

Краткие сообщения

13

Компенсация заряда изолированной мишени при облучении импульсным электронным пучком в форвакуумной области давлений

© В.А. Бурдовицин, В.С. Гулькина, А.В. Медовник, Е.М. Окс

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия
e-mail: burdov@fet.tusur.ru

(Поступило в Редакцию 22 января 2013 г.)

Представлены результаты расчета временной зависимости ионного потока и потенциала диэлектрической мишени на начальной стадии облучения электронным пучком в форвакууме. Показано, что удовлетворительное согласие с экспериментальными результатами имеет место при учете возможности зажигания разряда между мишенью и заземленными стенками вакуумной камеры.

Введение

Импульсный режим электронно-лучевой модификации, при котором структурно-фазовые изменения происходят лишь в относительно тонком поверхностном слое облучаемого материала, обеспечивает резкое возрастание микротвердости и коррозионной стойкости обрабатываемых изделий [1,2]. Такое эффективное воздействие обусловлено возможностью достижения в импульсном режиме на порядок больших значений плотности тока и мощности в пучке по сравнению с непрерывным режимом. Способность к импульсной эмиссии электронов представляет собой одну из отличительных особенностей и преимуществ плазменных катодов [3]. При этом развитие импульсных форвакуумных источников электронов с плазменным катодом [4], обеспечивающих генерацию пучков при давлениях в десятки Па, позволяет использовать их для обработки диэлектрических материалов, в частности керамики [5]. Возможность такой обработки обусловлена тем, что в области повышенных давлений образующаяся при транспортировке электронного пучка плазма обеспечивает эффективную компенсацию электронного заряда на поверхности диэлектрика таким образом, что установившийся на этой поверхности потенциал оказывается по абсолютной величине много меньше величины ускоряющего напряжения [6]. При рассмотрении механизма установления потенциала непроводящего объекта выясняется, что этот процесс — многофакторный, включающий ряд эффектов. Прямые измерения вклада каждого из них не всегда возможны, что делает целесообразным рассмотрение указанного явления на основе модельных представлений.

Целью настоящей работы являлись экспериментальные исследования и численный анализ процессов, имеющих место при облучении непроводящих объектов импульсным электронным пучком микросекундного диапазона длительностей.

Эксперимент

Эксперимент проводился на установке, подробно описанной в [5]. Генерация импульсного электронного пучка производилась форвакуумным плазменным электронным источником на основе разряда с полым катодом [4]. Электродная система источника (рис. 1) включает в себя следующие основные элементы: полый катод 1, плоский анод 2. Ускоряющий электрод 3, а также магнитная фокусирующая линза 4 представляют собой систему формирования пучка. Электрическое разделение электродов обеспечивается изоляторами 5. Генерация электронного пучка в плазменном источнике осуществлялась сочетанием

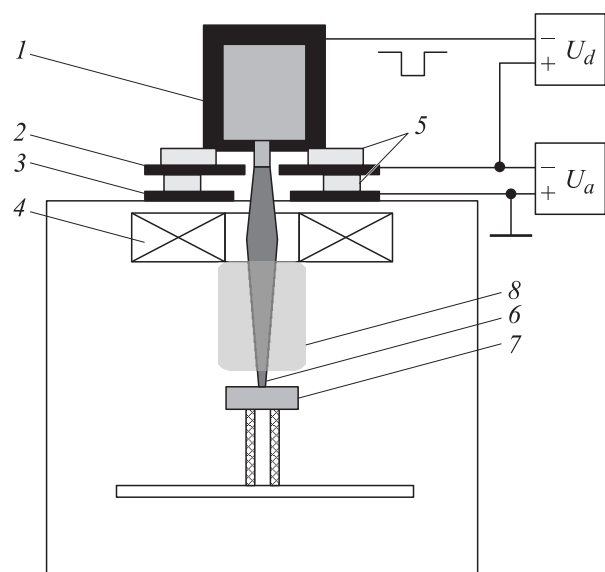


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — полый катод, 2 — анод, 3 — ускоряющий электрод, 4 — магнитная фокусирующая линза, 5 — изоляторы, 6 — электронный пучок, 7 — диэлектрический коллектор, 8 — пучковая плазма.

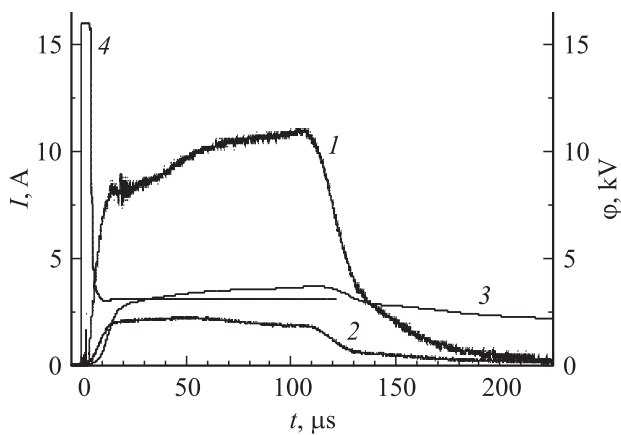


Рис. 2. Характерные осциллограммы импульсов разрядного тока (I), тока эмиссии (2), восстановленных (3) и рассчитанных (4) значений потенциала диэлектрического коллектора. $U_a = 16 \text{ kV}$, $p = 4 \text{ Pa}$.

нием импульсного разряда с постоянным ускоряющим напряжением. Использование постоянного ускоряющего напряжения обеспечивает стабилизацию эмиссионной границы плазмы и генерацию электронного пучка с узким энергетическим спектром.

Ускоренный электронный пучок 6, попадая на диэлектрическую мишень 7, заряжает ее отрицательно. Ионы из плазмы 8, образующейся в области транспортировки пучка, ускоряются отрицательным потенциалом в сторону мишени и, достигая ее поверхности, нейтрализуют наведенный на ней отрицательный заряд. Потенциал ϕ диэлектрической мишени измерялся с помощью косвенных методов, подробно описанных в [6]. В экспериментах при длительности импульсов $120 \mu\text{s}$ и частоте их повторения до 10 pulse/s величина тока разряда изменялась в диапазоне $5\text{--}40 \text{ A}$. При этом ток эмиссии электронов из плазмы составлял от 20 до 30% величины разрядного тока. Диаметр пучка 20 mm . Диаметр мишени, изготовленной из алюмооксидной керамики, составлял 60 mm . Ускоряющее электроны напряжение U_a варьировало от 3 до 17 kV . Давление газа (воздуха) составляло $3\text{--}10 \text{ Pa}$. Характерные осциллограммы импульсов разрядного тока, тока эмиссии, измеренного в цепи источника питания ускоряющего промежутка, а также восстановленный потенциал диэлектрической мишени показаны на рис. 2.

Расчетная модель

Качественные представления о процессах, определяющих поведение изолированной или диэлектрической мишени при облучении электронным пучком, изложены нами ранее в [6,7]. Основная идея состоит в том, что в первый момент облучения мишень заряжается до отрицательного потенциала, равного ускоряющему напряжению электронного источника. Начиная с этого мо-

мента, мишень и заземленная стенка вакуумной камеры представляют собой разрядный промежуток, в котором происходит зажигание тлеющего разряда, а электронный пучок выполняет функцию токового проводника. Развитие разряда занимает несколько микросекунд, в течение которых ток ионов на мишень возрастает и может превысить ток электронного пучка. После этого отрицательный потенциал мишени уменьшается, что сопровождается снижением ионного тока. Результирующий потенциал мишени устанавливается при достижении равенства электронного и ионного токов.

Численное моделирование процесса установления потенциала диэлектрической мишени состояло в имитации последовательности событий, имеющих место на начальной стадии облучения электронным пучком. Задача решалась в одномерном приближении при следующих допущениях. Длительность переднего фронта импульса тока нулевая. Анализируемый промежуток длиной x от мишени до стенки разбивался на элементарные слои одинаковой протяженности Δx . Количество слоев N определялось из условия, чтобы время пролета электрона от мишени к стенке не превышало продолжительности Δt пролета ионом одного элементарного слоя. Эта продолжительность принималась за временной шаг $\Delta t = \frac{\Delta x}{v_i}$, где v_i — скорость иона, определяемая с учетом подвижности и напряженности поля. При используемых давлениях подвижность ионов достаточно низкая, что и объясняет возможность использования вышеприведенных соотношений. На каждом шаге учитывалось образование электронных лавин и положительного заряда ионов, на основании которого из решения уравнения Пуассона рассчитывалось распределение потенциала. Координата, в которой потенциал становился равным потенциалу стенки, принималась за положение плазменной границы. Таким образом, по мере развития разряда плазменная граница сдвигалась от стенки по направлению к мишени. За ионный ток на мишень принимался заряд ионов в слое, примыкающем к мишени, деленный на временной шаг. Потенциал ϕ мишени оценивали из соотношения $\phi = \frac{Q}{C}$, где C — емкость мишени, рассчитанная по ее геометрическим параметрам, Q — заряд, определяемый с учетом поступления на мишень частиц обоих знаков. При определении обеспечиваемого пучком электронного тока I_t на мишень было принято прямоугольное распределение электронов по энергии в пределах 5% диапазона [8]. Это дало возможность реализовать зависимость этого тока от потенциала ϕ коллектора:

$$\begin{cases} I_t = I_b & \text{при } \phi < 0.95U_a, \\ I_t = \frac{I_b(U_a - \phi)}{0.05U_a} & \text{при } 0.95U_a < \phi < U_a, \\ I_t = 0 & \text{при } \phi > U_a, \end{cases} \quad (1)$$

где I_b — ток электронного пучка. Величины ϕ и U_a сравниваются по абсолютной величине.

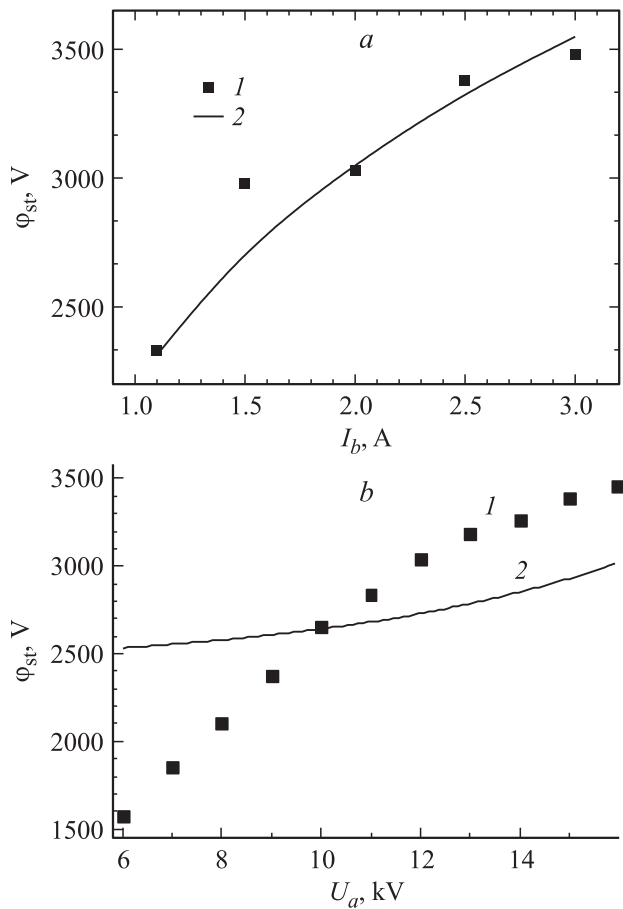


Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости модуля установившегося потенциала мишени от (а) тока пучка ($U_a = 13$ kV, $p = 4$ Pa) и (б) ускоряющего напряжения ($I_b = 2$ A, $p = 4$ Pa).

Результаты расчетов и сравнение с экспериментом

Моделирование процесса установления потенциала диэлектрической мишени при облучении импульсным электронным пучком проводилось в программном пакете Delphi 7 [9]. Расчетная зависимость модуля потенциала мишени от времени приведена на рис. 2 (кривая 4). Сравнение с кривой 3 позволяет утверждать удовлетворительное согласие с экспериментом с учетом того обстоятельства, что методика восстановления потенциала диэлектрической мишени не позволяет заметить скачок потенциала в начале импульса тока. Указанный скачок удавалось наблюдать при измерении потенциала изолированного металлического коллектора [7]. По мере развития разряда потенциал мишени достигает стационарного уровня ϕ_{st} . Аналогичным образом ведет себя и ионный ток на мишень. Расчетные и экспериментальные значения ϕ_{st} приведены на рис. 3. Их сравнение обнаруживает качественное и количественное совпадение. В то же время в эксперименте возрастание модуля ϕ_{st} с увеличением ускоряющего напряжения

происходит сильнее, чем это дает численный анализ. Указанное расхождение может быть связано с тем, что в предложенной модели не учтена возможность внедрения электронов в мишень, что затрудняет нейтрализацию их заряда ионами.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования и численное моделирование процессов установления потенциала диэлектрической мишени при ее облучении импульсным электронным пучком, генерируемым в форвакуумной области давлений. Показано, что в начале импульса тока происходит быстрое (за десятки наносекунд) увеличение абсолютного значения величины отрицательного потенциала мишени, что вызвано накоплением заряда электронов, приносимых пучком. Последующее снижение и установление стационарного значения потенциала обусловлено потоком ионов на мишень, а значительная продолжительность (единицы и десятки микросекунд) этапа установления потенциала мишени обусловлена процессами развития разряда между отрицательно заряженной мишенью и заземленными стенками вакуумной камеры. Расчетные значения установившегося потенциала удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными.

Работа поддержана РФФИ (проект 12-08-33016) и Минобрнауки РФ (проекты № 7.3101.2011 и ФЦП № 12.B37.21.0935).

Список литературы

- [1] Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.B. // Laser Particle Beams. 2003. Vol. 21. N 2. P. 157–174.
- [2] Meisner L.L., Dementyeva M.G., Lotkov A.I., Koval N.N. et al. Proc. Of 10th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. 2010. 19–24 Sept. Tomsk. Russia, P. 269–271.
- [3] Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск. Изд-во науч.-технич. лит-ры, 2005. 221 с.
- [4] Юшков Ю.Г., Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М. // ПТЭ. 2011. Вып. 2. С. 85–88.
- [5] Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Скробов Е.В., Юшков Ю.Г. // Перспективные материалы. 2011. Вып. 6. С. 77–82.
- [6] Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М., Скробов Е.В., Юшков Ю.Г. // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 10. С. 103–108.
- [7] Медовник А.В., Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. // Физика и химия обработки материалов. 2010. Вып. 3. С. 39–44.
- [8] Жирков И.С., Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Осипов И.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 6. С. 106–110.
- [9] Архангельский А.Я. Delphi 7. Справочное пособие. М.: Бином-Пресс, 2003. 1024 с.