

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБЪЯСНЕНИЮ МЕХАНИЗМА САМОИЗОЛЯЦИИ ПУЧКОВ ПРОТОНОВ, СКОЛЬЗЯЩИХ ВДОЛЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Л.А. Жилияков, В.С. Куликаускас

НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ.

Характер взаимодействия пучков ускоренных заряженных частиц с твердой диэлектрической поверхностью определяется параметрами этого взаимодействия. При скользющем взаимодействии, когда угол падения пучка не превышает 50 мрад, отмечен ряд интересных особенностей. В первую очередь – это самоорганизующаяся электризация поверхности, обеспечивающая изоляцию пучков от стенки и транспортировку их на значительные расстояния [1-3]. При использовании конических диэлектрических каналов за счет указанного эффекта самоизоляции пучков на выходе из канала удалось получить пучки с концентрацией частиц на 4 порядка превышающей концентрацию в исходном пучке [4].

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Рассмотрим скользящее взаимодействие пучка ускоренных заряженных частиц с поверхностью равномерно заряженной бесконечной диэлектрической пластины. Равномерно заряженная поверхность означает, что точечные заряды на ней находятся на равных расстояниях друг от друга в равновесных положениях. В данной работе рассмотрено расположение зарядов на поверхности в виде плоской гексагональной решетки (двумерный кулоновский кристалл), т.к. из всех плоских решеток Браве потенциальная энергия кулоновского взаимодействия частиц в такой решетке наименьшая.

В работе [5] показано, что потенциал градиентных сил достигает величины, достаточной для изоляции пучка, когда направление распространения пучка составляет некоторый малый угол α с кристаллографическим направлением [2,1] данного кулоновского кристалла. Рассмотрим движение заряженной частицы в поле плоского кулоновского кристалла. Начальное направление движения частицы параллельно поверхности и составляет малый угол α с кристаллографическим направлением [2,1] (рис.1). Частица прижимается к поверхности внешним электрическим полем, силовые линии которого нормальны к поверхности. Цепочки точечных зарядов (линии АВ и CD) формируют потенциальную яму, дно которой проходит посередине между ними (линия EG).

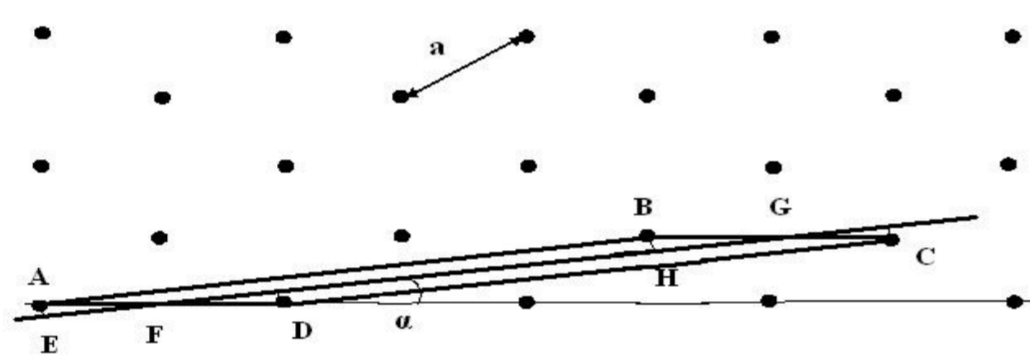


Рис. 1. Модель взаимодействия.

Исходя из результатов компьютерного моделирования траекторию движения частицы по дну потенциальной ямы (рис.2) можно представить как цепь параболических участков. В [6] показано, что электрическое поле кулоновского кристалла экспоненциально спадает при увеличении расстояния от поверхности. В рамках предлагаемой модели параболическая траектория движения частицы формируется из-за того, что импульс, отталкивающий частицу от поверхности, она получает только в нижних точках траектории, а все остальное время движется только во внешнем поле, прижимающем ее к поверхности.

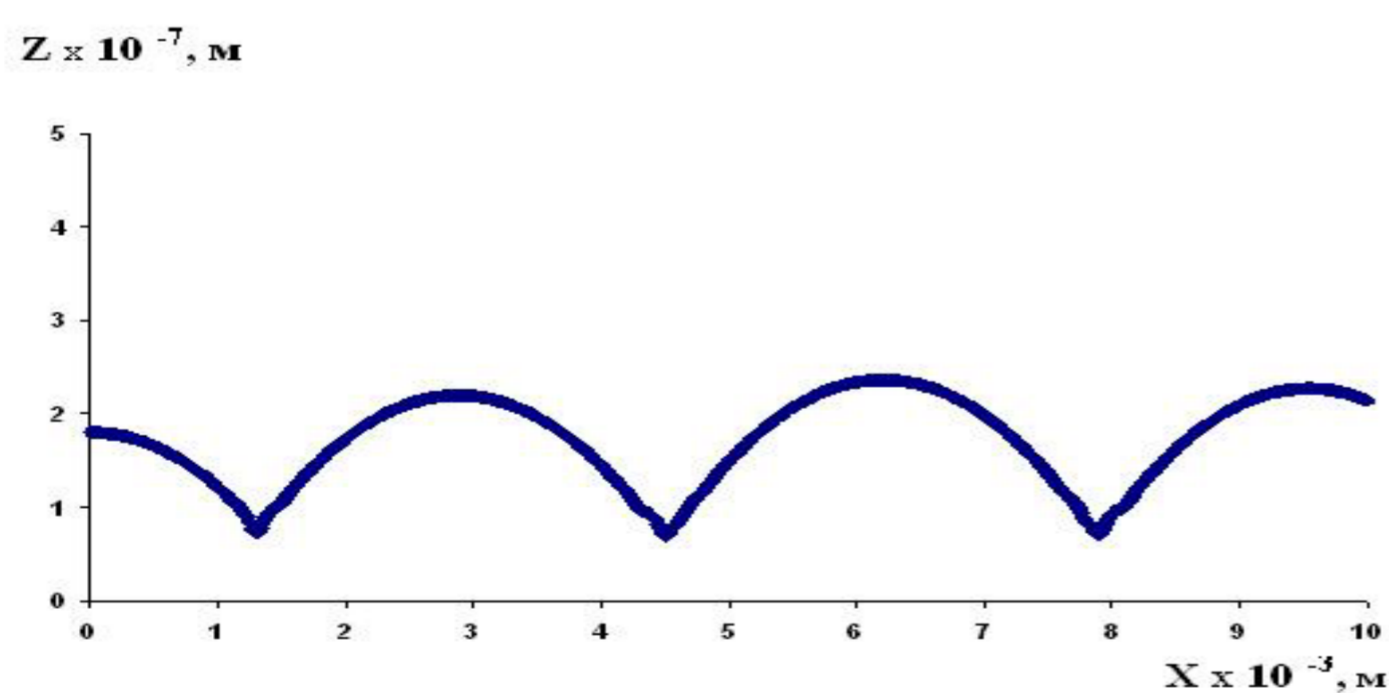


Рис. 2. Траектория частицы.

Для оценки величины отталкивающего импульса применим подход, использованный в [7] для расчета кулоновского рассеяния заряженных частиц. Отталкивающий импульс P_1 частица получает при взаимодействии с зарядами, находящимися в точках А и D. Его величина может быть оценена как:

$$P_1 = \frac{2K_1 q^2 z \Delta t_1}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

где q – заряд частицы, $r = \sqrt{z^2 + y^2}$ – минимальное расстояние между движущейся частицей и отталкивающим зарядом (прицельный параметр), z – минимальное расстояние между частицей и поверхностью, $z/r = \sin \beta$, β – угол между радиусом – вектором частицы и поверхностью,

$y = AE = \sqrt{3}/2 a \sin \alpha$, $\Delta t_1 = r/v$ – время взаимодействия, v – скорость частицы, 2 – коэффициент, учитывающий взаимодействие с зарядами А и D, K_1 – коэффициент, учитывающий слабые взаимодействия со всеми остальными зарядами, образующими кристаллическую решетку.

Прижимающий импульс P_2 , получаемый частицей на участке EH, равен:

$$P_2 = K_2 Eq \Delta t_2$$

где E – напряженность прижимающего поля, K_2 – коэффициент, учитывающий ослабление прижимающего поля за счет поля, создаваемого зарядами на поверхности, $\Delta t_2 = l/v$ – время пролета между точками E и H, $l = a/(2 \sin \alpha)$.

Условие изоляции частицы от поверхности: $P_1 = P_2$, или после преобразований:

$$\frac{Ea}{\sin \alpha} = \frac{Kz}{z^2 + \frac{3}{4}a^2 \sin^2 \alpha}$$

где $K = K_1 q/K_2 \pi \epsilon_0$. Это уравнение имеет единственное решение, при котором период решетки a максимален (и, соответственно, поверхностная плотность заряда минимальна):

$$a_{\max} = \sqrt{\frac{K}{E\sqrt{3}}}$$

Из полученного решения следует, что связь между поверхностной плотностью заряда на заряженной поверхности σ и напряженностью прижимающего поля E может быть представлена как:

$$\sigma = \frac{2q}{a^2 \sqrt{3}} = E \frac{2q}{K} = K_0 E$$

Значение коэффициента K_0 несложно получить из эксперимента, что также дает возможность определить значение a и в конечном итоге оценить концентрацию частиц в скользящем пучке.

ЭКСПЕРИМЕНТ.

Схема рабочего участка экспериментальной установки представлена на рис.3.

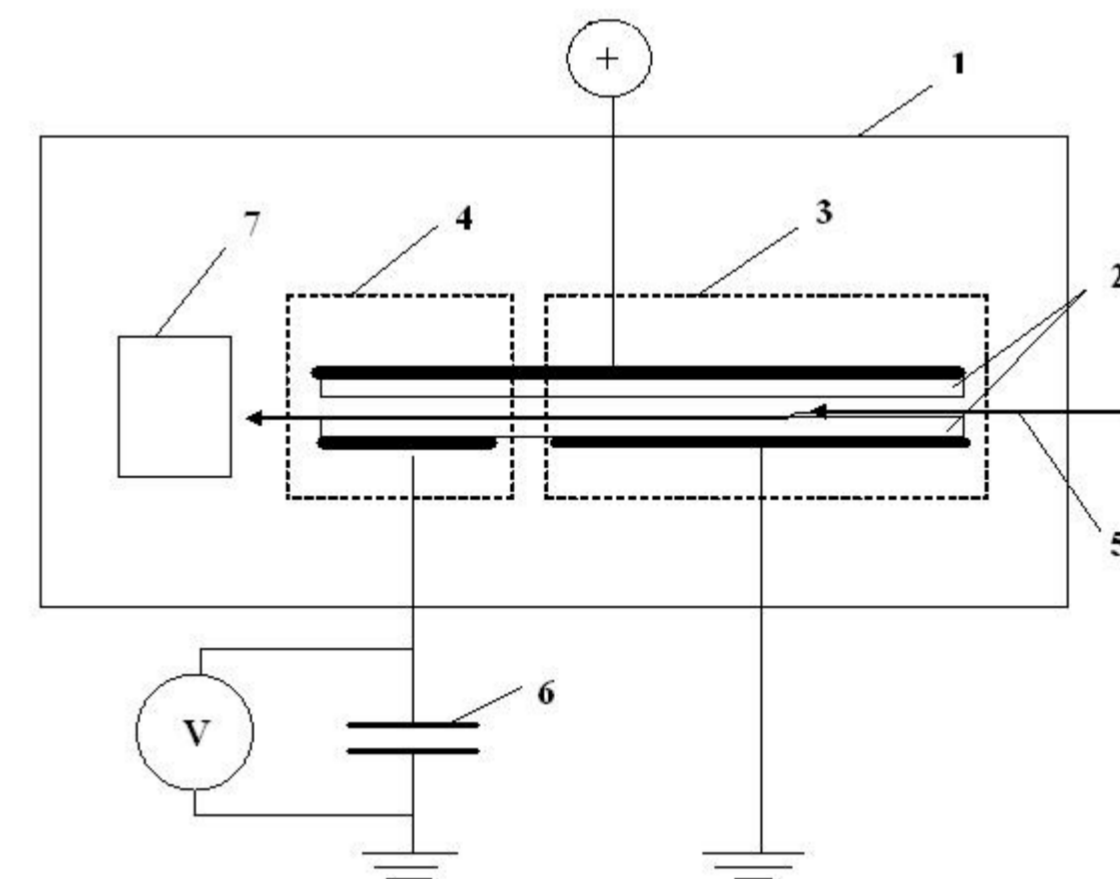


Рис.3. Схема эксперимента: 1 – вакуумная камера; 2 – стеклянные пластины; 3 – отклоняющий конденсатор; 4 – измерительный участок; 5 – пучок протонов; 6 – тестовый конденсатор; 7 – цилиндр Фарадея.

Пучок протонов направлялся в промежуток между пластинами. На верхнюю пластину конденсатора подавалось напряжение, в результате чего пучок протонов прижимался к поверхности нижней пластины. На выходе из конденсатора на нижней пластине выделялся изолированный от остальной части конденсатора измерительный участок. Металлический электрод, расположенный под стеклянной пластиной на этом участке, последовательно соединялся с конденсатором с известной емкостью – тестовым конденсатором. Измеряя напряжение на тестовом конденсаторе, можно определить величину электрического заряда (и, соответственно, поверхностную плотность заряда) на измерительном участке. Источник пучков протонов – каскадный генератор КГ-500. Измерения проводились при энергиях протонов 100, 200 и 300 кэВ.

Зависимость поверхностной плотности заряда от напряженности отклоняющего поля представлена на рис.4.

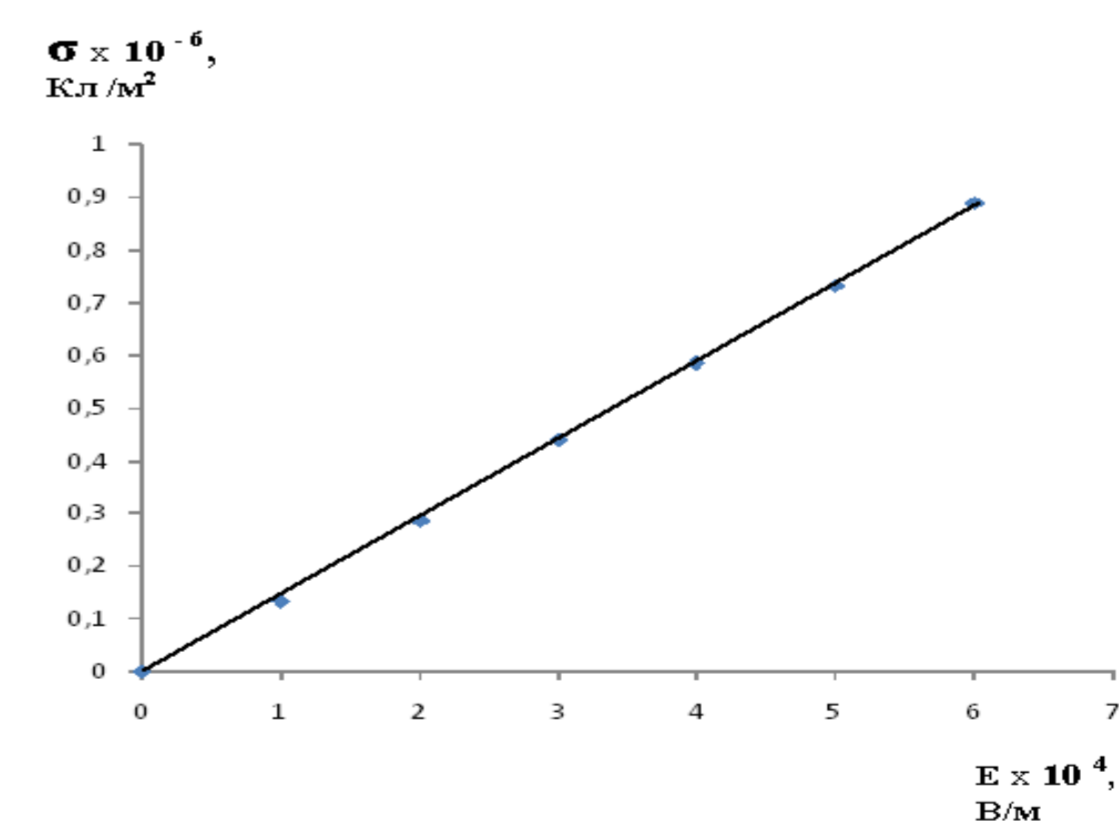


Рис. 4. Зависимость поверхностной плотности заряда от напряженности отклоняющего поля.

По результатам проведенных экспериментов:

- В пределах погрешности измерений величина заряда, образовавшегося на диэлектрической пластине на измерительном участке, не зависит от энергии пучка;
- В исследованном диапазоне параметров величина поверхностной плотности заряда линейно зависит от напряженности поля, прижимающего протоны к поверхности. Значение $K_0 = 1,49 \cdot 10^{-11}$ Кл/В м.
- В проведенных экспериментах величина тока пучка составляла 0,1 – 1 мкА, напряженность прижимающего поля – до $6 \cdot 10^4$ В/м, ширина пучка – 4 мм. По этим данным величина концентрации протонов, полученная в скользящем пучке при самоорганизующейся электродинамической изоляции, составляет $10^{13} - 10^{14}$ м⁻³. Эта величина близка к пределу по объемному заряду, достигнутому в настоящее время в пучках ускоренных заряженных частиц при магнитном удержании [8].

ЛИТЕРАТУРА.

- Stolterfoht N., Bremer J.H., Hoffmann V. et al. // Phys.Rev.Lett. 2002.V.88. P.133201.
- Stolterfoht N., Hoffmann V., Hellhammer R. et al. // NIM. 2003. В 203.P.246.
- Жилияков Л.А., Костановский А.В., Иферов Г.А. и др. // Поверхность.2002.№ 11. С.65.
- Nebiki T., Yamamoto T., Narusava T. et al. // J.Vac. Sci. Technol. 2003.A21(5). P.1671.
- Вохмянина К.А., Жилияков Л.А., Петухов В.П. и др. // Известия РАН. Сер. физическая. 2006. Т.70. № 6. С.828.
- Жилияков Л.А., Вохмянина К.А., Костановский А.В. и др. // Физика экстремальных состояний вещества-2006 /Под ред. Фортова В.Е. и др. Черногловка: ИПХФ РАН, 2006. С.200.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
- Будкер Г.И. Собрание трудов. М.: Наука, 1982.