

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

С. В. Баранов, С. С. Сулакшин, Получение паров меди на начальной стадии электрического взрыва проволоочки в вакууме. Параметры плазмы, *ТВТ*, 1987, том 25, выпуск 2, 225–229

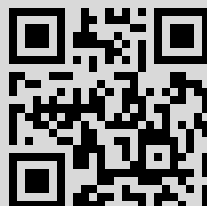
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 178.165.13.56

12 января 2019 г., 15:37:15



УДК 621.375

ПОЛУЧЕНИЕ ПАРОВ МЕДИ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОЛОЧКИ В ВАКУУМЕ. ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ

Баранов С. В., Сулашкин С. С.

Исследована возможность получения плотных паров меди с низкой температурой при электрическом взрыве проволоочки (ЭВП) в вакууме. Используются относительно медленный ввод энергии в разряд (≈ 10 МДж/с) и управление током разряда. При исследовании параметров плазмы на начальной стадии ЭВП измерялись вольт-амперные характеристики разряда, скорость и характер разлета плазмы, а также ее температура спектроскопическими методами. Концентрация паров оценивалась расчетным путем. Получены пары меди с температурой $\approx 0,5$ эВ, концентрацией $2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ в объеме диаметром 6 и длиной 12 см.

Для решения ряда прикладных задач необходимы пары металлов высокой плотности ($\geq 10^{18}$ см $^{-3}$) с температурой, близкой к температуре испарения, и равномерным распределением плотности по достаточно большому объему. К таким задачам относятся, например, однородное напыление металлов на диэлектрик, увеличение энергетических характеристик лазеров на парах металлов. Одним из эффективных методов получения паров металлов является ЭВП. При этом энергия, затрачиваемая на преобразование твердой фазы в газообразную, минимальна, а технологическая установка отличается простотой. В существующих установках, однако, в результате быстрого ввода энергии (≥ 100 МДж/с) пары металлов получаются перегретыми ($T > 10^4$ К), с высокой степенью ионизации, а при попытках охлаждения паров за счет свободного расширения в вакууме их плотность падает до $\leq 10^{17}$ см $^{-3}$ [1–3]. В данной работе исследуется возможность получения плотных паров меди с температурой $T \approx 3000$ К при ЭВП в вакууме. Особенный интерес для прикладных задач представляет начальная стадия испарения, когда концентрация паров высока и существует резкая граница пар — вакуум. Отличительными особенностями экспериментальной установки являются относительно медленный ввод энергии (≈ 10 МДж/с) в разряд и принудительное управление током разряда, что позволило избежать значительного перегрева паров и регулировать их температуру.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Электрический взрыв медной проволоочки длиной 12 см, диаметром 0,5 мм осуществлялся в вакууме при $p = 0,05 - 0,1$ Па с помощью конденсаторной батареи емкостью 600 мкФ. Индуктивность разрядного контура составляла 1,7 мкГн, зарядное напряжение — 3–4 кВ, период тока разряда — 200 мкс. Управление током разряда осуществлялось с помощью дополнительной, взрываемой в диэлектрике, проволоочки. Электрические характеристики ЭВП измерялись поясами Роговского. Напряжение на проволочке измерялось по току, протекающему через сопротивление 4 Ом, которое включалось параллельно проволочке. Электрические сигналы регистрировались осциллографами типа С8-12, запуск и синхронизация осуществлялись с помощью генератора ГЗИ-6 и схем управления игнитронами. Оптические измерения проводились с помощью фотоэлектронной камеры ФЭК-22СПУ и высокоскоростной фоторегистрирующей установки ВФУ-1.

На рис. 2 приведены осциллограммы тока и напряжения на проволочке, интенсивности интегрального по спектру излучения ЭВП, а также энерговод в разряд, рассчитанный по осциллограммам тока и напряжения. Измерения проводились без дополнительного ЭВП в диэлектрике

при зарядном напряжении 3,5 кВ. В течение первых 10 мкс скорость ввода энергии невелика, далее она резко возрастает до ≈ 10 МДж/с, что связано с ростом сопротивления при нагреве, расплавлении и начале испарения проволоочки. После 15 мкс начинается испарение меди, напряжение в разряде увеличивается до 3 кВ и происходит электрический пробой испарившейся меди. Об этом свидетельствует фронт импульса свечения на рис. 2 и появление светового излучения, регистрируемого с помощью ВФУ-1 (рис. 3, а). В момент пробоя паров токовый канал имеет диаметр, чуть больший диаметра проволоочки, затем в течение 2 мкс происходят явления, характерные для Z-пинча (стадия А на рис. 3, а). Иони-

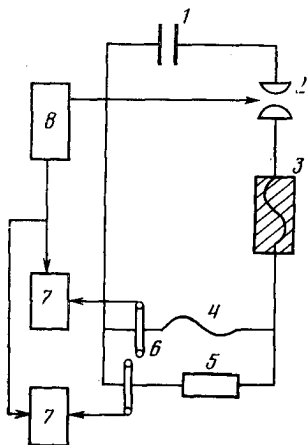


Рис. 1

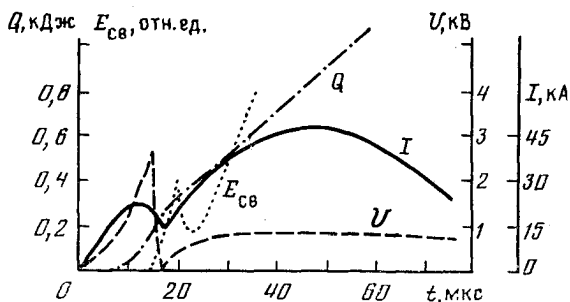


Рис. 2

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – конденсаторная батарея, 2 – инитрон ИРТ-2, 3 – проволока в диэлектрике, 4 – проволока в вакууме, 5 – сопротивление 4 Ом, 6 – пояса Роговского, 7 – осциллографы С8-12, 8 – генератор задержанных импульсов ГЗИ-6

Рис. 2. Осциллограммы тока, напряжения, свечения разряда и временная зависимость энергии, введенной в разряд

зация паров при этом приводит к падению сопротивления разрядного канала и соответственно падению напряжения. Ионизованные при пробое пары удерживаются от газодинамического разлета давлением магнитного поля тока, протекающего по плазменному каналу, содержащему в центре еще не испарившуюся проволочку. Это приводит к резкому нагреву и увеличению плотности плазмы, чему соответствует появление сплошного спектра в свечении (рис. 3, б) и скачок яркостной температуры, измеренный по нему (рис. 4).

Затем, по-видимому, вследствие развития неустойчивостей сжатой плазмы Z-пинча происходят выброс и быстрый разлет струй плазмы со скоростью 10–100 км/с (стадия В на рис. 3, а). Диаметр разрядного канала резко растет, плотность тока падает, и в дальнейшем разлет паров меди носит тепловой характер и происходит со скоростью 1 км/с. Поскольку ввод энергии в проволочку относительно медленный, происходит постепенное испарение меди и расширение паров (стадия С на рис. 3, а). Момент полного испарения материала проволоочки можно оценить по удельному расходу энергии на испарение меди, равному 6 кДж/г [4]. Полное испарение в условиях эксперимента должно происходить к 60 мкс. При этом диаметр парового цилиндра $d \approx 60$ мм, длина разрядного канала $L = 120$ мм. В протяженном объеме ($L/d = 2$) при равномерном распределении средняя плотность паров оценивается как $\approx 6 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$.

Осциллограммы тока и зависимость температуры плазмы разряда от времени приведены на рис. 4. Измерения температур проводились следующими методами. До появления свечения температура проволоочки определялась расчетным путем с учетом вложенной энергии и температурной зависимости теплоемкости меди [4]. В дальнейшем для определения температуры использовались спектры излучения, регистрируемые с вре-

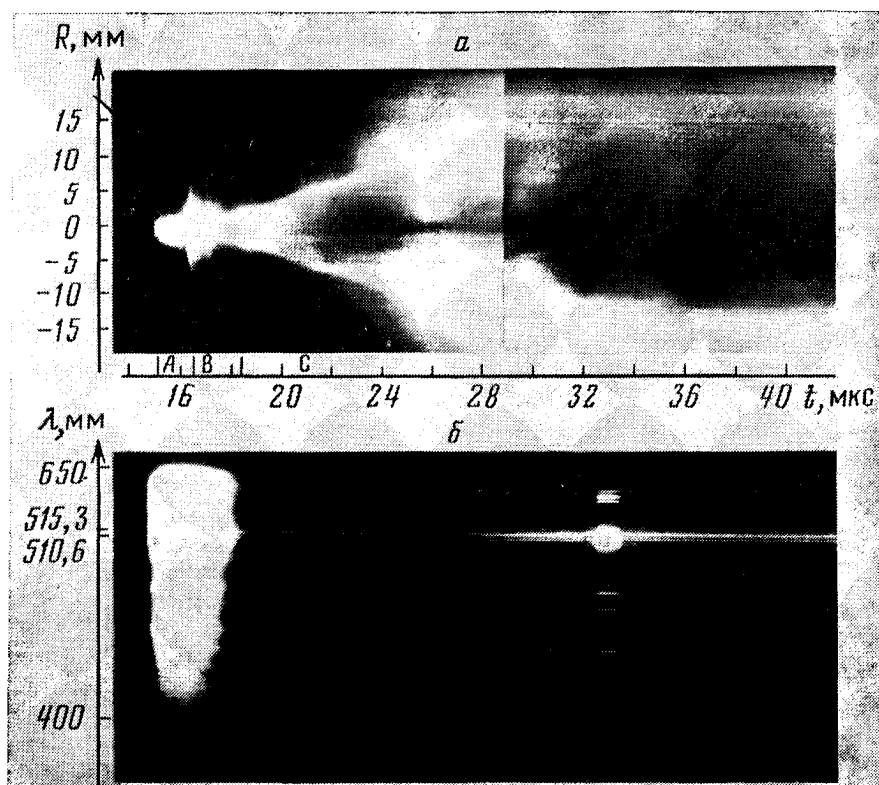


Рис. 3. Фотохронограмма (а) и спектрофотохронограмма (б) ЭВП в вакууме

менным разрешением. На спектрофотохронограмме (рис. 3, б) видно, что сначала в течение 2—3 мкс спектр излучения имеет сплошной характер, близкий к излучению абсолютно черного тела. После развала Z-пинча и быстрого разлета оптическая плотность плазмы уменьшается, спектр становится линейчатым и состоит исключительно из линий меди; свечения остаточного или термодесорбированного газа не обнаружено. По сплошному спектру, как спектру излучения абсолютно черного тела, в начальной стадии измерялась яркостная температура. По линейчатому спектру, в предположении локального термодинамического равновесия, температура газа измерялась методом относительной интенсивности линий [5]

$$T = \frac{E_2 - E_1}{k [\ln J_1/J_2 - \ln (A_2 g_2 \lambda_1) / (A_1 g_1 \lambda_2)]}$$

где E — энергия возбуждения уровней; k — постоянная Больцмана; A — вероятность спонтанного перехода; g — статистический вес уровня; λ — длина волны; J — интенсивность излучения линии.

Использовались линии CuI 510,6 и 515,3 нм. Константы переходов приведены в [6]. Измерение интенсивностей линий проводилось с временным разрешением стандартными методами фотометрии [7].

Результаты измерений приведены на рис. 4. Сначала температура медной проволоочки растет медленно в соответствии с джоулевым разогревом. Затем, в момент электрического пробоя паров и Z-пинча, температура

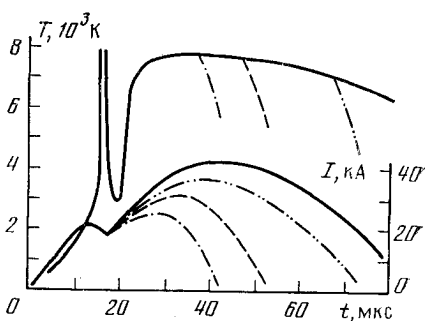


Рис. 4. Осциллограммы тока и временная зависимость температуры в разряде без обрыва тока (сплошные кривые) и с обрывом тока в различные моменты времени

скачкообразно увеличивается. Максимальное ее значение в этот момент определить не удалось, но, по крайней мере, она достигала 10^4 К. Через 2–3 мкс после развала Z-пинча температура резко падает до 3000 К, примерно соответствующей кривой джоулева разогрева. В дальнейшем температура паров меди возрастает до 7500 К и далее слабо меняется со временем. Явлений типа Z-пинча уже не происходит, поскольку разрядный канал расширился, и, как показывают оценки, давление магнитного поля тока становится малым для удержания плазмы.

Для охлаждения паров использовалась схема с управляемым отключением тока в разряде. Отключение или пауза тока происходит за счет дополнительного ЭВМ в диэлектрике, причем задержка отключения тока регулируется выбором массы проволоочки [8]. На рис. 4 показано изменение тока разряда при отключении в различные моменты времени и соответствующее изменение температуры паров. За время 5–10 мкс, несущественное с точки зрения геометрии разлетающихся паров (а значит и их давления), температура уменьшается на 2000 К. Далее свечение уменьшалось настолько, что измерение температуры становилось невозможным.

Оценка падения температуры газа за счет свободного цилиндрического разлета в вакууме по формуле [9]

$$T(t) = T(0) (t_0/t)^{1/2}$$

показывает, что $T(45 \text{ мкс}) = 6400 \text{ К}$ при $t_0 = 40 \text{ мкс}$. Следовательно, за счет разлета в вакууме температура плазмы могла уменьшиться на 1100 К. Можно предположить еще один механизм охлаждения паров. При медленном ЭВП в разряде существует значительное количество конденсированной дисперсной фазы. Температура медного конденсата в момент обрыва тока примерно равна температуре испарения и составляет $\sim 3000 \text{ К}$. Следовательно, конденсированная фаза является источником «холодного» пара, тепловые потоки на который также приводят к охлаждению плазмы.

Концентрация паров в разряде определялась расчетным путем по размерам разрядного канала и количеству испарившейся меди. Из зависимости энерговклада в проволочку видно (рис. 2), что на 60 мкс в разряд вводится $\sim 1,2 \text{ кДж}$, что достаточно для испарения всей массы проволоочки (0,2 г). Однако полного испарения не происходит, поскольку при ЭВП в вакууме значительная доля энергии вкладывается в шунтирующий разряд по поверхности и идет на разогрев плазмы, окружающей проволочку. При этом испарение проволоочки идет как за счет омического нагрева протекающим током, так и за счет нагрева проволоочки тепловыми потоками атомов, электронов и ионов плазмы.

Из осциллограммы тока и напряжения (рис. 2) можно определить, что общее сопротивление разряда после пробоя составляет 0,03 Ом. Сопротивление проволоочки, нагретой до температуры испарения, $\approx 0,13 \text{ Ом}$. Отсюда следует, что сопротивление шунтирующей плазмы равно 0,04 Ом. Исходя из соотношения сопротивлений проволоочки и плазмы, можно оценить, что $\sim 70\%$ энергии после пробоя паров меди идет на разогрев плазмы, а 30% — на омический нагрев и испарение проволоочки.

Нагрев проволоочки за счет теплового потока из плазмы оценивался по следующим формулам [10]:

$$W_a = 4\pi R^2 n_a \left(\frac{kT}{2\pi m_a} \right)^{1/2} 2kT, \quad (1)$$

$$W_e = 4\pi R^2 n_e \left(\frac{kT}{2\pi m_e} \right)^{1/2} (2kT + \Phi - e\varphi) \exp\left(\frac{e\varphi}{kT}\right), \quad (2)$$

$$W_i = 4\pi R^2 n_i \left(\frac{kT}{2\pi m_i} \right)^{1/2} \left[2kT - e\varphi + \left(1 - \frac{e\varphi}{kT} \right) (E_i - \Phi - e\varphi) \right], \quad (3)$$

где W_a , W_e , W_i — тепловые потоки соответственно от атомов, электронов и ионов; R — радиус частицы, воспринимающей тепловой поток; n_a , n_e ,

n_i — концентрации атомов, электронов и ионов; m_a , m_e , m_i — массы атома, электрона и иона; Φ — работа выхода; ϕ — потенциал частицы в плазме; E_i — потенциал ионизации.

Предполагаем, что после пробоя по пару проволочка существует в виде жидких частиц, радиус которых равен радиусу проволочки $R = 0,25$ мм, а температура плазмы составляет 7500 К. Концентрация тяжелых частиц плазмы в начале испарения принималась $N = 2,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, что соответствует давлению насыщения медных паров 100 кПа при температуре испарения меди $T \approx 3000$ К [4]. Учитывая, что средний заряд ионов не превышал по спектроскопическим данным $Z = 1$, при условии термодинамического равновесия при $T = 7500$ К, $N = 2,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ из формулы Саха [5] следует, что $n_a = 2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, $n_e = n_i = 0,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. Подставляя полученные значения в (1)–(3), получим, что $W_a = 320$ Дж/с, $W_e = 800$ Дж/с, $W_i = 1100$ Дж/с и суммарный поток энергии на одну частицу $W = 2,2$ кДж/с.

Если учесть, что общее количество частиц меди со средним радиусом $R \approx 0,25$ мм может быть ≤ 400 , то в течение 40 мкс после начала пробоя паров количество энергии, вкладываемое от плазмы в конденсированную фазу, составляет $\sim 5\%$ от энергии, вкладываемой в разряд.

Таким образом, суммарная энергия, затрачиваемая на испарение меди, составляет $\sim 35\%$ от вкладываемой. Остальные 65% энергии идут на разогрев окружающей проволочку плазмы. Таким образом, к 60 мкс должно испариться не более 35% массы медной проволочки. К этому времени пары разлетаются на расстояние ≈ 3 см от центра проволочки. Если учесть количество испаренного материала и размеры разрядного канала, то можно определить, что средняя концентрация составляет $\sim 2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$.

Авторы выражают благодарность Т. М. Горбуновой за помощь при обработке результатов эксперимента.

Томский политехнический
институт

Поступила в редакцию
23.XII.1985

ЛИТЕРАТУРА

1. Петросян В. И., Дагман Э. И., Алексеенко Д. С., Скрипкина П. А. ЖТФ, 1969, т. 39, № 11, с. 2076.
2. Федоров А. И., Сергиенко В. П., Тарасенко В. Ф., Седой В. С. Изв. вузов. Физика, 1977, № 2, с. 135.
3. Катценштейн Дж. В сб.: Взрывающиеся проволоочки. Т. 1. М.: ИЛ, 1963, с. 123.
4. Таблицы физических величин./Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
5. Александров А. Ф., Рухадзе А. А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. М.: Атомиздат, 1976.
6. Семенова О. П., Горбунова Т. М., Кирилов А. Е. Изв. вузов. Физика, 1969, № 7, с. 218.
7. Методы диагностики плазмы./Под ред. Лохте — Хольтгревена. М.: Наука, 1968.
8. Баранов С. В., Сулакишин С. С. Деп. ВИНТИ № 7306-84.
9. Гудзенко Л. И., Яковленко С. И. Плазменные лазеры. М.: Атомиздат, 1978.
10. Углов А. А., Гнедовец А. Г., Лохов Ю. Н. ФХОМ, 1981, № 6, с. 17.