

04; 10; 12

© 1990 г.

## ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА В МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОМ ДИОДЕ, УСТАНОВЛЕННОМ В ЦЕПИ С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ И ПЛАЗМОЭРОЗИОННЫМ РАЗМЫКАТЕЛЕМ

*П. С. Ананьин, В. Б. Карпов, Я. Е. Красик, Е. А. Пауль*

В статье приведены результаты экспериментальных исследований режимов работы плазменного размыкателя тока и магнитоизолированного диода, установленных параллельно в цепи с индуктивным накопителем и микросекундным генератором, а также параметров мощного ионного пучка, генерируемого в ионном диоде. Для уменьшения электродинамического выноса плазмы использовалось магнитное поле «пробочной» конфигурации, позволившее установить ионный диод в непосредственной близости от области размыкания. Показано, что при использовании пассивного источника плазмы на аноде наблюдается временная задержка (порядка десятка нс и более) максимума мощности в ионном диоде относительно максимума мощности в плазменном размыкателе.

### Введение

Полученные в последние годы результаты [1, 2] по исследованию плазмоэрозионных размыкателей (ПЭР), включенных в цепь с индуктивным накопителем при микросекундных временах ввода энергии, показали перспективность этого подхода для получения высоковольтных импульсов напряжения длительностью порядка  $10^{-7}$  с, которые могут найти применение для генерации мощных ионных пучков (МИП) [3].

Настоящая работа посвящена результатам экспериментальных исследований генерации МИП в магнитоизолированном диоде (МИД), установленном после ПЭР. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Источником тока служил генератор «Дубль» [4] ( $\varphi=600$  кВ,  $\rho=1.1$  Ом,  $W=98$  кДж). Разряд генератора осуществлялся на вакуумную коаксиальную индуктивность  $L=0.77$  мкГн, что определило время достижения током максимальной амплитуды 1.36 мкс ( $I=370$  кА). Предварительное создание плазмы в области ПЭР обеспечивалось восемью плазменными пушками эрозионного типа [5]. Концентрация и потоковая скорость плазмы в зависимости от режимов работы плазменных пушек варьировались в пределах  $2-4 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$  и  $5-7 \cdot 10^6$  см/с соответственно.

Для уменьшения электродинамического выноса плазмы, что обеспечивало возможность расположения МИД в непосредственной близости от ПЭР, использовалось магнитное поле, создаваемое соленоидом, установленным на  $l=20$  см от медианной плоскости расположения плазменных пушек. Анод диода устанавливался в области однородного магнитного поля на расстоянии 30 см от плазменных пушек ( $\approx 100$  нГн) и соединялся с внешним электродом через низкоомный шунт (ШОТ). Протяженность анода равнялась в основной серии экспериментов 250 мм при площади плазмообразующей поверхности 470 см $^2$  и межэлектродном зазоре  $d_{A-K}=9$  мм. С целью изменения импеданса МИД в части экспериментов использовались анодные цилиндры длиной 100 мм, позволяющие устанавливать  $d_{A-K}=6$  и 13 мм. Регистрация МИП осуществлялась внутри катода, в котором были выполнены продольные прорезы.

Электрофизические параметры работы генератора «Дубль», ПЭР и МИД определялись по показаниям с активного делителя напряжения (ДН<sub>А</sub>), ШОТ и поясов Роговского (ПР). Определение истинного напряжения на ПЭР и МИД проводилось путем введения соответствующей коррекции в показания ДН<sub>А</sub> на индуктивное падение напряжения между местом расположения ДН<sub>А</sub> и ПЭР и ДН<sub>А</sub> и МИД соответственно. Ток в ПЭР определялся по разнице показаний ПР, установленных до и после ПЭР. Характеристики МИП определялись электрофизическими датчиками (калориметр, цилиндр Фарадея, камера-обскура) и ядерно-активационной методикой на основе реакции  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)$ .

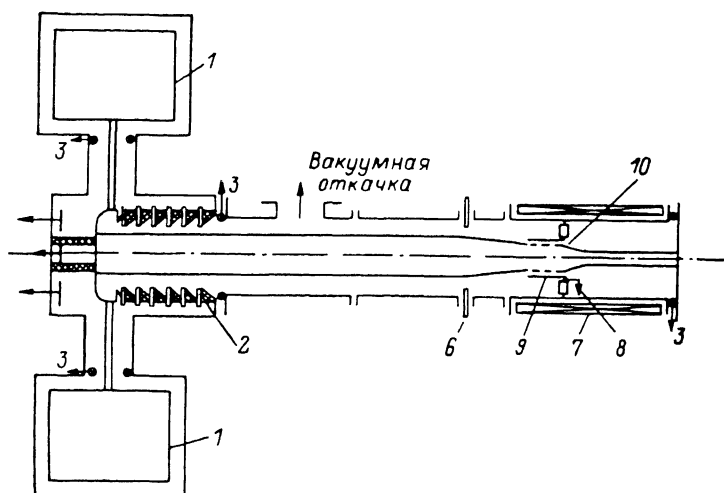


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — ГИНЫ генератора «Дубль» ( $C=0.267$  мкФ,  $L=1.29$  мкГн), 2 — вакуумный изолятор, 3 — пояса Роговского, 4 — активный делитель напряжения, 5 — активный делитель напряжения, 6 — плазменные пушки, 7 — соленоид, 8 — шунт обратного тока ионного диода, 9 — анод, 10 — катод.

### Экспериментальные результаты

Первая серия экспериментов была проведена с анодом без плазмообразующей полиэтиленовой вставки. В этом случае максимальная амплитуда полного тока МИД изменялась в пределах от 120 кА при  $B_z \ll 3$  кГс до 16 кА при  $B_z \approx 12$  кГс. Напряжение на диоде в этих срабатываниях не превышало 0.9 МВ, что соответствовало значению критического магнитного поля  $B_{кр}=5$  кГс. Наличие электронных потерь при  $B/B_{кр} \approx 2.4$  может быть связано с тем, что по потенциальному электроду протекал в сторону короткозамкнутого конца ток с амплитудой до 60 кА, создающий в межэлектродном зазоре азимутальное магнитное поле  $B_\theta \approx 5.5$  кГс, ответственное за аксиальный дрейф электронов и накопление их объемного заряда в конце анодного блока. Последнее приводило к появлению  $E_z$  компоненты электрического поля и соответственно к срыву электронов на анод. Оценка тока электронных потерь дает значение в нашем случае 12.5 кА, что несколько меньше экспериментально измеренного значения. Это может быть связано с генерацией МИП из плазмы, образованной на поверхности металлического анода за счет бомбардировки последнего электронами [6].

Импеданс ПЭР в этой серии экспериментов не превышал 12 Ом, что было значительно меньше импеданса диода ( $Z_d \approx 50$  Ом,  $B_z=12$  кГс). Следует отметить, что разрыв ПЭР и соответствующая генерация вихревой ЭДС происходили через 0.8—1.1 мкс после начала импульса генератора, что соответствовало амплитуде тока в цепи ПЭР до обрыва 280—350 кА.

Основная серия экспериментов была проведена с диэлектрической анодной вставкой с тем же, что и без вставки,  $d_{А-К}=9$  мм и в случае, когда имелась короткозамкнутая после диода индуктивность при значении  $B_z \approx 8.5$  кГс. Измерения максимальной энергии ионов с помощью отсечных пленок из лавсана ( $\Delta=2.5$  мкм) показали, что энергия ионов не превышает 900 кэВ. Восстанов-

ленное напряжение на диоде (рис. 2) согласуется с полученными результатами и оказывается не более чем на 300 кэВ меньше напряжения в области ПЭР. Калориметрические измерения дали значение интегральной энергии МИП на уровне 3 кДж, что соответствует среднему току ионов за  $t=10^{-7}$  с и  $E_i=800$  кэВ  $I_i=37.5$  кА. Измерения с помощью цилиндра Фарадея (рис. 2) показали, что максимальная амплитуда ионного тока достигает  $I_i=60$  кА, что при  $E_i=800$  кэВ дает значение импульсной мощности МИП до  $4.8 \cdot 10^{10}$  Вт и энергии пучка ( $t \approx 10^{-7}$  с) 2.6 кДж. Из приведенных на рис. 2 осциллограмм следует также, что временная задержка в появлении ионного тока относительно начала напряжения составляет не менее 15 нс. В связи с этим максимум мощности диода задержан от максимума мощности ПЭР и равняется 80 ГВт (в ПЭР  $\sim 220$  ГВт). Сравнение импедансов диода и ПЭР показывает, что импеданс ПЭР не превышал значения 7—10 Ом и примерно соответствовал импедансу диода. В связи с этим, а также из-за позднего включения диода основное энерговыделение происхо-

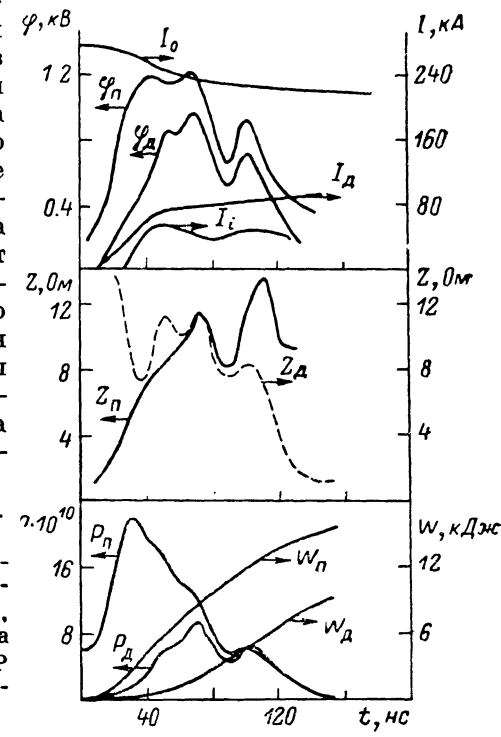


Рис. 2. Характерные осциллограммы импульсов напряжения в ПЭР ( $\varphi_{П}$ ), МИД ( $\varphi_{Д}$ ), полного тока в индуктивном накопителе ( $I_0$ ), тока ионного диска ( $I_{Д}$ ), тока ионного пучка и расчетные зависимости импедансов ПЭР ( $Z_{П}$ ) и МИД ( $Z_{Д}$ ), мощности и энерговыделения в ПЭР и МИД.

дило в ПЭР:  $W_{ПЭР} \approx 14$  кДж, а  $W_{Д} \approx 6$  кДж. При запасенной энергии в первичном индуктивном накопителе  $W=50$  кДж эффективность передачи энергии в МИП не превышала 6 %.

В следующей серии экспериментов значение внешнего магнитного поля не превосходило 1.5 кГс, что было заведомо меньше  $B_{кр}$ , но достаточным для остановки плазмы ПЭР. В данном случае диод работал практически полностью в режиме самоизоляции с анодом длиной 100 мм и  $d_{А-К}=13$  мм. Оценка величины паропотенциального тока такого диода дает значение 87 кА, что хорошо совпадает с экспериментально измеренным значением тока диода. Оценивая эффективность генерации МИП на уровне 30—35 % [7], получаем амплитуду генерируемого тока ионов на уровне 30 кА. Полученный отпечаток пучка по-

А-К зазор	$N_p \cdot 10^{16}$	$\tau_{н}$ , нс по уровню 600 кэВ	$\bar{\varphi}_{Д}$ , кВ	$I_p$ , кА	$W_p$ , кДж	$F_p$ , ГВт	$S_A$ , см <sup>2</sup>
Без короткозамкнутой индуктивности, А-К=9 мм, $l=250$ мм	4.5	85	850	87	6	73	470
Без короткозамкнутой индуктивности, А-К=13 мм, $l=100$ мм	1.2	110	850	17.4	1.6	14.7	213
Без короткозамкнутой индуктивности, А-К=6 мм, $l=100$ мм	0.76	20	750	60	0.91	46	169
С короткозамкнутой индуктивностью, А-К=9 мм, $l=250$ мм	2.4	85	800	44	3	35	470

зависает, что минимальный диаметр сходящегося радиально МИП на оси диода равняется 2 мм, что соответствует плотности тока  $j_i = 6 \text{ кА/см}^2$  при степени фокусировки, достигающей фактора 70.

В таблице приведены данные ядерно-активационных измерений протонной фракции МИП, генерируемого в МИД с различными  $d_{A-K}$ , и площади анодной поверхности. Наибольший протонный поток был зафиксирован при использовании МИД с  $d_{A-K} = 9 \text{ мм}$  и  $S_A = 470 \text{ см}^2$ :  $N_p = (4.5 \pm 2.5) \cdot 10^{16}$ , что соответствует среднему току протонов с  $E_i \geq 600 \text{ кэВ}$   $I_i = 86 \text{ кА}$ . Учитывая, что обычно протонная фракция в МИП при использовании анода из  $(\text{CH}_2)_n$  не превышает 70 % [9], получаем, что амплитуда полного тока МИП была не менее 120 кА при энергозапасе  $\sim 9 \text{ кДж}$ . Таким образом, эффективность генерации МИП в этом случае составила 18 % от энергии, накопленной в индуктивности. Мощ-

ность ионного пучка в диоде достигала  $10^{11} \text{ Вт}$  при плотности мощности на оси диода до  $10^{10} \text{ Вт/см}^2$  и плотности тока МИП  $j_i = 14 \text{ кА/см}^2$ . Из приведенной таб-

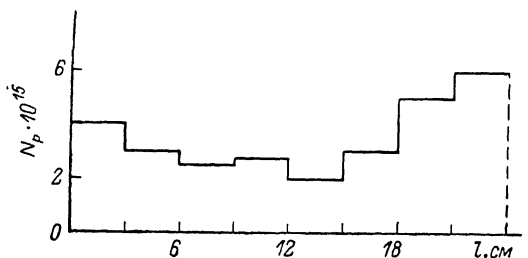


Рис. 3. Распределение плотности протонов с  $E_p > 600 \text{ кэВ}$  по длине диода.

$d_{A-K} = 9 \text{ мм}$ ,  $l = 250 \text{ мм}$ ,  $B_z = 7 \text{ кГс}$ .

лицы следует также, что уменьшение  $d_{A-K}$  до 6 мм привело к резкому уменьшению длительности высоковольтной ( $\geq 600 \text{ кВ}$ ) фазы импульса напряжения за счет быстрого замыкания межэлектродного зазора анодной и катодной плазмами. В этом случае происходило более раннее включение анода диода с образованием анодной плазмы и началом генерации МИП с плотностью тока на анодной поверхности  $j_i \approx 355 \text{ А/см}^2$ . Использование анодной геометрии с  $d_{A-K} = 13 \text{ мм}$  показало существенное различие по сравнению со случаем  $d_{A-K} = 6 \text{ мм}$ , выражающееся прежде всего в увеличении длительности высоковольтной фазы импульса напряжения и запаздывания максимума мощности диода от максимума мощности ПЭР. Плотность ионного тока на анодной поверхности при  $d_{A-K} = 13 \text{ мм}$  составила в среднем  $80 \text{ А/см}^2$  при чайлд-ленгмюровской плотности тока  $20 \text{ А/см}^2$ .

На рис. 3 приведено распределение плотности протонов по длине диода для  $d_{A-K} = 9 \text{ мм}$  и  $l = 250 \text{ мм}$ . Наличие максимумов плотности протонного потока в начале и конце МИД связано, по-видимому, с возможным наличием плазмы с малой концентрацией ( $n_i < 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) в начале диода и, как следствие этого, частичным снятием ограничения по объемному заряду в этой области диода. Увеличение протонного потока к концу МИД является следствием, как уже говорилось выше, незамкнутого характера электронного дрейфа в межэлектродном зазоре.

### Заключение

Проведенные эксперименты по генерации МИП в МИД, установленном после ПЭР, позволяют сделать следующие выводы.

1. Использование внешнего магнитного поля после ПЭР сводит к минимуму уменьшение напряжения на диоде за счет его индуктивного падения на участке ПЭР—диод и обеспечивает практическое отсутствие плазмы в области расположения диода.

2. При накопленной энергии в генераторе 96 кДж и переданной в индуктивность 50 кДж энергозапас МИП, генерируемого в МИД, составил 9 кДж при амплитуде ионного тока 120 кА, энергии ионов до 850 кэВ и мощности ионного пучка  $10^{11} \text{ Вт}$ .

Дальнейшие экспериментальные исследования в этом направлении будут связаны как с работой по повышению импеданса ПЭР, так и с получением активного источника анодной плазмы.

- [1] *Абдуллин Э. Н., Бугаев С. П., Баженов Г. П. и др.* // Физика плазмы. 1985. Т. 11. № 1. С. 109—110.
- [2] *Ковальчук Б. М., Месяц Г. А.* // ДАН. 1985. Т. 284. № 4. С. 857—859.
- [3] *Месяц Г. А., Диденко А. Н., Абдуллин Э. Н. и др.* // ДАН. 1986. Т. 289. № 1. С. 84—87.
- [4] *Ананьин П. С., Бугаев С. П., Быстрицкий В. М. и др.* // Тр. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Новосибирск, 1988. Ч. II. С. 118—120.
- [5] *Ананьин П. С., Быстрицкий В. М., Красик Я. Е., Синебрюхов А. А.* // Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1987. Т. 30. Вып. 10. С. 122.
- [6] *Быстрицкий В. М., Диденко А. Н., Толопа А. М.* // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 3. С. 566—568.
- [7] *Быстрицкий В. М., Красик Я. Е., Матвиенко В. М.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 3. С. 463—468.
- [8] *Быстрицкий В. М., Диденко А. Н.* // Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [9] *Быстрицкий В. М., Волков С. Н., Красик Я. Е.* // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 4. С. 447—454.

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

Поступило в Редакцию  
13 апреля 1989 г.  
В окончательной редакции  
15 мая 1990 г.