

Электрический пробой

Выполнили: Дугаева Светлана (НФИбд-01-18), Ли Тимофей (НФИбд-01-18), Васильева Юлия (НФИбд-03-18), Кученов Ирзилей (НФИбд-03-18), Соколова Анастасия (НФИбд-03-18), Назарьева Алена (НФИбд-03-18)

задание: графически изобразить модель НПВ

//

Человек познакомился с искровым разрядом задолго до того, как приступил к научному познанию мира. Феерическое и грозное явление природы — молния (картинка 1) с точки зрения физики являет собой пример грандиозного искрового разряда в атмосфере. С развитием электроэнергетики искровой разряд пришел в технику, принес с собой массу проблем. В частности, оказалось, что искровые разряды могут возникать между различными частями электрооборудования (картинка 2, 3), находящегося под электрическим напряжением, между проводами высоковольтных линий электропередачи и землей, вызывая короткое замыкание и, как следствие, выход оборудования из строя. Явление электрического разряда стали интенсивно изучать. Результаты этих исследований пролили свет на физику многих микроскопических процессов, приводящих к разряду, и позволили создать устройства, использующие это явление. Хорошо известно, что электрический разряд используется: в люминесцентных лампах для освещения и ночной рекламы, в ртутно кварцевых лампах (картинка 4) с целью получения ультрафиолетового излучения, в плазменных мониторах (картинка 5) для создания изображения и т. д. В физических экспериментах с помощью газового разряда создается плазма, которую затем можно использовать в различных целях, например, для создания МГД-генераторов, термоядерного синтеза и т. п. Несмотря на столь широкое применение и длительное изучение, до сих пор механизм возникновения некоторых разрядов, в частности искровых, не изучен до конца.

//

Возникновение искрового электрического разряда сильно зависит от условий эксперимента. В длинных искровых промежутках (когда расстояние между электродами составляет десятки сантиметров или даже метры) при постепенном увеличении напряжения между электродами вначале наблюдается коронный разряд (картинка 6, 7). Коронный разряд наблюдается в виде синевато-фиолетового свечения на одном из электродов (катоде), охватывающего ту область электрода, где поле наиболее сильное, и затухающего по мере удаления от металлической поверхности. Корона возникает в основном в области неоднородного поля — возле металлических выступов, «заусенцев», любых неоднородностей на электродах. При напряжениях, более высоких, чем те, которые приводят к образованию короны, в газах возникают так называемые стримеры (картинка 8, 9). Стримеры представляют собой систему слабо светящихся проводящих каналов, образующуюся в газе в области наиболее сильного электрического поля. Стример прорастает, как правило, с одного из электродов и при высоких напряжениях может ветвиться. Ветвление стримера происходит нерегулярно, и на сегодняшний день можно считать, что эти ветвления носят случайный характер. Разветвленную стримерную вспышку часто называют импульсной короной. Размер области, в которой развиваются стримеры, может составлять несколько метров даже в лабораторных условиях. Скорость продвижения стримера вглубь межэлектродного промежутка не меньше 10 км/с и может достигать 10000 км/с.

//

Вспышкой импульсной короны начинается искровой разряд в воздухе или других газах в длинных промежутках между электродами. В случае пробоя в газах при определенных условиях энерговыделения в стримерных каналах они превращаются в так называемые лидерные каналы (картинка 10). Лидер — это плазменное образование очень высокой светимости и настолько высокой проводимости, что его в некотором смысле можно считать продолжением электрода. Скорость распространения лидера по порядку величины составляет 10 км/с. Перед головной частью лидера образуется стримерная корона, от которой зависит дальнейшая динамика лидерного канала.

Развитие лидера определяет формирование искрового разряда в длинных газовых промежутках, так как именно лидерный процесс отвечает за «вынос» высокого потенциала электрического поля вглубь промежутка в направлении противоположного электрода.

//

На сегодняшний день менее всего изучен механизм роста и ветвления стримеров при электрическом разряде. Согласно современным представлениям, рост кончика стримера определяется величиной напряженности электрического поля перед ним. Величина электрического поля зависит не только от падения напряжения между электродами, но и от радиуса стримера и от скорости его роста. Эти три величины — радиус, локальная напряженность электрического поля и скорость роста кончика стримера — связаны между собой. При определенных значениях этих величин кончик стримера может разветвляться. В 1984 г. была предложена первая модель стохастического роста стримеров, в которой рост их ветвей связывался с локальным электрическим полем [11]. Основные положения модели изложены ниже. Авторы модели Нимейер, Пьетронеро и Висман (НПВ) использовали ее для описания пространственной структуры газового разряда, возникающего на поверхности диэлектрика, помещенного между двумя проводниками, в газе. Картины такого поверхностного разряда наблюдались впервые в 1777 г. и получили название фигур Лихтенберга. Предлагается смоделировать возникновение фигур Лихтенберга с помощью моделей стохастического роста стримеров.

//

Критерии и модели роста стримеров

Рассмотрим теперь развитие стримерной структуры в диэлектрике. Каналы стримеров заполнены плазмой, которая проводит электрический ток. Будем считать, что в первом приближении заряд успевает растечься по веткам стримера так, что потенциал структуры становится равным потенциалу электрода. Это означает, что при вычислении поля в диэлектрике стримерную структуру можно считать продолжением электрода, то есть тоже границей расчетной области. Удобно рассматривать рост структуры с электрода, имеющего нулевой потенциал.

Зная потенциал, можно вычислить электрическое поле. Среднее значение проекции электрического поля на звено, соединяющее узлы А и В, $E_{ABi} = (\phi_A - \phi_B)/l_{AB}$. Нам необходимо знать поле на звеньях, выходящих из стримерной структуры. Считая ее потенциал нулевым, получаем просто $|E| = \phi_B$ для горизонтальных и вертикальных звеньев,

$$|E| = \phi_B /$$

√

2 для диагональных. Здесь индекс V означает узлы, сосение со структурой.

Электрический пробой — стохастический процесс, каждое звено может пробиваться с некоторой вероятностью, зависящей от поля. Такая зависимость называется критерием роста. Рассмотрим некоторые примеры.

Модель НПВ.

Нимейером, Пьетронеро и Висманом [11] впервые была предложена модель, которая позволяет описать рост структур разряда в диэлектриках. В основе модели лежит предположение, что структура растет случайным образом, причем вероятность роста зависит только от локального электрического поля вблизи структуры. Эта модель достаточно легко реализуется на компьютере. Обычно моделируется разряд в диэлектрике, помещенном между двумя электродами, разность потенциалов между которыми V .

//

Для расчета электрического поля в диэлектрике область моделирования покрывается сеткой (например, квадратной в двумерном случае или кубической — в трехмерном), на которой решается уравнение Лапласа.

Рост начинается с одной из точек на электроде. На каждом шаге роста с некоторой вероятностью может образоваться одна веточка разрядной структуры (картинки 11, 12). Эта веточка будет соединять два соседних узла сетки, один из которых уже принадлежит разрядной структуре, а другой является «диэлектриком». Таким образом, из каждого узла двумерной сетки может образоваться до восьми веточек, если учитывать возможность роста и по диагоналям (для трехмерной сетки до 26 веточек). Пусть E — среднее значение проекции электрического поля на направление, соединяющего два соседних узла сетки, между которыми может образоваться новая ветвь разрядной структуры. Обычно предполагают, что вероятность ее образования приблизительно равна $p(E) \sim E^\eta$, где η — так называемый показатель роста, зависящий только от свойств диэлектрика.

На каждом шаге роста случайный процесс выбора новой веточки структуры реализуется следующим алгоритмом. Пробегает по всем M узлам решетки, в которые возможен рост, и рассчитываем сумму

$$Z = \sum_{k=1}^M E_k^\eta,$$

(2.4)

где величина E_k — своя для каждой пары узлов и находится на каждом шаге роста по текущему распределению электрического поля. Затем разыгрывается случайное число ξ , равномерно распределенное от 0 до Z . Для этого используется формула $\xi = Z \cdot \text{random}$. Затем повторно шаг за шагом рассчитывается (2.4) до тех пор, пока текущая сумма

$\sum_{k=1}^M E_k^\eta$

$\geq \xi$

не станет больше ξ . Тот узел, для которого сумма стала больше ξ , присоединяется к структуре. Новой образовавшейся веточке присваивается значение потенциала того

электрода, с которого начался рост этого стримера. Таким образом формируется эквипотенциальная структура.

В этой модели каждый шаг роста во времени имеет номер, но, к сожалению, номеру не сопоставлен реальный интервал времени Δt . Структура разряда растет до тех пор, пока не достигнет противоположного электрода.

Такая модель роста принадлежит к классу однозвенных моделей, в которых считается, что проводящее звено, появившееся первым, подавляет рост остальных на текущем временном шаге.