

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1972

УДК 537.523.74

Д. Х. АБДРАШИТОВА, М. Б. ГУСЕВА

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИОНОВ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ

Описаны результаты экспериментальных исследований, направленных на создание источника ионов твердых веществ. Пары вещества вводятся в атмосферу разряда способом катодного распыления. Обнаружено существенное влияние местоположения образца на выход ионов из источника. В оптимальном режиме получен ионный ток, в 3 раза превышающий уровень ионного тока из традиционного ионного источника с осцилляцией электронов в магнитном поле.

В настоящей работе описан плазменный источник ионов твердых веществ, предназначенный для микроэлектроники [1—4].

В данной работе исследуются различные конструктивные варианты разрядной камеры с накаливаемым катодом и осцилляцией электронов в магнитном поле. Найден оптимальный способ введения в разряд образца, пары вещества которого (рабочее вещество) образуются при ионной бомбардировке его поверхности. В предлагаемом ионном источнике выход ионов примерно в 3 раза превышает ионный ток из традиционного ионного источника.

Как было показано в [5], высокопроизводительному ионному источнику ионов металла, использующему явление катодного распыления для введения в атмосферу разрядной камеры паров металла, в наибольшей степени соответствует разряд с накаливаемым катодом и осцилляцией электронов в магнитном поле. Этот вид разряда имеет низкое давление горения и максимальную плотность плазмы вблизи оси разрядной камеры.

Парциальное давление паров распыляемого вещества P_s в источнике тем выше, чем выше плотность ионного тока на образец и коэффициент распыления образца. Коэффициент распыления K растет с энергией бомбардирующих ионов, определяемой потенциалом образца V_s (при $V_s \leq 1$ кВ) и его температурой T . Плотность ионного тока j_s^+ пропорциональна концентрации заряженных частиц в плазме $n_+ = n_-$. Кроме того, при повышении степени ионизации газа в разрядной камере возрастает влияние на парциальное давление паров P_s размеров поверхности образца S . Так, предварительные эксперименты показали, что образец больших размеров дает возможность увеличить парциальное давление паров распыляемого вещества в условиях, аналогичных [5], где использован малый образец, совмещенный с электродом — отражателем, и в ряде случаев получить разряд в парах чистого металла.

При этом и потенциал образца существенным образом влияет на отбор ионного тока из источника. В ряде случаев ток ионов из источника существенно уменьшался по сравнению с током из традиционного ионного источника такого типа. Использование цилиндрического образца в прикатодной области существенно увеличивает выходной ионный ток из источника. Объяснить указанный эффект можно проявлением электронооптической контракции плазмы.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований рабочих характеристик разрядной камеры ионного источника с осциллирующими в магнитном поле электронами при различных местоположениях и потенциалах электрода-образца.

§ 1. Экспериментальные исследования

Исследуемые системы. Исследуемые варианты разрядных камер показаны на рис. 1. Здесь A — анод, K — катод, O и S_0 — электроды-отражатели, $S_1, S_2, S_3 \dots S_n$ — электроды с потенциалами образца V_s . Все электроды S_n для каждой системы имеют одинаковый отрицательный потенциал $V_{S_n} < 0$; H — внешнее однородное магнитное поле, в которое помещаются исследуемые системы.

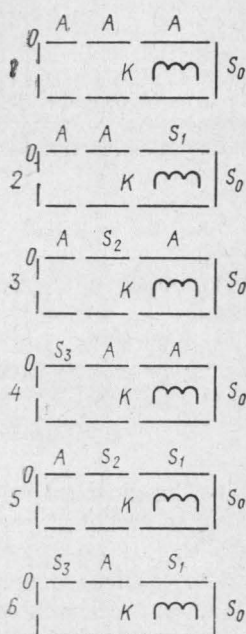


Рис. 1. Исследуемые варианты разрядных камер.

Вариант 1. Традиционный ионный источник с накаливаемым катодом и осцилляцией электронов в магнитном поле. Отрицательный потенциал на отражателе S_0 (в традиционном ионном источнике $V_s = V_k = 0$), очевидно, ничего не должен изменить в характеристиках разряда, кроме величины экранирующего слоя у отражателя S_0 .

Варианты 2, 3, 4 соответствуют различным местоположениям цилиндрического электрода, играющего роль образца.

Варианты 5 и 6 представляют собой более сложные комбинации электродов разряда. Их исследование позволяет уточнить оптимальную геометрию отрицательного электрода.

Экспериментальная установка. Экспериментальный макет источника схематически показанный на рис. 2, представляет собой металлический цилиндр из немагнитной нержавеющей стали, разделенный диафрагмой (3) с отверстием 2 мм на две части: вакуумную камеру (2) и камеру источника (1).

В вакуумной камере помещается система отбора и формирования ионного пучка. В разрядной камере помещаются электроды источника: 3 цилиндрических, являющихся анодом и образцами, и 2 плоских — электроды-отражатели. Цилиндрические электроды имеют внутренний диаметр 16 мм, толщину стенок 0,8 мм и длину 35, 21 и 12 мм. Внутри первого цилиндра соосно с ним расположен спиральный катод прямого накала диаметром около 8 мм и длиной 10 мм из вольфрамовой проволоки диаметром 0,47 мм. Введение рабочего газа и отбор ионного тока производятся через соответствующие отверстия в электродах-отражателях (см. рис. 2). Перепад рабочих давлений, обеспечиваемый диафрагмой, получается около двух порядков с $6 \div 7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. в

камере источника до $5 \div 7 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. в высоковакуумной камере. Снаружи на камеру источника надевается соленоид, создающий на оси магнитное поле в 500 гаусс.

Подачей соответствующих потенциалов на электроды источника реализуется тот или иной вариант из систем, представленных на рис. 1.

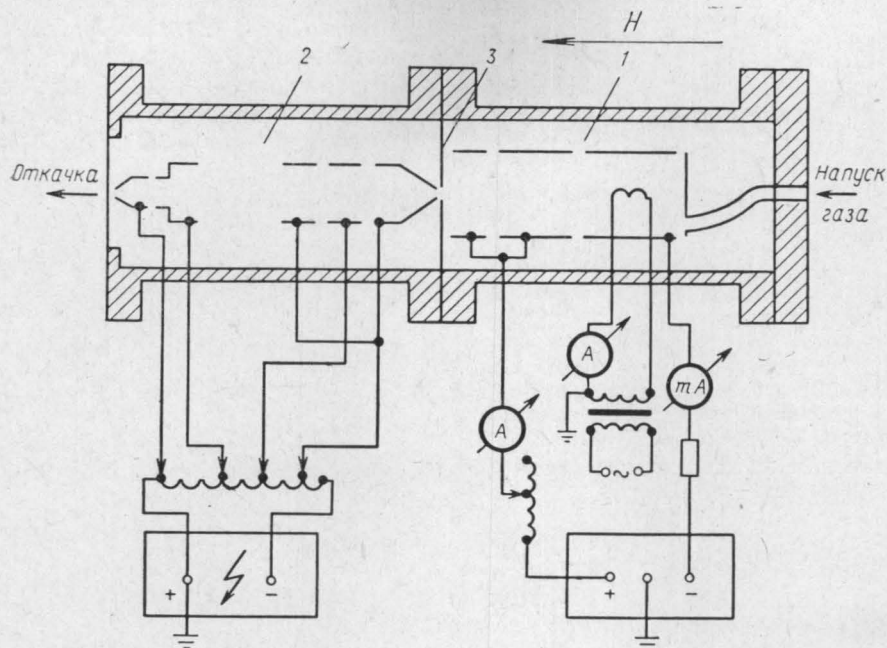


Рис. 2. Общая схема экспериментальной установки: 1 — разрядная камера; 2 — вакуумная камера; 3 — разделяющая диафрагма (отражатель 0)

При этом не нарушаются вакуумные условия в камере, что существенно снижает ошибки эксперимента.

Все электроды источника изготовлены из немагнитной нержавеющей стали — материала с низким коэффициентом распыления, поэтому во всех случаях разряд горит в атмосфере чистого неона. Это сильно упрощает эксперимент, так как ликвидирует опасность быстрого запыления изоляторов и тем самым увеличивает срок службы экспериментальной системы. Переход к образцам с высоким коэффициентом распыления не должен существенно отразиться на условиях горения разряда и его характеристиках, за исключением роста парциального давления паров вещества образца.

§ 2. Результаты эксперимента

Результаты экспериментов представлены на рисунках 3—5. На рабочие параметры разрядной камеры ионного источника существенное влияние оказывает местоположение и отрицательный потенциал электрода — образца V_{s_n} ($n=1, 2, 3$). Так, введение электродов S_1 и S_2 (системы 2 и 3) повышает потенциал горения разряда V_a по сравнению с V_a в системе 1 (см. рис. 3) в исследуемом интервале разрядных токов ($I_a=0 \div 1,5$ а). Введение электрода S_3 понижает V_a (кривые 1 и 4, 2 и 6).

Особенно сильно влияют электроды $S_{1,2,3}$ на извлекаемый из источника ионный ток (рис. 4). Отрицательный потенциал уже порядка 100 в на электродах S_2 и S_3 практически ликвидирует выходной ионный ток (уменьшает его в 10^2 и 10^3 раз соответственно: кривые 3, 4 и 1). В системе 2, где отрицательный электрод находится в положении S_1 , ионный ток из источника нарастает с увеличением V_S и при $V_S = -500$ в в 3 раза

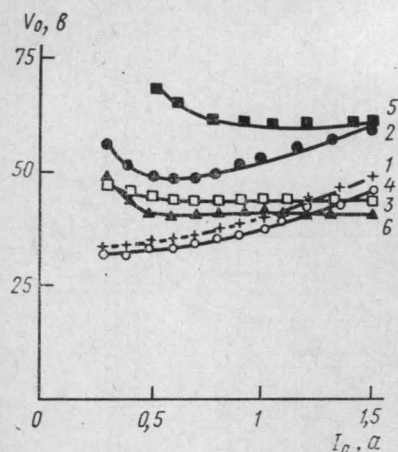


Рис. 3. Вольтамперные характеристики разряда $p=5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $f_k=16$ а, $V_{Sn}=-300$ в, $H=175$ гаусс. Нумерация кривых соответствует номерам систем рис. 1

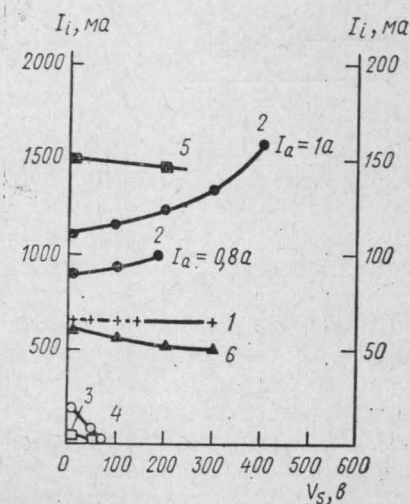


Рис. 4. Ионный ток из источника в зависимости от местоположения образца S . Кривые 3, 4, 5 — см. правую ось ординат, 1, 2, 6 — левую ось ординат. $p=5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $V_{эстр}=-4$ кв, $H=175$ гаусс, $V_{Sn}=-300$ в, $I_k=16$ а

превышает ионный ток из обычного источника с осцилляциями электронов в магнитном поле (кривые 1 и 2). В системах с электродом S в положениях S_2 и S_3 величину выходного ионного тока можно значительно увеличить, если ввести еще и электрод S_1 (системы 5 и 6 на рис. 1 и кривые 5 и 6 на рис. 4). По порядку величины он становится таким же, как и в традиционном ионном источнике.

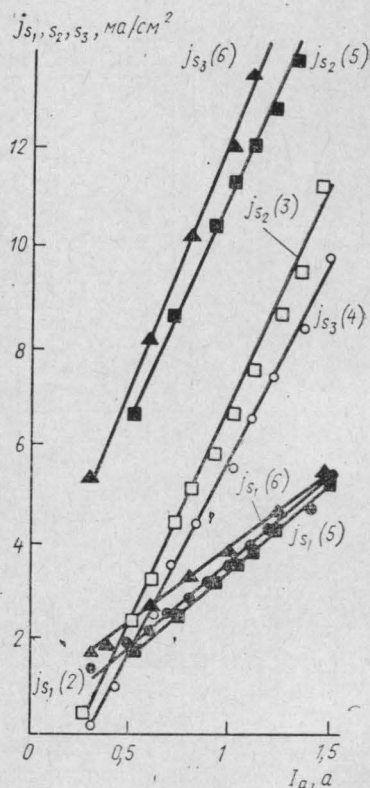


Рис. 5. Плотности ионного тока на образцах в различных частях разряда. $I_k=16$ а, $p=5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $H=175$ гаусс, $V_{Sn}=-300$ в

На рис. 5 представлены средние значения плотностей ионного тока на электроды S_1 , S_2 и S_3 . Из трех систем (2—4) максимальная плотность тока имеет место в системе 3: $j_{S_2}^+ > j_{S_3}^+ > j_{S_1}^+$. Введение в системы 3 и 4 дополнительного электрода S_1 (системы 5, 6) приводит к увеличению $j_{S_2}^+$ и еще в большей степени $j_{S_3}^+$, так что $j_{S_2}^{(5)} \sim j_{S_3}^{(6)}$ (j_{S_1} во всех случаях, включая и случай системы 2, когда $V_{S_2} = V_{S_3} = V_{a_1}$ практически одинакова).

§ 3. Обсуждение результатов

В нашем случае имеется неоднородное магнитное поле у края катода. Неоднородность магнитного поля обусловлена суперпозицией внешнего однородного магнитного поля соленоида $H_{вн}$ и поля катода H_K , которое при токе накала $I_K = 16a$ достигает 100 гаусс. Неоднородность поля не одинакова при различных $H_{вн}$. Наибольшей она становится при $H_{вн} \sim H_K$. В зависимости от направления магнитного поля распределение $H(z)$ будет различным.

Если на пути электронов нет никаких особенностей, то превалирующей формой движения будет движение по орбите, охватывающие силовые линии магнитного поля. При этом должны удовлетворяться как закономерности, обеспечивающие существование плазмы, так и закономерности движения в магнитном поле при наличии соударений. Этот случай соответствует диффузно-плазменной контракции [6].

Однако если кинетика электронов, вступающих в магнитное поле, имеет резко выраженный направленный характер (скорость направленного движения преобладает над хаотической), могут проявиться электроннооптические эффекты. В частности, может быть реализована электроннооптическая контракция [7].

Случаи 1 и 4 соответствуют первому типу контракции (рис. 1). Система 4 отличается от системы 1 тем, что уход электронов на третий электрод ($V_{S_3} < 0$) невозможен. Уменьшается объем плазмы за счет экранирующего слоя, увеличивается концентрация. В результате тот же разрядный ток получается при меньшем напряжении горения (кривые 1 и 4 на рис. 3). Отрицательно заряженный электрод S_3 отвлекает на себя значительное количество ионов из разряда. Поэтому выходной ионный ток существенно уменьшается.

Когда электрод S_1 окружает катод (система 2), отрицательный потенциал этого электрода также уменьшает область плазмы на величину экранирующего слоя и, кроме того, вызывает усиленный отбор ионного тока, что в свою очередь уменьшает ток ионов к катоду и, следовательно, уменьшает катодное падение. Для поддержания электронного тока на катоде (а значит и катодного падения) на том же уровне требуется повышение степени ионизации в области электрода S_1 . Это может обусловить появление $grad_z V$ в той области. Таким образом, в прикатодном пространстве может быть получена искаженная «сужением» плазма, где имеется достаточное количество направленных по z электронов. Итак, при $H_{вн} \approx H_K$ и противоположном по направлению H_K могут создаваться условия для электронно-оптической контракции, при которой, как известно [6], могут быть получены большие концентрации плазмы, чем в случае диффузно-плазменной контракции при прочих равных условиях.

Результаты приведенных исследований показали, что наилучшим расположением распыляемого образца следует считать положение S_1 (система 2), когда цилиндрический образец находится в прикатодной

области. В этом случае наблюдается большая плотность плазмы вблизи выходного отверстия, что выражается в наибольшем выходном токе.

Отрицательный потенциал прикатодного электрода благоприятно влияет также на угловую расходимость ионного пучка. Отношение ионного тока, проходящего на коллектор ионно-оптической системы, к общему извлекаемому ионному току для такого источника примерно втрое больше, чем для традиционного ионного источника ($0,6 \div 0,67$ и $0,2$ соответственно). В условиях использованной системы отбора угол расходимости ионного пучка у экстрактора составил $\sim 7^\circ$ при токе $I^+ \approx 1,5$ ма и напряжении 4 кв.

Энергетический состав ионного пучка практически не отличается от такового в традиционном источнике с накалимым катодом и осциллирующей электронов в магнитном поле и определяется в основном напряжением на разряде ($V_A - V_k = 40 \div 50$ в).

В общем случае ионный пучок из такого источника состоит в основном из ионов металла распыляемого электрода и ионов вспомогательного газа. При этом процентный состав пучка изменяется в пользу ионов металла при увеличении отрицательного потенциала на образце и уменьшении парциального давления вспомогательного газа. При исследовании медного образца на коллекторе был получен медный осадок, величина которого при прочих равных условиях увеличивалась с увеличением V_s , а геометрия соответствовала сечению ионного пучка.

В силу особенностей топографии электрического поля следует ожидать высокую локальную ионизацию внутри S_1 и в связи с этим повышенный коэффициент полезного использования паров распыляемого вещества, а также и эффективности распыления.

Авторы выражают признательность Е. М. Дубининой за обсуждение результатов работы и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Litton J., Bittman L. R. Proc. Nat. Electronics Conf., 8, 783, 1962.
2. Balmer J. R., Bruce J. H. J. Scient. Instrum., 41, 589, 1964.
3. Ferber R. R. IEEE Tran. Nucl. Sci., No. 10, 15, 1963.
4. Гусев В. М., Титов В. В., Гусева М. И., Куринный В. И. «Физика твердого тела», 67, 2077, 1965.
5. Raufenbach L. Nucl. Instrum. and Methods, 9, 1199, 1960.
6. Репкова О. Н., Спивак Г. В. «Уч. зап. МГУ», вып. 95, кн. 4, 33, 1946.
7. Голик Л. И., Спивак Г. Ф. ЖТФ, № 9, 1949.

Поступила в редакцию
9.4 1971 г.

Кафедра
электроники