

УДК 537.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 10 кэВ С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2015 г. К. А. Вохмянина^{1,*}, П. Н. Жукова¹, А. С. Кубанкин¹, И. А. Кишин¹, А. С. Клюев¹,
Р. М. Нажмудинов¹, А. Н. Олейник¹, Г. П. Похил²

¹Белгородский государственный национальный университет, Лаборатория радиационной физики,
308015 Белгород, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
119991 Москва, Россия

*E-mail: vokhmyanina@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 10.07.2014 г.

В работе исследуется эффект управления пучком электронов с энергией 10 кэВ с помощью диэлектрических пластин. Показано, что для разных схем заземления входного и выходного торцов пластин, изготовленных из оргстекла и оксида алюминия, пучок электронов после взаимодействия с диэлектрической поверхностью отклоняется от этой поверхности по-разному. Исследовалась зависимость отклонения пучка от поверхности пластин из оргстекла при разных углах наклона этих пластин с изменением величины тока падающего пучка электронов.

Ключевые слова: диэлектрическая поверхность, эффект управления, эмиссия вторичных электронов, скользящее падение.

DOI: 10.7868/S0207352815030191

ВВЕДЕНИЕ

Эффект бесконтактного прохождения электронов через диэлектрические каналы представляет большой интерес в связи с перспективой создания систем формирования электронных пучков, не требующих дополнительных сложных устройств и источников энергии. Поэтому в настоящее время уделяется пристальное внимание детальному изучению явлений, связанных с взаимодействием пучков электронов различной энергии и интенсивности с диэлектрическими поверхностями [1–6].

В работах [7, 8] было показано, что в большинстве экспериментов с пластинами из оргстекла наблюдалось значительное отклонение следа пучка на экране при небольших отрицательных углах наклона пластин по отношению к оси пучка при заземлении входного торца пластин. Причем на указанный эффект оказывает влияние как выходной торец пластины, так и основная поверхность оргстекла.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований скользящего взаимодействия пучков электронов низкой интенсивности с энергией 10 кэВ с диэлектрическими поверхностями пластин, изготовленных из оргстекла и оксида алюминия, при разных схемах заземления входного и выходного торцов. Общая

схема проводимых экспериментов показана на рис. 1.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Оргстекло. Эксперименты выполнялись на пластинах длиной 26 мм, шириной 20 мм и толщиной 9 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon \approx 4.4$. Кроме исследования гайдинг-эффекта были проведены эксперименты по определению зависимости угла отклонения пучка от поверхности пластины от величины тока. Эксперименты выполнялись для разных схем заземления пластин: 1) торцы не заземлялись; 2) заземлялся только входной торец; 3) заземлялся только выходной торец; 4) заземлялись оба торца. Необходимо указать, что заземление торцов осуществлялось с частичным покрытием рабочей поверхности пластин (обычно не более 1 мм) с помощью алюминиевой фольги толщиной 50 мкм. Использовался пучок электронов со следующими параметрами: энергия 10 кэВ с разбросом не более 0.1%, расходимость пучка менее 0.25° , диаметр пучка около 3 мм. Ток изменялся в пределах от 40 до 350 нА.

На рис. 2 приведен график зависимости отклонения следа пучка на экране от величины тока источника при разных углах падения электронов на поверхность (торцы не заземлены). Из графика видно, что при отсутствии заземления входного и

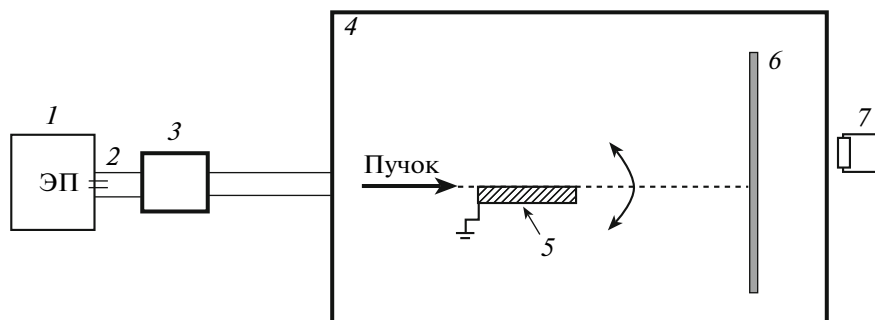


Рис. 1. Общая схема эксперимента: 1 – электронная пушка, 2 – коллиматор, 3 – система электромагнитных линз, 4 – вакуумная камера мишеней, 5 – образец (в данном случае заземлен входной торец), 6 – экран со сцинтиллирующим покрытием, 7 – видеокамера.

выходного торцов массивной диэлектрической пластины положение следа пучка после взаимодействия электронов с поверхностью отклоняется на значительный угол, который практически не зависит от угла падения электронов на поверхность. Кроме того, отклонение, увеличиваясь с увеличением тока пучка, выходит на предельный угол, определяемый свойствами диэлектрика и схемой заземления пластины.

Характер поведения следа пучка на экране был исследован для пучка, проходящего параллельно поверхности пластины (рис. 3). Использование различных схем заземления продемонстрировало следующие закономерности: предельный угол незначительно уменьшается при заземлении только выходного торца и уменьшается более чем в два раза при заземлении только входного торца пластины. При заземлении обоих торцов отклонение вообще не наблюдается.

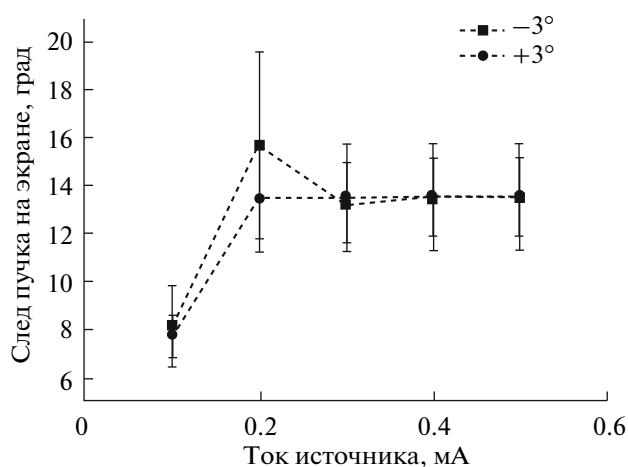


Рис. 2. Зависимость отклонения следа пучка на экране от величины тока источника при разных углах падения электронов на поверхность (торцы не заземлены).

Эффект управления электронами с помощью пластины из оргстекла наиболее явно проявляется в случае, когда заземлен только входной торец. На рис. 4 приведен график, иллюстрирующий эффект “управления” электронами исследуемым образцом. Ток пучка 350 нА. При повороте пластины на один градус след пучка на экране также смещается примерно на один градус, но в целом все точки на графике сдвинуты вверх на угол, находящийся в пределах начального угла отклонения следа при данной схеме заземления (рис. 3).

Оксид алюминия. Были проведены эксперименты по исследованию эффекта “управления” для пластины Al_2O_3 длиной 40 мм, шириной 20 мм и толщиной 480 мкм. Диэлектрическая проницаемость образца в поперечном направлении $\epsilon \approx 11$. Образец крепился на массивную подложку из

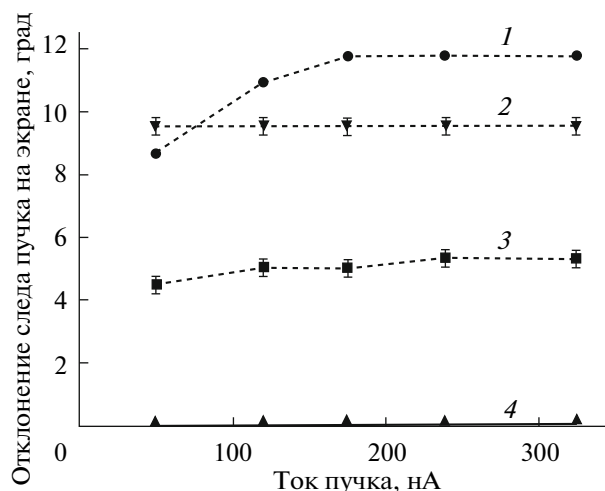


Рис. 3. Зависимость угла отклонения пучка от поверхности пластины при увеличении тока падающего пучка при разных схемах заземления пластины. Поверхность пластины параллельна оси исходного пучка: 1 – оба торца не заземлены, 2 – заземлен выходной торец, 3 – заземлен входной торец, 4 – оба торца заземлены.

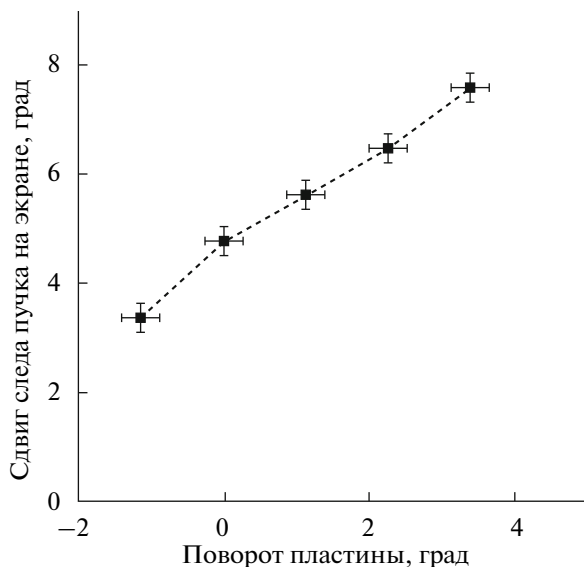


Рис. 4. Эффект управления электронами с помощью диэлектрической поверхности (входной торец заземлен алюминиевой фольгой, ток пучка 350 нА).

оргстекла. На рис. 5 приведены снимки смещения следа пучка на экране и соответствующий график зависимости смещения нижней грани следа пучка на экране (рис. 6) после взаимодействия электронов с поверхностью при отсутствии заземления обоих торцов пластины. При любой иной схеме заземления торцов след не менял положения вплоть до геометрического перекрытия пучка пластиной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные эксперименты указывают на существенное различие в результатах по управлению электронами с помощью пластин, изготовленных из различных материалов, при различных условиях заземления входных и выходных торцов мишеней. Для пластин из силикатного стекла длиной 76 и 35 мм и толщиной 2 мм с заземленным входным торцом происходит небольшое

смещение вверх части пучка при нулевом угле падения электронов на поверхность стекла [6].

Угол отклонения пучка от поверхности пластины из оргстекла зависит, прежде всего, от схемы заземления торцов диэлектрика. Наблюдается также слабая зависимость от начального угла падения электронов на поверхность. Разделения на две части пучка в указанных экспериментах не происходит, в отличие от экспериментов со стеклянными пластинами. При увеличении тока пучка, независимо от условий эксперимента, угол отклонения растет до некоторого предела и при дальнейшем увеличении падающего тока не изменяется. Таким образом, можно заключить, что образованное на поверхности (и торце) оргстекла зарядовое распределение, отклоняющее пучок, достигает некоторой предельной величины и далее не изменяется, находясь в динамическом равновесии с падающим пучком, зависящем только от свойств диэлектрика и схемы заземления обрзаца.

Эффект гайдинга наблюдался для оксида алюминия при отсутствии заземления на каком-либо из торцов, тогда как для массивного образца оргстекла этот эффект наблюдался при заземлении входного торца пластины. Однако при заземлении любого из торцов оксида алюминия гайдинг не наблюдается.

Наличие начального угла смещения пучка при отрицательных углах наклона пластины Al_2O_3 можно объяснить зарядкой входного торца при нормальном падении на него электронов. При дальнейшем повороте пластины из оксида алюминия начинает работать основная часть поверхности пластины, причем с увеличением угла поворота пластины вплоть до 5° пучок достаточно сильно рассеивается, поднимаясь также на несколько градусов, однако нижняя грань следа пучка на экране сдвигается лишь на 3° по отношению к уровню прямого пучка. Заряд на поверхности диэлектрика организуется таким образом, что притягивает часть пучка электронов, отклоняя его ниже уровня поверхности пластины на 2° . Подобный процесс

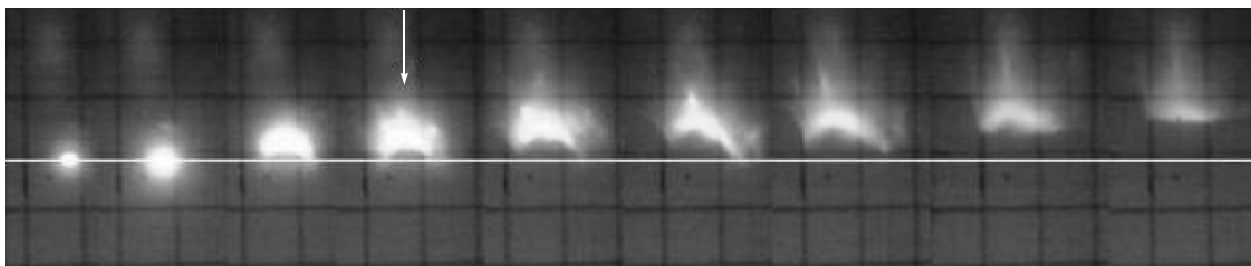


Рис. 5. Фотографии движения нижней грани следа пучка при отклонении пластины. Вертикальной стрелкой указано положение, при котором поверхность пластины параллельна оси пучка.

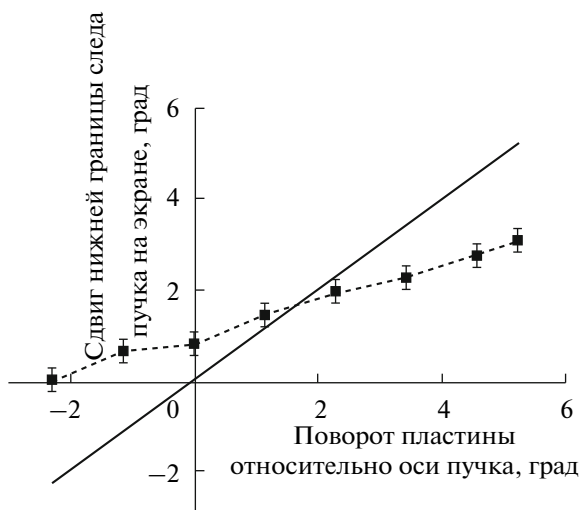


Рис. 6. Зависимость сдвига нижней грани следа пучка электронов на экране от угла поворота пластины, изготовленной из оксида алюминия ($\epsilon \approx 11$), заземление входного и выходного торцов отсутствует.

наблюдается для пластин из оргстекла в случае заземления выходного торца [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе показано, что для разных схем заземления входного и выходного торцов пластин, изготовленных из оргстекла или оксида алюминия, пучок электронов в результате взаимодействия с диэлектрической поверхностью отклоняется от этой поверхности по-разному. Угол отклонения пучка от пластины из оргстекла при увеличении тока достигает некоторой максимальной величины и далее не меняется.

Сложная зависимость смещения следа пучка на экране после взаимодействия электронов с поверхностью пластин, изготовленных из оргстекла, силикатного стекла или оксида алюминия, может быть объяснена исходя из того, что электроны, попадая на поверхность диэлектриков, могут образовывать отрицательно заряженные области, а при некоторых условиях вызывают эмиссию вторичных электронов с образованием положительно заряженных областей. Для объяснения полученных результатов необходимо построение численной модели, позволяющей определять параметры, отвечающие за зарядовое распределение на поверхности диэлектрика, обеспечивающее описанное в экспериментах поведение пучка.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектной части Государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 3.2009.2014/К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agafonov A., Bogachenkov V., Krastelev E.* // Proc. 15th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. 2004. С. 143.
2. *Das S., Dassanayake B.S., Winkworth M. et al.* // Phys. Rev. A. 2007. V. 76. P. 042716.
3. *Schiessl K., Lemell C., Tökési K., Burgdörfer J.* // J. Phys. Conf. Ser. 2009. V. 194. Iss. 1. 012069.
4. *Петухов В.П.* // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2010. № 3. С. 12.
5. *Wang W., Chen J., Yu D.Y., Yang B. et al.* // Physica Scripta. 2011. V. 144. 014023.
6. *Вохмянина К.А., Жукова П.Н., Иррибарра Э.Ф. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2013. № 3. С. 81.
7. *Вохмянина К.А., Жукова П.Н., Кубанкин А.С. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2014. № 4. С. 56.
8. *Vokhmyanina K.A., Zhukova P.N., Kubankin A.S. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 517. 012044.

Investigation of Guiding Effect of 10 keV Electrons by Planar Dielectric Surfaces

**K. A. Vokhmyanina, P. N. Zhukova, A. S. Kubankin, I. A. Kishchin, A. S. Klyuev,
R. M. Nazhmudinov, A. N. Oleinik, G. P. Pokhil**

The guiding of 10 keV electron beam using dielectric plates has been studied. It is shown that electron beam is deflected by the surface in different ways in dependence on various grounding scheme of the front and back sides of plexiglass and aluminum oxide plates. It is also shown that the deflection ability of the plates at different angle positions depends on the incident beam current value.