

ФОРМИРОВАНИЕ КАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОМ СИЛЬНОТОЧНОМ ДИОДЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ПРИ ПЛОТНОСТИ ТОКА ДО 200 А/см^2

В.А. Пападичев, Т.А. Шелковенко

Описаны эксперименты по формированию плотной плазмы на катоде сильноточного диода с магнитной изоляцией с целью получения килоамперных токов отрицательных ионов водорода. Достигнуты токи до 7 кА при плотности тока до 200 А/см^2 .

Трудности фокусировки и транспортировки ионных пучков в УТС с инерциальным удержанием могут быть сняты применением пучков быстрых атомов, полученных перезарядкой отрицательных ионов. Работы по сильноточным пучкам отрицательных ионов были начаты в Физическом институте им. П.Н. Лебедева в 1982 г. /1/, когда в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией был получен ток до 5 кА. Однако условия генерации H^- не были тогда ясны, а воспроизводимость результатов была низкой. В связи с этим предприняты исследования по методам формирования в таких диодах плотной катодной плазмы с высоким содержанием H^- . Эксперименты проводились в диапазоне напряжений 300–1000 кВ при токах диода 10–80 кА и длительности импульса на полувывоте 40–150 нс. Импульс напряжения состоял из основного импульса и предимпульса длительностью 1–2 мкс величиной 35–150 кВ (рис. 1).

Схема диода с магнитной изоляцией приведена в работах /1,2/. Аксиальное магнитное поле напряженностью до 20 кЭ создавалось импульсным соленоидом. Общий ток диода измерялся шунтом обратного тока. Число ионов H^- за импульс определялось активационной методикой с использованием реакций $^{12}\text{C}(\text{p},\gamma)^{13}\text{N}$ и $^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$ и последующим измерением позитронной активности ^{13}N и ^{15}O парным спектрометром совпадений. Для регистрации расширения плазмы применялось фотографирование диода с торца и снимались автографы электронного тока, текущего с границы плазмы вдоль магнитного поля на торец диода /1–5/.

Катодная плазма образовывалась при поверхностном пробое диэлектрика во время гредимпульса. С этой целью в разрыв металлического катодного штока помещался диэлектрический цилиндр или на катодный шток одевался полый тонкостенный (1–0,5 мм) полиэтиленовый цилиндр с перфорацией. Пробой по поверхности диэлектрика сопровождался значительным газоотделением, заметным по ухудшению вакуума и износу диэлектрического катода, что позволяет оценить общее выделение газа на уровне 10^{21} молекул и плотность газа у катода диода в $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при диаметре катода 2 см и длине диэлектрика 10 см.

Фотографии диода с торца и автографы электронного тока диода показывают, что при наличии диэлектрика катодная плазма расширяется, сокращая эффективный зазор анод – катод. Увеличение радиуса плазмы зависит от амплитуды и, в основном, от длительности предимпульса, приводя при больших длительностях к закорачиванию диода (иногда даже во время предимпульса). При отсутствии диэлектрика (металлический катод) катодная плазма расширяется гораздо слабее и магнитная изоляция в диоде не нарушается.

В экспериментах исследовались зависимости числа отрицательных ионов водорода в импульсе от длительности положительной и отрицательной частей предимпульса. Было обнаружено, что для эффективной генерации H^- необходимы как положительная так и отрицательная части предимпульса, причем минимальные длительности каждой части предимпульса, когда еще наблюдается заметный ток H^- , составляют 100 – 200 нс. При отрезании положительной или отрицательной частей предимпульса число H^- падает более чем на порядок (рис. 2). При большом зазоре предимпульсного разрядника обе части предимпульса отсутствуют, и активность в мишени не регистрировалась.

Так как температура слоя плазмы, откуда вытягиваются отрицательные ионы водорода, невысокая ($T_n < 1 \text{ эВ}$), можно оценить, что плотность H^- при плотности тока $j = env = 150 \text{ А/см}^2$ равна $0,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Принимая, что плотность плазмы в 10 раз, а газа в 100 раз выше плотности H^- [6], получим для плотности газа $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что согласуется с оценками по газоотделению. Время жизни ионов H^- в такой слабоионизованной плазме $\tau = (\sigma n v)^{-1} \approx 2 \text{ нс}$. Слой, где рождаются H^- , должен лежать вблизи эмиссионной границы катодной плазмы. Так как пробег ионов в газе плотностью 10^{17} см^{-3} составляет 30 мкм, то слой газа должен иметь резкую границу. Это заставляет предполагать, что для получения H^- в течение всего импульса напряжения длительностью около 100 нс необходимо протекание тока значительной плотности по катодной плазме с тем, чтобы H^- образовывались во время импульса напряжения.

Для подтверждения этой гипотезы были проведены эксперименты в обратной геометрии, т.е. с внешним катодом и внутренним анодом в виде графитового стержня. Катодная плазма образовывалась с помощью двухполярного предимпульса, причем, как и в других экспериментах, во время второй части предимпульса в торцевом диоде протекал ток. Ток, текущий по катодной плазме в осевом направлении во время основного импульса, регулировался изменением зазора между анодом и катодом в торце диода. На рис. 3 приведена зависимость активности графита на аноде от тока диода, который практически равен току, текущему по плазме. Из этих данных следует, что для образования достаточной плотности H^- необходима линейная плотность тока по плазме равная 3–4 кА/см. С учетом скин-эффекта (это видно по автографам пучка) плотность тока по плазме можно оценить в 15–20 кА/см². Следует заметить, что в экспериментах с диодами с магнитной изоляцией типа, предложенного в Корнельском университете [7–9], электронный ток по катоду невелик и его может не хватать для образования H^- в катодной плазме.

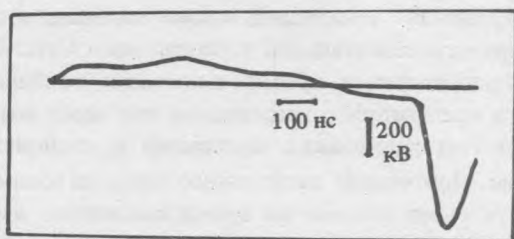


Рис. 1

Рис. 1. Импульс напряжения в диоде и полный предимпульс.

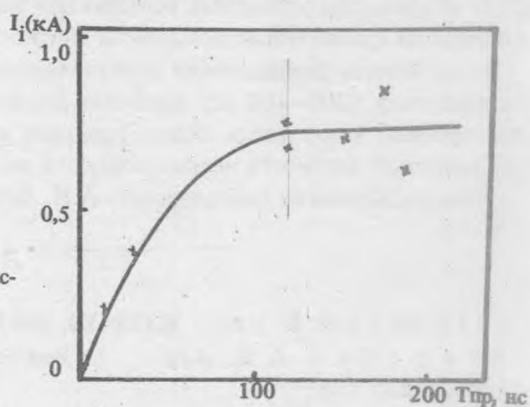


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость тока ионов H^- от длительности отрицательной части предимпульса (ускоритель "Импульс").

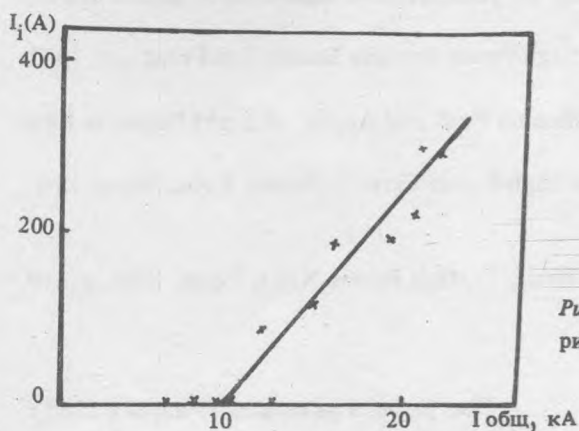


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость тока ионов H^- от тока диода в обратной геометрии.

Исследование автографов электронного тока с катода на торец анода показало, что в плазме проявляются неустойчивости типа желобковой (неоднородность по азимуту, "языки"). С целью стабилизации неустойчивостей была использована геометрия с минимумом магнитного поля на оси, что достигалось помещением двух медных цилиндров на аноде по краям диэлектрического катода. Неустойчивость расширения плазмы стабилизировалась, и автограф тока на торец с поверхности плазмы имел вид четко очерченной дуги окружности с угловым размером $250\text{--}300^\circ$ при зазоре между катодной плазмой и анодом $3\text{--}5$ мм. Расчет тока H^- по активности мишени дает значение до 7 кА, а для плотности тока — до 200 А/см² при напряжении на диоде в диапазоне $600\text{--}800$ кВ.

Эксперименты показали, что на режим движения и устойчивость плазмы влияют также форма и расположение разрезов и отверстий в аноде. Для более стабильной работы диода разрезы в аноде должны допускать протекание азимутального тока по нему, что создает условия для сохранения магнитного потока внутри анода и препятствует разлету плазмы из-за роста давления магнитного поля. Для сохранения азимутальной симметрии плазмы обратный аксиальный ток диода также должен течь беспрепятственно по всему периметру анода. Лучше всего отвечает этим требованиям анод с просверленными отверстиями для пролета ионов. Диаметр отверстий должен быть меньше эффективного радиального размера диода.

Таким образом, из данных экспериментов следует, что для получения плотности тока H^- в $100\text{--}200$ А/см² в сильноточных диодах необходимо иметь предимпульс положительной и отрицательной полярности с длительностью каждой части более 200 нс и амплитудой $40\text{--}150$ кВ и обеспечить протекание по катодной плазме электронного тока с линейной плотностью $3\text{--}4$ кА/см (или $15\text{--}20$ кА/см²).

Тот факт, что для образования достаточной концентрации H^- в катодной плазме необходим двухполярный предимпульс, заставляет предположить, что во время положительной и отрицательной частей предимпульса образуется плазма с разными параметрами (концентрация, степень ионизации, температура). Это можно объяснить тем, что во время положительного предимпульса аксиальный ток через плазму не течет, тогда как во время отрицательной части он достигает нескольких килоампер и, следовательно, вклад энергии в плазму может быть более значительным. Протекание аксиального тока по плазме из-за скин-эффекта по внешнему слою и вблизи границы двух слоев плазмы во время основного импульса может создать благоприятные условия для генерации H^- и их выхода в ускоряющий зазор через внешний слой плазмы сравнительно невысокой плотности.

Возможность стабилизации неустойчивостей плазмы и сравнительно малая необходимая длительность предимпульса ($200\text{--}300$ нс) позволят перейти к диодам с геометрическим зазором анод-катод $3\text{--}5$ мм (фактический зазор диода между границей катодной плазмы и анодом составит $1\text{--}2$ мм). Это соответствует расчетной плотности ленгмюровского тока более 1 кА/см² при напряжении диода $700\text{--}800$ кВ.

Авторы выражают благодарность А.Н. Лебеву и И.С. Данилкину за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агафонов А. В. и др. ЖЭТФ, 84, 2040 (1983).
2. Агафонов А. В. и др. IX Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1985, т. 2, с. 168.
3. Коломенский А. А. et al. Proc. 5th Int. Conf. on High-Power Particle Beams, San-Francisco, 1983, p. 533.
4. Коломенский А. А. et al. Proc. 2th Europ. Workshop on Prod. and Applic. of Light Negative Ions, Palaiseau, France, 1986, p. 87.
5. Коломенский А. А. et al. Proc. 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams, Kobe, Japan, 1986, p. 208.
6. Bacal M. Phys. Scripta, T2/2, 467 (1982).
7. Moustazis S. et al. Proc. 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams, Kobe, Japan, 1986, p. 119.
8. Fisher A. et al. Ibid, p. 116.
9. Bistritsky V. M. et al. Ibid, p. 113.

Поступила в редакцию 29 апреля 1987 г.