

04;12

©1994 г.

ЧЕТЫРЕХРАЗЯДНЫЙ ВАКУУМНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ РАЗЯДНИК

*Д.Ф.Алферов, В.А.Воздвиженский, Н.И.Коробова,
И.О.Сибиряк, В.А.Сидоров*

Исследованы пусковые характеристики вакуумного управляемого разрядника, включение которого осуществляется импульсным источником плазмы. Последний подсоединен к основному катоду через вспомогательную RL-цепь, задающую потенциал источника плазмы относительно основного катода при протекании тока разряда.

Определены условия пробоя между плазмой, генерируемой поджигающим устройством, и катодом. На основе полученных результатов проведен расчет пусковых характеристик разрядника в зависимости от параметров RL-цепи.

Выполнены измерения времени задержки включения, тока включения и напряжения пробоя такого разрядника в диапазоне начальных напряжений 1–12 кВ, токов до 4 кА при скорости нарастания тока разряда до $5 \cdot 10^{10}$ А/с и токе поджига 90 А. Сравнение результатов измерений и расчета показало их удовлетворительное согласие. Полученные результаты открывают возможность повышения ресурса узла управления разрядника.

Введение

Обычные вакуумные управляемые разрядники обладают рядом несомненных достоинств по сравнению с другими типами коммутаторов [1]: широким диапазоном рабочих напряжений и токов разряда, высокой скоростью восстановления электрической прочности, возможностью работы в частотном режиме и удобством эксплуатации.

В качестве иллюстрации в таблице приведены основные характеристики сильноточных разрядников, разработанных во Всероссийском электротехническом институте и в настоящее время успешно используемых в различных импульсных установках [2–4].

Наиболее распространенным способом включения прибора является использование иницилирующего искрового разряда вдоль поверхности короткой диэлектрической вставки между поджигающим электродом и катодом [1]. При этом на катоде вблизи поверхности диэлектрической вставки образуются катодные пятна причем часть из них остается там практически в течение всей длительности основного тока разряда $\sim 10^{-5}$ с и более. Длительное воздействие катодного пятна

Характеристика	РВУ-3 [4]	РВУ-40 [2]
Рабочее напряжение, кВ	0.5-40	0.5-30
Рабочий ток, кА	0.2-60	1-160
Максимальное количество электричества в импульсе, Кл	1	100
Время запаздывания включения при $I_{\text{п}} = 1$ кА, мкс	0.2 ± 0.02	1 ± 0.2
Время восстановления электрической прочности, мкс	30	100
Напряжение поджига, кВ	8	5
Ток поджига не менее, А	20	500
Частота (Гц)	500	0.1
Ресурс	10^6	$4 \cdot 10^4$
Габаритные размеры, мм: диаметр,	100,	150,
высота	190	203
Масса, кг	3.5	9.0

на узел поджига приводит к его разрушению, что ограничивает ресурс разрядника.

Для повышения ресурса и расширения функциональных возможностей разрядника представляет интерес использовать для инициации дугового разряда источник плазмы, отделенный от катода вакуумным промежутком [5]. В этом случае катодное пятно образуется в результате пробоя приэлектродного слоя между катодом и плазмой пускового источника. Образование КП под плазмой разряда наблюдалось в работах [6-8]. В [7] определены условия образования КП на поверхности из материала CuCr в зависимости от потенциала плазмы и тока внешнего источника плазмы.

В настоящей работе рассмотрена схема разрядника, в которой потенциал плазмы относительно катода задается током разряда. Предложена методика расчета условий включения такого разрядника и измерены его пусковые характеристики.

Образование катодного пятна (КП)

Исследования проводились на опытном образце РВУ, изготовленном по электронно-вакуумной технологии [2], обеспечивающей требуемую чистоту поверхности электродов и малое остаточное давление $< 10^{-4}$ Па. Схема разрядника представлена на рис. 1. Электродная система состоит из анодного диска 1 и цилиндрического катода 2 с внешним диаметром 35 мм. Внутри катода соосно размещен источник иницирующей плазмы. Источник состоит из поджигающего электрода 4, который отделен от катода источника 3 (вспомогательный катод) диэлектрической вставкой. Вакуумный зазор между основным и вспомогательным катодом $r = 0.5 - 1$ мм. Минимальное расстояние между вспомогательным катодом и анодом $d = 2$ мм. Все электроды выполнены из материала хром-медь и размещены в герметичном отпаянном керамическом корпусе.

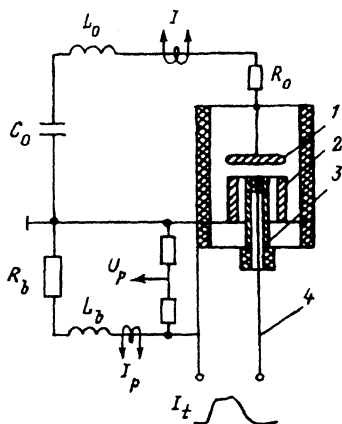


Рис. 1. Схема разрядника и испытательного разрядного контура.

R_0 — собственное сопротивление разрядника в дуговой фазе; R_b , L_b , C_0 , L_0 — параметры цепи включения катода плазменного источника и анода основного разрядного контура соответственно.

При подаче на поджигающий электрод импульса напряжения происходит пробой по поверхности диэлектрической вставки и в цепи источника плазмы начинает протекать ток поджига I_f . Протекание тока I_f обеспечивается катодными пятнами, которые образуются на поверхности вспомогательного катода после пробоя. Эти пятна являются эффективными источниками электронов и направленного потока высокоэнергетичных ионов, распространяющихся от КП со средней скоростью V_i (для медного катода $U_i = 2 \cdot 10^6$ см/с [1]). Через время d/V_i ионы, образованные в момент появления I_f , достигают анода, межэлектродный промежуток закорачивается катодной плазмой, и разряд переходит в дуговую фазу. В режиме диффузной вакуумной дуги, когда падение потенциала на межэлектродном промежутке обычно не превышает несколько десятков вольт, потенциал плазмы принимает значение, примерно равное потенциалу анода и вспомогательного катода. В этом случае ток разряда I и потенциал плазмы U_p в основном определяются параметрами внешнего разрядного контура. Потенциал основного катода U_k сохраняет нулевое значение.

При $U_p \gg U_k$ вблизи поверхности основного катода формируется слой объемного заряда ионов. Скорость ионов в слое примерно равна направленной скорости V_i , которая существенно превышает их тепловую скорость. Концентрация ионов $n(t)$ в прикатодном слое в момент времени t пропорциональна полному току $I_p = I_f + I$ через КП в предшествующий момент времени $t = t - \tau$, $\tau = r/V_i$ — время запаздывания. Плотность ионного тока в слое [7] $j_i(t) = Ezn(t)V_i = f \cdot I_p(t')/2\pi \cdot r^2$, f — доля ионного тока относительно I_p , z — средний заряд ионов. Предполагается, что плазма распространяется из КП сферически симметрично.

Будем считать, что время заметного изменения U_p значительно превышает характерное время пролета ионом слоя. В этом случае, воспользовавшись соотношением Ленгмюра для плотности ионного тока в слое $j_i(t)$, определим среднюю величину напряженности электрического поля на катоде [7]

$$E_k^2 (\text{В/см})^2 = 5.2 \cdot 10^6 \frac{f \cdot \sqrt{M} I_p (A) \sqrt{U_p (B)}}{[r(\text{см})]^2}, \quad (1)$$

где M — молекулярный вес иона, I_p — полный ток через КП на вспомогательном катоде в момент времени t' , предшествующий времени формирования электрического поля на катоде.

Как и в случае обычного вакуумного пробоя, электрический пробой прикатодного слоя происходит, если E_k превышает некоторое пробивное значение $E_{пр}$, величина которого зависит от материала катода и состояния его поверхности. На чистых поверхностях, которые обеспечиваются электронно-вакуумной технологией изготовления разрядника, наиболее вероятно реализация вызво-эмиссионного механизма образования КП [6].

Отметим, что рассмотренная модель инициации дугового разряда аналогична условиям поджига обычного РВУ на аноде [9]. Согласно этой модели, величина U_p , необходимая для успешного пробоя, может быть понижена путем увеличения M , I_p и уменьшения r . Условие пробоя при фиксированном значении $E_k = E_{пр}$, согласно (1), можно представить в виде [7]

$$I_p(t - \tau) \cdot \sqrt{U_p(t)} = G(A \cdot B^{1/2}). \quad (2)$$

Здесь G — постоянная включения, величина которой зависит от $E_{пр}$, материала электродов и геометрии межэлектродного промежутка. Так как значения параметров в выражении (1), как правило, точно неизвестны, то величину постоянной включения G следует определить экспериментально.

Для измерения G катод источника плазмы 3 был подсоединен к основному катоду 2 через сопротивление $R_b \gg \rho = (L_0 + L_b)/C_0$ (рис. 1). Здесь C_0 и L_0 — емкость и индуктивность основного разрядного контура, R_b и L_b — сопротивление и индуктивность вспомогательной цепи. Ток поджига I_f длительностью 250 нс с фронтом 30 нс значительно превышал ток разряда I через сопротивление R_b . После закорачивания плазмой поджига вакуумного зазора d разность потенциалов между плазмой и катодом 2 принимала значение зарядного напряжения $U_p \simeq U_0$ и оставалась практически постоянной при протекании тока поджига. Ток через КП источника плазмы при этом можно положить равным току поджига $I_p = I_f$. Измерения проводились по методике, изложенной в [7], с помощью поясов Роговского и омического делителя с временным разрешением не хуже 20 нс. Измеренная таким образом постоянная включения $G = 3.5 \cdot 10^4 \text{ А} \cdot \text{В}^{1/2}$. Соответственно при $I_p(t) \sqrt{U_p(t)} > G$ образование КП должно происходить со 100%-ной вероятностью. При этом ток разряда начинает протекать в цепи основного разрядного контура $C_0 L_0$.

Расчет коммутационных характеристик

Соотношение (2) позволяет рассчитать время включения разрядника (момент образования КП на основном катоде) при различных способах подсоединения внешнего источника плазмы. Достаточно общий случай электрической схемы разрядного контура представлен на рис. 1.

Положим, что разрядный ток начинается в момент времени $t = 0$, когда вакуумный зазор d полностью заполнен плазмой поджига. Будем считать, что величина тока разряда I значительно превышает ток поджига и $I_p = I$. Тогда для колебательного разрядного контура ($\xi = R/2\rho < 1$) соответственно имеем

$$I_p(t) = \frac{U_0}{\rho\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\delta t} \sin \omega t, \quad (3)$$

где

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C_0}}, \quad \delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1-\xi^2}{LC_0}}, \quad L = L_b + L_0, \quad R = R_b + R_0,$$

R_0 — активное сопротивление разрядного промежутка в дуговой фазе, U_0 — зарядное напряжение на емкости C_0 перед началом разряда. Здесь мы пренебрегаем переходными процессами на стадии заполнения вакуумного зазора плазмой.

Потенциал плазмы задается током разряда и параметрами вспомогательной $R_b L_b$ цепи

$$U_p(t) = I_p(t)R_b + L_b \frac{dI_p(t)}{dt}. \quad (4)$$

Подставив (3) и (4) в (2), найдем соотношение между зарядным напряжением U_0 и временем включения разрядника в безразмерном виде $x = t/t_m$

$$U_0 = \frac{(G\rho\xi)^{2/3} e^{\sigma(x-\frac{2}{3}x_0)}}{\kappa^{2/3} \sin^{2/3} \alpha (x-x_0) \{ \sin \alpha x [(2b-\beta)\kappa + b \operatorname{ctg} \alpha x] \}^{1/3}}, \quad (5)$$

где

$$t_m = \frac{\alpha C_0 \rho}{(1-\xi^2)^{1/2}}$$

— момент времени, соответствующий максимуму разрядного тока $I_p(t)$; $\alpha = \operatorname{arccctg} \kappa$; $\sigma = \alpha \kappa$; $\kappa = \xi/\sqrt{1-\xi^2}$; $b = L_b/L$; $\beta = R_b/R$; $x_0 = \tau/t_m$; τ — время запаздывания, равное времени пролета ионами вакуумного зазора между вспомогательным и основным катодами.

Соответственно ток I_p и напряжение U_p , необходимые для включения разрядника в момент времени t , определяются выражениями

$$I_p(x) = \frac{U_0}{\rho} \frac{\kappa}{\xi} e^{-\sigma x} \sin \alpha x,$$

$$U_p(x) = U_0 e^{-\sigma x} \sin \alpha x [(2b-\beta)\kappa + b \operatorname{ctg} \alpha x]. \quad (6)$$

Минимальное значение зарядного напряжения U_0 , при котором возможно включение разрядника в случае $b \ll \xi$ и $x_0 \ll 1$, определяется из условия $x = 1 (t = t_m)$

$$U_{0 \min} \approx \frac{(G\rho\xi)^{2/3} e^{\sigma}}{\kappa \sin \alpha x (2\beta)^{1/3}}. \quad (7)$$

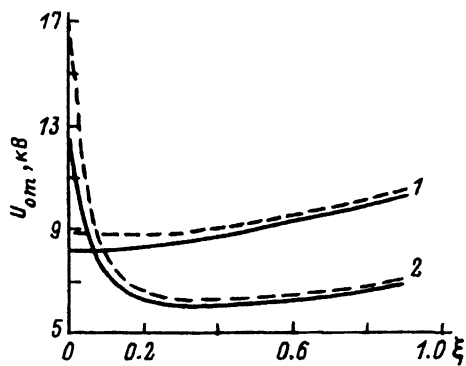


Рис. 2. Зависимость минимального напряжения включения разрядника от параметров цепи.

Выражение (7) принимает минимальное значение при $\xi = 0.35$ и его величина увеличивается с ростом постоянной включения G и волнового сопротивления основного разрядного контура.

В общем случае при увеличении b положение минимума в зависимости $U_{0\min}(\xi, b)$ смещается в сторону меньших значений ξ и при $b = 1$, $x_0 \ll 1$ принимает значение $\xi = 0$.

В качестве примера на рис. 2 представлена зависимость $U_{0\min}(\xi)$, рассчитанная при $C_0 = 2.9 \cdot 10^{-8}$ Ф, $L_0 = 7.5 \cdot 10^{-7}$ Гн, $R_0 = 0.3$ Ом для двух значений $b = 0.75$ (1), 0.15 (2) и 40 (сплошные кривые), 80 нс (штриховые). Видно, что с ростом b и величина $U_{0\min}$ возрастает. Отметим, что в случае $b \gg \xi$ разрядник начинает включаться в момент времени, соответствующий максимальной крутизне фронта разрядного тока. С увеличением ξ момент времени включения при минимальном значении зарядного напряжения $U_{0\min}$ увеличивается и приближается к $t = t_m(x = 1)$ при $\xi \gg b$.

Надежное включение разрядника должно происходить при $U_0 > U_{0\min}$. В этом случае выражения (5) и (6) позволяют рассчитать коммутационные характеристики в зависимости от параметров цепи разрядного контура и конструкции разрядника.

Результаты измерений

Измерения коммутационных характеристик разрядника проводились при следующих параметрах разрядного контура (рис. 1): $C_0 = 2.9 \cdot 10^{-8}$ Ф, $L_0 = 7 \cdot 10^{-7}$ Гн, $L_b = 1.4 \cdot 10^{-7}$ Гн ($b = 0.17$), $R_0 = 0.3$ Ом, $R_b = 3.3$ Ом ($\xi = 0.34$). При этих параметрах длительность фронта разрядного тока сравнима с временем запаздывания $\tau = 40-80$ нс. В условиях наших измерений указанный диапазон величины τ обусловлен неточностью установки вакуумного зазора τ между основным и вспомогательным катодом, а также возможным разбросом значений V_i . Напряжение U_0 изменялось в диапазоне 1-12 кВ. Напряжение поджига ≈ 700 В, амплитуда тока поджига ≈ 90 А.

Типичные осциллограммы токов и напряжения представлены на рис. 3. Вначале развитие разрядного тока происходит, как и в обычном РВУ: после начала тока поджига разрядный ток I_p сначала слабо нарастает, а затем по мере заполнения плазмой межэлектродного зазора d выходит на значения, задаваемые параметрами внешней цепи. С ростом I_p происходит увеличение напряжения U_p между вспомогательным и основным катодом. В момент включения t_p наблюдается

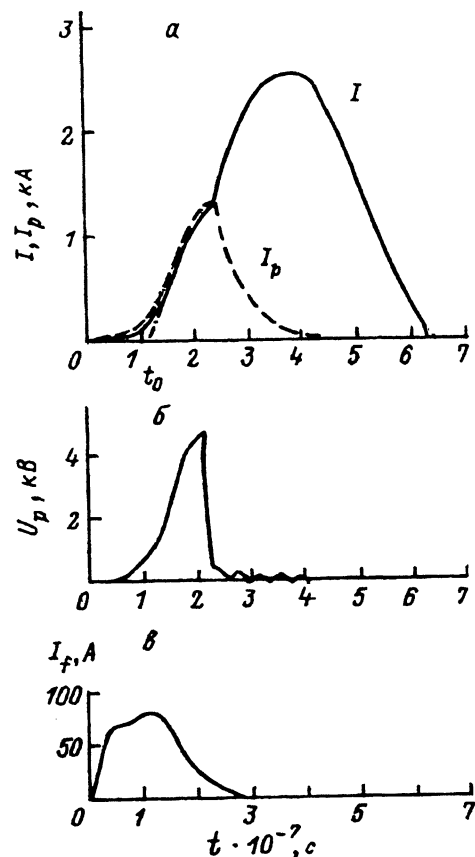


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений при $L_0 = 7 \cdot 10^{-7}$ Гн, $L_b = 1.4 \cdot 10^{-7}$ Гн.

а — ток основного разряда I (сплошные кривые), ток во вспомогательной цепи I_p (штриховые); б — напряжение на вспомогательном катоде U_p ; в — ток поджига I_f .

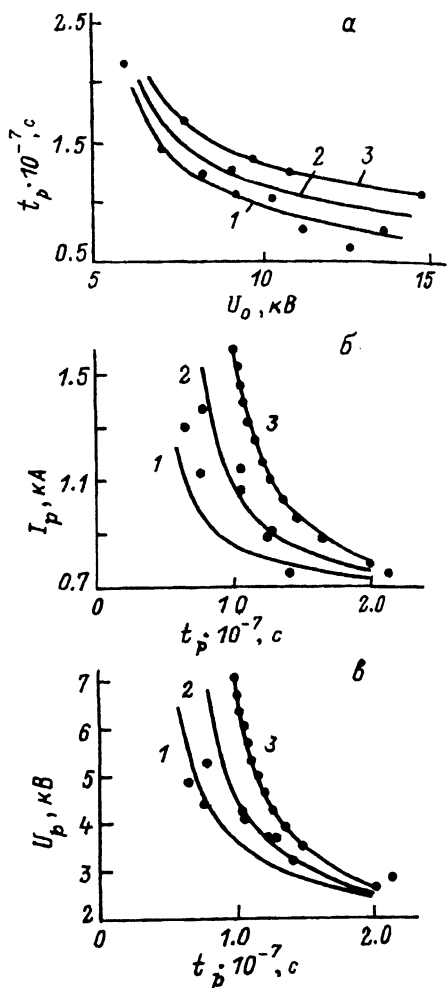


Рис. 4. Коммутационные характеристики разрядника.

а — зависимость времени включения t_p от U_0 , б — тока включения от t_p , в — напряжения на вспомогательном катоде от t_p ; сплошные линии — расчет при $\tau = 40$ (1), 60 (2), 80 нс (3); точки — эксперимент.

резкий спад напряжения U_p и перегиб разрядного тока I . Затем ток во вспомогательной цепи I_p спадает с постоянной спада — L_b/R_b .

В результате измерений получены зависимости времени включения t_p от U_0 , а также I_p и U_p от момента включения (рис. 4). Время включения отсчитывалось от момента t_0 , который определялся путем аппроксимации осциллограммы разрядного тока зависимостью (3), как показано на рис. 3 штрихпунктиром. На рис. 4 представлены также результаты расчета для выбранных параметров разрядного контура. Расчеты выполнены для трех значений времени запаздывания $\tau = 40$,

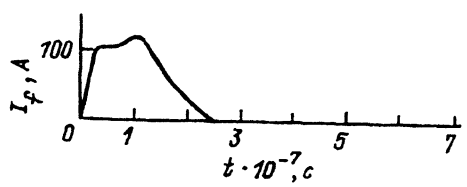
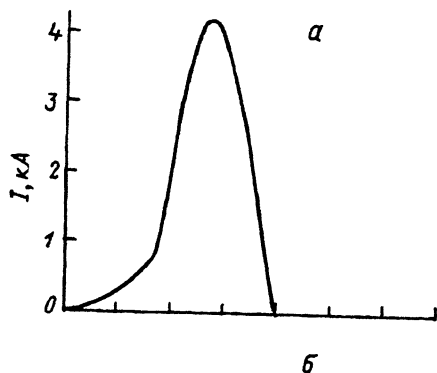


Рис. 5. Осциллограммы токов при $L_0 = 1.8 \cdot 10^{-7}$ Гн, $L_b = 5.4 \cdot 10^{-7}$ Гн.
 а — ток основного разряда I ,
 б — ток поджига I_f .

60 и 80 нс по соотношениям (5), (6). Видно, что экспериментальные точки в основном лежат в выбранном интервале времени запаздывания τ , причем бóльшая их часть группируется вблизи значений $\tau = 40-60$ нс.

Нами были также выполнены измерения при меньших значениях периода колебаний основного разрядного контура ($L_0 = 1.8 \cdot 10^{-7}$ Гн, $L_b = 5.4 \cdot 10^{-7}$ Гн, $b = 0.75$). Остальные параметры остались те же. Характерные осциллограммы в этом режиме приведены на рис. 5. В этом случае расчетные значения коммутационных характеристик разрядника также согласуются с данными измерений.

Заключение

Полученные результаты продемонстрировали работоспособность РВУ с внешним поджигом. Предложен метод расчета коммутационных характеристик такого разрядника, который позволяет произвести оптимальный выбор его параметров.

Учитывая большое количество независимых параметров в уравнении (5), оптимизацию параметров разрядника разумно проводить для заданного режима работы. В частности, при требуемой длительности импульса тока разряда и заданном волновом сопротивлении основного разрядного контура можно оценить оптимальные значения параметров вспомогательной цепи для существенного уменьшения нагрузки током на узел поджига и стартовых потерь разрядника. Использование разрядника с внешним поджигом позволяет надеяться существенно повысить его ресурс по сравнению с обычным РВУ.

Как следует из выражения (5), (6), для уменьшения стартовых потерь и повышения ресурса РВУ использование рассмотренного типа разрядника предпочтительно при длительностях импульса тока, значительно превышающих время запаздывания τ .

Отметим, что при больших значениях $L_b \gg L_0$ или при $\xi \gg 1$, когда с появлением тока основная часть напряжения U_0 прикладывается к вспомогательной цепи, режим работы разрядника с внешним поджигом

близок к режиму работы трехэлектродного вакуумного разрядника с магнитной задержкой [10]. Этот режим позволяет надеяться заметно уменьшить эрозию электродов на начальной стадии коммутации разрядника.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РАН (код проекта 93-02-17425).

Список литературы

- [1] Вакуумные дуги. Теория и приложения / Под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1982. 432 с.
- [2] Алферов Д.Ф., Воздвиженский В.А., Сибиряк И.О., Сидоров В.А. // ПТЭ. 1990. № 5. С. 139-142.
- [3] Dethlefsen R., Sidorov V.A., Vozdvijenskii V.A. // 8th IEEE Intern. Pulsed Power Conf. San Diego (USA), 1991. P. 511-514.
- [4] Воздвиженский В.А., Сидоров В.А. // ПТЭ. 1992. № 4. С. 104-111.
- [5] Отчет о НИР. ГР 02890058253. Петрозаводский гос. университет, 1987.
- [6] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 239 с.
- [7] Алферов Д.Ф., Воздвиженский В.А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 4. С. 202-204.
- [8] Perskii N.E., Khromov Y.D. // 20th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Barda (Italy), 1991. Vol. 6. P. 1359.
- [9] Voxman R.L. // IEEE Trans. Electr. Dev. 1977. Vol. 24. N 2. P. 122-128.
- [10] Dougal R.A., Morris G., Volkis G.D. // IEEE Trans Plasma Sci. 1991. Vol. 19. N 5. P. 976-988.

Всероссийский электротехнический институт
Москва

Поступило в Редакцию
30 сентября 1992 г.
В окончательной редакции
8 февраля 1993 г.