

МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ МЕДНЫХ И ВОЛЬФРАМОВЫХ ПРОВОДНИКОВ
МИКРОННОГО РАЗМЕРА ПРИ РАЗРЯДЕ НА НЕОДНОРОДНУЮ КОАКСИАЛЬНУЮ ЛИНИЮ
ИСТОЧНИКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ
ИМПУЛЬСА. СТРУКТУРА ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА.

С.В. Баракхостов, М.Б. Бочкарев, Н.Б. Волков, К.А. Нагаев,
О.Р. Тимошенкова, Е.А. Чингина

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, 620016, ул. Амундсена, 106
E-mail: nbv@ami.uran.ru

При наносекундном разряде генератора импульсных токов на микропроводники из тугоплавких (типа вольфрама) и легкоплавких металлов (типа алюминия или меди) структура образующихся в результате электрического взрыва проводников (ЭВП) плазменных каналов существенно отличается. В тугоплавких металлах образуется плазменная корона, «перехватывающую» в себя весь ток разряда, а в легкоплавких плазменная корона отсутствует. Возникает вопрос: какова роль поверхностных явлений и, в частности, термоавтоэлектронной эмиссии в формировании плазменной короны и в разрушении микропроводников, а также возможно ли образование плазменной короны при разряде на микропроводники из легкоплавких металлов? Основная цель предлагаемой работы – экспериментальный поиск ответов на данный вопрос.

В наших экспериментах генератор высоковольтных импульсов напряжения «РАДАН-220» с волновым сопротивлением 50Ω разряжался на неоднородную коаксиальную линию (вакуумную камеру), в центральную жилу которой включались проволоочки из меди диаметром $20\ \mu\text{m}$ и вольфрама - $24.5\ \mu\text{m}$ и длиной $5\ \text{mm}$. Амплитуда импульса напряжения составляла $220\ \text{kV}$; время нарастания до максимума - $200 - 500\ \text{ps}$; запасенная энергия в генераторе - $1\ \text{J}$. Давление в камере изменялось от $10^{-4}\ \text{mm Hg}$ до $1\ \text{атм}$. Напряжение на входе вакуумной камеры измерялось с помощью емкостного делителя, помещенного в вакуумное масло, а электрический ток с помощью шунта. Сигналы с делителя и шунта регистрировались четырехканальным цифровым осциллографом Tetronix с полосой пропускания $1\ \text{GHz}$. Установлено, что максимальное значение тока определяется эффективным волновым сопротивлением и достигает $2.2\ \text{kA}$. Показано также, что при одинаковых условиях форма тока практически не зависит от материала проволоочки. Кроме осциллографических измерений производилась интегральная съемка разряда с помощью цифровой фотокамеры Canon 450D и системы колец для макросъемки, его непрерывная развертка с помощью камеры АГАТ «СФ-3М», регистрация интегрального спектра с помощью спектрографа MS 257, электронная микроскопия поверхности остатков взорвавшихся проволоочек.

Установлено, что процесс разрушения микропроводников зависит от давления окружающего газа и термоавтоэлектронных процессов на поверхности микропроводников с током. Интегральные фотографии разряда демонстрируют существенную неоднородность структуры канала, наличие вихревых и винтовых структур, ярко светящихся точек и наличие плазменных (электронных) струй. Показано, что существует область пониженных давлений (у вольфрамовых проволоочек она шире, чем у медных), в которой проволоочка не разрушается. Эта область разделяет две области с различными механизмами разрушения, которым соответствуют различные формы осциллограмм тока. В области давлений, близких к атмосферному давлению, проволоочки, по-видимому, разрушаются в результате ее взаимодействия с плазмой канала разряда в газе вдоль поверхности проволоочки. В области $P \sim 10^{-4} - 10^{-2}\ \text{mm Hg}$ проволоочки разрушаются в результате собственно ЭВП. В промежуточной области разрушение микропроводников зависит от токов утечки, вызванных процессами термоавтоэлектронной эмиссии, локализации в результате неустойчивости электромагнитной энергии, формирования электронных пучков и плазменных струй. В области высокого вакуума термоавтоэлектронные процессы на поверхности микропроводников также влияют на процесс формирования и структуру канала, как показывает зависимость процесса разрушения от полярности напряжения на проволоочке.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Президиума Уральского отделения РАН в рамках интеграционных проектов фундаментальных исследований, выполняемых совместно учеными УрО, СО и ДВО РАН, и программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества».