

04;10

## **О возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений**

© В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники  
E-mail: burdov@fet.tusur.ru

*В окончательной редакции 22 января 2009 г.*

На основе измерений потенциала изолированной мишени при облучении ее электронным пучком, генерируемым плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений 5–15 Па, показано, что в этих условиях плазма, образующаяся в области транспортировки электронного пучка, обуславливает практически полную нейтрализацию зарядки изолированной мишени. Отмеченная особенность обеспечивает возможность непосредственной электронно-лучевой обработки непроводящих материалов, в том числе плавки и сварки керамических материалов.

PACS: 52.40.Mj

Известно, что электронно-лучевая обработка непроводящих материалов возможна лишь при создании условий для нейтрализации отрицательного заряда, накапливаемого на поверхности обрабатываемого изделия при его бомбардировке ускоренными электронами. Такие условия могут быть реализованы, например, в результате одновременного воздействия на поверхность электронами и ионами, погружения обрабатываемого изделия в плазму или нагрева диэлектрика до температур, при которых появляется заметная электропроводность, обеспечивающая стекание заряда. Обратим внимание на тот факт, что керамические материалы, представляющие, по-видимому, наибольший интерес среди диэлектриков как объект пучковой обработки, приобретают заметную электропроводность при температурах, превышающих 1000°С. Для всех вышеупомянутых случаев требуется, очевидно, привлечение специаль-

ного дополнительного оборудования, приводящего к существенному усложнению, а следовательно, и удорожанию процесса обработки.

Плазменные источники электронов — устройства, основанные на отборе электронов из газоразрядной плазмы, отличаются принципиальной возможностью эффективной работы в области повышенных давлений остаточной газовой среды [1]. Проведенные в последнее время исследования позволили расширить интервал рабочих давлений источников электронов такого типа до так называемого форвакуумного диапазона 5–15 Па [2,3]. В форвакуумных плазменных источниках генерация электронного пучка сопровождается образованием в области его транспортировки плазмы, концентрация которой  $10^{10}–10^{11} \text{ cm}^{-3}$  [4] может оказаться достаточной для эффективной нейтрализации отрицательного заряда, возникающего на поверхности непроводящей мишени под действием пучка электронов. Таким образом, функционирующие в форвакуумной области давлений плазменные источники электронов способны обеспечить возможность электронно-лучевой обработки непроводящих материалов или изолированных мишеней без привлечения специального оборудования и технологий для нейтрализации наведенного на мишени заряда.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном обосновании возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков с использованием плазменного источника электронов, функционирующего в форвакуумной области давлений.

На рис. 1 представлена схема эксперимента, предназначенного для измерения потенциала изолированной мишени при ее облучении электронным пучком в области повышенных давлений. Плазменный источник 1 на основе разряда с полым катодом, специально разработанный для генерации электронного пучка в форвакууме [5], размещался на фланце вакуумной камеры 2. Электронный пучок 3, сфокусированный магнитной линзой 4, направлялся на изолированную мишень 5, потенциал которой измерялся вольтметром 6. Энергия пучка составляла 2–4 keV. Распространяясь в остаточной атмосфере вакуумной камеры, электронный пучок создавал вдоль своей траектории плазму 7. Параллельно с измерениями потенциала мишени производились измерения плавающего потенциала одиночного зонда 8, размещенного в непосредственной близости от мишени. Зонд был снабжен экраном, предотвращающим попадание на него электронов пучка.

Как показали эксперименты, в форвакуумном диапазоне давлений при воздействии электронного пучка на изолированную мишень,

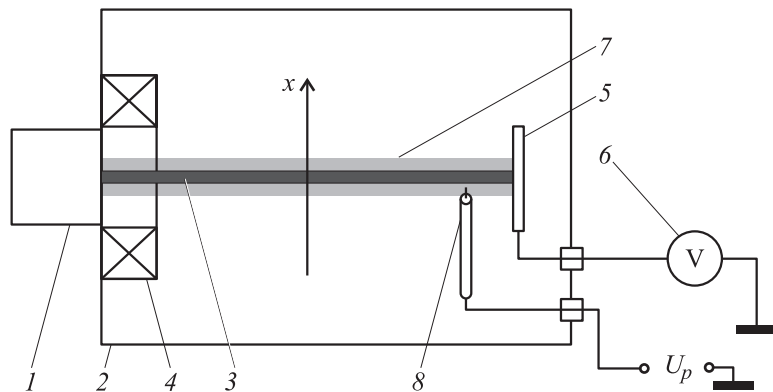
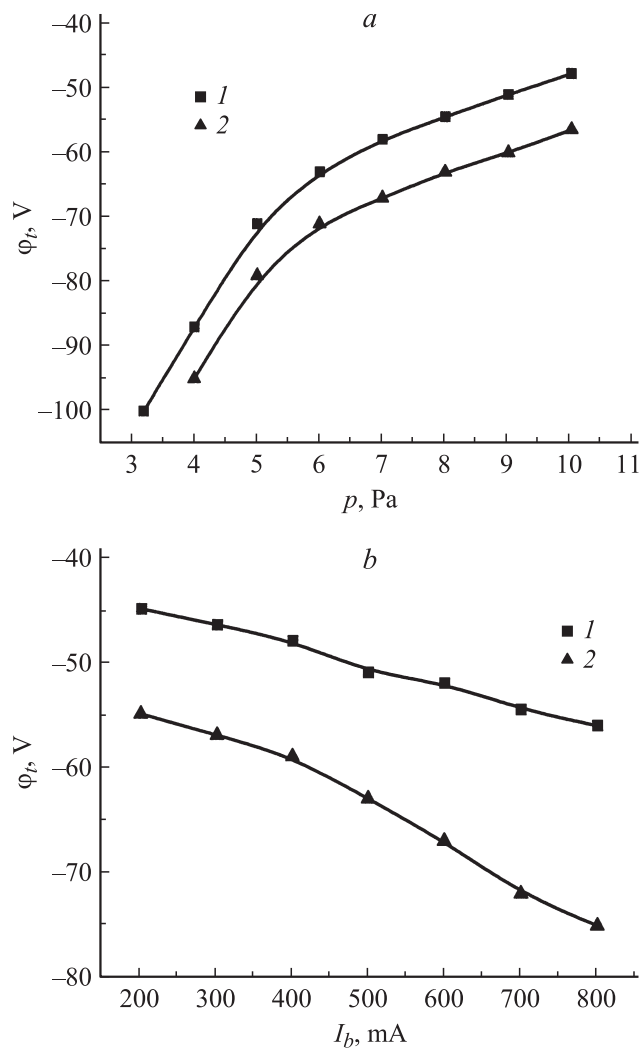


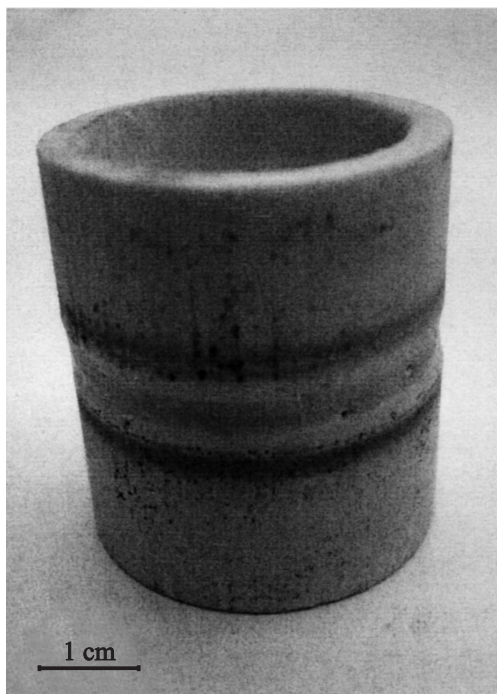
Рис. 1. Схема эксперимента.

несмотря на энергию электронного пучка в несколько keV, „плавающий“ потенциал мишени  $\phi_t$  оказался лишь на несколько десятков вольт ниже потенциала заземленных стенок камеры. Абсолютное значение потенциала  $\phi_t$  несколько возрастает с увеличением тока пучка и снижается по мере увеличения давления (рис. 2, *a* и *b*). Очевидно, что такие значения потенциала изолированной мишени не могут оказать сколь-нибудь заметного влияния на траекторию ускоренных электронов, воздействующих на мишень. Плавающий потенциал  $\phi_f$  зонда 8 (рис. 1) на 3–4 V превышал потенциал мишени. Определенная по зондовой характеристике электронная температура  $T_e$  составила 1–2 eV. Это дало основание оценить потенциал плазмы как  $\phi_p = \phi_f + (2-3)kT_e$ , т.е. потенциал мишени был ниже потенциала плазмы не более чем на 10 V.

Для обоснования механизма установления потенциала мишени  $\phi_t$  могут быть использованы результаты работы [6], в которой теоретически проанализированы и экспериментально проверены возможные пути поступления заряженных частиц на мишень. Согласно [6], потенциал  $\phi_t$  обусловлен балансом зарядов, приносимых на мишень электронным пучком, заряженными частицами плазмы, а также уносимыми вторичными электронами. В традиционной области давлений плазменных источников электронов ( $\sim 10^{-2}$  Pa) концентрация плазмы в области транспортировки ускоренного электронного пучка составляет



**Рис. 2.** Зависимость потенциала изолированной мишени  $\phi_t$  от: *a* — давления  $p$  для токов пучка  $I_b$ : 1 — 400 мА, 2 — 600 мА; *b* — тока пучка  $I_b$  для различных давлений  $p$ : 1 — 4 Па, 2 — 6 Па. Энергия пучка 3 кеВ.



**Рис. 3.** Керамика на основе оксида алюминия, сваренная электронным пучком.

по порядку величины  $n_e \approx 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . Согласно [6], в этих условиях и расчеты и измерения дают значения  $\Delta\varphi = \varphi_t - \varphi_p$ , практически совпадающие с ускоряющим напряжением для электронного пучка. При этом электронный пучок полностью отражается. Повышение давления на два порядка величины при переходе в форвакуумную область функционирования плазменного катода обеспечивает соответствующий рост плотности плазмы (до  $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ) и, как следует из [6], такого роста  $n_e$  оказывается вполне достаточно для практически полной зарядовой нейтрализации пучка на изолированной мишени. Именно эта особенность генерации электронного пучка при относительно высоких давлениях и обуславливает возможность электронно-лучевой обработки непроводящих диэлектрических материалов, в частности керамики.

При работе плазменного источника электронов в форвакуумной области давлений воздействие ускоренного электронного пучка на стекла, кварц и алундовую керамику приводило к локальному плавлению материала в зоне воздействия пучка. В алундовой керамике после затвердевания расплава образовывалась стеклообразная область. В керамических материалах на основе нитрида бора имела место сублимация материала, что позволяло осуществить сверление. Воздействие электронным пучком на область стыка деталей позволило осуществить сварку стекла, кварца и алундовой керамики (рис. 3). Специально проведенные испытания показали, что сварной шов в этой керамике оказалась вакуумно-плотным для давлений до 0.001 Ра. В результате испытаний на разрыв получена прочность от 15 до 30 МПа. Аналогичные измерения для исходной керамики дали значения 40–50 МПа.

Таким образом, генерация плотной плазмы при транспортировке электронного пучка в форвакуумной области давлений обеспечивает практически полную нейтрализацию заряда пучка на изолированной мишени, что дает принципиальную возможность электронно-лучевой обработки изолированных мишеней и непроводящих диэлектриков без специального создания условий для нейтрализации заряда пучка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 08-08-12005-офи.

## Список литературы

- [1] Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 216 с. (*Oks E.M. Plasma Cathode Electron Sources Physics, Technology, Applications. WILEY-VCH, 2006, 172 p.*)
- [2] Бурачевский Ю.А., Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М., Федоров М.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 10. С. 62–65.
- [3] Жирков И.С., Бурдовицин В.А., Окс Е.М. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 9. С. 115–119.
- [4] Жирков И.С., Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Осипов И.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 6. С. 106–110.
- [5] Бурдовицин В.А., Бурачевский Ю.А., Окс Е.М., Федоров М.В. // ПТЭ. 2003. № 2. С. 127–129.
- [6] Мартенс В.Я. // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 6. С. 70–76.