

С345.М

П-199



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

А.С. Пасюк, Ю.П. Третьяков, В.Станку

1644

РАСПЫЛЕНИЕ КАТОДА
В ДУГОВОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

ПТЭ, 1965, №3, с 42-45.

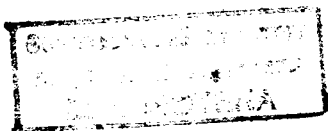
Дубна 1964

А.С.Пасюк, Ю.П.Третьяков, В.Станку

1844

РАСПЫЛЕНИЕ КАТОДА
В ДУГОВОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

Направлено в ПТЭ



Дубна 1984

2442/2 м.

В настоящее время в ускорителях многозарядных ионов наибольшее распространение получили дуговые источники ионов с осциллирующим разрядом, так как только в таких источниках многозарядные ионы получают в достаточных количествах. Источник такого типа с закрытой дугой и подогранным катодом применяется на трехметровом циклотроне У-300 Объединенного института ядерных исследований^{/1/}. Опыт эксплуатации этого источника показал, что время его работы (10-20 часов) зависит от режима работы, а причиной выхода источника из строя является интенсивное распыление катода. Исследование влияния параметров режима работы источника на скорость распыления катода составило предмет данной работы.

Описание установки

Ионный источник циклотрона У-300 исследовался на стенде, описанном в работе^{/2/}. Напряженность магнитного поля, в котором работал источник, составляла 5000 эрстед, вакуум в объеме был равен $(0,8-2) \cdot 10^{-4}$ тор. Питание источника осуществлялось по схеме, описанной в работе^{/1/}. Все опыты проводились при частоте посылок задающего генератора около 100 гц и длительности импульса ~ 1 мсек. Разрядное напряжение и ток дуги в импульсе составляли соответственно от 200 до 1100в и от 2 до 40 а. Форма импульсов тока и напряжения была прямоугольной со спадом вершины до 10% и постоянно контролировалась по осциллографу.

Материал катода источника - поликристаллический вольфрам с удельным весом 18,7г/см³. Распыленная масса определялась взвешиванием катода до и после опыта на лабораторных технических весах с точностью до 0,01 г. Разность весов катода составляла от 0,11 до 1,45 г.

На грани катода, обращенной к разряду, в результате распыления образуется кратер, глубина которого в наших опытах изменялась от 0 до 4 мм. При установке катода по оси газоразрядной камеры поверхность кратера в грубом приближении можно считать сферической (рис. 1). С увеличением глубины кратера изменяется угол падения ионов плазмы на поверхность катода и уменьшается телесный угол $\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$, в котором вылетают выбитые ионной бомбардировкой частицы вольфрама (рис. 2, кривая 1). Измеренная масса вольфрама, распыленного в единицу времени, уменьшается с увеличением глубины кратера (кривая 2). По этой кривой производилась корректировка результатов последующих опытов.

Кривая (3) показывает зависимость плотности потока $\Delta M/\Omega$ частиц, вылетающих в результате распыления катода, от глубины кратера. Возрастание плотности потока $\Delta M/\Omega$ с увеличением глубины кратера говорит о том, что скорость распыления катода при падении ионов нормально к поверхности меньше, чем при косом падении ионов. Это качественно согласуется с опытными данными, приведенными в работе ^{/3/}.

Результаты измерений

Скорость распыления катода была определена в зависимости от рода газа, подаваемого в источник, тока дуги в импульсе и напряжения разряда в импульсе. Скорости распыления катода в зависимости от рода газа были измерены при различных режимах дуги. Результаты измерений при напряжении дуги 500 в и токе 10 а приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Род газа	H ₂	He	N ₂	воздух	O ₂	Ne	Ar
Распыленная масса г/час	0,35	0,41	0,38	0,45	0,51	0,45	0,47

Из таблицы видно, что разница в скорости распыления катода при работе источника на различных газах невелика (за исключением водорода и кислорода). Изменение расхода газа, подаваемого в источник, от 4 до 14 см³/мин практически не влияет на скорость распыления катода. Дальнейшие опыты производились при работе источника на воздухе.

На рис. 3 приведена зависимость скорости распыления от тока дуги, измеренная при напряжении разряда 600 в.

Зависимость скорости распыления катода от напряжения разряда в импульсе измерялась для разных катодов и токов дуги (5, 10 и 20 а). На рис. 4 приведены типичные кривые зависимости скорости распыления катода от напряжения (кривая 1) и квадрата напряжения (кривая 2), измеренные при токе дуги 5а.

Напряжение и ток дуги в двух последних опытах (рис. 3 и 4) поддерживались постоянными с помощью изменения мощности подогрева катода и подачи газа в источник (от 5,5 до 11 см³/мин).

Разрушение катода источника может быть результатом испарения вольфрама и катодного распыления.

Оценка температуры катода по электронной эмиссии дает $3000-3300^{\circ}\text{K}$ в зависимости от режима работы источника. При этих температурах скорость испарения вольфрама равна соответственно $10^{-6}-2,5 \cdot 10^{-5}$ г/см²·сек^{14/}, что значительно меньше наблюдавшейся в наших опытах скорости уменьшения веса катода. Очевидно, разрушение катода источника является результатом катодного распыления.

При катодном распылении ионами благородных газов авторы работ^{15-17/} наблюдали увеличение выхода распыленного металла с увеличением массы иона при той же энергии. В наших опытах скорость распыления мало зависит от рода газа, подаваемого в источник. По-видимому, распыление катода происходит под действием ионов материала катода - вольфрама. Концентрация атомов вольфрама, рассчитанная с учетом того, что энергия выбитых из катода атомов имеет величину порядка 10 эв^{18/} и угловое распределение их близко к распределению по закону косинуса^{19/}, имеет величину $(0,5-3)10^{14}$ см⁻³ у поверхности катода и уменьшается вдвое на расстоянии 8 мм от поверхности. Измерения спектральным методом концентрации нейтральных атомов вольфрама дали результаты, которые находятся в хорошем согласии с расчетными (рис.5). Имея в виду опытные данные работы^{10/}, мы считаем, что концентрация частиц газа в разрядной камере источника изменялась в пределах $10^{13}-10^{14}$ см⁻³ в зависимости от режима работы источника. Таким образом концентрация атомов вольфрама в районе катода сравнима с концентрацией газа. Сравнивая потенциалы ионизации первых пяти электронов для ртути и вольфрама^{11/} и сечения ионизации для ртути и газов^{12/}, можно предположить, что количество и эффективный заряд ионов вольфрама сравнимы с количеством и эффективным зарядом ионов газа. Коэффициент распыления для ионов вольфрама в $4-5$ раз больше, чем для ионов аргона, и в $9-10$ раз больше, чем для ионов неона, при одинаковой энергии^{15/}. Имея в виду соотношение концентраций ионов газа и вольфрама и коэффициентов распыления для разных ионов, можно считать, что распыление катода в основном является результатом бомбардировки ионами вольфрама. Заметное увеличение скорости распыления при работе источника на кислороде, по-видимому, связано с действием другого механизма распыления: вероятно, ионы кислорода при взаимодействии с вольфрамом катода образуют легколетучие соединения.

Зависимость скорости распыления от тока разряда несколько отклоняется от прямой пропорциональности при больших токах разряда.

Полученная зависимость скорости распыления от напряжения на разряде при постоянном токе дуги близка к квадратичной. По данным работ^{16,17/} скорость катодного

распыления материалов с большим атомным весом (Mo, Ta, W) пропорциональна энергии налетающих ионов в области энергий от 50 до 600 эв. Причиной сильной зависимости скорости распыления катода от напряжения разряда могут быть следующие факторы. В наших опытах с увеличением напряжения разряда повышается эффективный заряд ионов (газа и вольфрама) $\sim 10^7$ и, следовательно, энергия ионов. При этом возможно значительное увеличение скорости распыления, вследствие того, что многозарядные ионы при равных энергиях с однозарядными распыляют катод быстрее $\sim 13^7$. Наконец, перераспределение тока разряда между электронной и ионной составляющими повышает ионную составляющую тока с увеличением напряжения. Из литературы известно, что ионная составляющая тока разряда достигала в аналогичном источнике 30% тока $\sim 10^7$.

В ы в о д ы

1. Распыление катода ионного источника с осциллирующей дугой и накаленным вольфрамовым катодом происходит в основном в результате бомбардировки ионами вольфрама.

2. Скорость распыления катода пропорциональна току дуги и квадрату напряжения разряда и мало зависит от рода газа, подаваемого в источник (за исключением кислорода и водорода).

Для нашего источника количество распыленного вольфрама катода можно оценить эмпирической формулой:

$$\Delta M = AIU^2 \frac{t}{Q}$$

где ΔM - масса распыленного вольфрама (г), I - ток разряда (а), U - напряжение разряда (кв), t - время работы (час), Q - отношение периода следования к длительности импульса, $A = 1,2 - 1,8$ - коэффициент пропорциональности.

Формула справедлива при токах разряда от 5 до 30 а. и напряжениях от 0,4 до 1 кв и при условии, что образование кратера на катоде в ходе распыления идет симметрично относительно оси катода (рис. 1). При смещении оси катода относительно оси газаразрядной камеры образование кратера идет несимметрично. В этом случае скорость распыления катода может возрасти в несколько раз.

Авторы выражают благодарность Г.Н.Флерову за постановку задачи. Авторы благодарят также Л.П.Кулькину за произведенные спектральные измерения и А.А.Еропкина за обеспечение работы стенда. Мы также признательны В.Е. Юрасовой за консультацию по вопросам катодного распыления материалов.

1. А.С.Пасюк и др. ПТЭ № 5, 23 (1963).
2. А.С.Пасюк и др. Препринт ОИЯИ 1523, Дубна, 1964.
3. G.Wehner, J.Appl. Phys., 30, 1762 (1959).
4. M.von Ardenne. 'Tabellen der Electronenphysik, Ionenphysik und Ultramikroskopie', Band II, J. 717 (1956).
VEB Deutscher der Wissenschaften, Berlin.
5. O.Almen and G. Bruce, Nucl. Instr. Meth., 11, 257 and 279 (1961).
6. Н.Лэгрэйд и Г.Венер, стр. 330-337 "Современная вакуумная техника"(перевод с англ.),
Издательство Иностран. лит., М., 1963.
7. N.Laegreid and G.Wehner, p. 164-169, Vacuum Technology Transactions. Proceedings of the Sixth
National Simposium, 1960, Pergamon Press Oxford, London, New-York, Paris.
8. И.Б.Беньяминович, В.И.Векслер "Известия АН Уз. ССР", (серия физ.-мат.наук)
№ 3, 29 (1963).
9. G.Wehner and D.Rosenberg, J. Appl. Phys, 31, 177 (1960).
10. Ю.Д.Пигаров, П.М.Морозов, ЖТФ, т. XXXI, вып. 4, 467, 476 (1961).
11. M.Von Ardenne, 'Tabellen der Electronenphysik, Ionenphysik und Ultramikroskopie', Band I, 479
(1956). VEB Deutscher der Wissenschaften, Berlin.
12. То же, что /11/, стр. 487.
13. С.Волский, Е.Жданюк. "Современная вакуумная техника" (перевод с англ.),
Изд. иностран. лит., М. 1963. Стр. 324-329.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1964 г.

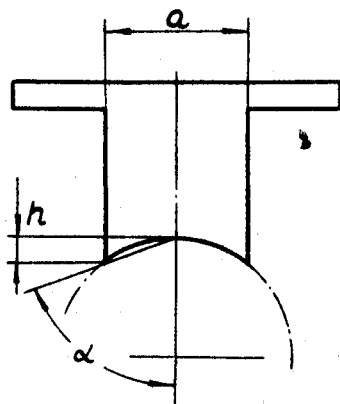


Рис. 1. Схема образования кратера при распылении катода.

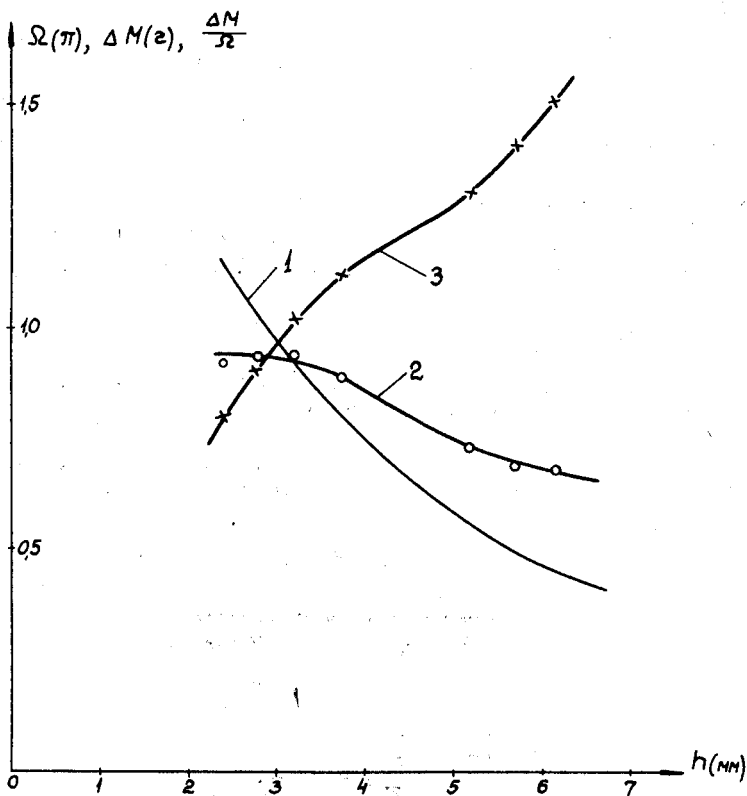


Рис. 2. Зависимость телесного угла Ω (1), распыленной массы вольфрама ΔM (2) и плотности потока частиц вольфрама $\Delta M/\Omega$ (3) от глубины кратера h .

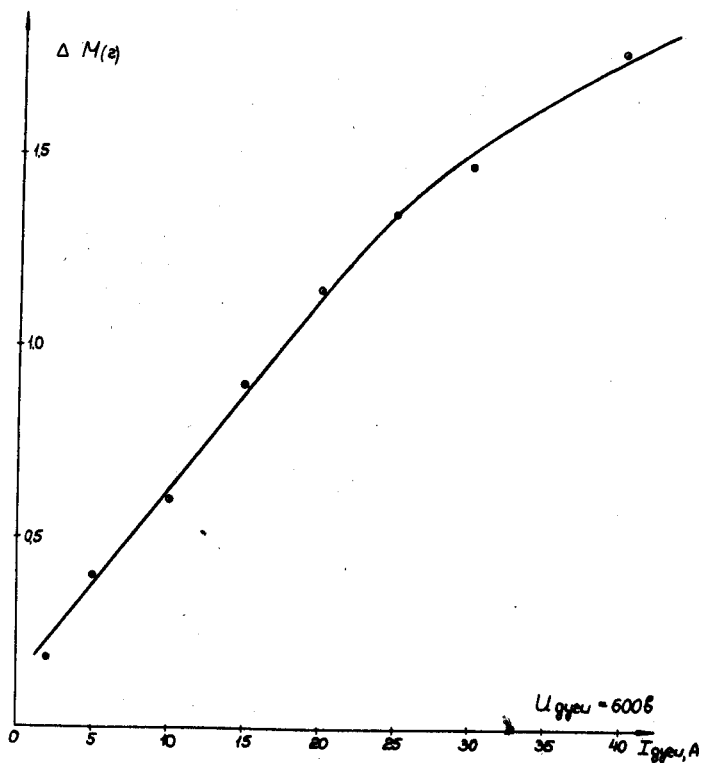


Рис. 3. Зависимость скорости распыления катода от тока дуги.

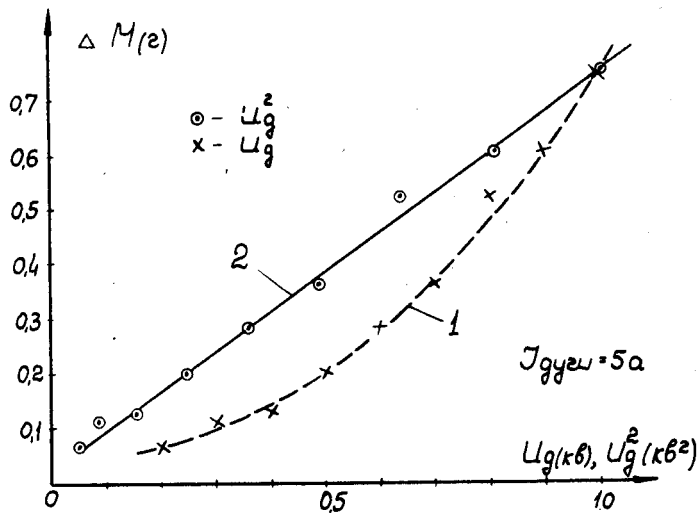


Рис. 4. Зависимость скорости распыления катода от напряжения дуги.

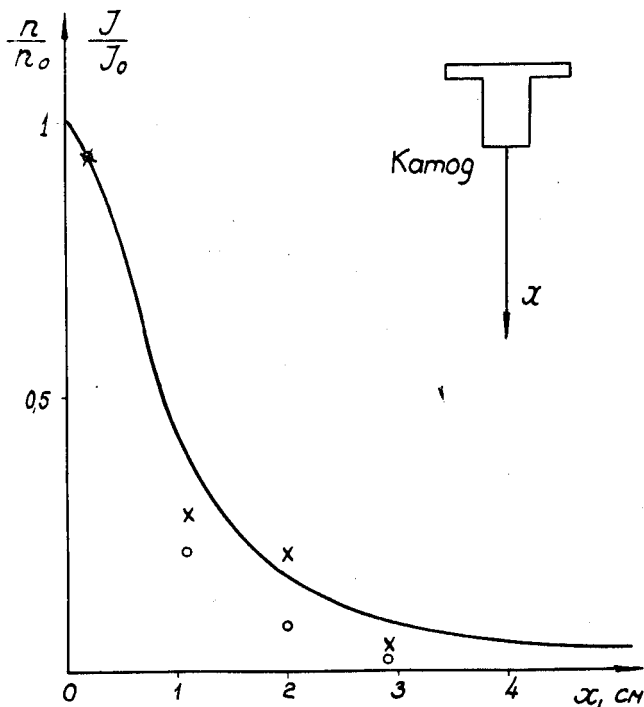


Рис. 5. Изменение концентрации атомов вольфрама вдоль оси разряда.
 x и o - соответственно интенсивности линий $2397,09 \text{ \AA}$ (WII)
 и $4008,75 \text{ \AA}$ (WI).