

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 537.521.6

Искровой и коронный разряды в воздухе на смешанном напряжении

Н. Г. Черепанов, А. А. Жуков, В. И. Крылов

Хабаровский государственный педагогический университет, г. Хабаровск, Россия

Проведены эксперименты по исследованию условий возникновения высокочастотных (с постоянной составляющей электрического поля) разрядов в воздушном промежутке с коэффициентом неоднородности электрического поля 3,7. Показано, что имеются значения таких параметров, как давление, частота, напряжения переменной и постоянной составляющих электрического поля, при которых происходит возникновение различных типов разрядов. Физически это означает, что можно говорить о фазовых состояниях ионизованного воздуха в неоднородном электрическом поле и о фазовых переходах при изменении соотношений, например между амплитудой переменного напряжения электрического поля и давлением газа. Построены двух- и трехмерные фазовые пространства, в которых определены области коронного и искрового разрядов, разделенные кривыми или поверхностями (в трехмерном пространстве), являющимися аналогом кривых равновесия фаз.

Известно [1–7], что в газоразрядном промежутке (в котором создается однородное или слабонеоднородное электрическое поле) при подключении его к достаточно большому внешнему постоянному или высокочастотному (ВЧ) или смешанному (ВЧ и постоянное) напряжению возникает искровой разряд при коэффициенте неоднородности $f = 1,6 - 2,0$. Если же поле более неоднородно ($f > 4,0$), возникает коронный разряд. В то же время есть значительная область значений f , когда ответ на вопрос о том, возникает ли коронный или искровой разряд, остается неопределенным. В настоящей работе как раз и были проведены эксперименты в этой области значений ($f = 3,7$).

Результаты экспериментов и их анализ показали, что существует область значений таких параметров, как напряжения переменной и постоянной составляющих электрического поля, определяющих точки фазовой плоскости; при изменении частоты точки фазового пространства существуют области, в которых тип разряда остается неизменным, а также непрерывные кривые или поверхности (в трехмерном пространстве), разделяющие эти области. Физически это означает, что при одном и том же коэффициенте неоднородности электрического поля могут быть разряды различного типа (искра или корона) в зависимости от соотношения между вышеуказанными параметрами.

Описание экспериментальной установки и методика измерений

Электрические свойства воздуха исследовались в промежутке между электродами специальной формы. Один электрод выполнен в виде острия из алюминиевого сплава, поверхность которого представляла собой гиперболоид вращения с радиусом закругления кончика острия 1 мм. Другой электрод плоский и сделан из стали. Расстояние между электродами выбрано равным 0,5 см, коэффициент неоднородности такого газоразрядного промежутка составляет 3,7 [3, 4]. Подобранные условия (форма электродов и расстояние между ними) довольно близки к условиям, при которых возникает коронный и искровой разряды.

Электроды располагали внутри герметичной камеры, давление в которой изменялось в пределах 0,15–2 атм с точностью 0,05 атм. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она состоит из газоразрядной камеры, насосной системы, с помощью которой изменялось давление воздуха; источников постоянного (ИПН) и высокочастотного (ИВЧН) напряжений. Имеются также измерители давления, переменного (U_a) и постоянного (U_c) напряжений; схема автоматики и стабилизации, позволяющая упростить выполнение работы и повысить точность измерений и сопротивление нагрузки R_n .

С помощью ВЧ-генератора к электродам подавалось переменное напряжение с амплитудой

0—10 кВ или постоянное напряжение до 11 кВ. Измерение напряжения осуществлялось с точностью не хуже 0,5%. Частота ВЧ-напряжения устанавливалась с точностью 1% и могла изменяться ступенчато в диапазоне от 100 кГц до 10 МГц. Тип разряда определяли электрическими методами и визуально.

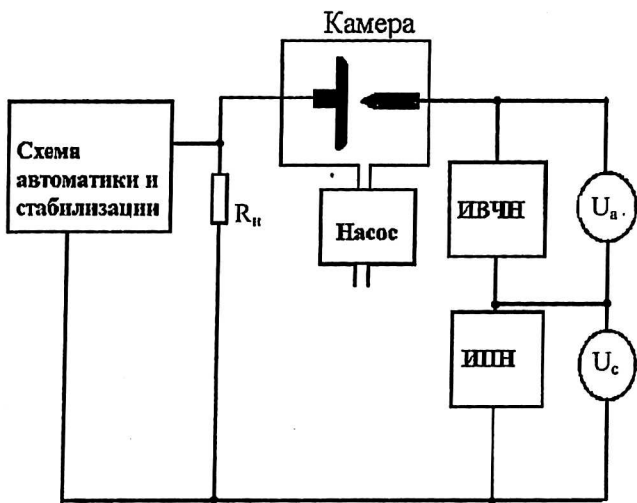


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Эксперимент проводили при смешанном напряжении по методике, подобной той, которая применялась в работах [8—11]. К промежутку подводилось постоянное напряжение U_c , недостаточное для возникновения пробоя. К этому напряжению добавлялось переменное ВЧ-напряжение U_a до тех пор, пока не происходил искровой пробой промежутка или коронный разряд на острие. Это значение амплитуды определялось по пять раз для каждого значения постоянной составляющей в целях уменьшения случайной ошибки.

Результаты эксперимента и их анализ

Проведены три серии измерений для различных частот переменного напряжения: 1,7; 5,35 и 7,2 МГц. В каждой серии было получено по 4—6 вольт-вольтных характеристик (ВВХ) для разных давлений в интервале 0,15—2,0 атм.

На рис. 2 изображены четыре ВВХ, полученные в первой серии измерений при частоте ВЧ, составляющей 5,35 МГц. По оси ординат отложено значение амплитуды переменной составляющей напряжения высокой частоты (U_a), приложенного к исследуемому промежутку, по оси абсцисс — значение постоянной составляющей приложенного напряжения (U_c). Причем, в положительном направлении указано напряжение при положительной полярности острия, а при его отрицательной полярности напряжение откладывается в отрицательном направлении оси абсцисс.

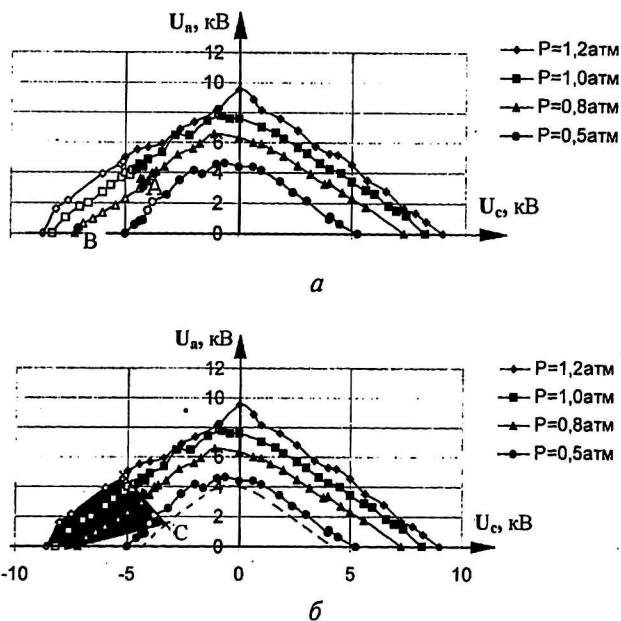


Рис. 2. Вольт-вольтные характеристики при частоте 5,35 МГц; закрашенные маркеры — искровой пробой, незакрашенные — коронный разряд. P — давление воздуха внутри камеры: а — А и В — “переходные точки”, соответствующие давлению 0,8 атм; б — С — точка схождения. Закрашенная область ограничена “переходными линиями”

Следует отметить, что ВВХ, полученные при неизменной конфигурации воздушного промежутка, при различных давлениях не будут пересекаться и соприкасаться. Так, ВВХ для давления 0,7 атм должна лежать между ВВХ, соответствующими 0,8 и 0,5 атм.

Рассмотрим ВВХ (см рис. 2, а), соответствующую 0,5 атм. При наличии на электродах только постоянного или только переменного напряжения наблюдается искра; при постоянном напряжении -4 кВ и амплитуде переменной составляющей 2 кВ имеем коронный разряд. Видно, что при неизменном давлении форма разряда может быть различной, т. е. зависит от соотношения постоянной и переменной составляющих приложенного напряжения.

В соответствии с результатами эксперимента введем понятие переходной точки, под которой будем понимать точку на заданной ВВХ (соответствующей определенному давлению и определенной частоте), в которой при многократном повторении эксперимента (в соответствии с выбранной методикой) может возникать как коронный, так и искровой разряд. Определить эту точку точно при дискретном изменении амплитуды напряжения достаточно сложно, но из физических соображений, связанных с механизмом возникновения разряда в неравновесной статистической системе, ясно, что она должна существовать, и ее параметры можно определить с нужной степенью точности. Например, у ВВХ, соответствующей давлению 0,8 атм (см рис. 2, а), должны существовать две переходные точки А и Б.

Переходные точки всех ВВХ будут образовывать линии, которые естественно назвать переходными линиями.

Таким образом, на рис. 2, а, содержащем семейство графиков, переходные линии ограничивают определенные области, которые представлены на рис. 2, б. Можно ожидать, что точки ВВХ при непрерывном изменении давления полностью покроют некоторые области выбранной фазовой плоскости, а переходные точки этих ВВХ образуют непрерывные кривые, отделяющие области коронного разряда от областей возникновения искрового разряда. Такие области фазовой плоскости назовем "диаграммами электрического состояния". Для конечного количества ВВХ эти диаграммы можно получить только приблизительно. На рис. 3, а показана такая диаграмма, полученная из ВВХ, изображенных на рис. 2, а.

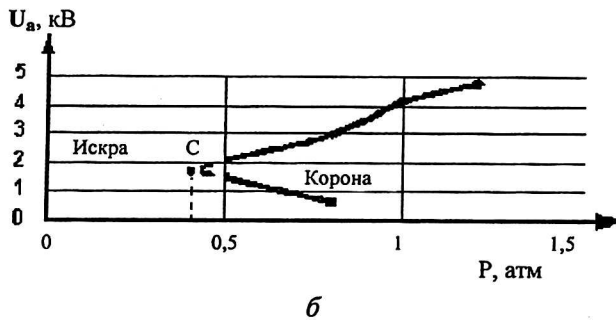
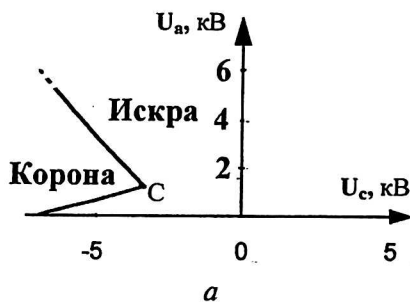


Рис. 3. Диаграмма электрического состояния данного воздушного промежутка:

а — в координатах ВВХ; б — в координатах P и U_a

При построении рассмотренных диаграмм независимыми считались постоянная и перемен-

ная составляющие электрического напряжения газоразрядного промежутка, а давление являлось функцией этих величин. Однако выбранная методика проведения эксперимента позволяет построить фазовую плоскость, определяемую давлением и одной из составляющих напряжения.

Такая диаграмма, точки которой определяются давлением и амплитудой переменной составляющей напряжения, показана на рис. 3, б. В общем можно построить фазовую поверхность в трехмерном пространстве (при фиксированной частоте), на осях которого откладываются составляющие напряжения и давления газа. Однако данная двумерная поверхность, по-видимому, не будет являться плоскостью, а будет представлять собой сложную неправильную поверхность, построение которой не является задачей настоящей работы.

Диаграмма электрического состояния характеризует определенный межэлектродный промежуток с фиксированной геометрией, а также газ, который заполняет данный промежуток. При изменении формы электродов, а также расстояния между ними или при замене состава газоразрядной среды диаграмма электрического состояния изменит свой вид: переходные линии поменяют свое расположение.

Двухмерный вариант диаграммы электрического состояния при разных давлениях характеризует электрические свойства воздушного промежутка при фиксированной частоте. Используемая установка дает возможность проводить эксперименты при различных частотах переменного напряжения, что позволяет учесть эту величину как третий параметр. Если вдоль оси аппликат отложить частоту, то получим трехмерную диаграмму электрического состояния. В ней переходные точки будут образовывать переходные поверхности, которые разделяют область коронного разряда и область искрового разряда. На рис. 4, а, б представлена трехмерная диаграмма электрического состояния, построенная по экспериментальным данным, в координатах: частота, амплитуда напряжения высокой частоты, постоянная составляющая напряжения. Видно, что газоразрядные процессы существенно зависят от частоты переменной составляющей.

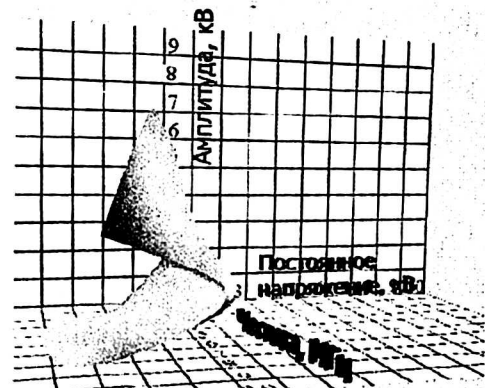
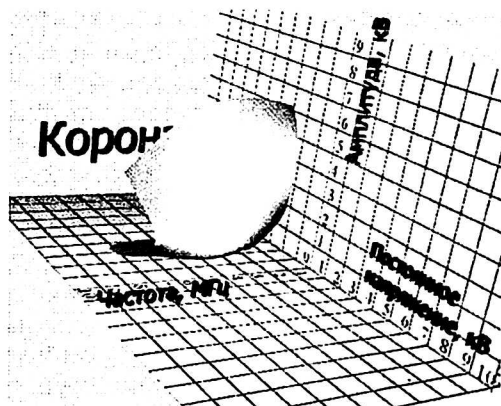


Рис. 4. Трехмерная диаграмма электрического состояния данного воздушного промежутка: а, б — виды переходной поверхности с разных сторон

С большой степенью достоверности можно ожидать, что вид диаграммы электрического состояния будет сильно зависеть от состава газоразрядной среды, поэтому ее можно использовать для сравнения или идентификации каких-либо газоразрядных сред.

Представленные фазовые диаграммы отражают известное термодинамическое свойство макроскопических систем, которое проявляется в возникновении новых закономерностей при усложнении физической системы [12].

Микроскопический же механизм данного явления можно качественно объяснить следующим образом: при наложении на промежуток типа острие — плоскость с коэффициентом неоднородности поля порядка 2,5—4 постоянного напряжения, достаточной для пробоя величины (минус на острие) $U_{c \max}$, возникает искровой пробой. При отсутствии фазы коронного разряда первичная лавина, стартующая с острия, достигает анода, и электроны лавины поглощаются плоскостью полностью, т. е. механизм пробоя подобен механизму искрового пробоя в однородном поле.

Если кроме постоянной составляющей напряжения существует еще его высокочастотная компонента, то при возникновении коронного разряда (из приведенных ВВХ) амплитуда смешанного напряжения в отрицательный полупериод приблизительно равна U_c , но время существования напряжения, близкого по величине к амплитуде, меньше времени пересечения электроном газоразрядного промежутка. Следовательно, действующее на электрон электрическое поле будет в среднем меньше, чем при постоянном напряжении, равном U_c , поэтому лавина будет меньшей интенсивности и не доходит до анода. Электроны лавины прилипают к молекулам кислорода, образуя отрицательные ионы, которые остаются между острием и плоскостью в силу своей малой подвижности и создают отрицательный объемный заряд.

Положительные ионы лавины поглощаются поверхностью острия, но с меньшей скоростью, так как среднее напряжение меньше U_c . При непрерывном возникновении этих лавин создается положительный объемный заряд, больший по величине, чем при $U = U_c$. Искажение поля внутри промежутка становится большим. Конфигурация поля внутри промежутка становится такой, которая и соответствует возникновению коронного разряда. Все последующие лавины заканчиваются, не доходя до плоскости. Это значит, что при смешанном напряжении в этом промежутке будет возникать коронный разряд.

Пусть теперь к рассматриваемому промежутку приложено только высокочастотное напряжение, которое приблизительно равно максимальному значению U_c . Тогда первичная лавина в момент

максимума отрицательного напряжения оставляет свою положительно заряженную головку возле плоскости и через полпериода уже притягивается к ней как к катоду. Искажения электрического поля наблюдаются уже возле плоскости, а увеличение амплитуды переменного напряжения приводит к тому, что вторичный электрон, двигаясь по остову первичной лавины от плоскости к острию, увеличивает ее плотность. Это уже другой механизм — механизм ВЧ-искрового пробоя.

Таким образом, на фазовой диаграмме возникают две области, соответствующие искровому пробоя, и область коронного разряда между ними.

Отметим, что предлагаемое качественное объяснение результатов вышеописанных экспериментов является предварительным и требует более глубокой проработки и количественных оценок.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. А. А. Рухадзе за внимание к работе и обсуждение полученных результатов.

Работа поддержана подпрограммой № 1 программы Министерства образования РФ "Федерально-региональная политика в науке и образовании" (проект № 1611).

Литература

1. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. — М.: Иностран. лит-ра, 1960.
2. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. — М.—Л.: Государственное изд-во технико-теоретич. лит-ры, 1950.
3. Резвых К. А. Расчет электростатических полей в аппаратуре высокого напряжения. — М.: Энергия, 1967.
4. Техника высоких напряжений/ Под ред. проф. Д. В. Разеви́га. — М.: Госэнергоиздат, 1963.
5. Бесхлебный С. И., Куду К. Ф.// Тез. докл. II Всес. совещ. по физике электрического пробоя газов. — г. Тарту. 5—8 июня, 1984. Ч. 1 С. 100—101.
6. Бесхлебный С. И., Куду К. Ф.// Ученые записки Тартуского ун-та, 1988. Вып. 809. С. 27—43.
7. Куду К. Ф. О начальных стадиях разряда с острия в воздухе. — г. Тарту, Тартуский ун-т, 1960.
8. Прокофьев А. М., Кабардин О. Ф., Куду К. Ф.// Известия АН СССР. Сер. физическая, 1959. Т. XXIII. № 8. С. 1004—1006.
9. Аронов М. А., Колечитский Е. С., Ларионов В. П., Минин В. Ф., Сергеев Ю. Г. Электрические разряды в воздухе при напряжении высокой частоты. — М.: Энергия, 1969.
10. Электрическая изоляция высокочастотных установок высокого напряжения/ Под ред. М. А. Аронова, В. П. Ларионова — М.: АО "Знак", 1994.
11. Айнтс М. Х., Веймер В. А., Куду К. Ф. // Ученые записки Тартуского ун-та, 1971. Вып. 283. С. 61—80.
12. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. — М.: Наука, 1964.

Spark and corona discharges in air on a mixed voltage

N. G. Cherepanov, A. A. Zhukov, V. I. Krylov
The Khabarovsk State Pedagogical University, Khabarovsk, Russia

It was made the experiments on investigation of requirement for origin of the high-frequency (with the component of a stationary electric field) discharges in an air gap at coefficient of electric field inhomogeneity of 3.7. It is shown that there are values of physical parameters (pressure, frequency, voltage of a variable and stationary component of electric field), at which there is a rise of different types of the discharges. It mean physically that it is possible to speak about phase states of ionization air in a nonuniform electric field and about phase transitions at change of relations, for example, between amplitude of alternate electric field voltage and gas pressure. It are built the two-dimensional and three-dimensional phase spaces, in which are spotted areas of the corona and spark discharges, disjointed by curves or surfaces (in three-dimensional space), being an analog of curves of phases equilibrium.