

10;12

Согласование двойной формирующей линии с взрывоэмиссионным диодом

© Г.Е. Ремнев, А.И. Пушкарев, Э.Г. Фурман

НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете
E-mail: airpush@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 октября 2003 г.
В окончательной редакции 17 февраля 2004 г.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния согласующего автотрансформатора, установленного между двойной формирующей линией импульсного сильноточного электронного ускорителя и взрывоэмиссионным диодом, на режим работы диода. Показано, что в случае предварительного принудительного размагничивания сердечника согласующего трансформатора форма импульса напряжения, прикладываемого к катоду, близка к оптимальной, учитывающей уменьшение сопротивления анод-катодного промежутка за счет разлета взрывоэмиссионной плазмы. Согласование двойной формирующей линии с взрывоэмиссионным диодом позволило также значительно снизить амплитуду паразитных предимпульсов и повысить до 90–92% долю энергии, подводимой к диоду в течение основного импульса.

В импульсных электронных ускорителях, формирующих импульсы с энергией электронов более 100 keV, используются в основном взрывоэмиссионные катоды [1]. Для ускорителей с мощностью более 1 kW важно согласование всех узлов с целью снижения потерь энергии, что позволяет повысить ресурс работы ускорителя. При формировании электронного пучка с энергией в импульсе более нескольких десятков джоулей наиболее энергонапряженным узлом является диод. Важно не только обеспечить согласование сопротивления анод-катодного промежутка с волновым сопротивлением наносекундного генератора к моменту подачи высоковольтного импульса, но и учесть уменьшение сопротивления диода за счет разлета плазмы в зазоре.

В работе [2] показано, что для взрывоэмиссионного диода с плоскими электродами, вольт-амперная характеристика которого описывается соотношением Чайльд–Ленгмюра, оптимальная форма импульса напряжения, учитывающая сокращение зазора из-за образования плазмы,

описывается уравнением

$$U(t) = U_0 \cdot \left(1 - \frac{4vt}{d}\right), \quad (1)$$

где U_0 — начальное напряжение, v — скорость движения катодной плазмы, d — расстояние между катодом и анодом.

Зависимость (1) описывает треугольную форму импульса, скорость спада которого равна

$$k = \frac{4v}{d}. \quad (2)$$

Для повышения к.п.д. ускорителя, увеличения долговечности выходного окна ускорителя в наносекундном сильноточном ускорителе между диодом и водяной двойной формирующей линией нами применен повышающий согласующий трансформатор, аналогичный индукторной секции [3], но с принудительным размагничиванием сердечника в процессе формирования импульса. Это позволило в 2 раза снизить напряжение на формирующей линии и генераторе Аркадьева–Маркса, исключить вредное влияние предимпульса без применения обостряющего разрядника. Ускоритель генерирует пучки электронов с энергией в импульсе 180–200 Дж при энергии электронов 500 кеВ и длительности импульса на полувысоте 60 пс. Ускоритель собран по классической схеме: генератор Аркадьева–Маркса, двойная формирующая линия, планарный вакуумный диод с взрывоэмиссионным графитовым катодом диаметром 60 мм.

Газонаполненный генератор импульсного напряжения собран по схеме Аркадьева–Маркса, содержит семь ступеней конденсаторов К75-74 (0,047 мкФ, 40 кВ) по два в каждой ступени. Разрядник первой ступени — управляемый, с тригatronным поджигом. Водяная формирующая линия имеет электрическую длину 30 нс с емкостью плеча $C_1 = C_2 = 6.5 \cdot 10^{-9}$ Ф, и суммарная емкость ее равна выходной емкости генератора импульсного напряжения. Формирующая линия коммутируется газовым разрядником (зазор 11 мм, давление до 8 атм. технического азота). В масляном объеме помещен согласующий трансформатор, содержащий четыре сердечника К360 · 150 · 25 из сплава 50НП · 0.01. Вокруг сердечников уложено 12 витков, которые равномерно по азимуту распаяны к электродам двойной формирующей линии. К катод-анодному промежутку диода к виткам согласующего трансформатора подключен дополнительный виток катододержатель — корпус камеры ускорителя,

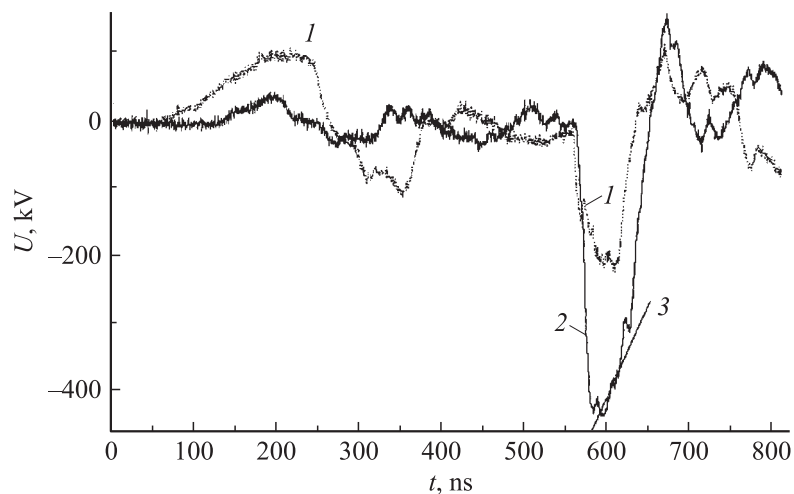


Рис. 1. Осциллограммы напряжения на диоде без внешнего размагничивания (1) и с размагничиванием (2). Прямая 3 — скорость спада напряжения.

и диод оказывается включенным по автотрансформаторной схеме с повышением напряжения в два раза относительно выходного напряжения двойной формирующей линии.

Для снижения амплитуды предимпульса и оптимизации формы основного импульса напряжения, формируемого наносекундным генератором, применено принудительное размагничивание сердечника, что позволяет в момент заряда формирующей линии обеспечивать насыщенное состояние стали ферромагнитного сердечника. Конструкция электронного ускорителя с согласующим автотрансформатором, узел принудительного размагничивания и работа ускорителя в режиме предварительного размагничивания ферромагнитного сердечника автотрансформатора подробно рассмотрены в работах [4,5].

На рис. 1 приведены осциллограммы напряжения, прикладываемого к анод-катодному промежутку, при одинаковом зарядном напряжении на формирующей линии. Предварительное размагничивание сердечника (кривая 2) позволило в 2 раза увеличить амплитуду основного импульса, снизить амплитуду предимпульса с 50 до 5%, а также изменить форму основного импульса. Использование внешнего размагничивания

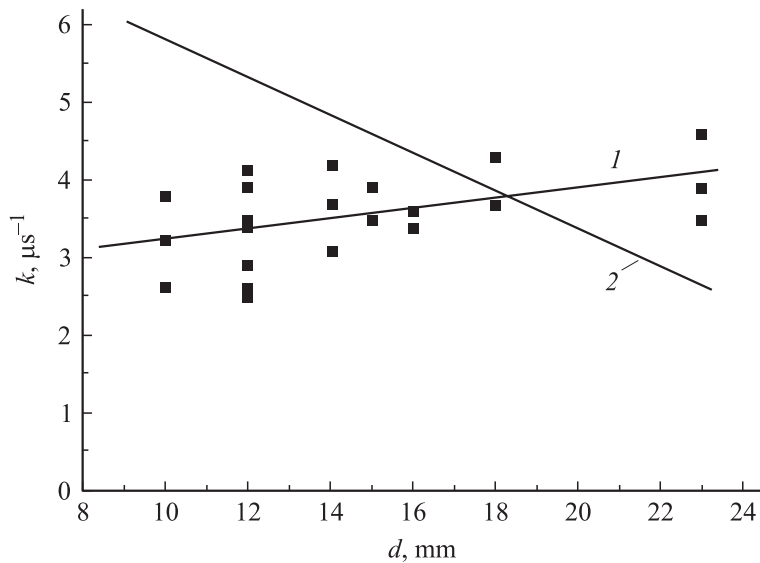


Рис. 2. Зависимость скорости спада напряжения на диоде от величины зазора анод–катод (1) и оптимальная скорость изменения напряжения на диоде с графитовым катодом (2).

позволило увеличить ресурс выходной анодной фольги до 10^4 импульсов, нарушение фольги в основном происходило из-за сбоя в работе схемы размагничивания.

Форма импульса напряжения, генерируемого формирующей линией и согласующим трансформатором при подаче внешнего размагничивания, близка к зависимости, описываемой уравнением (1), в широком диапазоне зазора анод–катод. На рис. 2 приведена зависимость скорости спада напряжения на диоде от величины анод-катодного промежутка.

Скорость спада напряжения рассчитывали по формуле

$$k = \frac{1}{U_m} \frac{dU(t)}{dt}, \quad (3)$$

где U_m — максимальное напряжение.

На рис. 2 приведена также зависимость оптимальной скорости спада напряжения на диоде (прямая 2), рассчитанной по формуле (2) при ско-

рости движения катодной графитовой плазмы $1.5 \cdot 10^6$ cm/s [2,6]. Видно, что при зазоре анод–катод 17–19 mm форма генерируемого напряжения совпадает с оптимальной формой и обеспечивает согласование наносекундного генератора с взрывоэмиссионным диодом в течение импульса. Спад напряжения на диоде в течение импульса обусловлен наличием тока намагничивания ферромагнитного сердечника, форма которого близка к треугольной.

Проведенные исследования показали, что при согласовании взрывоэмиссионного диода с формирующей линией с помощью повышающего автотрансформатора 92–95% энергии, подводимой к диоду, поступает в течение основного импульса (при принудительном размагничивании сердечника трансформатора). В случае отсутствия предварительного размагничивания на формирование основного импульса напряжения расходуется не более 75% энергии, накопленной в формирующей линии. Аналогичные измерения были выполнены на этом же ускорителе, в котором двойная формирующая линия была нагружена на диод через обостряющий разрядник без согласующего трансформатора (схема аналогична схеме ускорителя ТЕМП [7]). Измерения показали, что на формирование основного импульса при этом расходуется 60–70% энергии, запасаемой в формирующей линии. Остальная энергия поступает на генерацию предимпульса (4–5%) и паразитных послеимпульсов.

Список литературы

- [1] *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
- [2] *Месяц Г.А.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 13. С. 36–39.
- [3] *Быстрицкий В.М., Иванов И.Б., Красик Я.Е.* и др. // ПТЭ. 1987. № 5. С. 122–125.
- [4] *Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И.* и др. // ПТЭ. 2004. № 2.
- [5] *Remnev G., Furman E., Pushkarev A.* et al. // Proc. 4th International symposium on pulsed power and plasma applications. Nagaoka, Japan, October 19–22, 2003. P. 172–175.
- [6] *Бугаев А.С., Гушенец В.И., Николаев А.А.* и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 9. С. 37–43.
- [7] *Ремнев Г.Е., Исаков И.Ф., Опекунов М.С.* и др. // Изв. вузов. Физика. 1998. № 4 (приложение). С. 92–110.