

ФОРМИРОВАНИЕ СРЭП В ОБРАЩЕННОМ КОАКСИАЛЬНОМ ДИОДЕ С МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

И. И. Винтизенко, П. Я. Исаков, А. С. Сулакшин, В. И. Цветков, А. С. Шлапаковский

В работе рассмотрены вопросы формирования сильноточных релятивистских электронных пучков в обращенных коаксиальных диодах с магнитной изоляцией. Проведены аналитические и численные оценки величины тока, формируемого обращенным диодом. Результаты сопоставлены с данными экспериментальных измерений. Рассмотрены факторы, влияющие на длительность импульса напряжения в подобном диоде.

Интерес к обращенным коаксиальным диодам с магнитной изоляцией (ОКДМИ), успешно применяемым ранее для генерации интенсивных ионных потоков [1, 2], в настоящее время обусловлен возможностью получения с их помощью сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП) с заметно увеличенной (в 3—4 раза) по сравнению с обычными КДМИ длительностью импульса тока [3, 4].

В данной работе описаны результаты исследования особенностей формирования СРЭП микросекундной длительности в ОКДМИ.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Дискový катод толщиной 2 мм находится

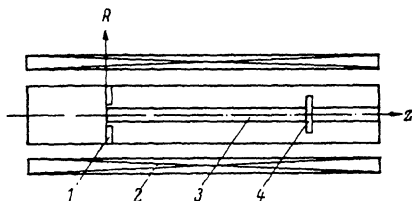
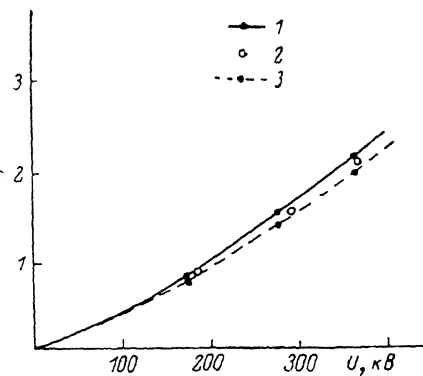


Рис. 1. Схема обращенного диода с магнитной изоляцией.

1 — катод, 2 — магнитная система, 3 — анод, 4 — коллектор.

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диода.

1 — расчет, 2 — эксперимент, 3 — аналитический расчет. Диаметр катода 46, анода — 16 мм.



под нулевым потенциалом и установлен внутри трубы диаметром 180 мм. Центральный электрод — анод — соединен с генератором импульсных напряжений (ГИН) ускорительного комплекса «Луч» [5], формирующим импульсы напряжений положительной полярности амплитудой 200—400 кВ микросекундного диапазона длительностей. На аноде установлен коллектор электронов, внешний диаметр которого превышает диаметр электронного пучка. Максимально длина пространства дрейфа составляла 300 мм и могла изменяться приближением коллектора к области инжекции. Вся система помещена в однородное магнитное поле с индукцией до 0.7 Тл.

Исследовались четыре геометрии диода с неизменным анодом диаметром 16 мм и катодами диаметрами 26, 36, 46, 56 мм. Диаметр коллектора 70 мм. Эксперименты проведены при трех значениях зарядного напряжения ГИНа. Электрические параметры диода определялись в момент выхода осциллограммы напряжения на максимум.

Для указанных геометрий диода строились вольт-амперные характеристики (ВАХ), одна из которых приведена на рис. 2.

На этом же рисунке построена ВАХ, полученная в результате численного моделирования процесса формирования электронного пучка в ОКДМИ методом «трубок тока» [6].

Численный эксперимент проводился по следующей схеме: на катодной поверхности выделяется зона эмиссии и в предположении неограниченной эмиссионной способности катода по закону «3/2» находится плотность тока J для каждого элементарного фронта, на которые разбит весь эмиттер. Электростатический потенциал ϕ в области транспортировки определяется с помощью уравнения Пуассона

$$\Delta\phi = 4\pi\rho,$$

где ρ — объемная плотность пространственного заряда.

Анализ численных результатов позволяет сделать следующие выводы. Эмиссия электронов происходит как с внутренней, так и с боковой поверхности катода, обращенной в сторону коллектора. Характерная зависимость распределения плотности электронного тока

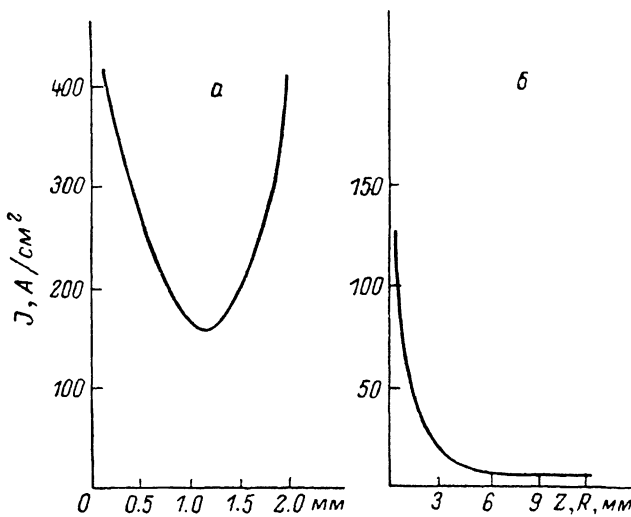


Рис. 3. Распределение плотности тока на внутренней (а) и боковой (б) поверхностях катода.

вдоль этих поверхностей приведена на рис. 3. Получаемый электронный пучок имеет выраженную трубчатую структуру. Толщина пучка 6—7 мм, а его средний диаметр совпадает с внутренним диаметром катода. Соотношение величин продольной и поперечной скоростей электронов имеет тот же порядок, что и в обычном прямом КДМИ ($v_{\perp}/v_{\parallel} \sim 0.1 \div 0.2$). Как следует из рис. 2, наблюдается хорошее соответствие экспериментально измеренных и рассчитанных численно величин тока.

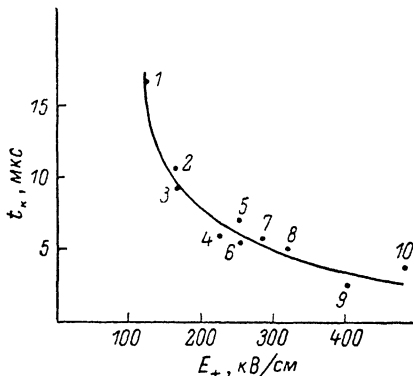


Рис. 4. Зависимость времени коммутации диода t_k от напряженности электрического поля на аноде (эксперимент) E_+ .

Амплитудные значения тока (кА): 1 — 0.36, 2 — 0.4, 3 — 0.7, 4 — 1.2, 5 — 0.8, 6 — 1.7, 7 — 0.29, 8 — 0.6, 9 — 4, 10 — 2.4.

гая бесконечность катода в отрицательном направлении оси Z , внешней трубы в положительном направлении и анода в обоих направлениях, получим для тонкого пучка

$$I_{\text{инж}} = \frac{mc^3}{e} \frac{(\gamma_R^r - \gamma_b) \sqrt{1 - \gamma_b^{-2}}}{2 \ln D_K/D_A}, \quad (1)$$

где

$$\gamma_b = \sqrt{2\gamma_R + 0.25} - 0.5, \quad \gamma_R = 1 + eU_A/mc^2,$$

e , m — заряд и масса электрона; c — скорость света; U_A — приложенное напряжение; D_A , D_K — диаметры анода и катода. Отметим, что полученное выражение, за исключением дроби

под знаком логарифма, практически идентично соответствующему выражению для прямого диода [7]. Результаты вычислений по формуле (1) также приведены на рис. 2.

Для этих геометрий коаксиальных диодов интегрированием $\int_0^{t_{\text{к}}} UI dt$ осциллограмм напряжения U и тока I определялась величина энергии электронного пучка.

Расчеты показывают следующее. При низком зарядном напряжении генератора (напряжение на диоде $U \sim 170$ кВ) коэффициент передачи энергии от ГИНа в электронный пучок достигает 40 %. При увеличении зарядного напряжения ($U \sim 270$ кВ) энергосодержание электронного пучка увеличивается, однако коэффициент передачи снижается до 30 %, а при $U \sim 360$ кВ — до 25 %. По-видимому, с увеличением напряжения возрастают паразитные токи утечки на центральные электроды электронной пушки и высоковольтного ввода.

Зависимость энергии электронного пучка, формируемого ОКДМИ, от величины межэлектродного зазора имеет резонансный характер. При малой величине межэлектродного зазора, когда сопротивление диода мало, большие потери энергии, запасаемой в ГИНе, происходят на его собственном внутреннем сопротивлении (в нашем случае ~ 18 Ом). Большие межэлектродные зазоры позволяют формировать импульсы напряжения большой длительности, но в этом случае существенно возрастают потери тока в высоковольтном вводе и электронной пушке.

В работе [4] при исследованиях ненагруженного обращенного диода (за счет отсутствия коллектора исключена инжекция электронов в пространство дрейфа) показано, что существенное влияние на длительность магнитной изоляции оказывают процессы на аноде диода. Основным фактором, влияющим на длительность импульса напряжения, является величина напряженности электрического поля на центральном электроде (аноде) ОКДМИ.

Рис. 4 иллюстрирует зависимость времени коммутации $t_{\text{к}}$ от напряженности электрического поля на аноде ОКДМИ, построенную по результатам [4] и настоящей работы. Там же указаны амплитудные значения инжектируемых диодом токов.

Таким образом, эти результаты подтверждают вывод [4] об определяющем влиянии на длительность магнитной изоляции в ОКДМИ величины напряженности электрического поля на аноде. Следует отметить также, что величина снимаемого с катода тока не влияет на время коммутации ОКДМИ. Эти факты позволяют предположить, что неустойчивость, приводящая к радиальному движению плазмы поперек внешнего магнитного поля и перемыканию межэлектродного зазора, в ОКДМИ развивается на аноде.

Литература

- [1] Luckhardt S. C., Fleischmann H. H., Kribell R. E. Cornell University Report, 1977, FRL-1. 15p.
- [2] Бакшаев Ю. Л., Блинов П. И., Долгачев Г. И. и др. Физика плазмы, 1979, т. 5, № 5, с. 1041—1043.
- [3] Долгачев Г. И., Закапов Л. П., Исиченко М. В. Препринт ИАЭ-3908/7. М., 1984. 25 с.
- [4] Винтисенко И. И., Сулакшин А. С., Цветков В. И. Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 8, с. 449—453.
- [5] Диденко А. Н., Арвин А. П., Винтисенко И. И. и др. Тез. докл. VI Всес. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, ИСЭ СО АН СССР, 1986, с. 197—198.
- [6] Горбенко Н. И., Ильин В. П., Попова Г. С. и др. В сб.: Численные методы решения задач электронной оптики. Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1979, с. 34—60.
- [7] Федосов А. И., Литвинов Е. А., Беломытцев С. Я. и др. Изв. вузов. Физика, 1977, т. 10, с. 134—135.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики
при Томском политехническом
институте им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
22 января 1987 г.
В окончательной редакции
9 июня 1987 г.