

04;11;12

Инициирование электрического вакуумного разряда ускоренными наночастицами

© С.В. Адаменко, П.А. Березняк, И.М. Михайловский,
В.А Стратиенко, Н.Г. Толмачев, А.С. Адаменко, Т.И. Мазилова

Национальный научный центр
"Харьковский физико-технический институт", Украина
Лаборатория электродинамических исследований АО "Энран",
Украина, Киев

Поступило в Редакцию 6 марта 2001 г.

Методами полевой ионной микроскопии исследовался статический пробой, инициированный ударами частиц, отрывающихся от острых анодов, находящихся в сильных электрических полях, соответствующих порогу атермического полевого испарения. Показано, что в этих условиях размерный порог инициирования вакуумного разряда на порядок ниже наблюдаемого в экспериментах с плоскими электродами и лежит в нанометровом диапазоне средних радиусов кривизны бомбардирующих заряженных частиц. Обнаружено также существенное снижение пороговых значений энергии частиц, инициирующих статический пробой.

В исследованиях высоковольтных вакуумных разрядов была убедительно продемонстрирована определяющая роль формирования взрывных эмиссионных центров в импульсном пробое [1–3]. Эктоны, представляющие собой пакеты заряженных частиц, были первоначально обнаружены при изучении взрывной эмиссии. Однако, как показали дальнейшие исследования, они могут возникать также за счет микро-взрывных процессов на электродах при бомбардировке поверхности ускоренными микрочастицами [4]. Учет этих эффектов позволил объяснить основные особенности протекания статических высоковольтных вакуумных разрядов, инициированных ударами микрочастиц об электроды. Однако закономерности инициирования разрядов существенно зависят от конкретных условий эксперимента, и механизм их во многом остается невыясненным. Достаточно полно изучены явления, сопутствующие статическому вакуумному пробую при бомбардировке электродов

частицами микро- и миллиметровых размеров [4,5]. Исследования пробоя под действием бомбардировки частицами меньших размеров к настоящему времени практически отсутствуют, что прежде всего связано с трудностями определения конфигурации и энергии микрочастиц.

В настоящей работе для исследования статического пробоя, инициированного ударами субмикронных частиц, применен метод высокоразрешающей полевой ионной микроскопии, позволяющий контролировать размеры частиц и определять локальные значения напряженности электрического поля. В результате установлено, что при высоких значениях напряженности поля порог инициирования статического вакуумного пробоя лежит в нанометровом диапазоне бомбардирующих заряженных частиц и соответственно смещен энергетический порог инициирования разряда.

Эксперименты проводились с помощью двухкамерного полевого ионного микроскопа с охлаждением образцов жидким водородом с рабочими напряжениями в интервале 2–30 кВ. Относительная глубина пульсаций напряжения не превышала 10^{-3} . Давление остаточных газов во внутренней рабочей камере составляло 10^{-6} Па; давление изображающих газов — гелия, неона и водорода изменялось в интервале 10^{-1} – 10^{-3} Па. Источником заряженных частиц служили аноды, изготовленные из вольфрама чистотой 99.98% в виде конических острий с углом конуса 10–15° и радиусами кривизны у вершины 5–40 нм. Частицы образовывались в результате разрушения вершины острий под действием пондеромоторных сил электрического поля. В качестве катода использовался медный диск, поверхность которого была предварительно подвергнута механической и электролитической полировке в ортофосфорной кислоте. В центре диска имелось отверстие, лежащее на оптической оси микроскопа. Ионы, проходящие через это отверстие, формировали изображение поверхности, усиливаемое с помощью микроканальной пластины. На острийный анод напряжение подавалось через резистор $2 \cdot 10^8 \Omega$. Емкость диода, в котором осуществлялся разряд, составляла 200 пФ. Электрический пробой регистрировался по скачкообразному сбросу напряжения на диоде и световой вспышке. Для исключения возможности протекания вакуумных разрядов, инициированных автоэлектронной эмиссией и испарением анода, предварительно осуществлялась высоковольтная тренировка диода. Эксперименты по инициированию пробоя ускоренными частицами проводились после достижения прочности вакуумной изоляции до 25 кВ. После высоковольтной тренировки в течение серии из 20–30 экспериментов не произво-

дилось развакуумирования системы. Острийные аноды, разрушившиеся в процессе экспериментов, заменялись с помощью высоковакуумной шлюзовой камеры.

Радиусы кривизны цилиндрической части частиц определялись по количеству атомных ступенек, формируемых в процессе полевого испарения, между кристаллографическими полюсами с низкими индексами Миллера [6]. Длина частицы в экспериментах, не приводивших к пробую, определялась по изменению среднего радиуса кривизны вершины острия в результате ее отрыва. Вследствие того что механические напряжения быстро убывают вдали от вершины острия, разрушение острийного анода и образование микрочастиц, как правило, происходило на расстоянии $1-3r$ от его вершины. Таким образом, отрывались фрагменты анода, конфигурация которых могла существенно отличаться от сферической. В то время как радиус кривизны вершины анода определялся с точностью до 4–8%, длина отрывающегося фрагмента оценивалась с относительной погрешностью около 50%. Пробой, как правило, приводил к увеличению более чем на порядок радиуса кривизны анода и образованию микровыступов [7], вносящих основной вклад в формирование полевых ионных изображений анодов (рис. 1).

Напряженность поля на вершине конического острия, сформированного полевым испарением, приблизительно постоянна и равна $E = V/(5r)$. Наблюдались лишь вариации напряженности, связанные с анизотропией энергии полевого испарения [5]. На конической части образца напряженность поля E существенно уменьшается и, таким образом, при определении заряда оторванной частицы Q можно учитывать напряженность поля над полусферической частью острийного анода:

$$Q = 2\pi\epsilon_0 E r^2, \quad (1)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, r — радиус кривизны полусферической части острийного анода. Компонента силы электрического поля, направленная вдоль оси анода, равна

$$F = \pi r^2 \epsilon_0 E^2 / 2. \quad (2)$$

Пондеромоторные силы в электрических полях напряженностью $2-6 \cdot 10^{10}$ V/m могут существенно превышать макроскопический предел текучести и достигать теоретического предела прочности материала анода [8]. В предположении сохранения заряда частицы на участке

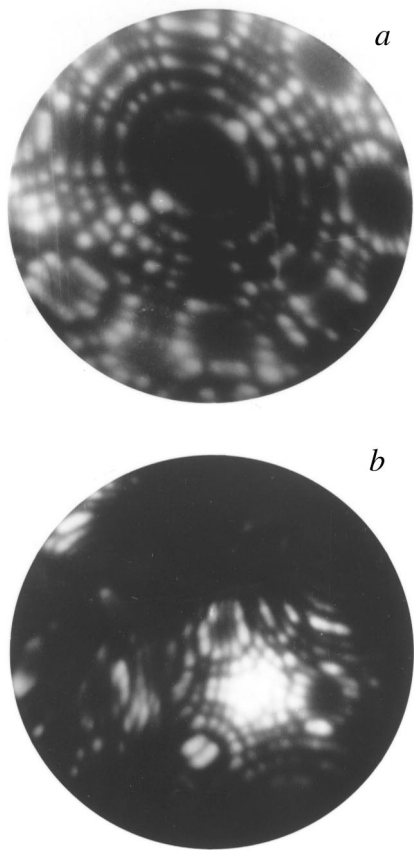


Рис. 1. Полевые ионно-микроскопические изображения вершины острейшего анода до (а) и после (б) пробоя.

ускорения ее кинетическая энергия может быть с учетом выражения (1) представлена в виде:

$$W = 10\pi\varepsilon_0 E^2 r^3. \quad (3)$$

На рис. 2 приведена вероятность инициирования пробоев P ударами о медный катод частиц в зависимости от радиуса кривизны, принимавшегося равным радиусу кривизны полусферической вершины острейшего

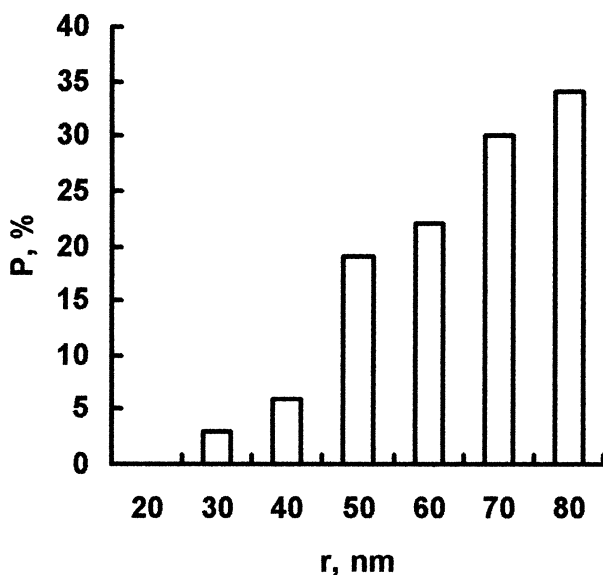


Рис. 2. Зависимость вероятности инициирования пробоев от радиуса кривизны наночастиц.

анода. С увеличением радиусов кривизны бомбардирующих наночастиц вероятность пробоев возрастала, достигая 34% при значениях r в интервале 75–85 нм. Инициирование пробоев наночастицами носило пороговый характер и наблюдалось при значениях радиусов, больших 30 нм. Это значение радиуса частиц на порядок ниже соответствующих пороговых размеров в экспериментах с макроскопическими (плоскими) электродами [4].

Отрыв наночастиц происходил в процессе формирования поверхности полевым испарением при постоянной напряженности электрического поля на аноде (56–58 В/нм), соответствующей скорости испарения 0.2–1.5 атомных слоев в секунду. Напряжение на диоде увеличивалось пропорционально радиусу кривизны вершины анода от 5.6 до 22.4 кВ. Энергия бомбардирующих медный катод частиц при этом изменялась в пределах $6.9 \cdot 10^{-12}$ – $4.5 \cdot 10^{-10}$ Дж. Пороговое значение энергии инициирования вакуумного разряда, рассчитанное по формуле (3), составляло $5.58 \cdot 10^{-11}$ Дж, что на два порядка ниже соответствующих значений при инициировании разряда микрочастицами, отрывающимися от плос-

ких анодов. Однако удельная энергия во всем интервале напряжений постоянна и равна 20.6 eV/atom, что существенно превосходит энергию сублимации вольфрама. Этой энергии достаточно для локального плавления и испарения катода и полного испарения самой частицы с последующим образованием у поверхности плазмы с плотностью, близкой к твердотельной. Взаимодействие плазмы с катодом, как было показано в [5], приводит к формированию эктона, ответственного за пробой вакуумного промежутка.

Таким образом, при отрыве фрагментов острых анодов, находящихся в предельно больших электрических полях порядка $10^{10} - 10^{11}$ V/m, соответствующих атермическому полювому испарению металлов, частицы ускоряются до энергий, существенно превышающих теплоту сублимации, что приводит к смещению размерного порога инициирования вакуумного разряда в нанометровый диапазон. Удельные энергии и скорости частиц не только превосходят соответствующие величины, реализуемые в экспериментах с плоскими электродами, но, по-видимому, являются предельно достижимыми, так как превышение заряда частиц над уровнем, реализуемым в экспериментах с острыми анодами, неизбежно приведет к полювому испарению и снижению заряда наночастиц.

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность П.И. Фомину за обсуждение результатов и Е.И. Луговской за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [2] *Месяц Г.А.* Эктоны. Ч. 1. Екатеринбург: Наука, 1993. 184 с.
- [3] *Фурсей Г.Н., Жуков В.М.* // ЖТФ. 1976. Т. 46. В. 2. С. 310–327.
- [4] *Сливков И.Н.* Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
- [5] *Месяц Г.А.* Эктоны. Ч. 2. Екатеринбург: Наука, 1994. 243 с.
- [6] *Miller M.K., Cerezo L., Hetherington M.G., Smith G.D.W.* Atom probe field ion microscopy. Oxford: Clarendon Press, 1996.
- [7] *Конторович Е.Л., Судакова Т.И., Шредник В.Н.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 10. С. 69–73.
- [8] *Михайловский И.М., Полтинин П.Я., Федорова Л.И.* // ФММ. 1983. Т. 56. В. 1. С. 186–191.