

04;10

Защита анодной фольги сильноточного ускорителя электронов от повреждения дуговыми разрядами

© В.В. Ежов, Е.В. Крастелев, Г.Е. Ремнев

НИИ высоких напряжений ТПУ, Томск
Международный институт прикладной физики и высоких технологий,
Москва
E-mail: evv@hdv.tpu.ru

Поступило в Редакцию 12 декабря 2008 г.

Приведены результаты экспериментального изучения механизма повреждения анодной фольги при выводе мощного импульсного электронного пучка из сильноточного диода. Эксперименты выполнены на сильноточном электронном ускорителе ТЭУ-500 [1]. Установлено, что повреждение фольги происходит в результате образования на ней катодных пятен и интенсивной эмиссии электронов в течение импульсов положительной полярности (пост-импульсы), следующих за основным отрицательным импульсом ускоряющего напряжения, и формирования в промежутке диода дугового разряда. Улучшение согласования диода с формирующей линией ускорителя и применение дополнительного анодного электрода, образующего с катодом вакуумный разрядник–кроубар, практически исключает разрушение анодной фольги и увеличивает ресурс ее работы до 10^5 импульсов.

PACS: 52.59.Mv, 84.70.+p

Проблема сохранности анодной фольги при выводе пучка электронов из вакуумного диода является одной из ключевых для многих практических применений сильноточных ускорителей [2]. В ранее выполненных работах отмечалось, что существенную роль в повреждении фольги играют такие факторы, как увеличение потерь в фольге из-за наличия электронов с малой энергией на фронтах импульсов, локальный перегрев в результате пинчевания пучка под действием собственного магнитного поля [3,4], возникновение дугового разряда при закорачивании ускоряющего промежутка плазмой, генерируемой в процессе работы диода [5].

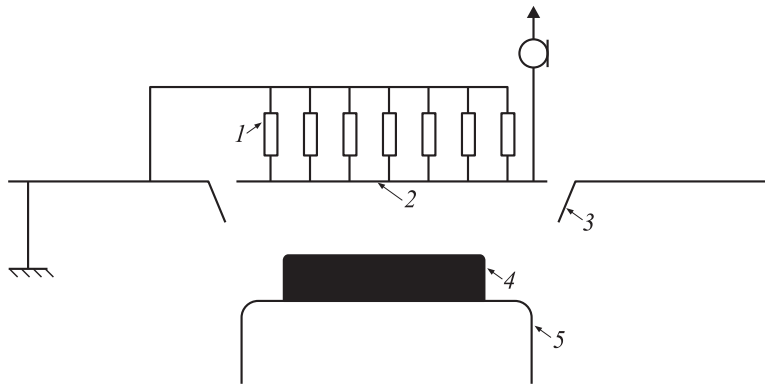


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — низкоомный шунт, 2 — коллектор (анод), 3 — защитный электрод, 4 — катод, 5 — катододержатель.

Настоящая работа посвящена изучению механизма разрушения анодной фольги сильноточного диода в условиях формирования сплошного, однородного по сечению пучка, т.е. когда влиянием собственного магнитного поля на распределение плотности тока можно пренебречь, и разработке мер по увеличению срока ее службы.

Эксперименты проведены со следующими параметрами ускорителя: амплитуда импульсов ускоряющего напряжения — до 500 кВ, тока пучка — до 10 кА, длительность импульсов на полувысоте — 60 нс, частота повторения — до 3 Гц. Система формирования импульсов ускоряющего напряжения включает в себя первичный накопитель — генератор Аркадьева–Маркса на напряжение 250 кВ, двойную формирующую линию (ДФЛ) и выходной одновитковый трансформатор для удвоения амплитуды импульса напряжения на диоде [1]. Выходной импеданс генератора — 40 Ω .

Геометрия диода, использованного в эксперименте, показана на рис. 1. Диаметр катода 60 мм, ускоряющий промежуток между катодом и анодом (фольгой) — 18 мм. В ходе экспериментов регистрировались импульсы ускоряющего напряжения, тока диода и тока пучка. Для измерений полного тока собственно в диодном промежутке на место анодной фольги устанавливался коллектор с полированной поверхностью, нагруженный низкоомным шунтом, как показано на рис. 1. Дополнительный анодный электрод в виде конического кольца (поз. 3

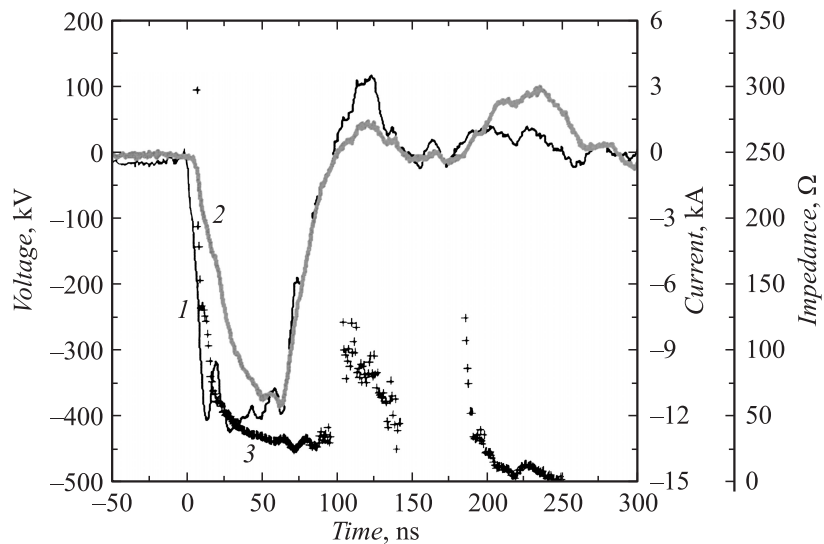


Рис. 2. Осциллограммы ускоряющего напряжения 1, тока коллектора 2 и зависимость импеданса диода от времени 3.

на рис. 1) был введен в диод позднее в ходе отработки мер по защите фольги. Рабочее давление остаточного газа в диоде составляло $6 \cdot 10^{-5}$ Торр.

Для генератора импульсов ускоряющего напряжения диод со взрывоэмиссионным плазменным катодом представляет собой нагрузку с изменяющимся во времени импедансом. В силу этого при разряде ДФЛ возникают частичные отражения от диода и не происходит полного разряда линии в течение основного импульса, что приводит к появлению цуга пост-импульсов [2].

Эксперименты с выводом пучка из диода через фольгу показали, что быстрое разрушение фольги происходит в тех случаях, когда в течение положительных постимпульсов напряжения в диоде регистрируются значительные токи положительной полярности. Осциллограммы тока через диодный промежуток с коллектора, установленного вместо анодной фольги, и напряжения на диоде для такого режима показаны на рис. 2. Там же приведена полученная из обработки осциллограмм зависимость импеданса диода $Z = U/I$ от времени.

Наличие тока во время положительного пост-импульса указывает на появление на коллекторе (или фольге) анодной плазмы, которая является источником электронов, ускоряемых в направлении катода. Как видно из зависимости I (рис. 2), импеданс диода в это время заметно превосходит величину импеданса во время основного импульса. Это свидетельствует о локальном характере эмиссии с фольги, т.е. образовании отдельных пятен, не охватывающих всю поверхность. В течение первого положительного пост-импульса величина импеданса падает от ≈ 100 до $\approx 50 \Omega$ в результате разлета как катодной, так и образовавшейся анодной плазмы. В течение второго пост-импульса величина импеданса диода продолжает уменьшаться приблизительно с той же скоростью. В конечном счете, происходит закорачивание промежутка катодной и анодной плазмой, и возникает дуговой разряд с малым падением напряжения на промежутке.

В таком режиме работы диода на фольге или полированной поверхности коллектора фиксируются эрозионные следы, характерные для катодных пятен вакуумных дуговых разрядов (рис. 3). Формирование отдельных катодных пятен локализует области протекания тока, что приводит к резко неоднородному тепловыделению в фольге, появлению механических напряжений, трещин и, в конечном счете, ее разрушению. Появление сквозных отверстий и разгерметизация диода при выводе пучка в камеру дрейфа с повышенным давлением происходит в таком режиме в течение нескольких десятков—сотен импульсов.

Сравнительные измерения с катодами двух типов — сплошным из графита и многоострийным из углеродной ткани — показали, что более быстрое формирование эмитирующей катодной плазмы при использовании многоострийного катода улучшает согласование диода с формирующей линией и уменьшает энергию пост-импульсов. Время жизни фольги с катодом из углеродной ткани возрастало в десятки раз и составляло $\sim 10^3$ импульсов. Тем не менее и в этом случае наблюдалось появление тока в диоде в течение положительных пост-импульсов, а на поверхности анода фиксировались характерные следы эрозии, свойственные быстро перемещаемым катодным пятнам вакуумной дуги.

На рис. 3 приведены фотографии следов эрозии на аноде при использовании в качестве катода диска из графита (рис. 3, *a*) и ткани из графитовых нитей (рис. 3, *b*), сделанные после 50 импульсов для каждого случая.

Видно, что в первом случае плотность эрозионных следов значительно выше. На осциллограммах это наглядно проявляется более частым

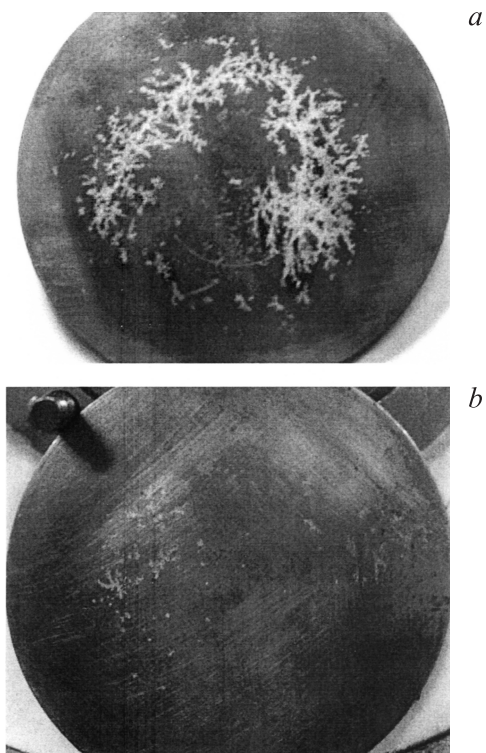


Рис. 3. Следы эрозии на аноде при использовании катода из сплошного графита (*a*) и графитовых нитей (*b*).

появлением импульсов тока во время положительных пост-импульсов с последующим быстрым падением импеданса диода.

Эффективный способ уменьшения влияния пост-импульсов и защиты анодной фольги от разрушения был реализован путем введения дополнительного анодного электрода в виде тонкого конического кольца из нержавеющей стали, охватывающего выпускное окно с фольгой (поз. 3 на рис. 1). Этот электрод вместе с периферийной частью катода образует защитный диодный промежуток, параллельный основному. Во время импульса ускоряющего напряжения на кольцо попадает часть электронного потока, эмитированного с периферии катода. Максималь-

ная плотность тока электронов на нем достигается на обращенной к катоду тонкой кромке, где уже в течение основного импульса происходит образование анодной плазмы. Во время пост-импульсов ток в диоде протекает только в защитном промежутке, вначале в виде электронного потока, эмитированного анодной плазмой, а затем по плазменной перемычке, образующейся в результате разлета катодной и анодной плазмы. Таким образом, образованный с помощью дополнительного электрода и катода второй диодный промежуток представляет собой защитный вакуумный разрядник-кроубар, протекание токов в котором резко снижает вероятность формирования пятен и плазменных дуговых разрядов между катодом и анодной фольгой.

С кольцевым электродом, геометрия которого показана на рис. 1, анодная фольга выдержала 10^5 импульсов при частоте следования 2 Hz без заметных следов эрозии ее поверхности. Суммарные потери тока электронного пучка при этом не превышали 25%.

В отличие от других известных решений, таких как установка перед фольгой на пути пучка сеток или решеток в виде протяженных сот [4], ведение дополнительного кольцевого электрода мало влияет на динамику ускоряемого пучка и практически не сказывается на распределении тока по большей части его сечения. Важно отметить, что в результате вакуумных дуговых разрядов в защитном промежутке не происходит повреждения рабочей поверхности катода, поскольку эти процессы захватывают только периферийные части (кромка и боковая поверхность) катода. Это обстоятельство может иметь решающее значение для обеспечения длительной стабильной работы установки без смены катода.

Список литературы

- [1] Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И., Фурман Э.Г. и др. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 130–134.
- [2] Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
- [3] Абдуллин Э.И., Беломыцев С.Я., Бугаев С.И. и др. // Физика плазмы. 1991. Т. 127. В. 6. С. 741–745.
- [4] Быстрицкий В.М., Ремнев Г.Е., Усов Ю.И. // Изв. вузов. Физика. 1978. № 5. С. 135–137.
- [5] Dolgachev G.I., Nitishinskiy M.S., Ushakov A.G. // Proc. of 12th Intern. Conference on High Power Particle Beams. Haifa, Israel. June 7–12, 1998. V. 1. P. 281–284.