

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕРХБЫСТРОГО ВВОДА ЭНЕРГИИ В МИКРОПРОВОДНИКИ С ТОКОМ

С.В. Баряхвостов, М.Б. Бочкарев, Н.Б. Волков, К.А. Нагаев,
*В.П. Тараканов, Е.А. Чингина

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: nbv@ami.uran.ru
*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Цель предлагаемой работы - экспериментальное исследование эффективности сверхбыстрого ввода энергии в микропроводники с током. В наших экспериментах генератор высоковольтных импульсов напряжения «РАДАН-220» с волновым сопротивлением $50\ \Omega$ разряжался на неоднородную коаксиальную линию (вакуумную камеру) длиной 15 см и диаметром 10 см, в центральную жилу которой включались проволоочки из Си диаметром $20\ \mu\text{m}$, Ni – $25\ \mu\text{m}$ и W - $24.5\ \mu\text{m}$ и длиной 5 mm. Амплитуда импульса напряжения составляла 220 kV; длительность фронта - 200–500 ps; запасенная энергия в генераторе - 1 J. Давление в камере изменялось от 10^{-4} до 760 Torr. Напряжение на входе камеры измерялось с помощью емкостного делителя, помещенного в вакуумное масло, а электрический ток - с помощью шунта сопротивлением $0.4\ \Omega$. Сигналы с делителя и шунта регистрировались четырехканальным цифровым осциллографом Tetronix с полосой пропускания 1 GHz. Максимальное значение тока на первой полуволне определялось волновыми характеристиками коаксиальной линии и достигало 2.2 kA.

Также нами производилась съемка собственного свечения канала разряда с помощью цифровых фотокамер Canon 450D и Canon 5D Mark II и системы колец для макросъемки, его непрерывная развертка с помощью стрик-камер АГАТ «СФ-3М» и Cordin-173, а также – фотоэлектронного конденсатора (ФЭК) СПУ-22М, а также - регистрация интегрального спектра и его непрерывная развертка с помощью спектрографа MS 257 и стрик-камеры Cordin-173. Фотографии собственного свечения разряда демонстрируют сложную структуру его канала, наличие вихревых и винтовых структур, ярко светящихся точек, а также - плазменных (электронных) струй.

Установлено, что эффективность ввода энергии и процесс разрушения микропроводников с током зависит от давления окружающего газа. При давлении $\leq 10^{-4}$ Torr форма первой полуволны тока вне зависимости от полярности напряжения источника, диаметра и материала проволоочки имеет провал длительностью 5 нс, не зависящей от указанных параметров. Моделирование с помощью кода КАРАТ разряда РАДАНа-220 на неоднородную коаксиальную линию с медной проволоочкой диаметром $300\ \mu\text{m}$, замкнутую на конце на сопротивление $R=0.4\ \Omega$, показывает, что осциллограмма тока в отличие от эксперимента имеет форму слабо затухающей синусоиды. Сопоставление осциллограмм тока разряда и сигнала с ФЭК показывает, что провалу на первой полуволне тока соответствует первая вспышка свечения длительностью 5 нс, независимой от полярности напряжения и материала проволоочки. Амплитуда же первой вспышки зависит как от полярности, так и от материала проволоочек. Временные развертки спектров свечения разряда указывают на непрерывность спектра излучения во время формирования первой вспышки. Характерные атомарные линии для меди и никеля появляются после первой вспышки и соответствуют свечению ядра продуктов взрыва проволоочки. Оценка температуры по отношению интенсивности трех линий для меди дает температуру 6000 К.

Результаты экспериментов и наши оценки, позволяют заключить, что провал на первой полуволне тока и яркая вспышка в непрерывном спектре связаны с формированием плазменной короны (тонкого кольца, плотно заполненного токовыми нитями) в результате электрического взрыва скин-слоя толщиной $\leq 0.3\ \mu\text{m}$, перехватывающей весь ток. Дальнейшее увеличение скорости ввода энергии приведет к еще большему снижению эффективности ввода энергии в проводник, так как она будет вводиться в плазменную корону, а не в проводник.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект No. 10-08-00691-а), Президиума УрО РАН в рамках проектов фундаментальных исследований, выполняемых совместно учеными УрО, СО и ДВО РАН (проект No. 09-С-2-1002), и программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества» (проект No. 09-П-2-1016).