

04

## Распространение плазмы вдоль оси плазменного прерывателя тока при радиальной инжекции

© Б.М. Ковальчук, А.А. Жерлицын

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: andzh@oit.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2003 г.

Приведены результаты исследований распространения плазмы вдоль оси прерывателя тока с инжекцией плазмы в радиальном направлении. Показано, что в отсутствие тока генератора через инжектируемую плазму фронт плазмы с концентрацией не ниже  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$  движется в аксиальном направлении со скоростью  $\sim 1 \div 1.5 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ . На расстоянии 20 см от плоскости инжекции концентрация плазмы  $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  достигается через  $5 \div 6 \mu\text{s}$  от начала тока в пушках. На расстоянии 50 см от плоскости инжекции достигается концентрация плазмы  $\sim 2 \div 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .

При инжекции плазмы в коаксиальный плазменный прерыватель со стороны внешнего проводника плазма распространяется также в аксиальном направлении от места инжекции. При использовании плазменных пушек кабельного типа [1] из-за высокой плотности плазмы в центральной отверстии кабеля именно аксиальное движение может определить протяженность прерывателя в осевом направлении и градиент плотности плазмы вдоль оси. Оба эти параметра влияют на работу прерывателя как в стадии проводимости, так и в высоковольтной фазе. На установке ГИТ-4 [1] были выполнены эксперименты по исследованию распространения плазмы вдоль оси прерывателя в системе с радиальной инжекцией плазмы из пушек кабельного типа и центрального проводника конической формы. Прерыватель такого типа может использоваться в схемах при подключении нагрузки до прерывателя [2,3], а также как плазмонаполненный диод при переключении тока вдоль оси системы.

**Методика исследования распространения плазмы и оценки ее концентрации.** Для исследования распространения плазмы в область прерывателя помещали коллектор, на который подавалось отрицатель-

ное напряжение смещения, и регистрировали протекающий ток. Если подавать постоянное напряжение, можно оценить аксиальную скорость движения и концентрацию плазмы в момент ее появления в области коллектора. В случае импульсной подачи напряжения на коллектор можно оценить концентрацию плазмы на заданном расстоянии в любой момент времени путем варьирования задержки между срабатыванием источника напряжения и плазменных пушек.

Если потенциал коллектора обеспечивает экранирование поверхности от электронов плазмы и отсутствует эмиссия с коллектора, тогда ток в цепи определяется только ионами:

$$I_c = k \cdot e \cdot Z \cdot n \cdot S \cdot v_p, \quad (1)$$

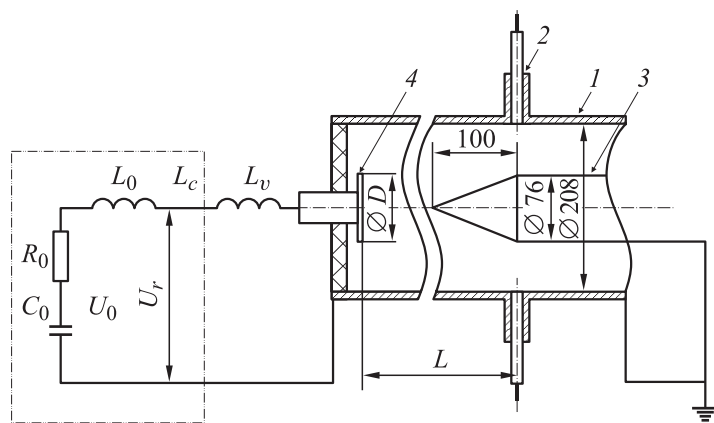
где  $Z$  — заряд ионов,  $S$  — площадь коллектора,  $v_p$  — скорость направленного потока ионов на коллектор,  $k$  — множитель, учитывающий ионно-электронную эмиссию. Для оценочных расчетов можно принять коэффициент ионно-электронной эмиссии  $\sim 1$ , тогда  $k = 2$ .

В результате контакта плазмы с коллектором может происходить образование катодных пятен. В пределе неограниченной эмиссии с коллектора электронный и ионный токи в слое будут подчиняться соотношению Ленгмюра и выражение для полного тока примет вид:

$$I_c \approx e \cdot Z \cdot n \cdot S \cdot v_p \cdot \sqrt{\frac{M_i}{Z \cdot m_e}}. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) могут быть использованы для оценки концентрации плазмы по измеренному току  $I_c$ , принимая в качестве основного состава плазмы ионы  $H^+$  и  $C^{++}$ .

**Схема эксперимента.** Схема эксперимента представлена на рис. 1. На внешнем проводнике 1 диаметром 208 mm установлены 32 полиэтиленовые плазменные пушки 2, инжектирующие плазму в радиальном направлении. Центральный проводник 3 имеет конусную форму с диаметром в плоскости инжекции плазмы 76 mm. На расстоянии  $L$  от плоскости пушек установлен коллектор 4 диаметром  $D$ . Питание плазменных пушек осуществляется от пары конденсаторов ИК 50-3. Ток разряда через пушку имеет периодическую форму. Амплитуда первого полупериода  $\sim 8$  kA, длительность  $\sim 2.3$   $\mu$ s. Система откачивалась с помощью турбомолекулярных насосов до остаточного давления  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  Torr.

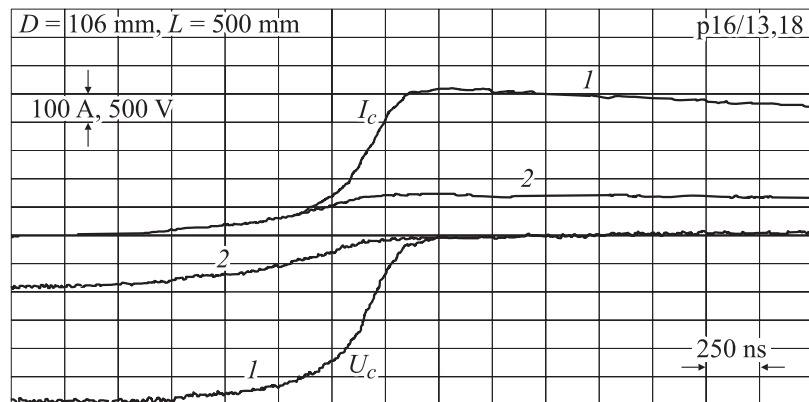


**Рис. 1.** Схема эксперимента по исследованию аксиального распространения плазмы.

**Измерения при постоянном напряжении смещения на коллекторе.** В этой серии экспериментов на коллектор подавалось отрицательное постоянное напряжение смещения от конденсатора емкостью  $C_0 = 2 \mu\text{F}$  в диапазоне от 0.5 до 4 kV. Разрядный ток в цепи коллектора  $I_c$  регистрировался с помощью шунта. В режиме короткого замыкания контура коллектора время до максимума тока составляет  $\sim 160 \text{ ns}$  при ограничительном сопротивлении в цепи  $R_0 = 5.5 \Omega$ .

При  $L = 200 \text{ mm}$  ток в цепи коллектора появляется через  $\sim 1 \mu\text{s}$  относительно начала протекания тока через плазменные пушки и за  $\sim 1.5 \mu\text{s}$  достигает амплитуды, соответствующей току короткого замыкания контура. Увеличение  $L$  до 500 mm привело к росту задержки в появлении тока  $I_c$  до  $3.8 \mu\text{s}$ . По времени появления тока  $I_c$  получаем оценку средней скорости аксиального движения плазмы  $\sim 1.5 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ . При изменении напряжения смещения в 8 раз с 0.5 до 4 kV время появления тока  $I_c$  осталось неизменным. Следовательно, электрическое поле коллектора не оказывает существенного влияния на движение плазмы.

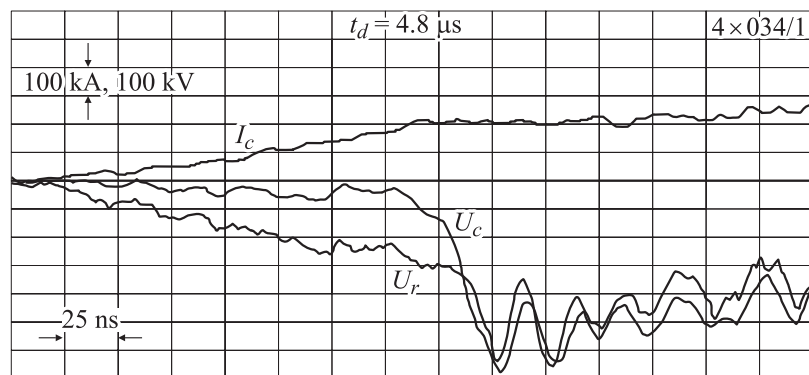
На рис. 2 для случая  $L = 500 \text{ mm}$  и диаметра коллектора  $D = 106 \text{ mm}$  представлены осциллограммы тока и расчетного напряжения на коллекторе  $U_c$  при зарядных напряжениях конденсатора 3



**Рис. 2.** Осциллограммы тока и напряжения на коллекторе при постоянном напряжении смещения. Зарядное напряжение конденсатора в цепи коллектора: 1 — 3 kV, 2 — 1 kV.

и 1 kV. На осциллограммах тока видны два характерных участка. Вероятно, что пологий участок обусловлен в основном ионами плазмы. Величина тока слабо зависит от приложенного напряжения в диапазоне от 0.5 до 4 kV и определяется концентрацией ионов. Для этого участка применимо выражение (1), которое дает оценку концентрации плазмы  $\sim 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  для водородной плазмы и  $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  для углеродной плазмы. Дальнейшее крутое нарастание тока обусловлено эмиссией электронов из образованной катодной плазмы. В момент максимума тока  $I_c$  напряжение на коллекторе  $U_c$  близко к нулю и амплитуда тока определяется величиной ограничительного сопротивления цепи смещения, а не концентрацией поступающих на коллектор ионов. При сокращении диаметра коллектора до 20 mm пологий начальный участок становится неразличимым, а амплитуда тока по-прежнему определяется сопротивлением контура. В момент максимума тока из уравнения (2) получаем, что концентрации в области коллектора не ниже  $1.5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , принимая плазму водородной, и не ниже  $3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  для углеродной плазмы.

**Измерения при импульсном напряжении смещения.** Для того чтобы иметь режим насыщения по ионному току и полностью ис-



**Рис. 3.** Осциллограммы тока и напряжений при импульсном напряжении смещения для времени задержки  $4.8 \mu\text{s}$ .

ключить влияние электрического поля на распространение плазмы, в последующих экспериментах напряжение на коллектор подавалось в импульсном режиме от генератора ГИТ-4, который включался с некоторой задержкой  $t_d$  относительно срабатывания плазменных пушек. Параметры ГИТ-4: емкость  $C_0 = 4.8 \mu\text{F}$ , собственная индуктивность  $L_0 = 109 \text{ нН}$ , выходное напряжение  $U_0 = -480 \text{ кВ}$ . Разрядный ток  $I_c$  регистрировался поясом Роговского, напряжение на выходе генератора  $U_r$  регистрировалось активным делителем. Индуктивность между генератором и коллектором  $L_v \sim 120 \text{ нН}$ . Измерения проводились для расстояний между коллектором и плоскостью инжекции 200 и 500 мм. Диаметр коллектора  $D = 160 \text{ мм}$ .

При времени задержки менее  $2.8 \mu\text{s}$  для  $L = 200 \text{ мм}$  генератор почти сразу включался на холостой ход и начальный участок тока генератора практически неразличим. Чувствительность в измерении тока составляла  $\sim 25 \text{ кА}$ , что, согласно уравнению (2), соответствует концентрации  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$  для скорости плазмы  $\sim 5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ . Следовательно, можно констатировать, что при  $t_d = 2.8 \mu\text{s}$  концентрация плазмы в области коллектора не превышает  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 3 приведен пример осциллограмм разрядного тока  $I_c$ , напряжения на выходе генератора  $U_r$  и расчетное напряжение на коллекторе  $U_c = U_r - L_v \cdot dI_c/dt$  для выстрела с  $t_d = 4.8 \mu\text{s}$  при  $L = 200 \text{ мм}$ . При данной задержке генератор

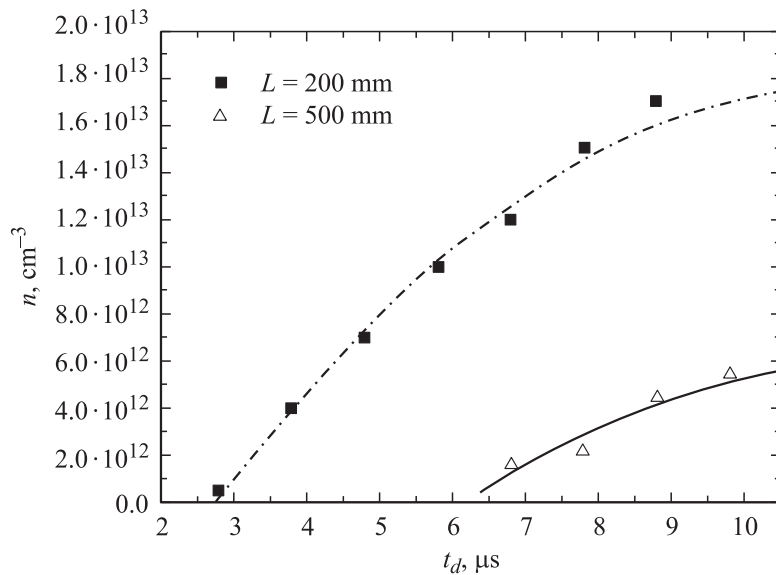


Рис. 4. Зависимости концентрации плазмы от времени задержки.

включается на плазмонаполненный диод. При нарастании тока до 200 кА происходит насыщение по ионному току, сопровождающееся резким ростом напряжения  $U_c$ . Оценка концентрации плазмы для ионов  $\text{C}^{++}$  из выражения (2)  $\sim 0.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . Если принять в качестве основного состава плазмы ионы водорода, концентрация плазмы получится в  $\sim 5$  раз выше. Учет влияния собственного магнитного поля электронов даст еще более высокую оценку концентрации плазмы. Результаты измерений при расстояниях между коллектором и плоскостью инжекции 200 и 500 мм приведены в виде зависимостей концентрации плазмы  $n$  от времени задержки  $t_d$  на рис. 4. Расчеты выполнены для углеродной плазмы. Отметим, что удаление центрального конусного проводника из зоны инжекции плазмы не привело к изменению зависимости  $n(t_d)$ .

**Заключение.** Результаты экспериментов показывают, что в отсутствие тока генератора через инжектируемую плазму фронт плазмы с концентрацией не ниже  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$  движется в аксиальном направлении со скоростью  $\sim 1 \div 1.5 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ . Время появления плазмы

с концентрацией более  $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  соответствует средней скорости  $\sim 5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$ . На расстоянии 20 см от плоскости инжекции концентрация плазмы  $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  достигается через  $5 \div 6 \mu\text{s}$  от начала тока в пушках. На расстоянии 50 см достигается концентрация плазмы  $\sim 2 \div 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .

## Список литературы

- [1] *Bugaev S.P., Volkov A.M., Iskol'dsky A.M.* et al. // IEEE Trans. Plasma Science. 1990. V. 18. N 5. P. 115–118.
- [2] *Bastrikov A.N., Kim A.A., Kovalchuk B.M.* et al. // Proc. 12<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conf. Monterey, 1999. P. 1191–1194.
- [3] *Бастриков А.Н., Жерлицын А.А., Ким А.А.* и др. // Изв. вузов. Физика. 1999. № 12. С. 31–35.