

УДК 537.52

Возбуждение микроплазменных разрядов на металлах с диэлектрической пленкой

В. А. Иванов, М. Е. Коныжев, А. С. Сахаров

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Проведены экспериментальные и теоретические исследования процессов возбуждения и движения микроплазменных разрядов на поверхности металлов с диэлектрической пленкой, облучаемых внешним потоком плазмы в вакууме. Установлено, что возбуждение и движение первичных импульсных микроплазменных разрядов происходят на границе контакта диэлектрической пленки и открытой поверхности металла в результате возникновения на этой границе сильного локального электрического поля, возбуждаемого внешним потоком плазмы. Показано, что плотная плазма первичных импульсных микроплазменных разрядов является причиной возбуждения последующих разрядов, которые также возникают на границе металла с диэлектрической пленкой в непосредственной близости от первичных микроплазменных разрядов.

Известно [1, 2], что при взаимодействии металлов с плазмой импульсных сверхвысокочастотных (СВЧ) разрядов или с плазмой импульсных электрических разрядов на поверхности металлов возможно возникновение микроразрядов — локальных плазменных образований с характерными пространственными размерами от долей до сотен микрон. В научной литературе, посвященной проблеме взаимодействия горячей плазмы со стенкой вакуумной камеры в установках управляемого термоядерного синтеза, эти микроразряды принято называть “униполярными дугами” [3], в технической литературе, посвященной электрическим вакуумным размыкателям, эти микроразряды называют “катодными пятнами” [4], в то время как в

многочисленных технологических исследованиях, посвященных взаимодействию плазмы с диэлектриками, полупроводниками, металлами и сплавами, эти микроразряды называют “микроплазменными разрядами”. Термин “микроплазменные разряды” отражает основное их свойство — малые (микронного масштаба) характерные размеры плазмы с признаками сильного локализованного воздействия на материалы, с которыми происходит взаимодействие [5—8]. При рассмотрении всех этих явлений [1—8] становится ясно, что существует общая физическая природа возникновения этих микроплазменных разрядов. Поэтому исследование физических механизмов возникновения микроплазмен-

ных разрядов имеет как фундаментальное, так и прикладное значение.

Фундаментальная научная проблема, на решение которой были направлены представляемые ниже исследования, состоит в определении физических механизмов локализации сильного взаимодействия плазмы с металлами и сплавами, включая важный и часто встречающийся случай наличия диэлектрической пленки на поверхности металла или сплава. Прикладная проблема состоит в нахождении и изучении эффективных микроплазменных процессов, приводящих к сильному упрочнению приповерхностных слоев металлов и сплавов при их взаимодействии с плазмой. Цель данной работы — изучить процессы возбуждения и поддержания микроплазменных разрядов на поверхности металлического сплава с диэлектрической пленкой на поверхности; разработать основы теоретической модели физического механизма возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности металлodieлектрических систем.

Описание экспериментальной установки и методов исследований

Для возбуждения и поддержания импульсных микроплазменных разрядов на поверхности образцов из металлов и сплавов использовалась экспериментальная установка "Сфера" (рис. 1). Эксперименты проводили в непрерывно откачиваемой вакуумной камере, в которой расположены плазменный инжектор, оборудование для крепления и перемещения металлических образцов, часть системы диагностики плазменных и электрических параметров разрядов.

Вакуумная часть установки состоит из сферической вакуумной камеры диаметром 50 см и системы обеспечения и измерения вакуумных условий. В состав системы обеспечения вакуума входят форвакуумный насос и вакуумная магистраль с необходимыми дополнительными устройствами. Система измерения остаточного давления воздуха в вакуумной системе установки "Сфера" состоит из термодатчика типа ПМТ-4М и вакуумметра ВИТ-2М. Остаточное давление воздуха в вакуумной камере поддерживалось на уровне 0,01—0,05 Торр за счет непрерывной откачки форвакуумным насосом.

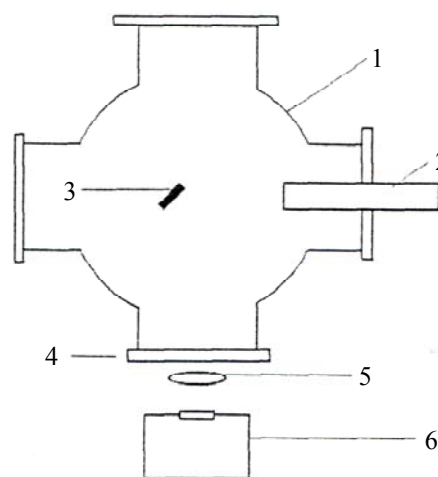


Рис. 1. Схема экспериментальной установки "Сфера" (вид сверху):

- 1 — вакуумная камера; 2 — плазменный инжектор;
- 3 — образец из металлического сплава; 4 — оптическое окно; 5 — длиннофокусный объектив; 6 — цифровой фотоаппарат или система IMACON-468

Плазменный инжектор коаксиального типа с водяным охлаждением создавал импульсный поток плазмы в результате импульсного высоковольтного электрического разряда (электрическое напряжение 7 кВ, амплитуда электрического тока 1,5 кА, длительность знакопеременного импульса 20 мкс), возникающего в приповерхностном слое диэлектрика. В качестве плазмообразующего диэлектрического материала в инжекторе использовали полиметилметакрилат (органическое стекло), при этом основным ионным компонентом плазмы являлись ионы водорода (90—80 %) и углерода (10—20 %), а доля более тяжелых ионов составляла менее 1 % [9]. Параметры плазмы измеряли одно-, двух- и трехэлектродным электрическими зондами Ленг-мюра [10].

В состав диагностического комплекса входили скоростная регистрирующая система IMACON-468, являющаяся комбинацией CCD-камеры (с возможностью электронной регистрации изображения светящегося объекта на семи кадрах с длительностью каждого кадра 100 нс и временным интервалом между кадрами 500 нс) и Hamamatsu-streak-камеры с характерным временем линейной развертки 1 мкс. Регистрирующая система была снабжена длиннофокусным микроскопом, позволяющим фокусировать поверхность образца на входное окно системы IMACON-468. С помощью электронно-оптической системы регистрировалось свечение микроплазменных разрядов на поверхности образца в диапазоне длин волн 400—700 нм. Наилучшее пространственное разрешение составило ~3 мкм. Свечение микроплазменных разрядов на образце регистрировалось камерой IMACON-468 и запоминалось в виде файла в формате tiff. При регистрации свечения микроплазменных разрядов на образце электрическая синхронизация системы позволяла исследовать как момент их зарождения на обращенном к первичному плазменному потоку участке металлического образца, так и движение микроплазменных разрядов по поверхности

образца спустя большой (более 100 мкс) временной интервал после окончания импульса плазмы инжектора.

Временная зависимость тока разряда регистрировалась с помощью пояса Роговского, а для измерения напряжения между образцом и стенкой вакуумной камеры использовался компенсированный делитель. Электрические сигналы тока и напряжения регистрировались с помощью запоминающего цифрового осциллографа Tektronix TDS 3014.

Для экспериментов использовались металлические образцы из никелево-хромистого Ni—Cr-сплава с составом: Ni — 62 %, Cr — 25 %, Mo — 10 %, остальное — 3 % (НХДЕНТ NL производится в России). Выбор такого металлического сплава обусловлен его широким практическим применением в медицине, в частности, в ортопедической стоматологии. Шлифованные образцы с шероховатостью ~1 мкм имели форму параллелепипеда размерами 4×4×12 мм. Одна часть образцов из Ni—Cr-сплава предварительно выдерживалась на воздухе при температуре 950 °С в течение 5 мин. В результате такой термообработки на поверхности образцов возникал оксидный слой толщиной около 1 мкм. Другая часть образцов из Ni—Cr-сплава предварительной термической обработке не подвергалась, но на локальном участке их поверхности возникала тонкая диэлектрическая пленка в результате того, что на этот участок поверхности помещали капельку воды, которая испарялась естественным образом при комнатной температуре.

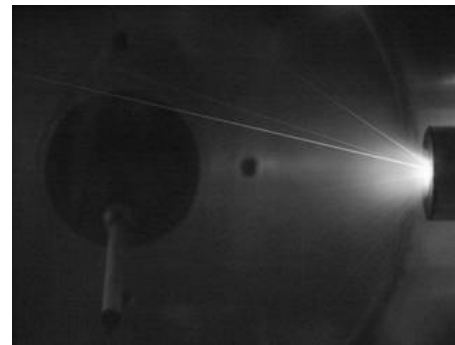
В процессе высыхания капли воды на воздухе в течение нескольких часов на поверхности Ni—Cr-образца возникала оксидная пленка с довольно неоднородной толщиной, изменяющейся в пределах 0,01—0,02 мкм.

Таким образом, в эксперименте использовались две группы образцов Ni—Cr-сплава с существенно различными толщинами пленки оксидов на поверхности.

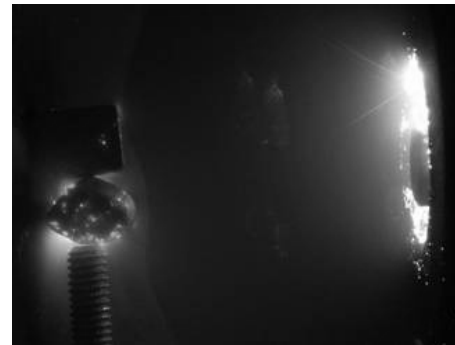
Экспериментальные результаты

В данной работе проведены экспериментальные исследования взаимодействия внешнего потока однородной импульсной плазмы (длительность импульса 20 мкс), создаваемого коаксиальным инжектором (рис. 2, а), с металлическим образцом из Ni—Cr-сплава, покрытого сплошным слоем оксидной пленки толщиной

1 мкм. При этом на поверхности Ni—Cr-образца (электрический потенциал которого составлял "–400 В" по отношению к стенкам вакуумной камеры) не возникало каких-либо микроплазменных разрядов при его облучении внешним потоком плазмы с максимальной плотностью вплоть до $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Однако после нанесения разрывов (около 0,1 мм) оксидной пленки на поверхности образца с помощью резца или иглы облучение такого образца потоком плазмы приводило к возбуждению многочисленных микроплазменных разрядов (см. рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Фотография свечения:

а — потока плазмы инжектора в вакуумной камере в отсутствие образца. (Справа виден цилиндрический выход сопла плазменного инжектора диаметром 30 мм);
б — микроплазменных разрядов на поверхности образца, возбуждаемых плазмой инжектора. (Снято с увеличением 2,5 через нейтральный фильтр с ослаблением 10)

Сначала микроразряды возбуждались в местах нанесенных разрывов оксидной пленки, а после возбуждения нескольких разрядов на поверхности образца возникали новые разрывы пленки, в которых также возбуждались микроплазменные разряды. При этом после каждого микроплазменного разряда с характерной длительностью 10 мс площадь, занятая оксидной пленкой, существенно сокращалась (приблизительно на $3 \text{ мм}^2/\text{импульс}$), а поверхность металла приобретала микрорельеф, обусловленный локальным плавлением и последующим быстрым охлаждением металла в местах локализации микроразрядов (рис. 3).

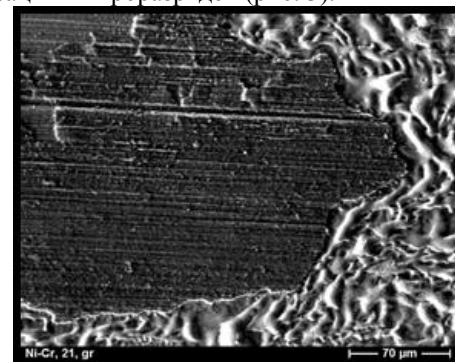


Рис. 3. Микрофотография образца из Ni—Cr-сплава с оксидной пленкой на поверхности (левая часть фотографии) и поверхностью, очищенной от оксидной пленки (правая часть фотографии с микрорельефом)

Возникающие на поверхности Ni—Cr-сплава микроплазменные разряды представляли собой локализованные ярко светящиеся плазменные образования с характерными размерами 10—200 мкм и достаточно медленно перемещающиеся по поверхности образца. Скорость перемещения микроплазменных разрядов вдоль поверхности оценивалась по оставленным “следам” на образце (областям “очищенного” от оксидной пленки металла), образовавшимся после взаимодействия с микроплазменными разрядами за один импульс длительностью около 10 мс. Исходя из полученных таким образом данных, величина скорости перемещения микроплазменных разрядов по поверхности Ni—Cr-сплава с оксидным слоем толщиной около 1—2 мкм оценивается в интервале значений 1—3 м/с. Эти разряды постепенно от импульса к импульсу испаряют оксидный слой вблизи мест горения разрядов и, таким образом, за 10—20 импульсов полностью очищают поверхность образца от оксидного слоя. Скорость “очистки” поверхности сплава от оксидного слоя в пересчете на суммарную длительность импульсов микроразрядов составляла около 6—3 см²/с. При этом на поверхности образца формировался микрорельеф, обусловленный плавлением и быстрым остыванием металла в локальных местах существования микроплазменных разрядов. На полностью очищенной от толстого оксидного слоя поверхности Ni—Cr-сплава при фиксированном значении потенциала образца “-400 В” и плотности иницирующей плазмы инжектора 10¹³ см⁻³ вероятность возбуждения микроразрядов существенно снижается до значения порядка 1 %, тогда как при наличии несплошного оксидного слоя на образце поток плазмы с плотностью плазмы 10¹³ см⁻³ возбуждает микроразряды с вероятностью 100 %.

Возбуждение и движение микроплазменных разрядов на поверхности образцов из Ni—Cr-сплава с тонким оксидным слоем на поверхности (0,01—0,02 мкм) существенно отличается. Так, возбуждение микроплазменных разрядов происходит при существенно более низких значениях плотности плазмы 5·10¹¹÷1·10¹² см⁻³ и том же значении потенциала образца -400 В. При этом скорость движения микроплазменных разрядов была столь высокой, что для регистрации этого движения была применена 7-кадровая система высокоскоростной фоторегистрации IMACON-468 с временной экспозицией каждого кадра 100 нс. На рис. 4 представлены семь кадров, на которых зафиксированы семь последовательных изображений микроплазменных разрядов, развивающихся на поверхности образца из Ni—Cr-сплава с нанесенной тонкой пленкой (0,01 мкм) оксидного слоя; восьмой кадр получен с помощью Hamamatsu-streak-камеры и соответствует так называемой “целевой временной развертке”.

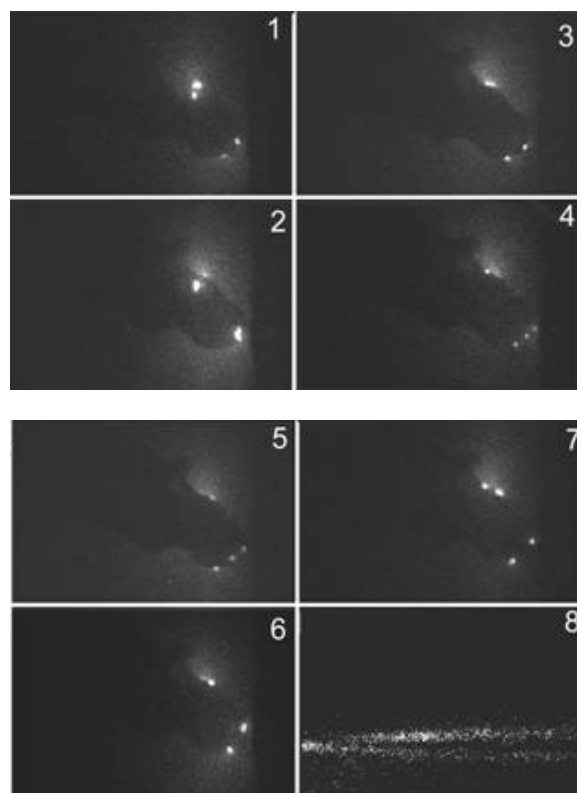


Рис. 4. Фотографии последовательности кадров изображения микроплазменных разрядов (1—7) и временной целевой развертки свечения микроплазменных разрядов (8), возбуждаемых на поверхности сплава Ni—Cr с нанесенной диэлектрической пленкой оксида толщиной около 10 нм. Размер области наблюдения на каждом кадре составляет 4×3 мм

При работе с этой разверткой изображение локального участка образца вырезалось щелью шириной 300 мкм. Изображение щели совпадало с кромкой оксидной пленки, обращенной к плазменному потоку инжектора. Скорость линейной развертки щели составляла 3·10⁵ см/с. Характерное время задержки первого кадра системы IMACON-468 относительно переднего фронта импульса плазмы инжектора составляло 80 мкс.

Таким образом, на первом кадре получалось изображение микроплазменных разрядов в те моменты времени, когда импульс плазмы от плазменного инжектора давно закончился (длительность импульса плазмы около 20 мкс, время начала регистрации системой IMACON-468 составляет 60 мкс после окончания плазменного импульса инжектора). Все последующие микроплазменные разряды возбуждались предыдущими разрядами и уже не зависели от плазмы инжектора, иницирующей первый микроплазменный разряд. Щель была ориентирована в пространстве горизонтально и разворачивалась во времени со скоростью 4 мм/мкс. Начало развертки streak-камеры совпадало с началом 2-го кадра, при этом развертка полностью захватывала 2-й кадр (100 нс), временной интервал 500 нс между 2-м и 3-м кадрами, полностью 3-й кадр (100 нс) и еще временной интервал 300 нс после окончания 3-го кадра. Как видно из фотографий, на кадрах 1—7 характерные размеры микроплазменных разрядов, развивающихся на поверхности сплава с тонкой диэлектрической пленкой, составляют от 300 до 10 мкм.

Микроплазменные разряды возбуждаются преимущественно на границе тонкой пленки и чистого металла: на фотографиях 1—7 (см. рис. 4) диэлектрическая оксидная пленка видна в виде темного пятна неправильной формы, вытянутого по диагонали кадров (сверху слева — вниз направо). За время длительности одного кадра пространственное смещение микроплазменных разрядов вдоль границы пленки не превосходило 100 мкм, а за временной интервал между кадрами (500 нс) перемещение микроплазменных разрядов уже было более заметным и составляло величины от 0,2 до 0,07 мм. При этом вновь образующиеся микроплазменные разряды возникали, как правило, на границе тонкой оксидной пленки и металла и перемещались как вдоль границы пленки и металла, так и в сторону пленки в результате испарения оксидной пленки микроплазменными разрядами.

Расчеты скорости перемещения микроплазменных разрядов,двигающихся вдоль границы пленки и металла, дают значения около 400—500 м/с,двигающихся в сторону пленки в результате ее испарения — около 100—150 м/с.

Расчеты скорости перемещения микроплазменных разрядов можно выполнить также из приведенной на фотографии 8 (см. рис. 4) временной щелевой развертки, на которой видно, как сначала формируется один микроплазменный разряд, а спустя интервал времени около 400 нс на расстоянии менее 200 мкм от первого микроплазменного разряда на границе пленки и металла возникает второй микроплазменный разряд. Скорость перемещения таких разрядов здесь также высока, поскольку за время щелевой развертки 1 мкс они удаляются друг от друга на расстояние около 700 мкм, при этом расчетная скорость их перемещения составляет около 500 м/с.

Обсуждение экспериментальных результатов

Выполненные экспериментальные исследования показали, что на металлическом образце, покрытом сплошной и толстой (около 1 мкм) диэлектрической пленкой и находящимся под потенциалом "–400 В", микроплазменные разряды не возбуждаются при взаимодействии с плазмой плотностью до 10^{13} см⁻³ и температурой около 10 эВ. При нанесении предварительных разрывов на диэлектрической пленке или при возникновении новых разрывов в процессе возбуждения микроплазменных разрядов новые разряды возбуждаются плазменным потоком от инжектора при существенно меньших плотностях плазмы. Кроме того, новые микроплазменные разряды возбуждаются также плазмой предыдущих микроплазменных разрядов в рамках интервалов времени, когда импульс внешнего потока плазмы инжектора давно закончился. При взаимодействии плазменного потока с металлическим образцом, покрытым тонкой диэлектрической пленкой (0,01—0,02 мкм), возбуждение микроплазменных разрядов также происходит на границе диэлектрической пленки и чистого металла при существенно меньших плотностях плазмы $\sim 10^{12}$ см⁻³.

Возбуждение последующих микроплазменных разрядов происходит на границе диэлектрической пленки и открытой поверхности металла. Перемещение разрядов вдоль поверхности образцов и возбуждение новых происходит по границе металла и диэлектрика. Скорости перемещения микроплазменных разрядов могут существенно различаться для случаев тонкой и толстой диэлектрических пленок, но характер их движения по границе металла и диэлектрика является общим характерным свойством взаимодействия плотной плазмы с поверхностью металлодиэлектрических структур.

При взаимодействии плазмы с твердым телом существенным фактором, определяющим это взаимодействие, является электрическое поле, возникающее вблизи поверхности тела в пространственной области с размером порядка длины Дебая

$$r_D = (T_e / 4\pi e^2 n_0),$$

где T_e — электронная температура плазмы;

n_0 — плотность электронов;

e — заряд электрона.

Величина электрического поля на поверхности твердого тела (даже в условиях его электрической изоляции и баланса тока электронов и ионов на поверхности) может составлять величину $E = (8\pi n_0 T_e)^{1/2}$. Так как в наших экспериментах плазменный поток от инжектора характеризуется электронной плотностью плазмы $n_0 = 5 \cdot 10^{11} — 1 \cdot 10^{13}$ см⁻³, электронной температурой плазмы $T_e = 10$ эВ, то величина электрического поля на поверхности твердого тела изменяется в интервале значений $E = 4 — 20$ кВ/см. Такие электрические поля слишком малы, чтобы привести к явлениям типа электронной автоэмиссии с поверхности металла или взрывной электронной эмиссии с образованием плазмы: для такого рода процессов необходимы электрические поля порядка 1 МВ/см [10]. Однако в наших экспериментах мы имеем дело с металлическим образцом, на поверхности которого имеется диэлектрическая пленка. При этом металлический образец может находиться при заданном электрическом потенциале "–400 В" относительно стенок вакуумной камеры. Это может существенно повлиять на величину и пространственное распределение электрического поля вблизи границы между диэлектрической пленкой и открытой поверхностью металла. Выполненные нами теоретические оценки показали, что при облучении такой металлодиэлектрической системы внешним потоком плазмы возможно возникновение сильного электрического поля, локализованного вблизи границы поверхности металла и диэлектрика.

Для проверки этой гипотезы и выяснения структуры электрического поля в плазме вблизи границы металлической поверхности, покрытой диэлектрической пленкой, были проведены двухмерные модельные расчеты. Задача решалась в гидродинамическом приближении в области $-L/2 \leq x \leq L/2$, $0 \leq y \leq M$. Плазма, состоящая из электронов с температурой T_e и холодных ионов водорода с массой $m_i = 1836 m_e$, натекала в расчетную область через границу $y = M$, на которой задавался нулевой электрический

потенциал. Плотность ионов на этой границе полагалась равной плотности электронов, $n_i|_{y=M} = n_e|_{y=M} = n_0$, а скорость ионов была равна $v_i|_{y=M} = (0, -v_s)$, где $v_s = (T_e / m_i)^{1/2}$ — скорость ионного звука.

Стационарные распределения плотности и скорости ионов и электрического потенциала ϕ внутри расчетной области находились путем численного решения системы уравнений непрерывности и движения для ионов

$$\begin{aligned} \nabla(n_i v_i) &= 0; \\ m_i(v_i \nabla)v_i &= -e \nabla \phi \end{aligned}$$

и уравнения Пуассона

$$\Delta \phi = 4\pi(n_e - n_i).$$

При этом считалось, что электроны изотермические ($T_e = \text{const}$), и распределение их плотности подчиняется закону Больцмана $n_e = n_0 \exp(e\phi / T_e)$.

Металлодиэлектрическая поверхность существовала при $y = 0$. Свободная металлическая поверхность при $0 < x \leq L/2$ находилась под заданным отрицательным потенциалом $\phi_0 < 0$. При $-L/2 \leq x < 0$ поверхность была покрыта тонкой диэлектрической пленкой, на которой в процессе расчета автоматически устанавливался плавающий потенциал $\phi_{fl}(x)$, соответствующий нулевому значению нормальной компоненты плотности тока на границе плазма—диэлектрик:

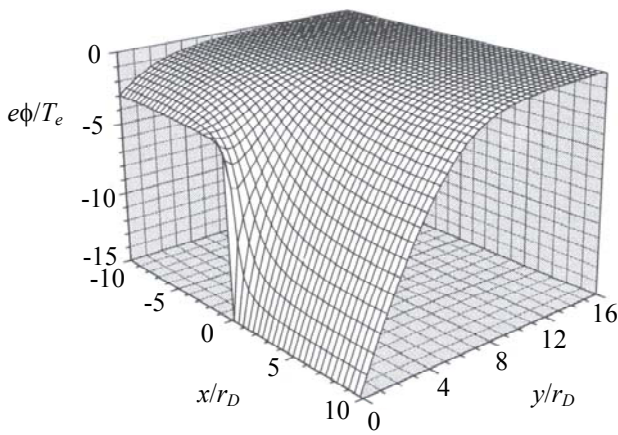
$$\begin{aligned} j_{i\perp} = j_{i\perp} + j_{e\perp} &= 0, \quad \text{где} \quad j_{i\perp} = en_i v_{iy}|_{y=0}; \\ j_{e\perp} &= (2\pi)^{-1/2} n_e v_{Te} |_{y=0}. \end{aligned}$$

Толщина пленки d считалась много меньшей дебаевского радиуса $r_D = (T_e / 4\pi e^2 n_0)$ и в расчетах полагалась равной нулю.

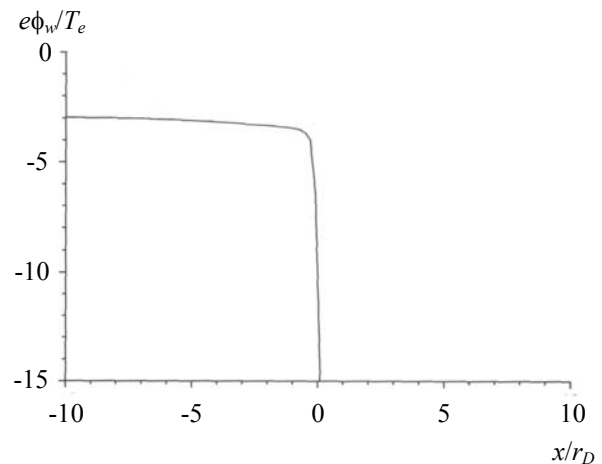
На боковых границах ($x = -L/2$ и $x = L/2$) задавались условия равенства нулю x -ком-поненты электрического поля $E_x|_{x=-L/2} = E_x|_{x=L/2} = 0$.

Результаты расчетов при $\phi_0 = -15T_e / e$, $L = 20r_D$ и $M = 16r_D$ приведены на рис. 5.

Таким образом, расчеты пространственного распределения электрического потенциала, возникающего вблизи металлодиэлектрического образца в присутствии плазмы, показывают, что в пространственной области над поверхностью диэлектрической пленки вдали от границы с металлом в приповерхностном слое масштаба длины Дебая возникает электрическое поле порядка $E_D = (8\pi n_0 T_e)^{1/2}$. Над поверхностью металла вдали от границы с диэлектрической пленкой величина электрического поля увеличивается вследствие приложения добавочного потенциала к металлу. Расчеты показывают, что при $\phi_0 = -15T_e / e$ величина электрического поля вблизи поверхности металла E_m приблизительно в три раза превышает величину электрического поля над поверхностью диэлектрической пленки E_D : $E_m \approx 3E_D \approx 3(8\pi n_0 T_e)^{1/2}$. При этом поле внутри пленки существенно выше и равно $(\phi_0 - \phi_{fl}) / d \gg \phi_0 / r_D$, где d — толщина диэлектрической пленки. Это поле сосредоточено внутри пленки и может не проявляться при отсутствии дефектов или разрывов пленки. Ситуация существенно изменяется вблизи границы диэлектрической пленки и поверхности открытого металла (например, при наличии царапины или трещины). Как видно из рис. 5, именно вблизи контакта пленки и металла (вне пленки) формируется большой градиент потенциала на расстоянии, существенно меньшем радиуса Дебая, т. е. возникает сильное локализованное электрическое поле, величина которого может на несколько порядков превосходить электрическое поле на поверхности пленки и металла вдали от контакта.



а



б

Рис. 5. Результаты расчетов:

a — распределение электрического потенциала в плазме с $m_i/m_e = 1836$ вблизи металлодиэлектрического образца;

b — профиль потенциала на поверхности образца, $\phi_s(x)$.

Поверхность образца расположена при $y = 0$. В области $-10 \leq x/r_D < 0$ металл покрыт диэлектрической пленкой при $0 < x/r_D \leq 10$ — свободная металлическая поверхность под потенциалом $\phi_0 = -15T_e/e$. Ось y направлена по нормали к поверхности образца в глубь плазмы

При $|\phi_0| \gg |\phi_H|$ величину сильного электрического поля вблизи контакта диэлектрической пленки и металла можно оценить как $E_c \approx \phi_0/d$. Так как в наших экспериментах реализуются следующие конкретные значения физических величин: толщина пленки $d = 1$ мкм, электрический потенциал металла $|\phi_0| = 400$ В, электронная плотность плазмы $n_0 = 5 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{13}$ см⁻³, электронная температура плазмы $T_e = 10$ эВ, радиус Дебая $r_D \approx 2$ мкм $> d = 1 - 0,01$ мкм, то электрическое поле $E_c \approx \phi_0/d$ на границе диэлектрической пленки и металла достигает значения 4 МВ/см и более. Такие высокие значения электрического поля уже достаточны для инициирования как взрывных или автоэмиссионных процессов на металле [10], так и для возникновения электрического пробоя (искры) по поверхности среза диэлектрической пленки с образованием более плотной плазмы на металле с электронной плотностью порядка $10^{16} - 10^{18}$ см⁻³ [11, 12]. В самом микроплазменном разряде электронная плотность плазмы может достигать еще больших значений $\sim 2 \cdot 10^{20}$ см⁻³ [13]. Такая плотная плазма даже при температуре электронов 1—2 эВ может самостоятельно создавать сильные электрические поля $\sim 1 - 10$ МВ/см вблизи металла, достаточные для инициирования процессов взрывной эмиссии и сильного локального взаимодействия с металлом, которые сопровождаются плавлением металла и последующим быстрым его остыванием с образованием единичного кратера или множества кратеров.

Таким образом, вблизи контакта диэлектрической пленки с открытой поверхностью металла формируется микрорельеф на поверхности последнего.

Роль плазмы фактически заключается в том, чтобы создать плавающий потенциал на поверхности пленки. При этом формируется большая разность потенциалов между внешней поверхностью пленки и поверхностью металла. В отсутствие плазмы поверхность пленки имеет потенциал, близкий к потенциалу металла, и сильных электрических полей не возникает.

Заключение

Экспериментально установлено, что импульсный поток плазмы с электронной плотностью выше $n_0 = 5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ и температурой электронов $T_e = 10$ эВ возбуждает микроплазменные разряды на поверхности металла, частично покрытого диэлектрической пленкой. При этом микроплазменные разряды возбуждаются на границе диэлектрической пленки и металла.

Исследованы скорости движения микроплазменных разрядов вдоль границы диэлектрической пленки и металла. Для толстых диэлектрических пленок толщиной выше 1 мкм скорость перемещения микроплазменных

разрядов составляет 1—3 м/с, для тонких диэлектрических пленок толщиной около 0,01 мкм — 500—150 м/с.

Разработана физическая модель механизма возбуждения микроплазменных разрядов на границе диэлектрической пленки и металла, связанная с возникновением сильного электрического поля в области контакта металла и диэлектрика в плазме. На основе гидродинамической модели плазмы рассчитано распределение потенциала над поверхностью металла и диэлектрической пленки. Показана возможность возникновения сильного электрического поля вблизи контакта металла с диэлектриком при взаимодействии с внешним потоком плазмы.

На основании выполненных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что механизмом возбуждения микроплазменных разрядов является электрический пробой по срезу диэлектрической пленки, при этом возникновение сильного электрического поля, вызывающего пробой, обусловлено разностью потенциалов между поверхностью пленки и поверхностью металла. Зарядка поверхности диэлектрической пленки в плазме происходит до значения плавающего потенциала $\approx 3T_e/e$, соответствующего равенству потоков электронов и ионов, а потенциал металла определяется условиями эксперимента и составляет $\approx (10 - 40)T_e/e$. Возникающие при этом электрические поля в зависимости от толщины пленки могут достигать значений выше 4 МВ/см. Такие сильные электрические поля должны, во-первых, вызывать электрический пробой поверхности диэлектрика, во-вторых, образовывать вторичную плазму, инициирующую новые микроплазменные разряды.

Авторы работы выражают благодарность

Р. Х. Залавутдинову, А. М. Спиринову

и А. А. Летунову за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект РФФИ №06-08-01624-а)
и Московского комитета по науке
и технологиям (проект 1.1.182).

Л и т е р а т у р а

1. Иванов В. А. Возбуждение и воздействие микроплазменных разрядов на металлы и сплавы в плазме сверхвысокочастотного факела // Прикладная физика. 2001. № 2. С. 5—39.
2. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H., Siemroth P. Initiation and Sustainment of Unipolar Arc Discharges by a Microsecond Pulse Plasma // Adv DDR Beitrage aus der Plasma Physik B. 23. H.6. 1983. P. 551—560.
3. Nedospasov A. V., Petrov V. G., Zykova N. M. Unipolar Arcs // IEEE Trans. Plasma Sci. PS-13. 1985. P. 253—256.

4. Зимин А. М., Иванов В. А., Юттнер Б. Динамика катодных пятен на поверхности бериллия в дуговом вакуумном разряде// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. — М.: Изд-во РНЦ “Курчатовский институт”. 2001. Вып. 2. С. 50—57.

5. Атаманов М. В., Васильев В. И., Зайцев В. В., Иванов В. А., Карузин О. Н., Плишивцев Н. В., Прохоров В. Н., Чащин Н. Е. Новые технологии повышения прочности деталей машин// Автомобильный транспорт. — М.: Минавтотранс РФ. 1995. № 7. С. 31—33.

6. Иванов В. А., Плишивцев Н. В., Прохоров В. Н., Чащин Н. Е. Упрочнение поверхностей деталей автобусов обработкой плазмой СВЧ-разряда: Тез. докл. IV всерос. конф. по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. — Томск. 13—17 мая 1996. С. 407—409.

7. Иванов В. А. Возбуждение микроплазменных разрядов на поверхности металлов с помощью свехвысокочастотного плазменного факела: Тез. докл. XXVII Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. — г. Звенигород. 2000. С. 243.

8. Зимин А. М., Иванов В. А., Юттнер Б. Микроплазменные разряды на бериллиевом катоде в вакуумном дуговом разряде// В кн.

Матер. Всерос. науч. конф. по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2001. — Петрозаводск 1—7 июля 2001. Т. 1. С. 168—172.

9. Иванов В. А. Трехэлектродный несимметричный зонд для непрерывного измерения температуры и плотности плазмы: Крат. сообщ. по физике.— М.: ФИАН, 1988. С. 33—35.

10. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. — М.: Наука, 2000. — 424 с.

11. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H. Time Resolved Measurements of Arc Cathode Plasma in Vacuum// Proceedings XI th. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 1984. — Berlin, DDR. V. 1. P. 157—160.

12. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H. Time-Resolved Measurements of the Parameters of the Arc Cathode Plasmas in Vacuum/ Pub. Nuclear and Plasma Sciences Society USA// IEEE Plasma Science. 1985. V. PS-13. № 5. P. 334—336.

13. Batrakov A. V. Plasma properties of arc cathode spots at liquid-metal cathode: XXth ISDEIV Proceeding (XXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum). Tours (France)-July 1—5, 2002. P. 123—130. (ISBN 0-7803-7394-4).

Статья поступила в редакцию 18 июля 2006 г.

Excitation of microplasma discharges on metals with dielectric films

V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, A. S. Sakharov

A. M. Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia

The experimental and theoretical studies of processes of excitation and movement of microplasma discharges on the surface of metals with dielectric films under irradiation of external plasma flux in vacuum were carried out. It is established that excitation and movement of primary microplasma discharges occurs along a boundary of contact of clean metal surface with dielectric film as a result of appearance of strong local electric fields excited by external plasma flux. It is shown that the dense plasma of the primary microplasma discharges is the reason of excitation of subsequent microplasma discharges, which also arise on boundary of metal surface with dielectric film in a nearest vicinity of primary microplasma discharges.