

04;11;12

Метод увеличения электрической прочности вакуумной электроизоляции

© Н.В. Татарина

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
e-mail: sst@bk.ru

(Поступило в Редакцию 10 января 2012 г.)

При низких напряженностях внешнего поля, недостаточных для появления полевой эмиссии электронов, в дефектах поверхности высоковольтных электродов типа пор возникают процессы, которые создают предпробойные токи и инициируют микрозаряды и пробой вакуумного промежутка (вакуумную дугу). Для подавления этих процессов необходимо уменьшить газонасыщенность электродов. Предлагается изготавливать высоковольтные электроды из металлических шариков, обезгаживание которых происходит значительно быстрее, чем цельнометаллических электродов, что способствует увеличению электрической прочности вакуумного промежутка.

Введение

Выяснение физических процессов, ответственных за предпробойные токи и пробой вакуумного промежутка, очень важно для технологии подготовки высоковольтных электродов. От качества вакуумной электроизоляции зависит стабильность, надежность и срок службы высоковольтных вакуумных приборов и электрофизических установок. Существенным образом она определяет габариты высоковольтных устройств. Правильное представление о причинах нарушения вакуумной электроизоляции определяет технологию подготовки высоковольтных электродов.

Высокий уровень электрической прочности был ранее получен в работах [1–3] с электродами из молибдена и меди высокой чистоты после высокотемпературного прогрева в вакууме и очистки их поверхности тлеющим разрядом в инертном газе до отсутствия послеразрядной эмиссии электронов, которая исчезает при достижении чистометаллической поверхности. Для электродов из молибдена (диаметр 18–20 мм) удалось достигнуть напряжения 90 кВ, а кратковременно 100–110 кВ при токе менее 10^{-8} А/см² на вакуумном промежутке 1 мм. Напряженность электрического поля составляла более 10^8 В/м. Напряжение 55–60 кВ выдерживалось в течение десятков часов без пробоя, а ток не превышал 10^{-8} А.

В импульсном режиме микросекундной длительности на вакуумном промежутке 1 мм напряженность электрического поля достигала $1.4 \cdot 10^8$ В/м, а на промежутке 0.1 мм она увеличивалась до $(5–7) \cdot 10^8$ В/м. Более того, вакуумная дуга прерывалась до окончания импульса при тех же параметрах электрической цепи, которые были до обработки электродов.

После выноса электродов на атмосферу электрическая прочность вакуумной электроизоляции снижалась, но оставалась достаточно высокой [4]. Появление пористой

пленки на катоде (чистометаллической или окисленной) приводило к уменьшению электрической прочности на 2 порядка величины, т.е. до 10^6 В/м (рис. 1) [5]. Впервые в этом опыте был обнаружен начальный линейный участок вольт-амперной характеристики (ВАХ) предпробойных токов, появление которого определялось процессами в порах. Опыты с пористыми электродами показали, что величина тока этого участка зависит от газонасыщенности электродов и эта зависимость имеет максимум. Степень газонасыщенности определяется не только предварительным прогревом электродов в вакууме, но и длительностью откачки и уровнем вакуума в перерывах отсутствия напряжения на электродах (рис. 2) [5].

Эти результаты и известные ранее другие закономерности вакуумной электроизоляции дали основание предположить новый механизм ее нарушения [5].

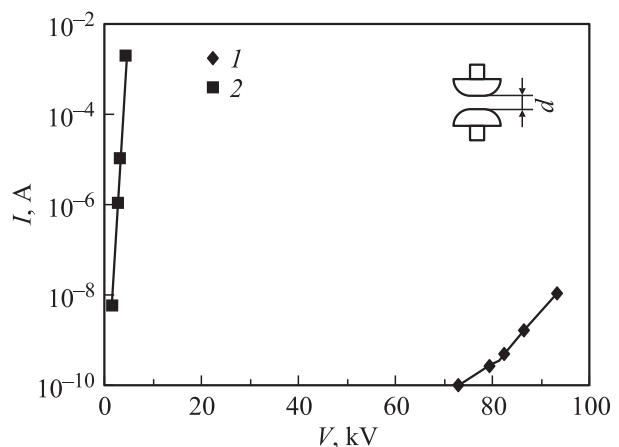


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика вакуумного промежутка $d = 1$ мм с молибденовыми электродами марки М.Ч. 1 — электроды очищены до отсутствия послеразрядной эмиссии, 2 — после появления на катоде пористой чистометаллической пленки.

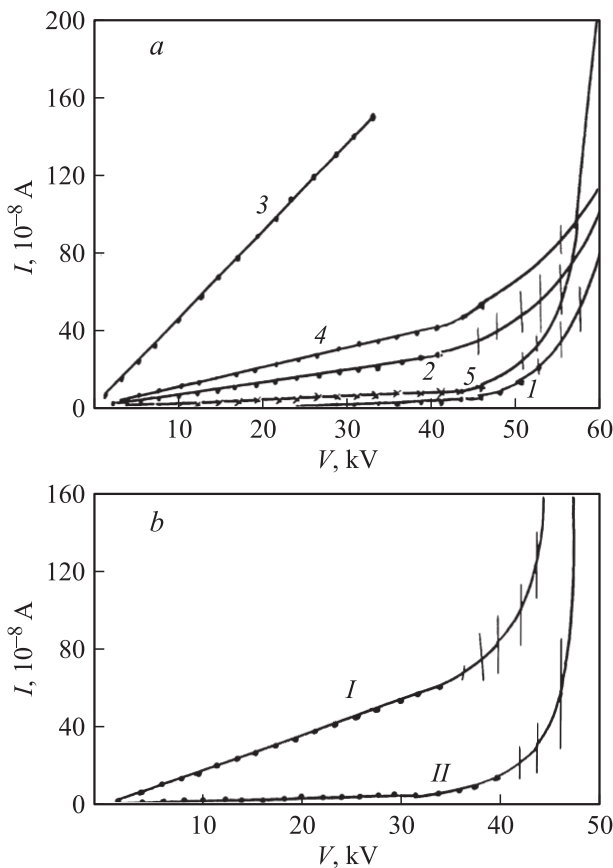


Рис. 2. ВАХ графитовых пористых углеродов при длительной откачке от атмосферы. Кривые 1–5 соответствуют измерениям через неделю (*a*): *b* — изменение ВАХ при выдержке электродов в вакууме 10^{-2} мм Нг в течение 3 дней (кривые I и II). Вакуумный промежуток $d = 28$ мм.

Для обычных электродов, изготовленных по общепринятой технологии, порами могут быть канавки от резца, трещины, границы зерен, место контакта различных включений на поверхности электродов и т.д. Без предварительной обработки высоковольтных электродов на поверхности присутствует пленка оксида в результате контакта с атмосферой. Эта пленка является пористой. Пористая пленка появляется при пробоях вакуумного промежутка, а также при длительном воздействии предпробойных токов вследствие переноса материала электродов с одного на другой. Дефекты типа пор могут быть эмиссионными центрами и стимулировать микроразряды и пробой вакуумного промежутка.

1. Механизм нарушения вакуумной электроизоляции

В последнее время все чаще появляются публикации, в которых пересматриваются сложившиеся представления о доминирующей роли полевой эмиссии. Как известно, полевая эмиссия возникает при напряженности 10^9 В/м, в то время как поля, при которых реги-

стрируются заметные токи в вакуумном промежутке, на 2–4 порядка ниже. Предполагается, что поле может усиливаться на микроостриях. Коэффициент усиления поля β зависит от отношения высоты острия h к его радиусу r : $\beta = (h/r)$.

Однако в работе [6] было показано, что со специально нанесенными на поверхность катода видимыми остриями с $\beta = 450$ не наблюдалась полевая эмиссия при достижении необходимой напряженности поля (с учетом коэффициента усиления β). Эмиссионными центрами в этом опыте были различные виды трещин на подложке. Такой же результат был получен и в работе [7]: появление видимых острий с $\beta = 100$ и более не изменило ВАХ предпробойных токов.

Энергетический спектр электронов отличается от спектра полевой эмиссии, а зарегистрированные с помощью электронного микроскопа эмиссионные центры были не остриями, а включениями [8,9]. Большинство эмиссионных центров на полусферическом катоде располагались не в центре электрода, где наибольшая напряженность поля, а ближе к краям электрода и т.д.

До настоящего времени коэффициент усиления β определялся по углу наклона экспериментальных графиков Фаулера–Нордгейма (ФН), предполагая, что рассматриваемые токи — токи полевой эмиссии. Типичные

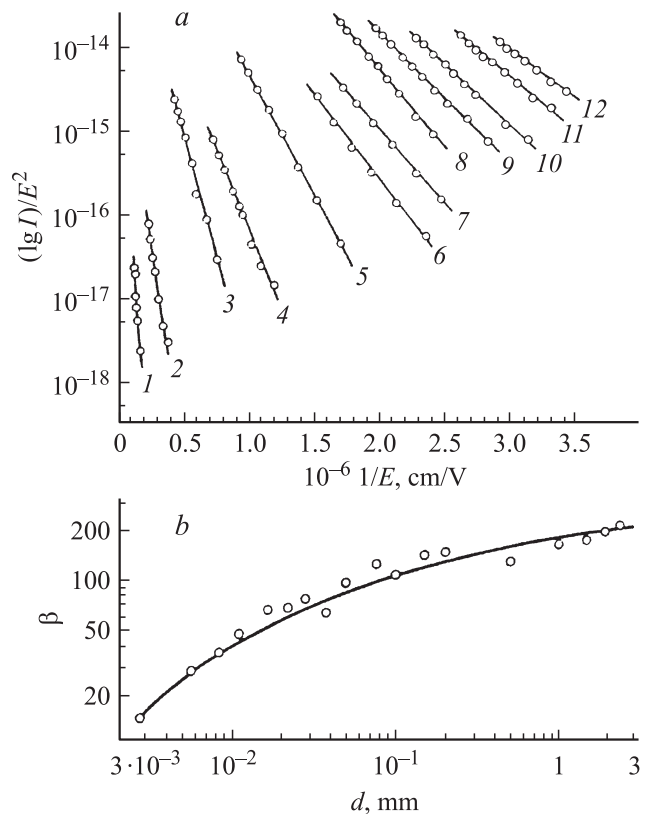


Рис. 3. Характеристики Фаулера–Нордгейма для разных вакуумных промежутков (*a*). Кривые 1–12 соответствуют вакуумным промежуткам от 0.003 до 2.5 мм. *b* — зависимость β от длины вакуумного промежутка из рис. 3, *a*.

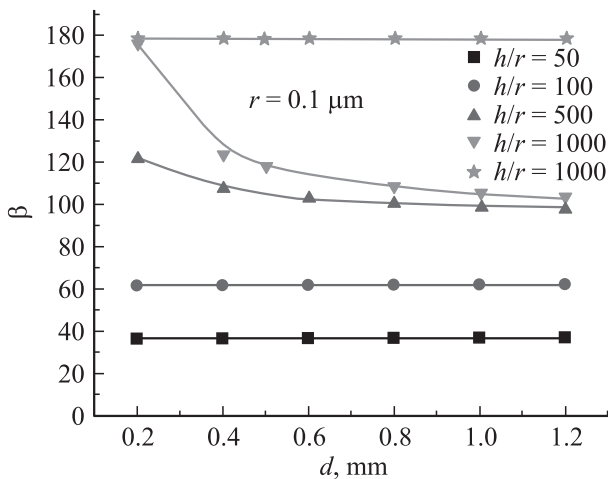


Рис. 4. Расчетные значения β в зависимости от длины вакуумного промежутка. \star — острие без плоскости.

графики ФН для разных вакуумных промежутков представлены на рис. 3, *a* [10,11]. Эти зависимости характерны как для постоянного, так и импульсного напряжений при разных состояниях поверхности электродов (чисто металлических и с пленой оксида).

По наклону характеристик определяют коэффициент β , который сильно зависит от длины вакуумного промежутка (рис. 3, *b*). Наличие семейства графиков ФН также не подтверждает полевую природу предпробойных токов, так как эти графики строятся в зависимости от напряженности поля, т.е. для всех вакуумных промежутков они должны совпадать. Тем более странно, что с удалением предполагаемого острия от анода β значительно увеличивается, достигая значений 10^2 – 10^4 .

Нами были проведены расчеты коэффициента β от длины вакуумного промежутка для острий, располагаемых на плоскости катода. Изменялось расстояние d между острием и анодом (рис. 4).

Используемая программа расчета позволяет воспроизвести значения геометрических параметров острия (в виде цилиндра с радиусом $r = 0.1 \mu\text{m}$) и длины вакуумного промежутка d . Расчеты проводились для разных соотношений h/r : 50, 100, 500, 1000 и для острия в отсутствие плоскости катода (рис. 4). Как видно из графиков, β не увеличивается с удлинением вакуумного промежутка, как это происходит на рис. 3, *b*. Анализируя эти данные, следует отметить, что для используемых значений h/r величины β близки к тем, какие следуют из зависимости $\beta = f(h/r)$ [12]. Для длинных острий, когда наличие плоскости отсутствует, β действительно имеет значения более 10^2 . Для больших острий на плоскости влияние плоскости ослабевает и для $h/r = 500$ β несколько увеличивается для промежутка 0.2 мм. Для $h/r = 1000$ это влияние еще больше ослабевает, однако β также не увеличивается с удлинением вакуумного промежутка [13].

Полученные результаты расчетов дают основание считать, что предпробойные токи не являются полевыми и метод определения β по экспериментальным характеристикам ФН вызывает сомнения. Этим методом пользуются для определения площади предполагаемых острий и работы выхода ϕ . В опубликованных работах эти значения иногда имеют размер атома, а $\phi = 0.3 \text{ V}$, что дает основание авторам сообщать о новых материалах.

В работе Р. Латама [14] также показано, что микроострия не являются причиной нарушения вакуумной электроизоляции, а для ее улучшения необходима очистка высоковольтных электродов, а не сглаживание поверхности электродов [14]. Следует отметить, что наилучшие результаты были получены значительно раньше при использовании чистого материала и тщательной очистке высоковольтных электродов в работах [1–3].

Наличие полевой эмиссии практически не объясняет существующие закономерности вакуумной электроизоляции, такие как зависимость напряжения пробоя от длины вакуумного промежутка, перенос материала электродов в предпробойной стадии с одного электрода на другой, „эффект полного напряжения и тока“, насыщение ВАХ и ее гистерезис, наличие свечения в вакуумном промежутке в предпробойной стадии, влияние газонасыщенности электродов, улучшение характеристик при низком вакууме и т.д. Таким образом, при реально достигнутых уровнях электрической прочности вакуумной изоляции полевая эмиссия не является причиной ее нарушения.

Перечисленные закономерности объясняются гипотезой, предложенной автором [5]. При провисании внешнего поля в дефекты поверхности отрицательного электрода (типа пор) возникают следующие процессы (рис. 5). Согласно работам Тамма о поверхностных состояниях электронов, которые возникают на границе поверхностного раздела твердого тела с вакуумом, а также вследствие адсорбции на внешних поверхностях различных молекул, на этой границе нарушается равновесие при появлении на очень близком расстоянии снаружи потенциала 0.1–1 V. К боковой поверхности поры из объема материала электрода направляются электроны, которые приводят к диссоциации молекул через их возбуждение. Это аналогично процессу резонансной десорбции, когда бомбардировка поверхности

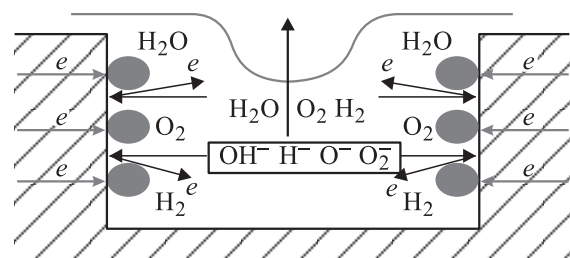


Рис. 5. Схема процессов, возникающих при провисании электрического поля в пору катода.

электронами низкой энергии приводит к интенсивному потоку от поверхности нейтральных адсорбированных молекул и отрицательных ионов, испускаемых из адсорбированных слоев углеводородов, водорода, воды, кислорода и т.д. Например, энергия резонансной десорбции H^- составляет 3.6 eV после того, как на чистую поверхность кристалла наносится слой воды. Другими десорбированными ионами могут быть OH^- , O^- , O_2^- и т.д. [15,16].

Часть отрицательных ионов с боковой поверхности поры направляется к аноду, создавая ток в вакуумном промежутке. Другие ионы бомбардируют противоположную поверхность поры, на которой происходит рекомбинация этих ионов с выделением электронов низкой энергии. Их энергия несколько увеличивается провисающим в пору полем, и процесс резонансной десорбции усиливается за счет бомбардировки этими электронами со стороны вакуума. В предпробойном токе появляется электронная составляющая, при этом предпробойный ток в вакуумном промежутке соответствует линейному участку ВАХ. При рекомбинации отрицательных ионов на поверхности поры происходит воспроизведение адсорбированных слоев, хотя и с некоторыми потерями, т.е. эмиссионные процессы могут быть достаточно стабильными длительное время.

Таким образом, предпробойный ток в вакуумном промежутке должен состоять из отрицательных ионов и электронов на линейном участке ВАХ. Опыт с магнитным полем подтверждает это предположение. Впервые такой опыт был выполнен авторами работы [17] (рис. 6).

Экспонента ВАХ появляется в результате зажигания газового (таусендовского) разряда при провисании в пору эквипотенциали, при которой возможна ионизация газа, десорбированного при резонансной десорбции, и газа из материала электрода, который выделяется в вакуумный промежуток из мест типа пор. При выведении

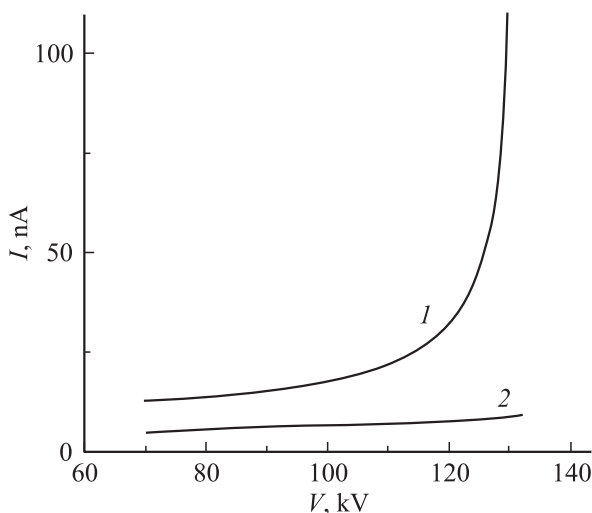


Рис. 6. ВАХ предпробойного тока без магнитного поля (1) и с магнитным полем (2).

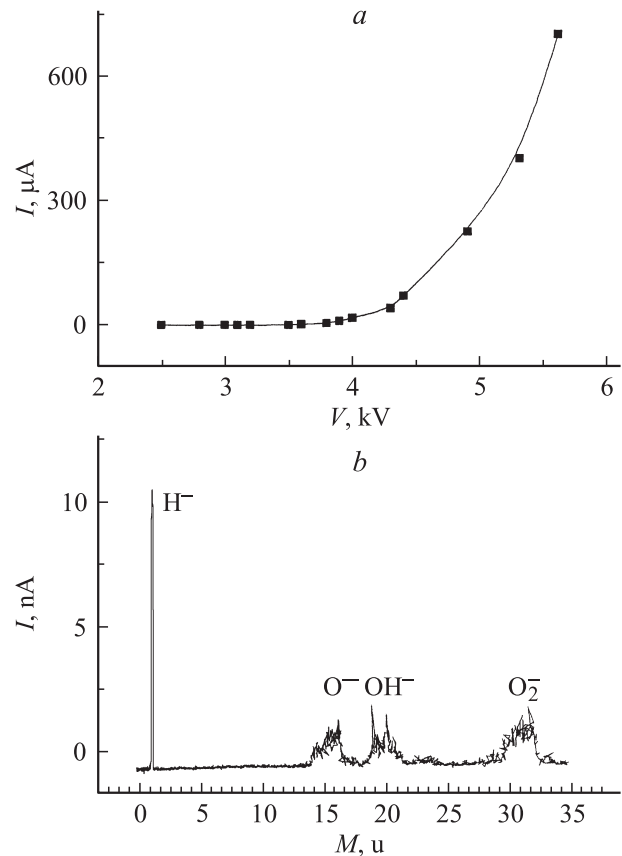


Рис. 7. ВАХ графита МПГ-8 для вакуумного промежутка $d = 2 \text{ mm}$ (a) и спектр отрицательных ионов (b) при напряженностях внешнего поля $E = 3.8 \cdot 10^6 \text{ V/m}$.

электронов из вакуумного промежутка разряд прекращается (рис. 6), т.е. таусендовский разряд в вакуумном промежутке горит при наличии резонансной десорбции и всех процессов в поре. При некоторой плотности тока в вакуумном промежутке разряд переходит в тлеющий, а затем в дугу — пробой вакуумного промежутка. Вышеперечисленные процессы были названы автором пороэмиссией [5].

Для подтверждения этой гипотезы был исследован спектр ионов на установке „Большой монохроматор МИФИ“. На рис. 7 представлены ВАХ исследуемого образца из графита марки МПГ-8 (рис. 7, a) и спектр отрицательных ионов (рис. 7, b), характерных для резонансной десорбции газа [18].

Подтверждением существования газового разряда в вакуумном промежутке является одинаковый вид ВАХ таусендовского разряда в левой кривой Пашена и ВАХ пороэмиссии [18], наличие свечения в предпробойной стадии при постоянном и импульсном напряжении, которое отделено от отрицательного электрода темным пространством, а также наличие анодного свечения и положительных ионов.

Эта гипотеза объясняет существование семейства ВАХ, угол которых определяется степенью провисания

внешнего поля, зависящего от соотношения размеров пор по отношению к длине вакуумного промежутка [5], а также основные закономерности вакуумной электроизоляции, перечисленные выше.

2. Метод увеличения электрической прочности вакуумной электроизоляции

Как отмечалось выше, наиболее эффективный способ улучшения электрической прочности вакуумного промежутка — подавление процессов в дефектах поверхности электродов типа пор, т.е. в первую очередь уменьшение газонасыщенности электродов. Наиболее эффективно это можно сделать с помощью предварительного длительного высокотемпературного прогрева электродов в вакууме. Этот способ не всегда приемлем. Уменьшение газонасыщенности с помощью длительной непрерывной откачки — процесс очень длительный. Однако его можно значительно сократить, если электроды сделать из шариков. У таких электродов увеличивается объемная пористость электродов. Исследование электродов из шариков дало положительный результат [19,20].

Было проведено сравнение электрической прочности вакуумных промежутков с цельнометаллическими электродами, изготовленными по современной технологии (использовались алмазные резцы, электрополировка, предотвращалось запыление электродов) с исследуемы-

ми электродами из шариков диаметром $750\ \mu\text{m}$, снимок поверхности которых представлен на рис. 8.

В качестве критерия электрической прочности использовались ВАХ предпробных токов с ограничением тока до величины, которая существенным образом не влияла на исследуемое состояние электродов. Сравнение ВАХ проводилось после предварительной откачки экспериментального прибора от атмосферы в течение недели.

На рис. 8 показано семейство ВАХ для цельнометаллических электродов — А, для пластин из шариков — В, для катода из шариков и цельнометаллического анода — С.

Электроды А и В имели примерно одну и ту же площадь. Усиление на краях цельнометаллического катода А было меньше, чем для пластин из шариков, так как радиус закругления равнялся $1\ \text{mm}$. Однако это не повлияло на большую разницу электрической прочности в пользу электродов из шариков. Как следует из графиков рис. 8, *a, b* для разных вакуумных промежутков ток $40\ \mu\text{A}$ регистрировался для электродов из шариков при напряжении более чем в 2.5 раза большем, чем для цельнометаллических электродов. Для электродов С, площадь которых была меньше, эта цифра еще более увеличилась. Такой результат является значительным для вакуумной электроизоляции.

Влияние газонасыщенности наглядно видно из графиков рис. 8, *c*. Для вакуумного промежутка в $1\ \text{mm}$ показана ВАХ до (кривая 2) и после (кривая 2') пребывания электродов в течение двух дней при давлении $P = 0.2\ \text{mm Hg}$. Увеличение газонасыщенности привело к заметному увеличению предпробных токов. Действительно, из практики работы с высоковольтными приборами и установками известно, что длительное отключение вакуумных насосов приводит к снижению эффекта предварительной обработки электродов. Степень ухудшения электрической прочности определяется как начальной газонасыщенностью электродов, уровнем вакуума, при котором пребывают электроды, так и длительностью этого пребывания.

Заключение

Наиболее эффективные методы увеличения электрической прочности в вакуумной электроизоляции связаны с подавлением процессов в дефектах поверхности электродов типа пор, которые могут появляться при очень низких величинах напряженности внешнего поля $10^5\ \text{V/m}$. К этим методам относится предварительное облучение электродов ионами инертных газов, ускоренных до нескольких десятков кВ, и сильное обезгаживание электродов. В первом методе резко снижаются процессы резонансной десорбции вследствие появления ловушек для электронов в поверхностном слое. Во втором методе переход к таунсендовскому разряду происходит при более высоком напряжении.

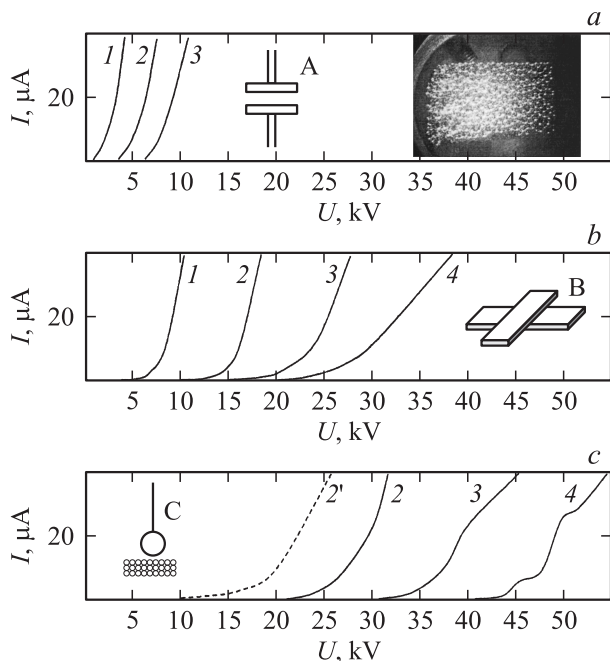


Рис. 8. ВАХ для вакуумных промежутков 0.5 (кривые 1), 1 (2), 1.5 (3) и 2 mm (4). Фотография поверхности электродов и конфигурация электродов. А — электроды цельнометаллические; В — электроды из шариков; С — анод цельнометаллический, катод — пластина из шариков.

Снижение газонасыщенности возможно не только после предварительного прогрева электродов в вакууме и длительной откачки приборов и установок, но при тренировке электродов микропробоями вакуумного промежутка, когда не только уничтожаются различного рода поверхностные инородные включения, которые в сильной степени снижают уровень электрической прочности вакуумного промежутка, но происходит обезгаживание электродов. Этот метод широко используется на практике, хотя он имеет ряд недостатков, так как даже при микропробоях, ограниченных по току, появляются нежелательные кратеры и напыленный пористый слой.

Изготовление электродов из шариков позволяет более быстро снижать газонасыщенность электродов за счет увеличения объемной пористости электродов. Как показали проведенные эксперименты, электрическая прочность вакуумных промежутков значительно увеличивается по сравнению с цельнометаллическими электродами.

Список литературы

- [1] Чистяков П.Н., Радионовский А.Л., Татарина Н.В., Новиков Н.Е., Трещикова Д.С. // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 6. С. 1075–1078. ЖТФ. 1972. Т. 42. Вып. 2. С. 821–825.
- [2] Chistyakov P.N., Radionovski A.L., Tatarinova N.V., Novikov N.E., Theshcikova D.S. // Proc of Vth ISDEIV. 1972. Poland. P. 361–365.
- [3] Чистяков П.Н., Дубинин Н.П. // Известия вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22. Вып. 8. С. 1020–1025.
- [4] Татарина Н.В., Новиков Н.Е. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 9. С. 1567–1569.
- [5] Татарина Н.В. // Вакуумная техника и технология (обзор). 2003. Т. 13. Вып. 1. С. 3–29. (Выставлен на сайте этого журнала на русском и английском языках <http://www.vacuum.ru/cgi-bin/zurnal/go.cgi?rnd=18078618&file=2003-13-1-1807861.pdf> <http://www.vacuum.ru/cgi-bin/zurnal/go.cgi?rnd=9497679&file=2003-13-1-9497679.pdf>)
- [6] Яценко А.Ф., Кулишова Г.Г., Старовойтова Л.Н. // Известия АН СССР. 1988. Т. 52. Вып. 8. С. 1530–1533.
- [7] Tatarinova N.V., Grigoriev Yu.V. // IEEE-Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2. N 2. P. 277–280.
- [8] Латам Р. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. 187 с.
- [9] Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
- [10] Kobayashi S., Xu N.S., Saito Y., Latham R.V. // Proc/ of XVIIIth Intern. Symp. on DEIV, Eindhoven, 1998. P. 56.
- [11] Tsuruta K. // IEEE-Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. 1987. V. 22. P. 77–79.
- [12] Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. Т. 2. С. 191.
- [13] Татарина Н.В., Казиев А.В. // Материалы XVII конф. „Вакуумная наука и техника“. Сочи, 2010. С. 159–162.
- [14] Latham R.V. // Proc. of XXIV ISDEIV. 2010. Germany, P. 1–5.
- [15] Bernheim M., Ting di Wu. // Материалы 10-ой Всесоюз. конф. „Взаимодействие ионов с поверхностью“, М. (Звенигород), 1991. Т. 3. С. 207–214.
- [16] Bernheim M. // Surface Science. 2004. Vol. 566–568. P. 1222–1228.
- [17] Пивовар Л.И., Гордиенко В.И. // ЖТФ. 1958. Т. 28. Вып. 10. С. 2289–2294.
- [18] Татарина Н.В., Синельникова Д.Н. // Материалы XVIII конф. „Вакуумная наука и техника“. Украина (Судак), 2011. С. 158–162.
- [19] Татарина Н.В., Новиков Н.Е. Патент № 2054729. Бюл. № 5. 1996.
- [20] Tatarinova N.V., Sinelnikov D.N. // Proc. of XXIII ISDEIV. Japan, 2008. P. 785–788.