

12

Анализ эффективного анод-катодного зазора в ионном диоде при работе в двухимпульсном режиме

© А.И. Пушкарев, Ю.И. Исакова, И.П. Хайлов

Томский политехнический университет

E-mail: aipush@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 февраля 2014 г.

Представлены результаты исследования эффективного анод-катодного (А-К) зазора в ионном диоде с магнитной самоизоляции при работе в двухимпульсном режиме. В диоде А-К зазор ограничивается плазменным слоем на поверхности анода и дрейфующими электронами вблизи поверхности катода. Выполненный анализ показал, что в течение первого импульса напряжения эффективный А-К зазор сокращается с постоянной скоростью $1.5 \pm 0.1 \text{ cm}/\mu\text{s}$ с 9 до 1–2 mm (в зависимости от длительности первого импульса), полного переключения А-К зазора плазмой не происходит. После изменения полярности напряжения в течение 10–20 ns эффективный зазор восстанавливается до величины, близкой к исходной. Высота слоя дрейфового движения электронов на втором импульсе составляет 1–1.5 mm, толщина плазменного слоя на поверхности анода при этом не превышает 0.5 mm.

Обязательным условием эффективной генерации мощных ионных пучков (МИП) является формирование плотной плазмы на поверхности анода. Обеспечивая генерацию ионного пучка, эта плазма при расширении приводит к сокращению анод-катодного (А-К) зазора и ограничивает время работы диода в режиме генерации МИП. Контроль эффективного А-К зазора позволяет избежать короткого замыкания в диоде и оптимизировать его работу. При организации двухимпульсного режима работы ионного диода с формированием взрывоэмиссионной плазмы на первом импульсе и ускорением ионов на втором импульсе можно добиться максимальной эффективности генерации ионов, подбирая длительность паузы между импульсами [1]. Использование двухимпульсного режима позволяет управлять работой ионного диода, регулировать плотность ионного тока при незначительном изменении ускоряющего напряжения. В двухимпульсном режиме в ионном диоде

с магнитной самоизоляции реализован режим плазмозрозийного размыкателя с увеличением мощности ионного тока за счет сокращения длительности импульса [1].

Анализ ВАХ диода с магнитной самоизоляцией в двухимпульсном режиме показал, что после изменения полярности напряжения на диоде (второй импульс) происходит освобождение А-К промежутка от взрывоэмиссионной плазмы (эффект плазменной эрозии) и при неполном заполнении его плазмой [2]. Но с увеличением длительности первого импульса отмечается рост амплитуды импульса плотности ионного тока и полного тока в диоде на втором импульсе [3], что может быть связано с вкладом анодной плазмы в сокращение А-К зазора. Цель выполненной работы — анализ изменения эффективного А-К зазора ионного диода со взрывоэмиссионным катодом при работе в двухимпульсном режиме.

Исследования выполнены на ускорителе ТЕМП-4М [4] при его работе в одно- и двухимпульсном режимах. Ускоритель ТЕМП-4М в двухимпульсном режиме формирует сдвоенные разнополярные импульсы — первый отрицательный (300–600 ns, 150–200 kV) и второй положительный (120 ns, 250–300 kV). Диагностическое оборудование ускорителя и результаты калибровки подробно рассмотрены в наших работах [2,5]. На рис. 1 приведены характерные осциллограммы ускоряющего напряжения и тока в диоде.

С учетом сокращения А-К зазора при расширении плазменной эмиссионной поверхности электронный ток равен

$$I_e(t) = \frac{4\varepsilon_0\sqrt{2e}}{9\sqrt{m_e}} \frac{U^{3/2}S}{d^2} = \frac{2.33 \cdot 10^{-6}U^{3/2}S_0}{(d_0 - vt)^2}, \quad (1)$$

где U — ускоряющее напряжение, S_0 — рабочая площадь диода, v — скорость расширения плазмы, d_0 — начальный анод-катодный зазор, ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость, m_e , e — масса и заряд электрона.

После изменения полярности напряжения на потенциальном электроде диода в результате эффекта плазменной эрозии величина А-К зазора восстанавливается до первоначальной [6]. При генерации МИП объемный заряд электронов вблизи поверхности заземленного электрода (катод на втором импульсе) частично компенсируется ионами с анода. В А-К зазоре реализуется биполярный поток и плотность электронного тока увеличивается в 1.86 раза [7]. Тогда электронный ток

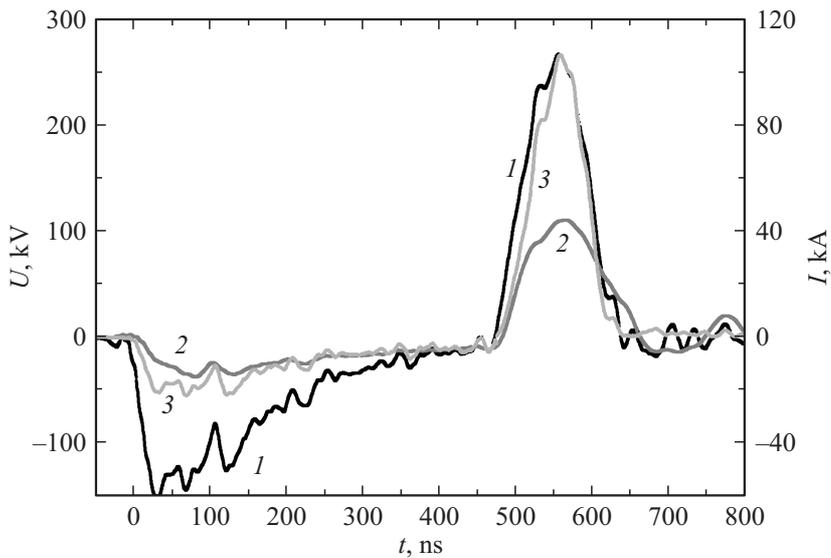


Рис. 1. Осциллограммы ускоряющего напряжения (1) и полного тока в диоде (2). Расчетный ток электронов (3).

в диоде в течение второго импульса равен

$$I_e(t) = \frac{2.33 \cdot 10^{-6} \cdot 1.86U^{3/2}S_0}{[d_0 - v(t - t_0)]^2}, \quad (2)$$

где t_0 — длительность первого импульса ($t_0 = 480$ нс на рис. 1).

В ионном диоде с графитовым катодом 80–85% ионного пучка составляют однократно ионизованные ионы углерода [2]. В режиме ограничения тока объемным зарядом плотность тока ионов C^+ составляет 0.7% плотности электронного тока. Оптимизация конструкции и режима работы ионного диода с магнитной самоизоляции позволила увеличить эффективность генерации МИП в 8–10 раз [2]. Но при этом ионная компонента тока не превышает 10% полного тока диода. Поэтому в пределах точности измерения ВАХ величину эффективного А-К зазора можно контролировать по полному току диода с использованием одномерного соотношения Чайлда–Ленгмюра для электронной

компоненты тока. Тогда изменение эффективного А-К зазора можно рассчитать по соотношениям

$$d_{ef1} = \left(\frac{2.33 \cdot 10^{-6} S_0 U^{3/2}}{I} \right)^{1/2}, \quad d_{ef2} = \left(\frac{1.86 \cdot 2.33 \cdot 10^{-6} S_{cr} U^{3/2}}{I} \right)^{1/2},$$

где d_{ef1} и d_{ef2} — эффективный зазор на первом и втором импульсах соответственно, S_{cr} — критическая площадь катода, I — полный ток в диоде.

В исследуемых конструкциях диодов в течение генерации МИП (второй импульс) происходит образование виртуального катода [8], подавление ускорения электронов из плазмы под виртуальным катодом и, как следствие, уменьшение электронного тока по сравнению с расчетным по соотношению (2), см. рис. 1. Поэтому при расчете эффективного А-К зазора на втором импульсе нужно учитывать не всю рабочую поверхность катода, а только площадь эмиссии электронов.

Площадь области катода, с которой происходит эмиссия электронов (критическая площадь), можно рассчитать как отношение общего тока к плотности электронного тока при его ограничении объемным зарядом (см. соотношение 1). Ее можно определить при работе ионного диода в одноимпульсном режиме. В этом режиме предварительный разрядник срабатывает только после пробоя основного разрядника, предотвращая поступление напряжения на анод диода. Поэтому к моменту прихода ускоряющего импульса напряжения положительной полярности на диод анодная плазма отсутствует и не влияет на полный ток в диоде, который определяется только электронным током с катода. Отсутствие плазмы на поверхности анода в этом режиме подтверждается отсутствием ионного тока (по показаниям коллимированного цилиндра Фарадея и по тепловизионной диагностике). На рис. 2 показаны осциллограмма ускоряющего напряжения при работе диода в одноимпульсном режиме и изменение критической площади при разных начальных А-К зазорах. Выполненные исследования показали, что критическая площадь катода в 2–2.5 раза меньше его геометрической площади.

На рис. 3 показаны осциллограмма ускоряющего напряжения и значения эффективного А-К зазора в полосковом фокусирующем диоде при работе в двухимпульсном режиме. Величина начального А-К зазора составляла 9 мм. Уменьшение эффективного А-К зазора в течение первого импульса с постоянной скоростью (диод работает в режиме

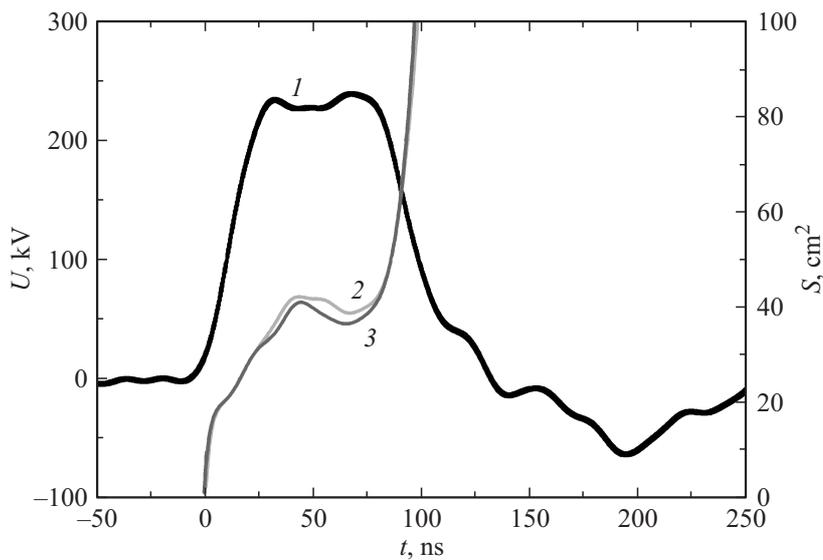


Рис. 2. Осциллограмма ускоряющего напряжения (1) и изменение критической площади при А-К зазоре 6 мм (2) и 7 мм (3).

генерации электронного пучка) аналогично данным, приведенным в работе [9] для электронного диода.

Выполненные исследования показали, что в течение генерации МИП величина эффективного А-К зазора составляет 7–8 мм. Дополнительным подтверждением корректности выполненных расчетов эффективного А-К зазора является анализ работы ионного диода при заземлении катода с двух концов. При этом диод работает без магнитной самоизоляции электронов. Экспериментальные значения максимального полного тока диода на втором импульсе совпадали с расчетными по соотношению (2). Эффективный А-К зазор в полосковом плоском диоде в этом режиме на первом импульсе снижался с постоянной скоростью $1.5 \pm 0.1 \text{ cm}/\mu\text{s}$ до 1–2 мм, а на втором импульсе составлял 7–8 мм.

В диоде с магнитной изоляцией электронов эффективный А-К зазор ограничивается не только плазменным слоем на поверхности анода, но и дрейфующими электронами вблизи поверхности катода. Высота трохида дрейфового движения электронов в скрещенных

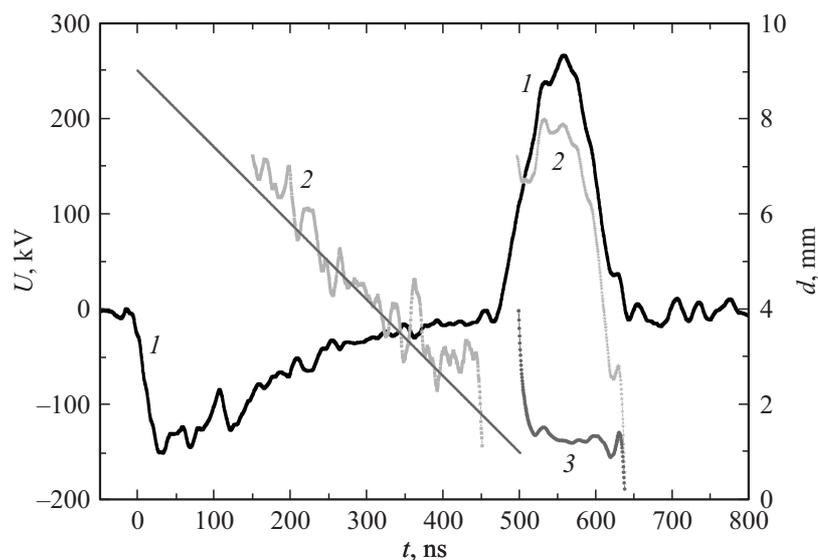


Рис. 3. Осциллограмма ускоряющего напряжения (1), изменение эффективного А-К зазора (2) и толщины слоя дрейфа электронов (3).

электрическом и магнитном полях в диоде с магнитной изоляцией на втором импульсе равна [2]

$$\Delta_2(t) = \frac{2m_e E}{eB^2} = \frac{2m_e U(t)}{e[d_0 - v(t - t_0)]B(x, t)^2},$$

где B — магнитная индукция в А-К зазоре, E — напряженность электрического поля.

Расчет распределения магнитной индукции в А-К зазоре выполнен по программе ELCUT с учетом демпфирования магнитного поля материалом анода. Результаты моделирования изменения толщины слоя дрейфового движения электронов при генерации МИП показаны на рис. 3.

Эффект удаления плазмы из А-К зазора при приложении импульсного электрического поля (англ. plasma erosion) хорошо известен и используется в плазмозероционных размыкателях. Время удаления

плазмы из А-К зазора при приложении импульсного электрического поля равно [10], s:

$$\tau = \frac{en_0 S d}{I},$$

где n_0 — концентрация плазмы, m^{-3} ; S — площадь диода, m^2 ; d — А-К зазор, m ; I — ток, A .

При средней концентрации плазмы в А-К зазоре $(1-3) \cdot 10^{13} cm^{-3}$ [11], площади диода $100 cm^2$, А-К зазоре $9 mm$ и токе $20 kA$ время эрозии плазмы составит $10-20 ns$, что соответствует экспериментальным данным продолжительности роста эффективного А-К зазора диода после изменения полярности напряжения (рис. 3).

Выполненный анализ показал, что в течение первого импульса напряжения величина эффективного А-К зазора сокращается с постоянной скоростью $1.5 \pm 0.1 cm/\mu s$ до $1-2 mm$ (в зависимости от длительности первого импульса). В отличие от плазмоэрозионных размыкателей, в ионном диоде с магнитной самоизоляцией в течение первого импульса не происходит полного перемирания А-К зазора плазмой. После изменения полярности напряжения в результате плазменной эрозии эффективный зазор за $10-20 ns$ восстанавливается до величины, близкой к исходной. В дальнейшем, в течение генерации МИП величина эффективного А-К зазора составляет $7-8 mm$. Толщина плазменного слоя на поверхности анода при этом не превышает $0.5 mm$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 12-08-00118-а.

Список литературы

- [1] Ремнев Г.Е. Получение мощных ионных пучков для технологических целей: Автореф. дис. д-ра техн. наук. Томск, 1994.
- [2] Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., Сазонов Р.В., Холодная Г.Е. Генерация пучков заряженных частиц в диодах со взрывоэмиссионным катодом. М.: Физматлит, 2013. 240 с.
- [3] Pushkarev A., Isakova Yu., Vahrushev D. // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 123 112.
- [4] Pushkarev A.I., Isakova Yu.I. // Surface & Coatings Technology. 2013. V. 228. P. S382.
- [5] Isakova Yu.I. // J. Korean Physical Society. 2011. V. 59. N 6. P. 3531.

- [6] *Pushkarev A.I., Isakova J.I., Saltimakov M.S., Sazonov R.V.* // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 013 104.
- [7] *Werner Z., Piekoszewski J., Szymczyk W.* // Vacuum. 2001. V. 63. P. 701.
- [8] *Pushkarev A.I., Isakova Yu.I., Guselnikov V.I.* // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. P. 083 109.
- [9] *Schneider R., Stallings C., Cummings D.* // J. Vac. Sci. Tech. 1975. V. 12. P. 1191.
- [10] *Humphries S.* Charged Particle Beams. Wiley, New York, 1990. 847 p.
- [11] *Vekselman V., Gleizer J., Krasik Ya. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 081 503.