.5 см. Движение следа пучка на экране фиксировали с помощью вебкамеры, находящейся вне вакуумной камеры. Образец последовательно поворачивали с помощью гониометра, и для каждого фиксированного угла делали снимок.

**Диэлектрическая поверхность.** Пучок электронов с энергией  $E = 10$  кэВ (ток на маске 100 нА, сечение пучка около 2 мм в диаметре, расходимость  $<0.2^\circ$ ) падал под скользящим углом на плоскую диэлектрическую поверхность, и после взаимодействия с ней электроны формировали на экране след, фиксировавшийся с помощью вебкамеры. На рис. 2 приведена серия фотографий, демонстрирующая смещение следа пучка на экране при наклоне пластины длиной 50 мм, изготовленной из оргстекла, на углы от  $-1^\circ$  до  $2.8^\circ$  относительно оси пучка. Фронтальную часть пластины покрывали заземленной алюминиевой фольгой. Светлая прямая на фотографии показывает уровень следа прямого пучка. Расстояние до экрана составляло 24.5 см.

В целом характер движения пятна на экране подобен движению следа при повороте стеклянной плоской поверхности. Однако образование

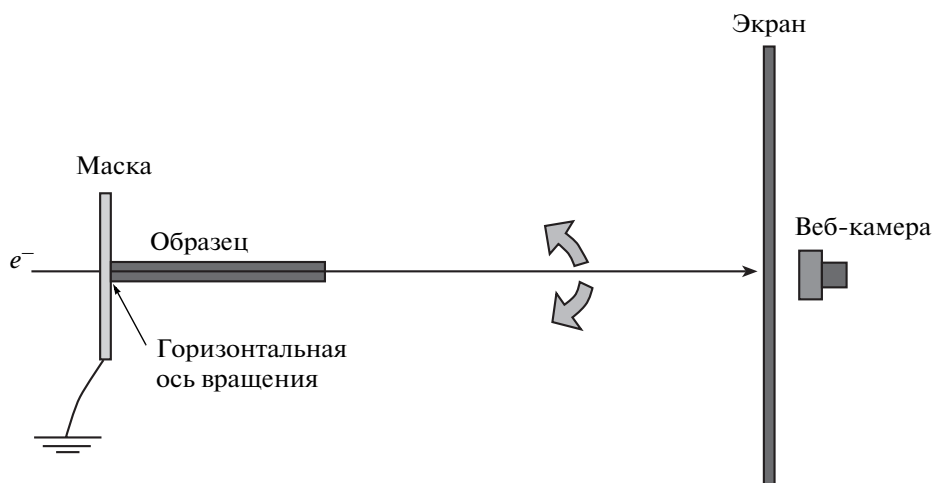


Рис. 1. Общая схема экспериментов.

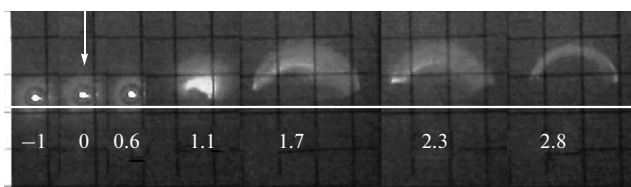
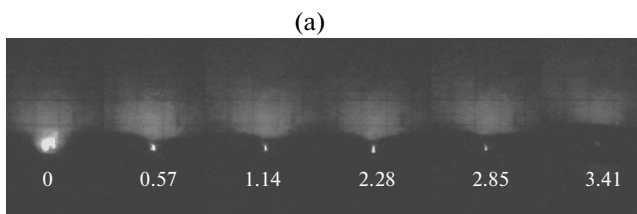


Рис. 2. Смещение следа пучка на экране при наклоне пластины длиной 5 см на углы от  $-1^\circ$  до  $2.8^\circ$  относительно оси пучка.



самосогласованного заряда на поверхности оргстекла (формирование стабильного следа на экране), как и его стекание при выключении тока, происходит медленнее (до 10 мин), чем на стекле, что свидетельствует о различиях в поверхностной проводимости диэлектриков.

Как и в случае стеклянной поверхности, в случае поверхности из оргстекла след от пучка на экране в ряде экспериментов раздваивался (рис. 3а): на часть, совпадающую по положению со следом прямого пучка, и на сильно рассеянное пятно — “облако” (или дугу), которое поднималось в соответствии с поворотом пластины по отношению к оси

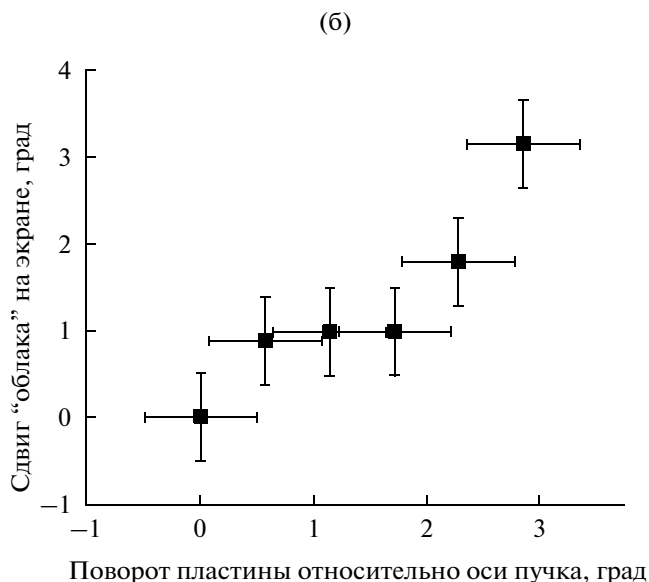
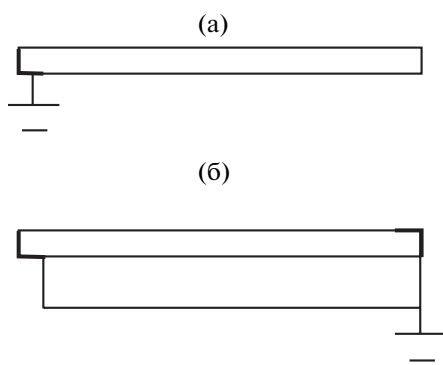


Рис. 3. Разделение следа пучка на экране на две части при наклоне пластины из оргстекла длиной 5 см (а). График зависимости движения «облака» от угла поворота пластины (б).



**Рис. 4.** Схема заземления пластин (вид сбоку): а — заземлен только передний торец; б — заземлены оба торца и часть поверхности на выходе.

пучка (рис. 3б). Поперечный размер падающего пучка около 2 мм, длина исследуемой пластины 50 мм.

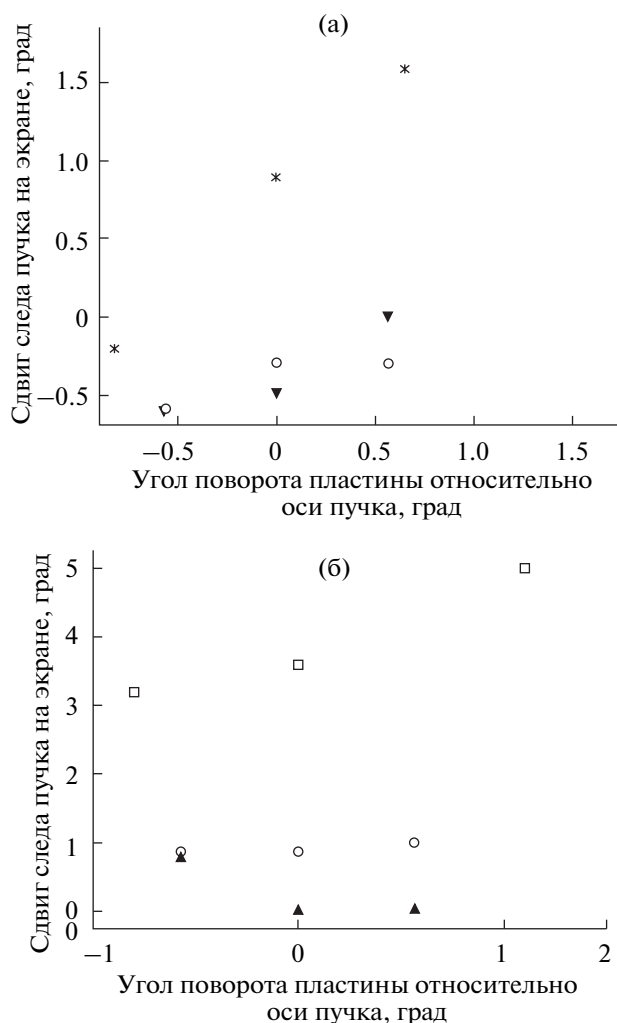
Сдвиг следа от “облака” на экране измеряли по смещению нижней грани “облака” относительно нулевого положения пластины (параллельного пучку). Форма “облака”, предположительно, зависит от качества обработки поверхности и величины тока пучка. На рис. 3а приведена фотография для случая матовой поверхности оргстекла, взаимодействующей с током ~100 нА.

Большая часть экспериментов с диэлектрическими поверхностями показала подъем следа пучка даже при углах наклона пластин, отрицательных по отношению к оси пучка. Для выяснения причины подъема следа пучка выходная часть пластины была заземлена, как показано на рис. 4, заземленная фольга закрывала торец пластины и 1 мм отражающей поверхности. При этом поднятие пучка на экране исчезало или след опускался ниже следа прямого пучка.

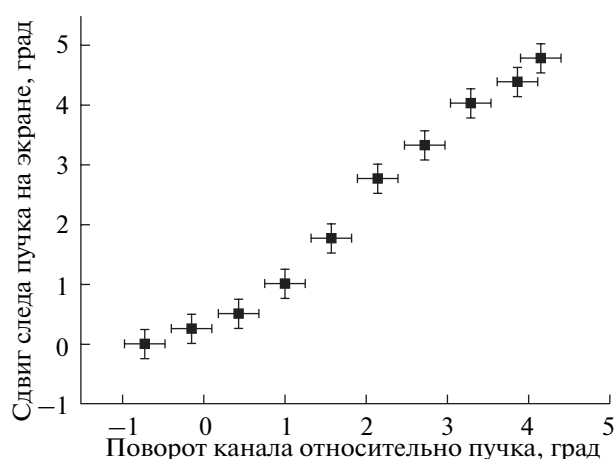
На рис. 5 приведены графики для пластин с заземленной и незаземленной выходными поверхностями соответственно. Длина пластин 35 мм, ток ~40 нА.

Различия в положениях следов для одинаковых пластин можно объяснить несколькими различающимися величинами токов электронов, падающих на поверхность, так как эксперимент ставили таким образом, чтобы пучок частично падал на поверхность под скользящим углом, и, следовательно, часть его уходила на заземленный передний торец.

**Плоский канал из оргстекла.** На рис. 6 представлена зависимость положения следа пучка на экране от угла наклона диэлектрического плоского канала, изготовленного из пластин из оргстекла. Длина канала 35 мм, расстояние между пластинами ~1 мм. Ток на входной части образца составлял 200 нА. Как видно из рисунка, плоский канал эффективно управляет пучком электронов



**Рис. 5.** Движение следа пучка в зависимости от угла наклона пластин в случае заземления: обоих торцов и части отражающей поверхности на выходе (а), только переднего торца (б). Длина пластин 35 мм. В каждой серии приведены кривые, полученные для оргстекла разных марок.



**Рис. 6.** Зависимость положения следа пучка на экране от угла наклона диэлектрического плоского канала длиной 35 мм.

(без заметной потери интенсивности) в пределах  $4^\circ$  подобно цилиндрическим пластиковым каналам [5].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенных экспериментов показали, что как и в случае взаимодействия электронов со стеклянными поверхностями, на поверхности из оргстекла образуется некоторое самосогласованное распределение заряда, позволяющее электронам следовать за пластинами и плоскими каналами при повороте их на небольшие углы относительно оси пучка.

Нетипичная зависимость положения пятна на экране при углах, близких к нулевым относительно оси пучка, может быть объяснена образованием разноименно заряженных структур на поверхности оргстекла за счет большого выхода вторичных электронов при скользящих углах падения. Данный механизм, в отличие от механизма образования заряда-изображения [6], не требует больших токов и, кроме того, может полностью объяснить поведение пучка электронов при отрицательных углах наклона пластин. Эта задача является темой дальнейшего исследования и может быть решена с помощью компьютерного моделирования, в основе которого лежит струйная модель, описанная в [7].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментов на плоской поверхности оргстекла обнаружен эффект управле-

ния движением пучка электронов, как и в случае стеклянной поверхности. Однако в случае оргстекла проявился ряд особенностей – в скорости формирования стабильного зарядового состояния на поверхности диэлектрика и наличии начального угла подъема следа при отрицательных углах наклона пластины. В некоторых случаях при небольших углах наклона пластины относительно оси пучка наблюдалось опускание следа пучка на экране ниже следа прямого пучка.

Также был зафиксирован эффект управления движением пучка электронов для плоских каналов, изготовленных из органического стекла.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Das S., Dassanayake B.S., Winkworth M. et al.* // Phys. Rev. A. 2007. V. 76. P. 042716.
2. *Schiessl K., Lemell C., Tökési K., Burgdörfer J.* // J. Phys. Conf. Ser. 2009. V. 194. Iss. 1. P. 012069.
3. *Петухов В.П.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. № 3. С. 12.
4. *Wang W., Chen J., Yu D.Y., Yang B. et al.* // Phys. Scr. 2011. V. 144. P. 014023.
5. *Вохмянина К.А., Жукова П.Н., Иррибарра Э.Ф. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 3. С. 81.
6. *Вохмянина К.А., Жукова П.Н., Ле Тхи Хоай и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2012. № 3. С. 84.
7. *Похил Г.П., Чердынцев В.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 4. С. 1.

## Investigation of 10 keV Electron Interaction with Insulating Surface

**K. A. Vokhmyanina, P. N. Zhukova, A. S. Kubankin, Le Thu Hoai, R. M. Nazhmudinov,  
A. A. Pleskanov, A. N. Oleinik, N. N. Nasonov, G. P. Pokhil**

The interaction between grazing 10 keV electron beam and flat surface of plexiglass was studied experimentally. In addition, the transition of the electrons through the flat channels formed by such surfaces was investigated. The experiments revealed the guiding effect as in the case of the glass surface. However, some features emerged, such as the existence of the initial lifting angle at the negative inclinations of the plate. The self-consistent charge was formed on the surface of the plexiglass and drained after turning off the current slower than on the glass surface. This fact can indicate the differences in the surface conductivity of insulators.