УДК 539.9

С. К. КОДАНОВА, А. И. КЕНЖЕБЕКОВА

(НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан)

РАСЧЕТ ДРЕЙФА ЭЛЕКТРОНОВ В ПЕРЕМЕННОМ НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДОВ В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ

Аннотация. Возможность получения новых методов формирования сверхточных изображений в цифровой печати и копировальных машинах является важным новым направлением в использовании свойств барьерного разряда. В настоящей работе рассмотрен дрейф электронов в переменном неоднородном электрическом поле для различных систем электродов в барьерном разряде, рассчитанных методом Монте Карло. Представлены распределения скорости дрейфа электронов внутри разрядного промежутка для случаев плоской, цилиндрической и сферической симметрии при одном и том же приложенном напряжении и длине газового промежутка.

Ключевые слова: барьерный разряд, электрическое поле, распределение скорости дрейфа.

Тірек сөздер: барьер разряды, электр өрісі, дрейф жылдамдығының таралуы.

Электрический пробой газового промежутка между диэлектриком и металлом используется во многих современных приборах и технологиях. Это плазменно-стимулированные процессы травления и осаждения, включая технологии получения тонких пленок, упрочнения поверхностей, обработка материалов – легирование и полировка. Многие элементы барьерного разряда используются в медицине, источниках ионов, технологиях обеззараживания.

Плазма барьерного разряда обладает такими характерными особенностями, как пространственная неоднородность, сильная неравновесность плазмы и т.д. Движение электронов моделируем методом Монте Карло с учетом столкновений электронов с атомами газа в переменном сильно неоднородном электрическом поле. В методах, основанных на моделях сплошной среды, возникает необходимость дробления шагов по времени для точного решения моментов времени, в которых протекает большой ток. Кроме того, необходимо использовать мелкие шаги по пространственным координатам в области большого объемного заряда вблизи поверхности диэлектрика. Все это делает более привлекательным метод частиц и Монте Карло для моделирования барьерного разряда.

Одним из факторов, приводящим к сильной неоднородности является геометрический фактор. Поэтому рассмотрим три различных случая:

1) Плоский случай, когда разряд горит между двумя плоскими пластинами, одна из которых покрыта диэлектриком, а расстояние между которыми значительно меньше их размера;

2) Случай цилиндрической симметрии, когда разряд горит между цилиндрическим катодом (проволочкой) и внешним электродом – анодом;

3) Случай сферической симметрии, когда в качестве катода выступает покрытая диэлектриком сфера.

Были определены граничные условия для электростатического потенциала. В плазме барьерного разряда, как и в любом другом, выполняется условие квазинейтральности и электрическое поле формируется из условия поддержания плазмы существующими токами. В условиях барьерного разряда, при очень большой нестационарности можно пренебречь влиянием объемного заряда.

Из теоремы Остроградского-Гаусса следует, в трех случаях для напряженности электрического поля E(r) получаем

$$E(r) = E_0[a/(r+a)]^s \ , \tag{1}$$

где s = 0, 1, 2 для плоского, цилиндрического и сферических электродов. Здесь r отсчитывается от границы диэлектрика толщины (радиуса) *a*. Естественно, что в плоском случае поле не зависит от толщины диэлектрика. Напряженность поля на поверхности диэлектрика E_0 определяется разностью потенциалов U, длиной разрядного промежутка L и толщиной диэлектрика по следующим формулам:

$$E_0 = U/L, \quad s = 0 \tag{2}$$

$$E_0 = (U/a)\ln(1 + L/a), \quad s = 1 \tag{3}$$

$$E_0 = (U/a)(1 + a/L), \quad s = 2 \tag{4}$$

Как следует из этих формул, поле на поверхности неплоского диэлектрика определяется в основном только напряжением и радиусом кривизны, а длина разрядного промежутка участвует в виде малой поправки.

Граничные условия для электронов выберем следующие:

1) На катоде: электрон, пересекающий катод, упруго отражается с той же энергией;

2) На аноде: электрон, пересекающий анод, вбрасывается из катода с энергией, равной температуре атомов (катода);

3) При акте ионизации электроном атома внутри разрядного промежутка второй электрон выбирается из ближайшего к катоду и перемещается в точку ионизации, при этом его энергия полагается равной энергии выбитого при акте ионизации электрона.

Такой алгоритм позволяет рассчитать и проанализировать основные характеристики барьерного разряда в момент времени, когда перенос можно полагать квазистационарным, падение потенциала равно заданному.

Процедура Монте Карло для розыгрыша столкновений описана в работе С. А. Майорова*. На рисунке 1 представлено распределение скорости дрейфа электронов внутри разрядного промежутка для случаев плоской, цилиндрической и сферической симметрии при одном и том же приложенном напряжении 100 В и длине промежутка 1 см.

* Майоров С.А. Физика плазмы, 2007, **33**, №7, 637.

Для демонстрации основных особенностей барьерного разряда и алгоритма расчета переноса электронов в разрядном промежутке рассмотрим промежуток толщиной 1 см 0<r<L, заполненный аргоном при давлении 40 Па (10^{17} атомов в см$^{-3}$), с падением напряжения на газовом промежутке 100 В и толщиной диэлектрика 1 мм.

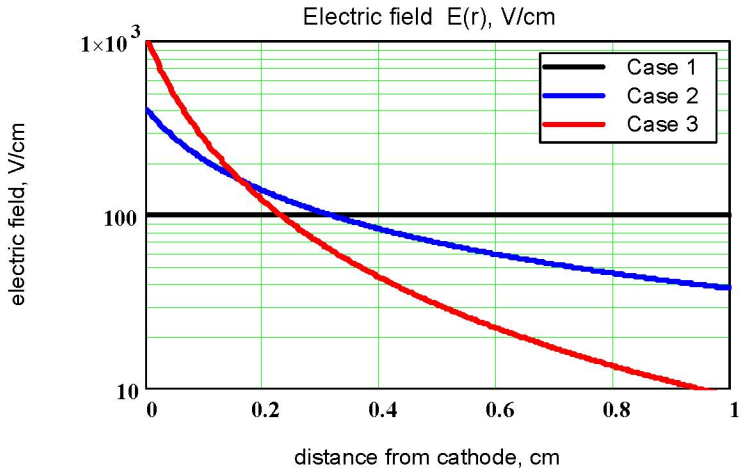

Рисунок 1 – Распределение напряженности электрического поля внутри разрядного промежутка для случаев плоской, цилиндрической и сферической симметрии при одном и том же приложенном напряжении 100 В и длине промежутка 1 см

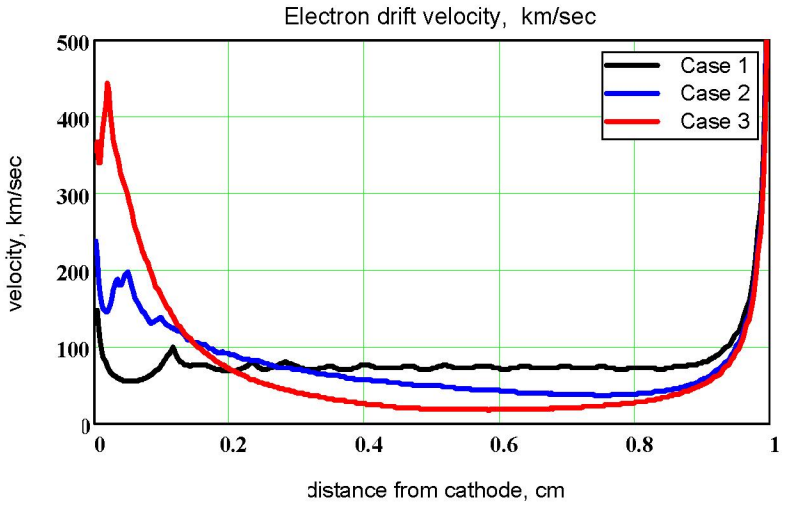

Рисунок 2 – Распределение скорости дрейфа электронов внутри разрядного промежутка для случаев плоской, цилиндрической и сферической симметрии

Представленные результаты расчетов барьерного разряда для случаев плоской, цилиндрической и сферической симметрии при одном и том же приложенном напряжении и длине промежутка дают общее представление о влиянии формы электродов на характеристики разряда. Анализ этих результатов позволит сформулировать рекомендации по выбору параметров разряда и геометрических характеристик электродов. Для этой цели может понадобиться проведение массовых расчетов для изучения влияния на исследуемые характеристики входных параметров системы – состава и давления газа, геометрических размеров, а также временных характеристик прикладываемого напряжения.

Резюме

С. К. Қоданова, А. И. Кенжебекова

БАРЬЕРЛІК РАЗРЯДТА ӘРТҮРЛІ ЭЛЕКТРОДТАР ЖҮЙЕСІ ҮШІН АЙНЫМАЛЫ БІРТЕКТІ ЕМЕС ЭЛЕКТР ӨРІСІНДЕ ЭЛЕКТРОНДАР ДРЕЙФІН ЕСЕПТЕУ

Цифрлық баспа және көшірме аппараттарында анық кескіндерді алудың жаңа тәсілдерін алу мүмкіндіктері барьерлік разряд қасиеттерін қолдануда маңызды жаңа бағыт болып табылады. Бұл жұмыста Монте Карло тәсілімен есептелген Барьерлік разрядта әр түрлі электродтар жүйесі үшін айнымалы біртекті емес электр өрісінде электрондар дрейфін есептеу қарастырылған. Белгілі кернеудегі және белгілі газдық кеңістік үшін жазық, цилиндрлік және сфералық симметрия жағдайларында разрядтық кеңістіктегі электрондардың дрейфтік жылдамдығының таралуы берілген.

Тірек сөздер: барьер разряды, электр өрісі, дрейф жылдамдығының таралуы.

Summary

S. K. Kodanova, A. I. Kenzhebekova

CALCULATION OF THE ELECTRON DRIFT IN AN ALTERNATING NON-UNIFORM ELECTRIC FIELD FOR DIFFERENT ELECTRODE SYSTEMS IN A BARRIER DISCHARGE

Possibility of obtaining new methods of generating excess accurate images in digital printing and copying machines is an important new trend in the use of the properties of the barrier discharge . In this paper the drift of electrons in an alternating non-uniform electric field for different electrode systems in barrier discharge calculated by the Monte Carlo are considered. The distribution of the electron drift velocity in the discharge gap of cases for planar, cylindrical, and spherical symmetry at the same applied voltage and the length of the gas gap are presented.