

прямой диффузии, при котором сохраняется односторонний режим работы ИОП с минимальными потерями для  $TE$ -поляризации. На втором этапе подбирается время заглупления, соответствующее максимальному значению коэффициента экстинкции. Метод двухстадийной ионообменной диффузии широко применяется для создания заглупленных волноводов в различных стеклах и материалах с использованием различных ионов.

Ввиду того что механизм возникновения резонансных потерь для  $TM$ -поляризованного излучения не зависит от конкретного механизма, приводящего к образованию волноводного слоя, мы считаем, что разработанный в настоящей работе подход может быть использован при создании ИОП на основе других материалов.

### Список литературы

- [1] Findakly T., Chen B. // Electron. Lett. 1984. Vol. 20. N 3. P. 128-129.
- [2] Bristow J.P.G., Nutt A.C.G., Laybourn P.J.R. // Electron. Lett. 1984. Vol. 20. N 25/26. P. 1047-1048.
- [3] Grand G., Valette S. // Electron. Lett. 1984. Vol. 20. N 18. P. 730-731.
- [4] Ctyroky J., Henning H.-J. // Electron. Lett. 1986. Vol. 22. N 14. P. 756-757.
- [5] Polky J.N., Mitchell G.L. // JOSA. 1974. Vol. 64. P. 274-279.
- [6] Yamamoto Y., Kamiya T., Yanai H. // IEEE J. Quant. El. 1975. Vol. QE-11. N 9. P. 729-736.
- [7] Rashleigh S.C. // Opt. and Quant. Electron. 1976. Vol. 8. P. 49-60.
- [8] Дуанов Е.М., Лындин Н.М., Сычугов В.А., Тищенко А.В. // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. № 6. С. 1151-1152.
- [9] Kaminow I.P., Mammel W.L., Weber H.P. // Appl. Opt. 1974. Vol. 13. N 2. P. 396-405.

Институт общей физики  
Москва

Поступило в Редакцию  
24 февраля 1992 г.

04;10;12  
© 1992 г.

Журнал технической физики, т. 62, в. 12, 1992

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ В ПЛАЗМОНАПОЛНЕННОМ ДИОДЕ

В.М.Быстрицкий, С.В.Григорьев, А.В.Харлов

### Введение

Одна из основных проблем в генерации мощных ионных пучков (МИП) связана с источником МИП — анодной плазмой. Наиболее распространенными источниками анодной плазмы для ионных диодов являются так называемые пассивные источники, в которых плазма образуется при поступлении импульса напряжения на диод за счет пробоя диэлектрических включений на поверхности анода. Такой источник дает многокомпонентный состав ионов, к тому же имеется значительная задержка между началом импульса напряжения и появлением ионного тока [1], что значительно ухудшает эффективность генерации МИП. В связи с этим представляют интерес исследования работы магнитно-изолированного ионного диода (МИД) с активным источником анодной плазмы, позволяющим устранить временную задержку начала генерации ионного пучка и получать МИП с контролируемыми параметрами. В этом случае динамика

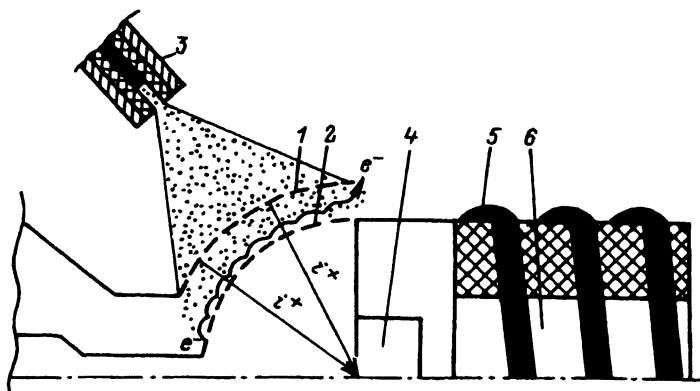


Рис. 1. Схема плазмонаполненного диода.

1 — анод, 2 — катод, 3 — плазменные пушки, 4 — диагностика, 5 — развязывающая индуктивность для вывода сигналов с высоковольтного электрода, 6 — активный делитель напряжения.

работы МИД и параметры генерируемого МИП существенно отличаются от случая с пассивным источником анодной плазмы. Это связано с тем, что в начальный момент анод-катодный (АК) зазор заполнен плазмой с высокой проводимостью и в зависимости от параметров плазмы и параметров цепи могут реализовываться различные режимы работы диода. Определяющее влияние на характер работы плазмонаполненного диода могут оказывать параметры цепи, в которую он включен. Если индуктивность цепи мала ( $L \ll R_r \cdot T_r$ ), где  $L$  — индуктивность цепи,  $R_r$  — сопротивление генератора,  $T_r$  — длительность импульса напряжения, то диод работает в режиме плавного растущего импеданса, а при  $L \geq R_r \cdot T_r$  диод работает в режиме, подобном режиму работы плазменного прерывателя тока (ППТ). Первый режим исследовался в большом числе работ [2,3]. Для него характерной чертой является плавный рост импеданса и значения напряжения и тока, близкие к согласованным. В работе [4] исследовался плазмонаполненный МИД с  $B_r$  полем. Параметры цепи в этой работе удовлетворяли условию  $L \simeq R_r \cdot T_r$ , однако режимов, характерных для ППТ, получено не было. Можно предположить, что это объясняется наличием внешнего магнитного поля, за счет которого уменьшаются плотность плазмы в АК зазоре и ее потоковая скорость, что соответственно уменьшает скорость размыкания плазменного слоя. В связи с этим представляется перспективным исследование плазмонаполненного диода, работающего в режиме самоизоляции, без внешнего магнитного поля.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований по генерации и фокусировке МИП в плазмонаполненном диоде с внешним источником анодной плазмы.

## 1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на ускорителе «ПАРУС» с параметрами  $U = 0.8$  МВ,  $\rho = 2.8$  Ом,  $\tau = 60$  нс [5]. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Использовался сферический диод инверсного типа. Анод и катод изготавливались методом холодной штамповки из нержавеющей стали толщиной 1.5 мм. Радиус катода составлял 40 мм, радиус анода 55 мм, АК

зазор соответственно составлял 15 мм. На анод и катод наносилась сетка отверстий диаметром 2 мм таким образом, что геометрическая прозрачность анода и катода составляла около 50%. Плазма инжектировалась в диод со стороны анода с помощью 8 плазменных пушек коаксиального типа, расположенных в средней плоскости анода. Расстояние от пушек до анодной поверхности составляло 8 см, что позволяло отделить нейтральную компоненту от основного плазменного сгустка. Питание пушек осуществлялось от одного конденсатора ИК-50-3 через развязывающие сопротивления из нихрома величиной 0.5 Ом. Напряжение составляло 30 кВ, при этом общий ток через пушки достигал 70 кА и время до максимума тока составляло 2 мкс. Индуктивность цепи до диода составляла около 140 нГн.

## Диагностика

Контроль работы ускорителя проводился стандартными методами — емкостными и активными делителями напряжения и поясами Роговского, установленными на различных участках ускорителя. Электронные потери на анод МИД измерялись коллимированными цилиндрами Фарадея (КЦФ), которые регистрировали электроны с углом падения на анод  $\geq 45^\circ$ . Для диагностики МИП использовались калориметр для измерения полного энерговклада ионного пучка, КЦФ с поперечным магнитным полем для определения плотности ионного тока, трековые детекторы для получения автографов МИП, сходящегося в катодную полость. Сигналы с высоковольтного электрода снимались с помощью развязывающей индуктивности  $L \simeq 3$  мкГн, установленной на корпусе делителя напряжения. Для определения процентного содержания высокоэнергетичных протонов ( $E_p \geq 450$  кэВ) в пучке использовалась активационная методика по реакции  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)$ .

## 2. Экспериментальные результаты

Плотность плазмы в АК зазоре и ее потоковая скорость определялись с помощью КЦФ с отрицательным смещением, работающего в режиме плазменного зонда с насыщением по ионному току. Эти измерения проводились без срабатывания ускорителя. Было определено, что плотность плазмы и ее потоковая скорость составляют  $2 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$  и  $5 \times 10^6$  см/с соответственно при зарядном напряжении 35 кВ. Концентрация протонов в плазме может быть оценена с использованием следующего выражения, основанного на предположении эмиссии с ограничением по пространственному заряду из плазменной границы:

$$C_p \simeq (Z_i \cdot M_p / M_i)^{0.5} \cdot p / (1 - p),$$

где  $p$  — относительная доля тока протонов в полном токе (измерялась экспериментально),  $M_i$  — средняя масса непротонной фракции в плазме,  $M_p$  — масса протона,  $Z_i$  — средний заряд непротонной фракции.

В нашем случае  $M_i = 12$  соответствует ионам углерода:  $Z_i = +2$  (эксперимент). Из активационных измерений было получено  $p = 0.4$ , что соответствует 25% доли протонов в плазме, формируемой плазменными пушками. Напряжение на ионном диоде измерялось делителем напряжения  $b$  (рис. 1) непосредственно на катоде без необходимости индуктивной

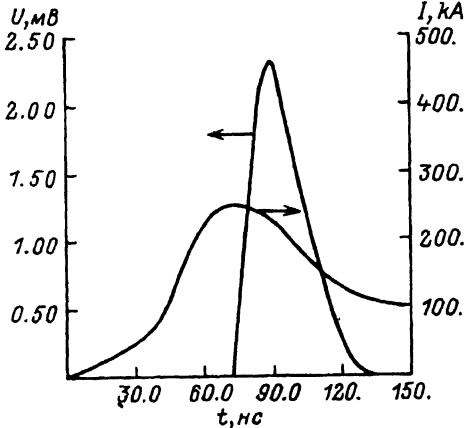


Рис. 2. Характерные импульсы напряжения и полного тока диода.

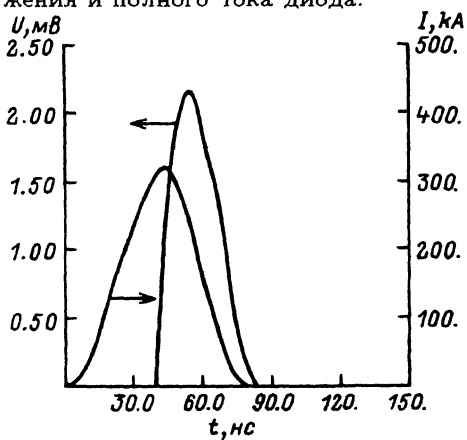


Рис. 4. Напряжение и ток диода, полученные численным моделированием.

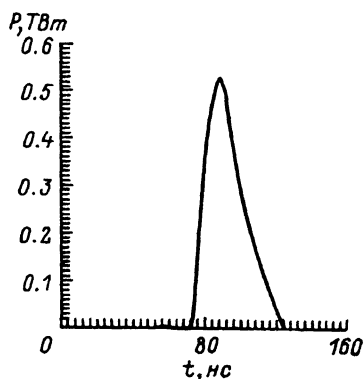


Рис. 3. Мощность, выделяемая в диоде.

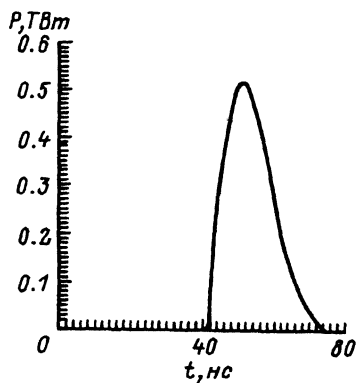


Рис. 5. Расчетная мощность диода.

коррекции. Момент начала обрыва тока контролировался по датчику тормозного излучения (*pin*-диод).

Индуктивность цепи позволяла накапливать в контуре до диода ток 300 кА, оптимальное размыкание наблюдалось при токе 250–260 кА. Время задержки между началом генерации плазмы и срабатыванием ускорителя составляло при этом около 2 мкс. При этих условиях наблюдалась стабильная работа диода с высокой воспроизводимостью. На рис. 2 приведены типичные осциллограммы напряжения и тока диода, на рис. 3 — мощность, выделяемая в диоде. Напряжение на диоде составляло при этом 2–2.4 МВ, мощность, выделяемая в диоде, достигала 0.5 ТВт, что соответствует повышению мощности более чем в два раза по сравнению с идеально согласованной нагрузкой. Калориметрические измерения полной энергии ионного пучка оказались затрудненными вследствие высокой плотности тока МИП и, как следствие этого, уноса материала с поверхности калориметра. Для уменьшения этого эффекта осуществлялось ослабление МИП набором сеток. Таким образом, была оценена нижняя граница энергии МИП, прошедшего в катодную по-

лость, на уровне 1 кДж. С учетом геометрии прозрачности катода это соответствует энергосодержанию МИП  $\geq 2$  кДж и соответственно эффективности генерации МИП  $\geq 20\%$ . С помощью КЦФ было получено, что плотность ионного тока на аноде  $i_a \simeq 400$  А/см<sup>2</sup>, что согласуется с калориметрическими измерениями. Энергия ионного пучка, прошедшего через отверстие диаметром 1 см в фокальной плоскости, измеренная калориметром, выполненным в форме стакана, составила  $\simeq 500$  Дж, что соответствует плотности ионного тока 15 кА/см<sup>2</sup>. С помощью активационной диагностики по реакции  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)$  было получено, что плотность тока протонов в фокусе с энергией выше 450 кэВ составляет  $\simeq 6$  кА, т.е. доля протонов в пучке около 40%.

Были проведены численные расчеты работы плазмонаполненного диода с использованием одномерной плазмоэрозионной модели, аналогичной работе [6]. В расчетах использовались экспериментально измеренная скорость плазмы и двухкомпонентный состав плазмы ( $\text{C}^{+2}$ ,  $\text{H}^+$ ). При расчете вводилась трапецеидальная форма импульса генератора (20 нс — время нарастания и спада, 30 нс — плоская часть импульса) без учета предимпульса. На рис. 4 и 5 приведены зависимости напряжения, тока и мощности диода от времени, полученные с помощью численного моделирования. Основное различие между экспериментом и численным моделированием заключается во временном сдвиге на  $\simeq 40$  нс, что обусловлено наличием предимпульса в эксперименте.

### Заключение

В экспериментах с плазмонаполненным диодом достигнута его стабильная работа в режиме обострения мощности с увеличением мощности диода в 2.5 раза по сравнению со случаем согласованной нагрузки. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с численным моделированием по плазмоэрозионной модели. Азимутальная неоднородность МИП не превышала 30%. Для дальнейшего улучшения работы диода предложенной конфигурации необходимо применение плазменных пушек с однокомпонентным составом ионов и более однородным заполнением АК зазора плазмой. В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность за полезные обсуждения Я.Е.Красину, С.Н.Волкову, И.В.Лисищину.

### Список литературы

- [1] Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Атомиздат, 1984.
- [2] Матвеевко В.М. Канд. дис. Томск, 1987.
- [3] Horioka et al. // Proc. 8th Intern. conf. on High Power Electron and Ion Beam Research and Technology. Novosibirsk, 1990. P. 822-828.
- [4] Быстрицкий В.М. и др. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Т. 2. С. 94-96.
- [5] Быстрицкий В.М., Матвеевко В.М., Харлов А.В. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Т. 2. С. 124-126.
- [6] Goldstein S.A., Meger R.A., Ottinger P.F. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. P. 774-789.

Институт сильноточной электроники  
Томск

Поступило в Редакцию  
20 декабря 1991 г.  
В окончательной редакции  
16 июля 1992 г.