

04:11;12

©1992 г.

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОБОЙ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО ИОННОГО СЛОЯ В ПЛАЗМЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

Д.П.Борисов, Н.Н.Коваль, М.Ю.Крейндель, Е.А.Литвинов, П.М.Шанин

Проведены исследования условий пробоя приэлектродного слоя пространственного заряда в плазме импульсной вакуумной дуги с током до 1 кА при подаче на электрод постоянного отрицательного напряжения 0–200 В или импульсного напряжения с амплитудой до 4 кВ и длительностью 150 мкс. Получены расчетные и экспериментальные зависимости времени задержки пробоя слоя от величины приложенного напряжения и состояния поверхности электродов. Обсуждаются два механизма пробоя приэлектродного ионного слоя и определены критические параметры перехода одного механизма в другой.

Введение

В установках для плазменной и ионной обработки деталей и других устройствах, в которых имеются плазмонаполненные промежутки, на поверхности электродов, контактирующих с плазмой, могут самопроизвольно возникать катодные пятна, что ведет к нарушению работы установки или эрозии обрабатываемых деталей [1]. В то же время появление катодных пятен и пробой с отрицательного электрода в предварительно созданной плазме значительно снижает напряжение зажигания высокоточных разрядов в вакуумных промежутках [2].

Основными факторами, определяющими пробой, являются концентрация плазмы, сорт ионов и длительность импульса [2,3]. Большое влияние на характеристики пробоя оказывает также состояние поверхности электродов, контактирующих с плазмой [4–6]. В данной работе теоретически и экспериментально исследовались условия пробоя с отрицательного электрода, помещенного в плазму дугового разряда при наличии диэлектрических пленок на электроде и после его очистки путем прогрева до высокой температуры, в зависимости от приложенного к электроду напряжения.

Экспериментальное оборудование, методика и результаты экспериментов

Экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1, включает магниевый или свинцовый катод 1 диаметром 4 мм, поджигающий электрод 2, отделенный от катода кольцевой фторопластовой

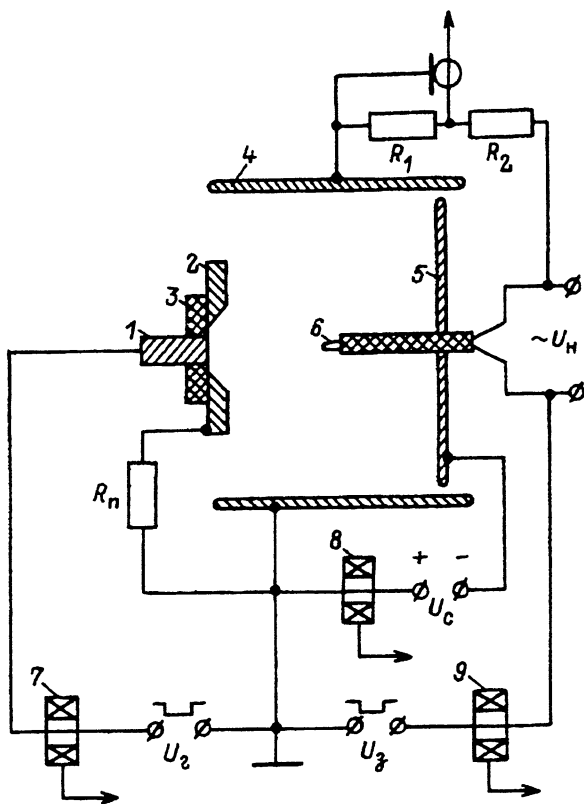


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

шайбой 3, и цилиндрический полый анод 4 из нержавеющей стали диаметром 270 мм и длиной 400 мм. Торец полого анода перекрывается плоским электродом 5 из нержавеющей стали диаметром 250 мм. По оси системы с помощью керамической трубки вводился накаливаемый U-образный зонд 6 из вольфрамовой проволоки диаметром 0.2 мм с длиной выступающей из керамики части 10 мм. Откачка системы производилась турбомолекулярным насосом с азотной вымораживающей ловушкой. Рабочее давление, регулируемое напуском азота или воздуха, составляло $10^{-3} - 10^{-2}$ Па.

Электрическое питание дуги, горящей между катодом и полым анодом, осуществлялось от искусственной линии, формирующей прямоугольные импульсы тока длительностью 1 мс и амплитудой 100–1000 А. Поджигающий электрод подключался к полному аноду через ограничивающий резистор $R = 100$ ом. В экспериментах с плоским электродом 5 отрицательное смещение $U_c = 0 - 200$ В подавалось от регулируемого источника постоянного напряжения. Время до пробоя слоя t_3 регистрировалось от момента зажигания дуги до скачка тока в цепи электрода 5 и соответствующего спада поданного на него напряжения. В эксперименте с зондом на него с задержкой относительно момента зажигания разряда 500 мкс, необходимой для формирования в анодной полости плазмы квазистационарного дугового разряда, подавался импульс отрицательного относительно полого анода напряжения U_z с фронтом 0.2 мкс, длительностью 150 мкс и амплитудой, изменявшейся от 0 до 4 кВ. Подачей

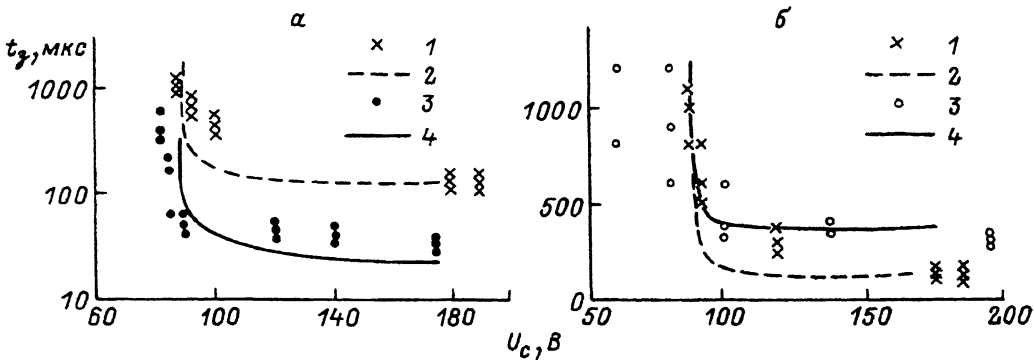


Рис. 2. Зависимость задержки пробоя от напряжения смещения для плоского электрода.

a — катод из Mg; ток разряда, А: 1, 2 — 150; 3, 4 — 600; 1, 3 — эксперимент; 2, 4 — расчет;
б — ток разряда 150 А; катод: 1, 2 — Mg; 3, 4 — Pb; 1, 3 — эксперимент; 2, 4 — расчет.

накала температура зонда изменялась от 300 до 1200 К, что позволило реализовать режимы с обезгаженной или загрязненной диэлектрической пленкой и слоем адсорбированного газа поверхностью зонда. Измерение напряжения на зонде производилось с помощью делителя R_1, R_2 , а токов разряда и пробоя на электрод 5 и зонд 6 — поясами Роговского 7, 8, 9, сигналы с которых подавались на запоминающий осциллограф. Момент возникновения пробоя призондового слоя фиксировался осциллографом по скачку тока на зонд, нарастающему со скоростью $\geq 10^8$ А/с. Параметры разрядной плазмы оценивались с использованием этого же зонда, путем обработки зондовых характеристик.

На рис. 2 приведены результаты измерения времени задержки пробоя t_3 с электрода 5 от величины приложенного напряжения U_c . Ток ионов, измеренный в цепи с электрода 5 в режиме насыщения составлял 3 А при токе разряда 150 А и возрастал до 12 А при токе 600 А. Следует отметить, что при прочих одинаковых условиях t_3 заметно не изменялось в течение времени проведения экспериментов.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости времени задержки пробоя для холодного (*a*) и прогретого до 1200 К (*б*) зонда от величины импульсного отрицательного напряжения. В отличие от холодного зонда, для которого наблюдается большой разброс значений t_3 , для нагретого зонда время задержки при фиксированном отрицательном напряжении изменяется в узком временном интервале. Например, при плотности ионного тока на зонд 45 мА/см² пробоями отсутствуют при напряжении смещения, меньшем 2.1 кВ, а при напряжении выше 2.3 кВ пробоями возникают на каждом импульсе без задержки. Это позволяет для нагретого зонда провести статистическую обработку экспериментальных данных и построить зависимость вероятности пробоя от амплитуды приложенного напряжения (рис. 4).

Теоретические оценки и обсуждение результатов

В случае взаимодействия плазмы вакуумного дугового разряда с электродом, покрытым диэлектрической пленкой, на который подано отрицательное смещение относительно анода, напряженность электрического поля, возникающего на электроде за счет зарядки пленки, можно

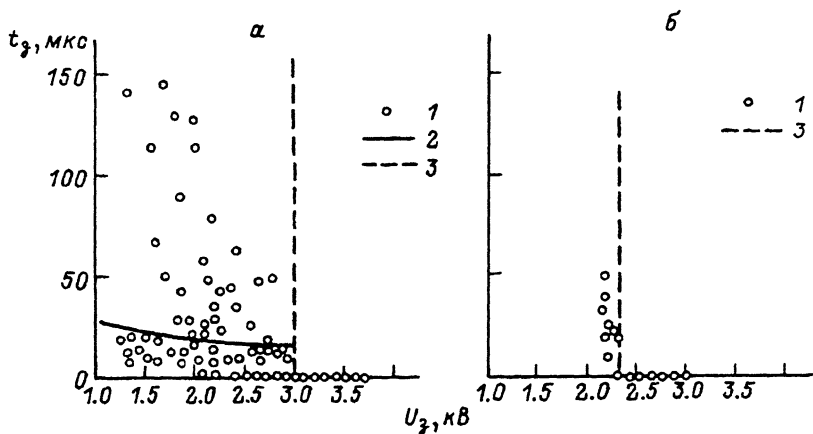


Рис. 3. Зависимость задержки пробоя от приложенного напряжения для холодного (а) и нагретого (б) зондов при $j_i = 45 \text{ mA/cm}^2$.
 1 — эксперимент, 2 — расчет, 3 — критическое напряжение.

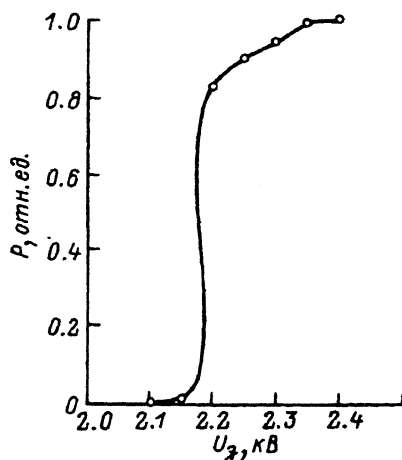


Рис. 4. Зависимость вероятности пробоя от напряжения на нагретом зонде при $j_i = 45 \text{ mA/cm}^2$.

представить в виде

$$E(t) = \frac{4\pi}{\varepsilon} \int_0^t (j_i - j_e) dt, \quad (1)$$

где j_i — плотность ионного тока, а

$$j_e = j_{et} \exp\left(-\frac{e(\varphi_p + U_c - \varepsilon E(t)d)}{T_e}\right), \quad (2)$$

j_e — плотность электронного тока из плазмы. Здесь j_{et} — тепловой ток электронов, T_e — тепловая энергия электронов, d — толщина пленки, ε — диэлектрическая проницаемость пленки, φ_p — потенциал плазмы относительно катода, U_c — отрицательное смещение поданное на электрод относительно анода. В (2) учтено, что по мере зарядки пленки уменьшается разность потенциалов между плазмой и пленкой.

Решая уравнение (1) с учетом (2), получаем зависимость напряженности поля от времени в виде

$$E(t) = \frac{4\pi t j_i}{\varepsilon} - \frac{T_e}{e\varepsilon d} \ln \left[1 - \frac{j_{et}}{j_i} \exp \left(-\frac{e(\varphi_p + U_c)}{T_e} \right) \left(1 - \exp \frac{4\pi e t d j_i}{T_e} \right) \right]. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при $t \ll T_e/(4\pi e d j_i)$ зависимость носит линейный характер; по мере зарядки пленки увеличивается доля электронного тока, и при достижении плавающего потенциала поверхности пленки относительно плазмы зарядка прекращается. Разрешая уравнение (3) относительно времени и подставляя напряженность поля, при которой происходит пробой, получим зависимость времени до пробоя от приложенного к электроду напряжения в следующем виде:

$$t_3 = \frac{\varepsilon E_p}{4\pi j_i} - \frac{T_e}{4\pi e d j_i} \ln \left[\frac{1 - A(U_c) \exp(e\varepsilon d E_p/T_e)}{1 - A(U_c)} \right], \quad (4)$$

где

$$A(U_c) = \frac{j_{et}}{j_i} \exp \left(-\frac{e(\varphi_p + U_c)}{T_e} \right).$$

Плотность тока ионов, усредненная по площади электрода, связана с током разряда и геометрическими размерами электродов следующим соотношением:

$$j_i = \frac{I_r \gamma z e}{S M} \ln \left[1 + \left(\frac{R}{R+L} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где I_r — ток разряда, $S = \pi R^2$ — площадь электрода, γ — коэффициент удельной эрозии, z — средний заряд ионов, M — масса иона, R и L — радиус и длина цилиндрического анода соответственно.

Из условия квазинейтральности можно получить плотность теплового тока электронов из плазмы

$$j_{et} = j_i \frac{v_t}{z v_d}, \quad (6)$$

где v_t и v_d — тепловая скорость электронов и дрейфовая скорость ионов, соответственно.

Потенциал плазмы относительно анода можно получить из баланса токов с учетом того, что ток заряженных частиц на электрод мал по сравнению с током на анод. В этом случае потенциал плазмы определяется соотношением

$$\varphi_p = \frac{T_e}{e} \ln \left[\frac{v_t}{z v_d (1 + M/(\gamma z e))} \right]. \quad (7)$$

Расчетные зависимости времени, проходящего от начала поступления ионного тока на электрод до пробоя его ионного слоя, от величины приложенного отрицательного смещения при двух значениях тока разряда и для катодов из магния и свинца представлены на рис. 2. Из расчетных и экспериментальных данных следует, что при отрицательных напряжениях на электроде 5, меньших, чем абсолютная величина напряжения горения дуги $\bar{U}_r = 60 - 80$ В, в его печи регистрируется электронный ток и пробоев не наблюдалось. С увеличением отрицательного напряжения

электронная компонента тока на электрод уменьшается и при некотором отрицательном смещении на него идет только бомовский ток ионов, а время зарядки пленки до критического значения не меняется. Это согласуется с известными результатами [5], где пробой определяется лишь произведением плотности ионного потока на время его воздействия на поверхность. При увеличении тока разряда увеличиваются концентрация плазмы и плотность тока ионов на электрод и, как следствие, уменьшаются время зарядки диэлектрических пленок и время задержки t_3 . При использовании катода из материала с более низким атомным номером растет скорость ионов, что также ведет к сокращению t_3 .

В реальном случае пленка может покрывать не всю поверхность электрода, тогда зависимость (4) будет верна в том случае, если характерный размер пленки больше толщины приэлектродного слоя. При длительности импульса разряда, меньшей времени зарядки диэлектрических пленок, можно избежать пробоя. Однако следует учитывать, что при работе в повторно-кратковременном и частотно-импульсном режимах может происходить накопление заряда на пленке и тогда пробой приэлектродного слоя будет определяться не только длительностью импульса воздействия ионного потока на загрязненную поверхность электрода, но и длительностью пауз между импульсами, в течение которых часть заряда стекает с диэлектрической пленки.

При высоких напряжениях на слое или при высоких концентрациях плазмы пробой приэлектродного слоя может произойти за счет достижения критической напряженности поля в слое и при отсутствии диэлектрических пленок на электроде. Как видно из рис. 3,б и 4, пробой на зонд при этом имеет пороговый характер. Следовательно, пробой за счет зарядки диэлектрических пленок сменяется пробоем слоя за счет создания критической напряженности поля в слое (рис. 3,а). При этом критическая напряженность электрического поля для холодного зонда несколько выше за счет ослабления его в диэлектрике.

В работе использованы и проанализированы два различных механизма пробоя приэлектродного ионного слоя и определены критические параметры перехода одного механизма в другой. Полученные расчетные временные характеристики пробоя системы плазма — отрицательный электрод при наличии на электроде диэлектрических пленок, удовлетворительно совпадает с экспериментом. Обнаруженные закономерности могут быть интересны в различных технологических процессах и физических исследованиях. Например, эффект ослабления поля на поверхности зонда за счет диэлектрических пленок может стать основой метода оценки чистоты поверхности в пучково-плазменной технологии. Пробой между плазмой вакуумной дуги и чистым зондом может служить критерием для определения концентрации плазмы при известных значениях напряжения смещения зонда и потенциала плазмы или позволит определять потенциал плазмы по известному напряжению смещения зонда и концентрации плазмы.

Список литературы

- [1] Conrad J.R., Bauman S., Fleming R., Meeker G.P. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 4. P. 1707-1712.
- [2] Перский Н.Е., Сысун В.И., Хромой Ю.Д. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Ч. I. С. 13-15.
- [3] Николаев А.В., Самойленко М.В. // Матер. VII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Алма-Ата, 1977. Т. I. С. 231-234.

- [4] *Ivanov V.A., Jüttner B., Pursch H., Siemroth P.* // Beitr. Plasmaphys. 1983. Vol. 23. N 6. P. 551-560.
- [5] *Антонов В.М., Геворкян Л.Б., Пономаренко А.Г.* // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. Вып. 16. С. 995-1001.
- [6] *Проскуровский Д.И., Пучкарев В.Ф.* // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 12. С. 2611-2618.

Институт сильноточной электроники
Томск
Институт электрофизики
Екатеринбург

Поступило в Редакцию
21 января 1992 г.
В окончательной редакции
29 июня 1992 г.
