

12

Анализ концентрации дрейфующих электронов в ионном диоде с магнитной самоизоляцией

© А.И. Пушкарев, В.Г. Пак

Томский политехнический университет
E-mail: aipush@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 июля 2014 г.

Представлены результаты анализа концентрации дрейфующих электронов в ионном диоде с магнитной самоизоляцией. Исследования выполнены на ускорителе ТЕМП-4М в режиме формирования сдвоенных разнополярных импульсов — первый отрицательный (300–600 ns, 150–200 kV) и второй положительный (120 ns, 250–300 kV). Показано, что концентрация электронов в области дрейфа составляет 10^{13} – 10^{14} см⁻³. Получено, что сила Лоренца, действующая на электроны в скрещенном электрическом и магнитном полях, в 150–200 раз больше силы их кулоновского расталкивания. Это обеспечивает их большую концентрацию в области дрейфа, превышающую концентрацию в области пространственного заряда.

Высокая эффективность генерации мощных ионных пучков (МИП) в диодах с магнитной изоляцией обеспечивается в основном за счет подавления электронной компоненты биполярного потока в А-К-промежутке диода. В ионном диоде с магнитной самоизоляцией катод соединен с корпусом камеры только с одной стороны, консольно. При генерации МИП электроны эмитируются с поверхности катода и при движении от точки крепления до точки эмиссии формируют магнитное поле самоизоляции, вектор магнитной индукции которого в А-К-зазоре перпендикулярен вектору напряженности электрического поля. В скрещенных электрическом и магнитном полях под действием силы Лоренца электроны меняют направление движения от поперечного (с катода на анод) к продольному вдоль катода к свободному концу диода.

Концентрация электронов в области дрейфа ионного диода с магнитной изоляцией определяет режим его работы, но она исследована

недостаточно полно. При высокой концентрации электронов в области дрейфа они могут образовать виртуальный катод, и ускорение ионов происходит в эффективном А-К-зазоре: плазменный слой на поверхности анода — виртуальный катод из дрейфующих электронов [1]. При малой толщине области дрейфа дрейфующие электроны формируют магнитное поле самоизоляции в эффективном А-К-зазоре, повышая однородность магнитного поля вдоль диода [2]. В ионном диоде с внешней магнитной изоляцией с двумя соосными цилиндрическими катодами (barrel diode) авторы оценивают среднюю концентрацию дрейфующих электронов $6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ [3]. Плотность ионного тока (70% H^+) при этом составляла 100 A/cm^2 при энергии ускоренных протонов 350 keV . Но в этом случае концентрация протонов составляет $\approx 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, что выше концентрации электронов в виртуальном экстрагирующем катоде. Близкие условия по транспортировке электронов реализуются при пинчевании электронного пучка. При ускоряющем напряжении 1 MV и начальной плотности электронного пучка $\sim 100 \text{ kA}$ происходит сжатие пучка до плотности более 1 MA/cm^2 [4]. В пинч-диоде (rod-pinch diode) при ускоряющем напряжении $1\text{--}2 \text{ MV}$, полном токе $30\text{--}70 \text{ kA}$ и длительности импульса 70 ns (ускоритель Gamble II) плотность электронного тока вблизи конусного анода превышает 10^6 A/cm^2 . При энергии электрона более 1 MeV его скорость близка к скорости света. Тогда концентрация электронов в области пинчевания составляет $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Авторами работы [6] при ускоряющем напряжении 1.8 MV , полном токе в пинч-диоде 35 kA и длительности импульса 80 ns на вершине стержневого анода получена плотность электронного тока пучка $2.5 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$, что соответствует концентрации электронов $5.2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Цель выполненных исследований — определение концентрации электронов в области дрейфа ионного диода с магнитной самоизоляцией.

Исследования выполнены на ускорителе ТЕМП-4М [7] в режиме формирования сдвоенных разнополярных импульсов: первый, плазмообразующий — отрицательный ($300\text{--}600 \text{ ns}$, $150\text{--}200 \text{ kV}$) и второй, генерирующий — положительный (120 ns , $250\text{--}300 \text{ kV}$). Полный ток в диоде составляет $50\text{--}60 \text{ kA}$. Диагностическое оборудование ускорителя ТЕМП-4М и результаты калибровки подробно рассмотрены в наших работах [8,9].

При условии, что полный ток диода равен току дрейфующих электронов (ионный ток мал и электроны не покидают область дрей-

фа), концентрацию дрейфующих электронов n_{dr} можно рассчитать из соотношения

$$n_{dr}(t) = \frac{I(t)}{S_{dr} e v_{dr}(t)} = \frac{I(t)}{e h \Delta(t) v_{dr}(t)},$$

где S_{dr} — сечение области дрейфа ($S_{dr} = h\Delta$), h — ширина диода, Δ — толщина слоя дрейфа.

При расчете скорости дрейфа электронов в диоде со взрывоэмиссионным катодом при генерации ионного пучка в двухимпульсном режиме необходимо учитывать сокращение А-К-зазора за счет расширения плазмы и эффект плазменного сжатия при изменении полярности ускоряющего напряжения [10]. Скорость дрейфа электронов в скрещенном электрическом и магнитном поле равна [11]:

$$v_{dp}(t) = \frac{E}{B} = \frac{U(t)}{d(t)B(t)} = \frac{U(t)}{[d_0 - v(t - t_0)]B(t)},$$

где E — напряженность электрического поля, d_0 — А-К-зазор, B — магнитная индукция, t_0 — длительность первого импульса ($t_0 = 520$ ns на рис. 1), v — скорость расширения плазмы.

Толщина слоя дрейфа электронов соответствует высоте трохиоды дрейфового движения электронов и равна двум ларморовским радиусам электрона [11]:

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

На рис. 1 показаны изменение высоты трохиоды дрейфового движения электронов и изменение средней концентрации электронов в области дрейфа в течение генерации ионного пучка. Расчет распределения магнитной индукции в А-К-зазоре выполнен по программе ELCUT [12] с учетом демпфирования магнитного поля материалом анода.

Для оценки толщины слоя дрейфующих электронов также можно использовать соотношение [4]

$$\Delta = d \left(\frac{B_{cr}}{B} \right)^2.$$

В ионном диоде с магнитной самоизоляцией в течение более 90% времени генерации ионного пучка магнитная индукция в А-К-зазоре

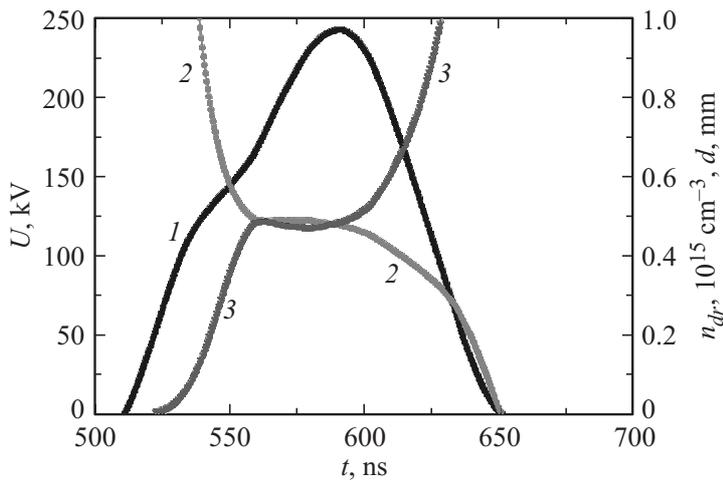


Рис. 1. Осциллограмма ускоряющего напряжения, второй импульс (1), изменение высоты трохида дрейфового движения электронов (2) и концентрации электронов в области дрейфа (3).

в 3.5–4 раза превышает критическую магнитную индукцию B_{cr} [10]. Тогда при А-К-зазоре 8 мм высота слоя дрейфа электронов составит 0.5 мм. В ионном диоде с внешней магнитной изоляцией (300 кВ, 40 кА, 80 нс) толщина области дрейфа электронов составляет 0.5–0.7 мм при А-К-зазоре 8 мм [3]. При высоте трохида менее 0.5 мм и А-К-зазоре 8 мм кинетическая энергия электронов не превышает 16 кеВ.

Расчет высоты трохида дрейфового движения электронов выполнен в предположении постоянства полей, т.е. без учета изменения ускоряющего напряжения и полного тока диода в течение периода трохида. При магнитной индукции 1 Т период трохида составит $3.6 \cdot 10^{-11}$ с. Отношение скорости изменения ускоряющего напряжения к его величине (а также скорости изменения полного тока диода к его величине) в наших экспериментальных условиях не превышает $3 \cdot 10^7$ с $^{-1}$. Это обеспечивает изменение напряженности электрического поля и магнитной индукции за период трохида не более чем на 0.1%. Поэтому изменение электрического и магнитного полей при расчете высоты трохида не вносит существенной погрешности.

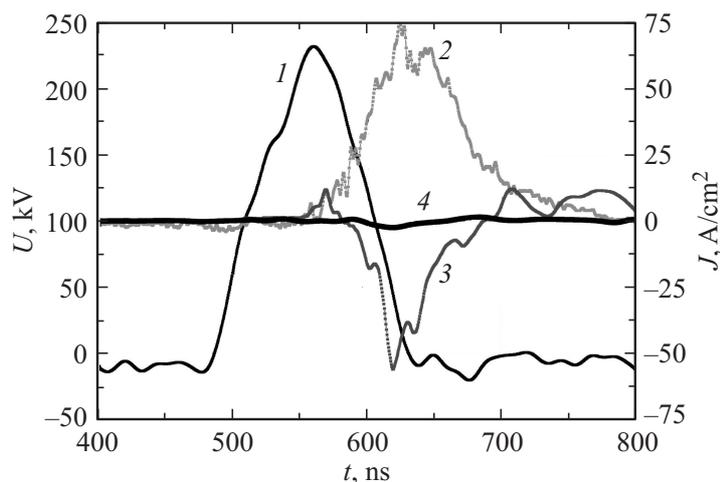


Рис. 2. Осциллограмма ускоряющего напряжения, второй импульс (I), изменение плотности ионного (I) и компенсированного тока МИП (I). Плотность тока, измеренного ЦФО, закрытым Al-фольгой толщиной $10\ \mu\text{m}$ (I).

Полученные значения концентрации электронов в области дрейфа являются верхней границей, так как не учитывают потери электронов при дрейфе вдоль диода и вклад ионов в полный ток диода. В ионном диоде с магнитной самоизоляцией ускорение ионов происходит между слоем взрывоэмиссионной плазмы на поверхности анода и слоем дрейфующих электронов у поверхности катода. При плотности ионного тока $40\text{--}80\ \text{A/cm}^2$ и ускоряющем напряжении $250\ \text{kV}$ концентрация однократно ионизированных ионов углерода составляет $(1.3\text{--}2.5) \cdot 10^{12}\ \text{cm}^{-3}$. Эти ионы проходят плотный слой дрейфующих низкоэнергетических электронов, что обеспечивает эффективную нейтрализацию МИП. Для измерения зарядовой нейтрализации МИП мы использовали цилиндр Фарадея без отсечки электронов (ЦФО). ЦФО выполнен из разъема СР50-812ФВ, диаметр коллектора составлял $8\ \text{mm}$, диаметр коллимирующего отверстия в крышке — $4\ \text{mm}$. Плотность ионного тока измеряли коллимированным цилиндром Фарадея с магнитной отсечкой электронов ($B = 0.4\ \text{T}$). Осциллограммы сигналов с цилиндров Фарадея приведены на рис. 2.

Выполненные исследования показали, что в полосковом диоде с магнитной самоизоляцией концентрация электронов в 2–2.5 раза превышает концентрацию ионов (при равной концентрации суммарный ток, регистрируемый цилиндром Фарадея без отсечки электронов, равен нулю). Концентрация низкоэнергетичных электронов, нейтрализующих положительный заряд ионов пучка, в этом случае составляет $(2.5 - 6) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Так как эти электроны покинули область дрейфа, но магнитная самоизоляция электронов сохраняется по всей длине диода, концентрация дрейфующих электронов должна превышать 10^{13} см^{-3} .

Большая концентрация электронов в области дрейфа обусловлена тем, что сила кулоновского расталкивания электронов значительно меньше силы Лоренца, обеспечивающей движение электронов по троходе. Сила Кулона при отталкивании двух электронов равна

$$F_K = \frac{9 \cdot 10^9 e^2}{r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 e^2}{n_{dr}^{2/3}},$$

где e — заряд электрона, r — расстояние между электронами ($r \approx (n_{dr})^{1/3}$).

Сила Лоренца равна

$$F_m = ev_{dr}B.$$

На электрон, находящийся в электрическом поле, действует сила Ампера

$$F_A = eE = \frac{eU}{d} = ev_{dr}B = F_m.$$

На рис. 3 показано изменение сил, действующих на дрейфующие электроны в течение генерации ионного пучка. Средняя величина силы Кулона рассчитана в модели парного взаимодействия и относится к электронам, которые находятся на внешней границе области дрейфа. В объеме области дрейфа концентрация электронов высокая, и кулоновское взаимодействие с объемным зарядом всех других электронов значительно снижает силу отталкивания за счет взаимной компенсации. На рис. 3 приведены мгновенные значения силы Ампера и значения силы Лоренца, усредненные за период трохоиды.

Выполненный анализ показал, что в ионном диоде с магнитной самоизоляцией сила, действующая на электроны в скрещенном электрическом и магнитном полях, в 150–200 раз больше силы их кулоновского

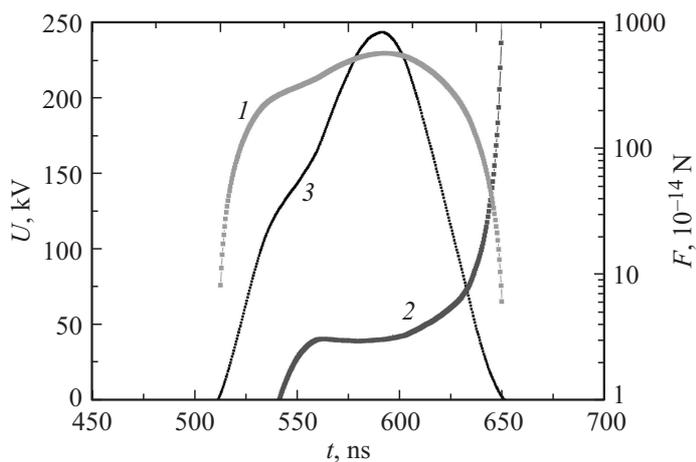


Рис. 3. Изменение силы Лоренца, силы Ампера (1) и силы Кулона (2), действующих на электроны в области дрейфа в течение генерации ионного пучка. Ускоряющее напряжение, второй импульс (3).

расталкивания. Это обеспечивает их большую концентрацию в области дрейфа, превышающую 10^{13} cm^{-3} .

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания „Наука“, проект № 2159.

Список литературы

- [1] Пушкарёв А.И., Исакова Ю.И., Хайлов И.П. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40 В. 13. С. 10–17.
- [2] Pushkarev A.I., Isakova Yu.I., Gusevnikov V.I. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. P. 083 109.
- [3] Фурман Э.Г., Степанов Ф.И., Фурман Н.Ж. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 5. С. 86–95.
- [4] Humphries S. Charged Particle Beams. New York: Wiley, 1990. 847 p.
- [5] Cooperstein G., Boller J.R., Comisso R.J., Hinshelwood D.D., Mosher D., Ottinger P.F., Schumer J.W., Stephanakis S.J., Swanekamp S.B., Weber B.V., Young F.C. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. Iss. 10. P. 4618

- [6] Yi Gao, Aici Qiu, Zhong Zhang, Pengfei Zhang, Zhiguo Wang, Hailiang Yang // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 073 108.
- [7] Pushkarev A.I., Isakova Yu.I. // Surface and Coatings Technology. 2013. V. 228. Suppl. 1. P. S382.
- [8] 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.
- [9] Isakova Yu.I. // J. Korean Physical Society. 2011. V. 59. N. 6. P. 3531.
- [10] Pushkarev A.I., Isakova J.I., Saltimakov M.S. Sazonov R.V. // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 013 104.
- [11] Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Учебн. пособие. М: Наука, 1976. 224 с.
- [12] ELCUT 5.5. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Санкт-Петербург, 2007.