

УДК 533.9.02; 537.525; 621.387.2

ИНТЕНСИВНЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ С ОДНОРОДНО ИСПАРЯЮЩИМСЯ В ВАКУУМЕ ЭЛЕКТРОДОМ

В. А. Саенко

Научный центр "Институт ядерных исследований", Киев, Украина

Дан краткий обзор современного развития физики, техники и технологических применений электрических разрядов с испаряемым в вакууме электродом; вакуумная дуга с локальным (неоднородным) испарением из катодного и анодного пятен не рассматривается.

К числу первых работ по стационарным электрическим разрядам с однородно испаряющимся в вакууме электродом относится создание источника излучения оптических спектров атомов плазмы тлеющего разряда с испарением металла из цилиндрического полого катода [1]. Интенсивный дуговой разряд в парах материала анода был предложен в источнике ионов высокотемпературных материалов для масс-сепаратора [2, 3]. Он имел горячие стенки разрядной камеры в однородном магнитном поле. Градиент давления паров внутри камеры отсутствовал. По разрядным характеристикам свойства источника [2, 3] мало отличались от несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом в газе [4]. Указанные работы важны в историческом плане, но не имели значительного влияния на исследования интенсивных стационарных электрических разрядов с однородно испаряющимся в вакууме электродом (ИСЭРОИВЭ). Решающее значение на развитие ИСЭРОИВЭ имело сделанное в 1963 г. Д. Мэттоксом предложение по улучшению качества тонких пленок путем применения ионной бомбардировки в

процессе осаждения. Эта технология была названа "ионным осаждением" [5]. Первое устройство ионного осаждения было далеко от совершенства. Оно использовало тлеющий разряд в аргоне для ионной бомбардировки плёнки рабочего вещества, испаряемого из анода в виде вольфрамовой спирали [5]. В 1965 г. автором статьи для улучшения качества тонких пленок было предложено использовать разряды с однородно испаряющимся электродом в вакууме, а не в аргоне [6]. В отличие от предложения Д. Мэттрокса, технологию на основе ИСЭРОИВЭ назвали "термоионным осаждением", т.е. термическим и ионным осаждением [6]. Такое определение термоионного осаждения отличает его также от "вакуумно-дугового нанесения" из катодного пятна [7].

Вакуумно-дуговое нанесение в настоящее время наиболее широко распространено и часто называется "катодно-дуговым методом". В 1966 г. обнаружен разряд в парах материала анода без магнитного поля [8]. Наблюдающееся несоответствие между действительным исследованием того или иного ИСЭРОИВЭ и датой соответствующей открытой публикации связано с закрытостью работ по плазменным технологиям, которая существовала в СССР до 70-х годов и даже позже. При исследовании испарения электронным пучком твердых веществ в магнитном поле был обнаружен интенсивный пучково-плазменный разряд с испаряемым электродом в вакууме при холодных стенках разрядной камеры [9]. В развитии ИСЭРОИВЭ определенную роль сыграли и космические исследования. С ними связано создание плазмы Cs на основе дугового разряда с полым катодом [10]. В 1979 г. наблюдался разряд с испаряемым материалом катода, где горячий тигель был выполнен в виде короткого стакана из Mo, а рабочим веществом являлись Cu и Sr [11]. В дальнейшем набор рабочих веществ был существенно расширен за счет использования эффекта полого катода [12] с развитой термоэмиссионной поверхностью. Определяющая роль термоэмиссии в поддержании разрядов с испаряемым катодом подчеркивалась в работах [13—15].

В работах [6, 7, 16] значительно увеличен коэффициент ионизации паров материала анода за счет использования дополнительных радиального электрического поля [7] и скрещенных полей [6, 16]. Необходимо отметить, что история развития устройств термоионного осаждения — это борьба за интенсификацию ионизации паров рабочего вещества, расширение набора рабочих веществ и диапазона энергии ионов в плазменном потоке. В работах [6, 7] показано, что разряд в парах материала анода и модификации этого разряда генерируют ускоренные потоки плазмы широкого набора веществ. Срыв разряда с испаряемым материалом анода радиальным электрическим током [18] четко показал, что свойства ИСЭРОИВЭ могут существенно отличаться от свойств аналогичных разрядов в газах и требуют специального изучения, результаты которого излагаются в данной статье. Последняя является продолжением работ [19, 20] и состоит из классификации и свойств рассматриваемых разрядов, анализа их физических моделей, описания устройств, сконструированных на основе этих разрядов, и их технологических применений.

ОБЩИЕ СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ ИСЭРОИВЭ

Однородным считается такое испарение материала электрода, когда характерный размер области испарения соизмерим с размерами рабочей поверхности этого электрода, т. е. со всего многообразия интенсивных стационарных электрических разрядов с испаряющимся в вакууме электродом нами исключается только хорошо изученная вакуумная дуга с неоднородным (локальным) испарением из катодного или анодного пятна.

В основе физики ИСЭРОИВЭ лежат соответствующие теории классических электрических разрядов в газах при низких давлениях с их представлениями об электронных лавинах, объемных зарядах, плазменных неустойчивостях, электро-

дных явлениях. Учет наличия испаряющегося электрода в разрядном промежутке существенно усложняет теории, может приводить к новым эффектам. Поэтому строгий расчет практических конструкций на основе ИСЭРОИВЭ и их технологических параметров становится невозможным. В исследованиях ИСЭРОИВЭ очень важное значение приобретает эксперимент, установление аналогий и различий с разрядами в газах, определение технологических параметров устройств и свойств получаемых пленок или покрытий. Далее идет поиск объектов внедрения полученных результатов. В итоге появляются новые физические представления о разрядах, новые конструкции источников плазмы, источников ионов, плазменных ускорителей, новые ионные и вакуумно-плазменные технологии или их вариации. Следовательно, мы можем говорить о том, что в настоящее время сформировались новые современные направления развития физики, техники и технологии, тесно связанные с рассматриваемыми разрядами.

Существующие ИСЭРОИВЭ по типу испаряемого электрода можно классифицировать на три основных вида: разряды с испаряющимся катодом; разряды с испаряющимся анодом; электронно-лучевые разряды (с испаряющимся электронным лучом электродом в эквипотенциальном пространстве или с дополнительным неиспаряющимся потенциальным электродом). Остановимся более детально на каждом из перечисленных видов разрядов.

Разряды с испаряющимся катодом

Интенсивные разряды с однородно испаряющимся катодом в вакууме относятся к дуговым разрядам с накаливаемым катодом, который эмитирует термоэлектроны. Различаются разряды, в которых эмиссия термоэлектронов идет с испаряемого вещества (Ta, Mo, W, Gd) и разряды с термоэмиссией из тугоплавкого тигля, в который загружено легкоплавкое рабочее вещество (Cu, Ag, Au). Часто стенки тугоплавкого тигля применяются как для эмиссии термоэлектронов, так и для формирования диаграммы направленности создаваемого плазменного потока. Последний случай реализуется в разряде с испарением рабочего вещества из полого катода (рис. 1, 2), который нашел наиболее широкое применение среди разрядов с испаряющимся катодом. На рис. 1 показано устройство с направлением истечения потока плазмы вертикально вверх, а на рис. 2 — вертикально вниз [21]. Возможно истечение плазмы и под углом к вертикали или горизонтально. В источниках плазмы, показанных на рис. 1, 2, вольфрамовая нить подогрева 3 эмитировала термоэлектроны, которые ускорялись и разогревали тигель-катод до температуры испарения рабочего вещества. Давление паров рабочего вещества в полой тигель-катоде составляло 1—100 Па. Подачей напряжения U_a на анод вначале зажигался тлеющий разряд, который при постоянном разрядном сопротивлении $R_a = 10—100$ Ом и увеличении напряжения E_a источника анодного питания мог переводиться в дуговой разряд. Интенсифицировать ионизацию можно было не только увеличением разрядного тока I_a , но и включением катушек магнитного поля. Типичные зависимости ионного тока на подложку I_i (кривая 1), разрядного тока I_a (кривая 2) и анодного напряжения U_a (кривая 3) от индукции магнитного поля в области выходного торца тигля-катада для устройства с истечением потока плазмы вниз (см. рис. 2) показаны на рис. 3 [22]. Из рис. 3 видно, что с помощью магнитного поля I_i можно увеличить почти в 10 раз. Вид функции $I_i(B)$ зависит от конструкции полого катода. Для устройства, показанного на рис. 1, I_i прямо пропорционально зависит от B . Последняя закономерность наблюдается для устройства с полым катодом, который имеет сужение поперечного сечения боковых стенок (сопло Лавала; цилиндрическая полость, закрытая диафрагмой). Вместе с тем наличие магнитного поля приводит к сужению диаграммы направленности плазменного потока (рис. 4). Поэтому интенсификация ионизации магнитным полем используется редко.

Рис. 1. Источник плазмы полым катодом (направление истечения потока плазмы вверх) [21]:

- 1 — насадка в виде сопла Лавалю;
- 2 — камера испарения рабочего вещества;
- 3 — нить подогрева катода;
- 4 — конический анод;
- 5 — изолятор;
- 6 — катушки магнитного поля;
- 7 — рабочее вещество;
- 8 — подложка;
- 9 — держатель подложек

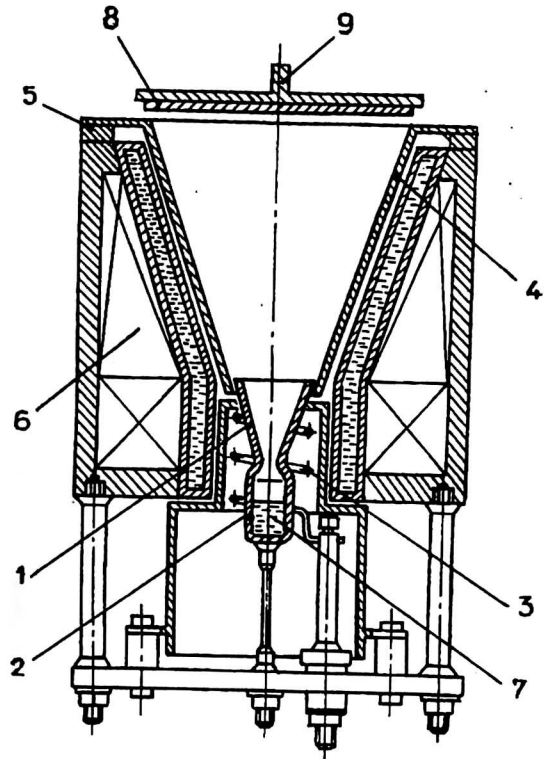
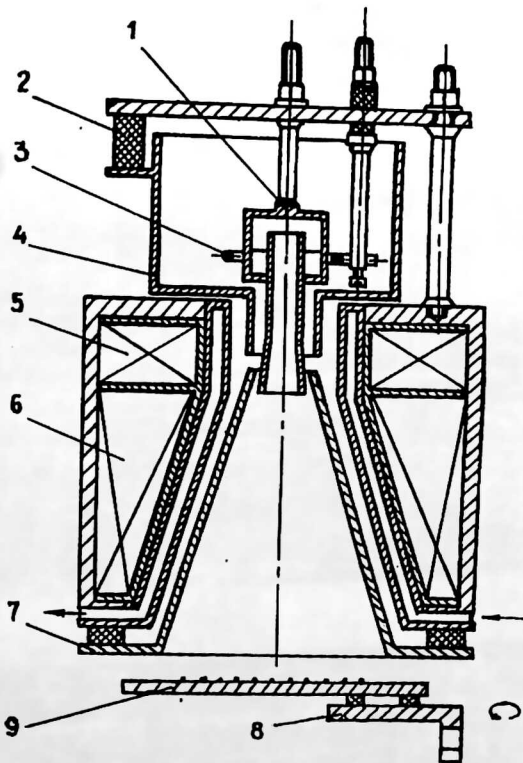


Рис. 2. Источник плазмы полым катодом (направление истечения потока плазмы вниз) [21]:

- 1 — полый катод — тигель;
- 2 — изолятор;
- 3 — нить подогрева;
- 4 — тепловой экран;
- 5 — верхняя катушка магнитного поля;
- 6 — нижняя катушка магнитного поля;
- 7 — конический анод;
- 8 — держатель подложек;
- 9 — подложки



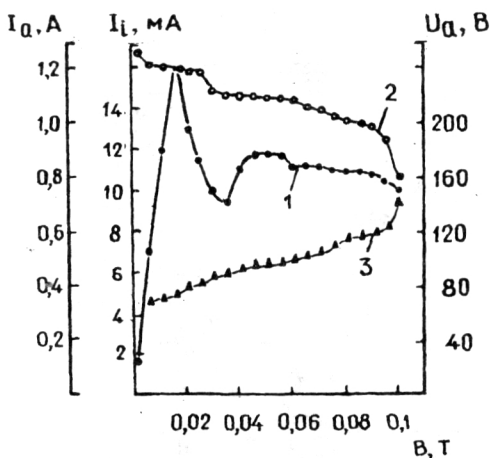


Рис. 3. Влияние величины индукции магнитного поля B на параметры разряда:

I_i — кривая 1; I_a — кривая 2;
 U_a — кривая 3 [22]

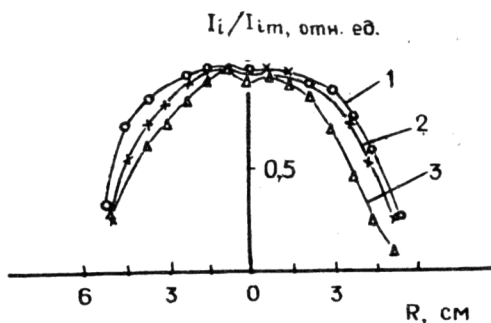


Рис. 4. Диаграмма направленности источника плазмы:

1 — $B = 0$; 2 — $B = 0,01$ Т;
 3 — $B = 0,05$ Т [21]

Показанная на рис. 4 зависимость I_i пронормированного на максимальное значение I_{im} от радиуса плазменного потока R получена для устройства с истечением потока плазмы вниз (см. рис. 2), когда включена только верхняя катушка магнитного поля. Зависимость I_i / I_{im} от R измерялась на расстоянии 12 см от выходного торца тигля-катода [21]. I_{im} пропорционально возрастает с ростом I_a при $I_a < 1,5$ А. При $I_a > 1,5$ А I_{im} не зависит от I_a . Одним из основных показателей источников плазмы с полым катодом в виде сопла Лавала является коэффициент использования рабочего вещества η . Он определяется как отношение массы осажденной пленки m к массе испаренного рабочего вещества m_1 . В условиях работы

[21] $\eta = \frac{m}{m_1} = 10 - 15\%$. Это примерно в два раза лучше, чем при испарении рабо-

чего вещества из цилиндрического полого катода аналогичных размеров. Ионное распыление пленки в процессе термоионного осаждения снижает экспериментальное значение η по сравнению с осаждением пленки из потока нейтральных атомов [21].

Вторым возможным применением разряда с испарением рабочего вещества из полого катода являются ионные источники [23, 24]. Один из вариантов ионного источника показан на рис. 5. От аналогичного источника на газах [25] он отличается только наличием вольфрамовой нити подогрева и теплоизолированного анода. Для получения почти полной ионизации атомов, выходящих из полого катода, в выходное отверстие тигля-катода лучше сварить термоэмиссионную трубочку с диаметром, близким к диаметру извлекаемого ионного пучка [24]. В таком случае термоэмиссионная трубочка и является собственно полым катодом. Основное достоинство источников ионов с однородно испаряемым электродом по сравнению с вакуумно-дуговым [26] состоит в том, что рабочим веществом может служить не только металл, но и высокоомный полупроводник или диэлектрик.

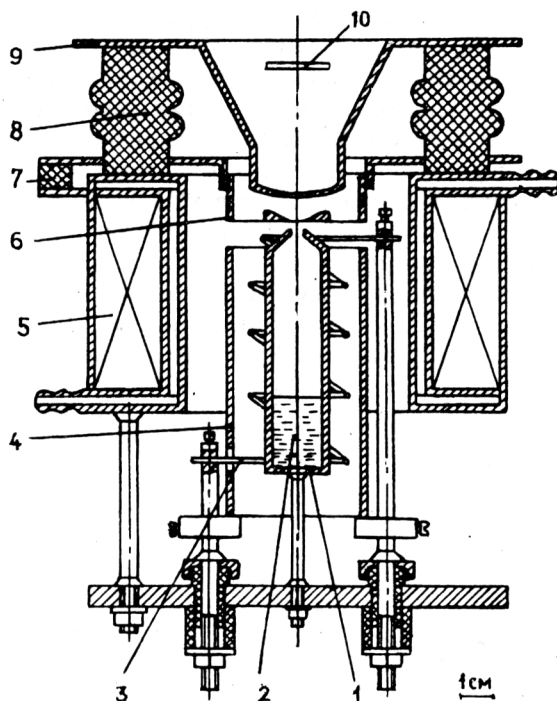


Рис. 5. Источник ионов с полым катодом [23]:
 1 — полый тигель — катод; 2 — рабочее вещество;
 3 — нить подогрева; 4 — тепловой экран;
 5 — катушка магнитного поля; 6 — анод;
 7, 8 — изоляторы; 9 — извлекающий ионы электрод;
 10 — коллектор ионного пучка

Для дальнейшего совершенствования устройств с испарением рабочего вещества из полого катода важное значение имеет установление физической модели разряда в них. С этой целью в работе [27] исследовалось влияние условий горения разряда на функцию распределения температуры стенок T_c цилиндрического полого катода по длине катода L (рис. 6). На рис. 6, а (кривая 1) показано распределение $T_c(L)$, когда включена только электронная бомбардировка тигля-катода с нити подогрева, расположенной в нижней части при $L = 6$ см. Значение $L = 0$ соответствует выходному торцу тигля-катода — началу истечения пара. По мере увеличения разрядного тока I_a и постоянной мощности подогрева тигля-катода W_f увеличивается температура T_c на всей длине L , особенно вблизи выхода потока пара (см. рис. 6, а, кривые 2, 3). Увеличение мощности подогрева тигля-катода (расхода рабочего вещества m) приводит к тому, что самая большая T_c сосредотачивается у выходного торца катода (рис. 6, б, кривые 1, 2). Увеличивая разрядный ток и уменьшая внешний подогрев тигля-катода разряд можно перевести в самостоятельный режим, когда испарение рабочего вещества осуществляется самим разрядом (см. рис. 6, в, кривые 1, 2). Увеличение I_a и в этом случае приводит к увеличению T_c по всей длине стенок тигля-катода, особенно вблизи выхода потока пара. Такие закономерности следуют из теории дугового разряда с истечением газа через трубку в вакуум [28], которая базируется на эксперимен-

тах [29, 30]. Более того, из теории, изложенной в работе [28], следует, что наибольшая T_c (место оптимальной ионизации в разряде и максимальной ионной бомбардировки стенок тигля-катода) должна быть сосредоточена в области максимального градиента плотности частиц в потоке пара, т. е. в месте сужения поперечного сечения тигля-катода. Именно такая закономерность установлена экспериментально как в дуговом разряде с испарением рабочего вещества из катодов различных конфигураций [27], так и в разряде с истечением газа из полостей различных конфигураций [31]. Этим объясняется и различие в ходе кривых $I_i(B)$ для катодов различных конфигураций. Таким образом, оба разряда по физическим процессам в них подобны, и теорию [28] можно использовать для моделирования дуговых источников плазмы и ионов с испарением рабочего вещества из полого тигля-катода простой конфигурации. В случае катода с осевой вставкой [32] теория [28] неприменима. Различие между рассматриваемыми разрядами состоит в том, что расход рабочего вещества \dot{m} в случае истечения газа является независимым параметром, а в случае испарения \dot{m} зависит от разрядных условий и прежде всего от величины I_a .

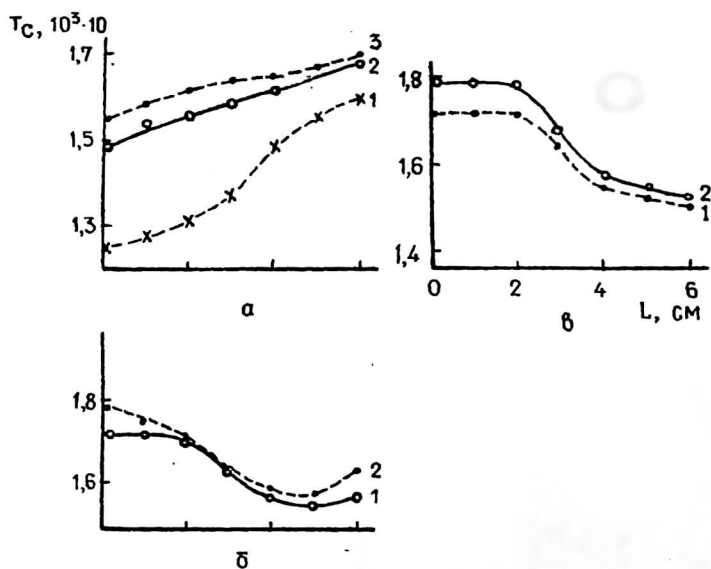


Рис. 6. Распределение температуры стенок T_c цилиндрического тигля — катода по его длине L [27]:

а — влияние I_a на T_c : 1 — $I_a = 0$; 2 — $I_a = 0,5$ А; 3 — $I_a = 1,2$ А;

б — влияние мощности подогрева W_c на T_c :

1 — $W_c = 120$ Вт; 2 — $W_c = 375$ Вт;

в — самоподогревный режим горения разряда:

1 — $I_a = 2,6$ А, 2 — $I_a = 4,5$ А

В настоящее время разработаны источники плазмы с полым тугоплавким катодом, в котором рабочим веществом являются Ag, Au, Ba, Bi, Cu, Cs, Sn, Pb, Se, Sr, Te, V, Zn. Не отмеченным ранее достоинством таких источников является возможность запыления дна прямоугольных ямок микронных размеров при малом боковом подпыле. Эти источники обладают большим коэффициентом α ионизации в потоке плазмы по сравнению с ВЧ- и СВЧ-источниками плазмы [33, 34]. Параметры источников приведены в таблице. Применяются источники плазмы с

полым катодом в технологии нанесения слоев Au для рентгеношаблонов [35], контактов из Ag к высокотемпературной сверхпроводящей керамике, контактов из Si к полупроводниковым приборам СВЧ и алмазам, в технологии обмоток из Si в бесконтактных электродвигателях, в восстановлении кольцевых пазов цилиндров двигателей внутреннего сгорания и других случаях.

Таблица параметров источников плазмы

Тип источника	D, см	j^* , мА/см	E_i , В	\dot{m} , мг/с	α , %	g , мкм/с	Q, кВт	Литера- тура
С полым катодом	6—10	0,1—30	1—10	1—50	1—50	$10^{-3} + 10^{-1}$	0,1—5	[12], [21], [22]
С испаряемым анодом:								
а — диодный	4—10	0,05—0,2	$10^1 \cdot 10^3$	0,1—0,5	1—8	$10^{-4} \cdot 10^{-3}$	0,1—3	[16]
б — триодный	10	0,5—2	$10^1 \cdot 10^3$	0,1—0,5	10—30	$10^{-4} \cdot 10^{-3}$	0,5—5	[17]
в — со скрещен- ными полями	6	0,5—5	$10^1 \cdot 10^3$	0,1—0,5	30—70	$10^{-4} \cdot 10^{-3}$	0,1—5	[16]
Электронно-лучевые:								
а — с накален- ным катодом	10	0,1—1	1—3	—	1—30	$10^{-3} \cdot 10^{-1}$	1—10	[40], [41]
б — с полым ка- тодом	10	0,3—3	1—3	1—20	10—40	$10^{-3} \cdot 10^{-1}$	2—10	[30, [42—45]
Катодно-дуговые источники	10	0,5—10	1—3	0,1—10	40—90	$10^{-2} \cdot 10^{-1}$	0,5—5	[49—50]

Обозначения достигнутых параметров источников плазмы с однородно испаряемым электродом в вакууме, приведенных в таблице: D — диаметр потока на расстоянии 15 см от испаряемого электрода; j^* — плотность ионного тока на подложку; E_i — средняя энергия ионов в потоке плазмы; \dot{m} — расход рабочего вещества; α — коэффициент ионизации плазмы в потоке; g — скорость нанесения пленки; Q — мощность источника плазмы. Величина α определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{j^* M}{e \rho g}, \tag{1}$$

где M — масса иона; ρ — плотность вещества в пленке; e — заряд электрона.

Формула (1) не учитывает ионного распыления пленки в процессе осаждения, поэтому она требует корректировки на ионное распыление при $\alpha > 10\%$. Из таблицы видно, что достигнутые параметры источников плазмы с однородным испарением электрода в вакууме близки к параметрам катодно-дуговых источников, однако возможности первых шире возможностей вторых. В первом типе источников отсутствуют капли в потоке плазмы, возможно получение как больших, так и меньших E_i , g , Q . Они более универсальны по выбору рабочего вещества. Достоинства ИСЭРОИВЭ перед магнетронным разрядом [47] в технологии напыления пленок состоят: в возможности отсутствия балластного газа в технологическом объеме; в больших α и g ; в более широком изменении технологических параметров. Все это ведет к улучшению качества пленок. Таким образом, первый тип источников плазмы расширяет возможности вторых, а иногда является безальтернативным.

Разряды с испаряющимся анодом

Интенсивные разряды с однородно испаряющимся анодом в вакууме возможны только при наличии термоэлектронов из горячего катода и относятся к дуговым разрядам. Физические процессы на аноде разряда наиболее полно исследованы в [36]. Различаются четыре разновидности таких разрядов: 1 — диодный разряд, 2 — диодный разряд в магнитном поле, 3 — триодный разряд, 4 — триодный разряд с испаряющимся анодом в скрещенных полях. Все они могут быть реализованы в разрядном устройстве, показанном на рис. 7 [16]. Диодный разряд зажигается между горячим термокатоде 3 в виде кольца из W и водоохлаждаемым медным тиглем-анодом, в который загружается рабочее вещество. Ионизация в диодном разряде интенсифицируется магнитным полем катушки соленоида 5. В этом случае реализуется диодный разряд в магнитном поле. Разряд исследован в диапазоне индукций магнитного поля $B = 0 - 1$ Т. Второй путь интенсификации ионизации в диодном разряде без магнитного поля состоит в том, что анод и катод окружаются цилиндром под положительным относительно заземленного катода потенциалом V_c , который создается источником питания. Свойства разряда при наличии электрода отличаются от свойств диодного разряда и поэтому разряд с дополнительным электродом называется триодным разрядом с испаряемым электродом или разряд с испаряющимся анодом в радиальном электрическом поле. Триодный разряд в магнитном поле соленоида называется ещё разрядом с испаряющимся анодом в скрещенных полях. Создаваемая каким-либо разрядом с испаряющимся анодом плазма может конденсироваться на подложке, которая закрепляется на подложке-держателе, потенциал которого может регулироваться источником питания. Для диагностики параметров плазмы обычно используются плоский зонд Ленгмюра и многосеточный зонд.

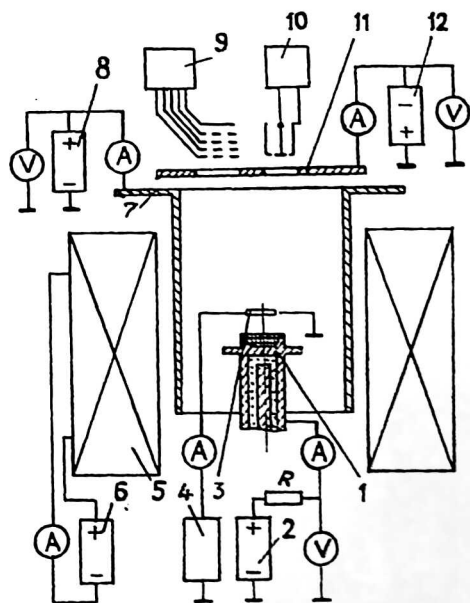


Рис. 7. Устройство с испаряющимся анодом [16]: 1 — водоохлаждаемый тигель-анод; 2 — источник анодного напряжения; 3 — горячий термокатод; 4 — источник напряжения накала термокатода; 5 — катушка магнитного поля; 6 — источник напряжения для катушки магнитного поля; 7 — дополнительный цилиндр; 8 — источник напряжения для цилиндра; 9 — многосеточный зонд; 10 — плоский зонд Ленгмюра; 11 — держатель подложек с отверстием; 12 — источник напряжения для держателя подложек

Диодный разряд исследован в диапазоне разрядных токов $I_d = 1-100$ А. Типичные вольт-амперные характеристики [33] и зависимости ионного тока на подложку I_i от разрядного тока I_d диодного разряда при разных токах накала катода I_0 показаны на рис. 8, а. Они существенно отличаются от аналогичного разряда на газах [4]. Наблюдается четыре режима работы термокатода: 1 — вакуумный режим при $I_d < 1$ А, когда испаряемого рабочего вещества недостаточно для

зажигания разряда (растущий участок кривой $U_a(I_a)$ на рис. не показан); 2 — свободный режим работы с объемным разрядом электронов у поверхности катода (кривые 1, 1'), когда вольт-амперная характеристика описывается функцией $I_a U_a = \text{const}$ при $I_a \leq 4$ А и при $I_a > 4$ А U_a практически не зависит от I_a , как в разряде на газах; 3 — вынужденный режим работы без объемного заряда у поверхности катода (кривые 2, 2'—5, 5'); 4 — самоподогревный режим, когда внешний накал катода выключен и он греется ионами из разряда. Самоподогревный режим работы катода на рис. 8, а не показан, но спад кривых 2—5 после максимума связан именно с началом саморазогрева катода [38]. Из хода кривых зависимости $I_i(I_a)$ при разных значениях I_0 (кривые 1'—5') видно, что уменьшение тока накала катода I_0 является эффективным средством интенсификации ионизации паров рабочего вещества в разряде. На кривой 5' ионный ток I_i возрастает в несколько десятков раз по сравнению с кривой 1'. Одновременно возрастает и падение анодного напряжения U_a на разряде (кривые 1—5), т. е. возрастает вкладываемая в разряд мощность, основная часть которой выделяется на аноде. Наблюдающийся рост зависимости $I_i(I_0)$ обусловлен как увеличением коэффициента ионизации плазмы в потоке α в несколько раз, так и увеличением скорости расхода рабочего вещества \dot{m} также в несколько раз. Весьма важным свойством разрядов с испаряемым анодом является наличие отрицательного плавающего потенциала U_f в пространстве за катодом (см. рис. 8, б). Отрицательные U_f характерны для свободного режима работы термокатода (кривая 1*). При переходе к вынужденному режиму (кривые 3*—5*) U_f проходит через минимум, который наблюдается, когда разрядный ток I_a становится равным току термоэмиссии катода I_c . В этот момент наблюдается минимум на вольт-амперных характеристиках (см. рис. 8, а, кривые 3—5). Таким образом, в диодном разряде с испаряемым анодом в свободном режиме работы термокатода получают ускоренные компенсированные ионные потоки. Этим свойством обладают все разряды с испаряемым анодом при давлении газа в объеме $P \leq 1 \cdot 10^{-1}$ Па. Наиболее вероятная энергия ионов E_m в потоке близка к eU_a , т. е. $E_m \approx eU_a$, где e — заряд электрона. В триодных разрядах $eU_a < U_m < eU_c$, где U_c — потенциал цилиндра.

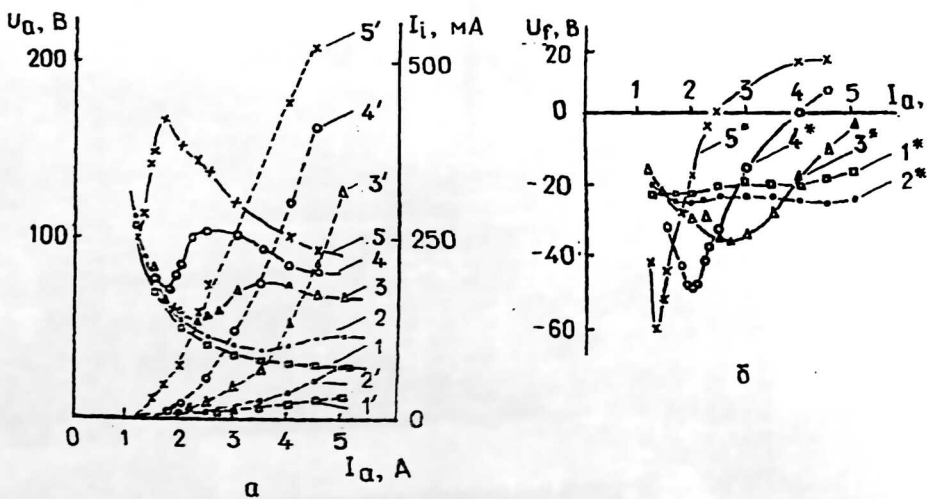


Рис. 8. Зависимости анодного напряжения U_a (кривые 1—5), ионного тока на держатель подложек I_i (кривые 1'—5'), и плавающего потенциала U_f (кривые 1*—5*) от разрядного тока I_a при разных токах накала катода I_0 [37]:
 1, 1', 1* — $I_0 = 37,5$ А; 2, 2', 2* — $I_0 = 35,0$ А; 3, 3', 3* — $I_0 = 33,75$ А;
 4, 4', 4* — $I_0 = 32,5$ А; 5, 5', 5* — $I_0 = 31,25$ А

С помощью магнитного поля ионизация паров рабочего вещества в диодном разряде интенсифицируется в несколько раз (рис. 9, кривая 1). Еще более значительно влияние на ионный ток на подложку I_i скрещенных полей (продольного по отношению к потоку плазмы магнитного и радиального электрического полей). Магнитное поле контрагирует разряд и сужает диаграмму направленности плазменного потока, поэтому оно чаще используется в ионных источниках [2], а в источниках плазмы применяется либо триодный разряд [17], либо разряд в скрещенных полях [16]. Радиальным электрическим полем можно не только интенсифицировать ионизацию паров рабочего вещества, но и потушить (сорвать) разряд между катодом и анодом. Это видно из рис. 10, а, где показаны зависимости I_i , U_a и потенциала цилиндра U_c от тока цилиндра I_c при $I_o = 37,5$ А. При $I_c > 1,5$ А исчезало свечение разряда и было $I_i = 0$. При уменьшении тока накала катода I_o наблюдаемый эффект исчезал (см. рис. 10, б). Он отсутствует в аналогичных разрядах на газах. Механизм срыва триодного разряда в скрещенных полях обусловлен возрастанием проводимости плазмы β при $U_c > U_a$ и свободном режиме работы катода. В этом случае рост β за счет дополнительного отбора эмиссии из катода вызывает падение U_a ниже критического при $I_a = 3$ А = const и разряд срывается (см. рис. 10, а). Аналогично объясняется и срыв испарения анода диодного разряда при напуске газа в объем до давлений $P = 10^{-2} \div 10^{-1}$ Па, когда возрастает компенсация отрицательного объемного заряда у катода, возрастает проводимость плазмы, падает U_a и испарение анода прекращается, а разряд горит только на газе. Методы стабилизации срыва этих разрядов сейчас исследуются. На рис. 11 показан один из вариантов источника плазмы с испаряемым анодом 1 в виде стержня [38]. Под ним расположен термокотод 3. Разряд может интенсифицироваться электрическим полем цилиндра 2 и магнитным полем соленоида 4. Источник предназначен для нанесения пленок Сг на мелкие детали 5, которые располагаются на держателе подложек 6. Такой источник работает только на рабочих веществах, давление насыщенных паров которых при температуре плавления $P_1 > 1$ Па. При работе устройства рабочее вещество анодного прутка 1 существует в виде капли. Устойчивость капли на конце прутка определяется равновесием между весом капли и силами поверхностного натяжения. Вес капли задается скоростью подачи рабочего вещества V и скоростью испарения Ω . Соответствующие расчеты показывают, что капля будет висеть на конце прутка из рабочего вещества диаметром d_o , если

$$V \leq 4 \left(\frac{6\sigma}{d_o^2 \rho g} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{\Omega}{\rho}, \quad (2)$$

где σ , ρ — коэффициенты поверхностного натяжения при температуре плавления и удельная плотность рабочего вещества, соответственно; g — ускорение земного тяготения.

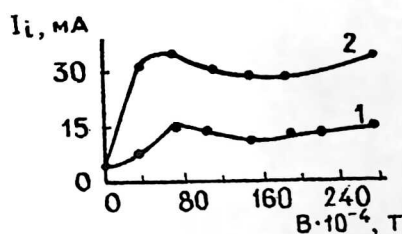


Рис. 9. Зависимость ионного тока на держатель подложек I_i от величины индукции магнитного поля B для диодного (кривая 1) и триодного (кривая 2) разрядов

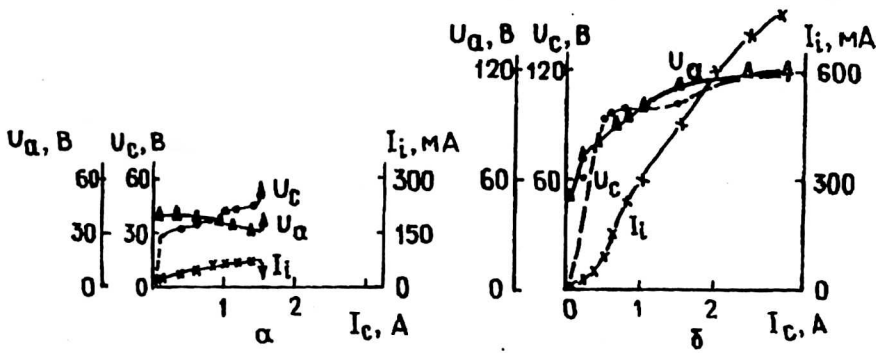


Рис. 10. Зависимости I_i , U_a , U_c от тока цилиндра I_c . $B = 0,08$ Т; $I_0 = 2$ А [18]:
 а — $I_0 = 37,5$ А; б — $I_0 = 34$ А

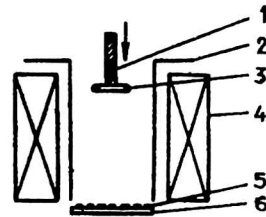


Рис. 11. Источник плазмы с испаряемым анодом

Для увеличения производительности устройства его можно выполнять не аксиально-симметричным, а вытянутым вдоль перпендикуляра к плоскости рисунка (см. рис. 11). Основной недостаток источников плазмы с испаряемым анодом состоит в том, что срок службы катода составляет в среднем 10 ч. Подбором конструкции источника плазмы и режима горения разряда срок службы катода можно увеличить в 3—4 раза. Применяются источники плазмы с испаряемым анодом для металлизации диэлектриков, получения пленок TiN ; $TiH_{1,8}$; $TiD_{1,8}$; $TiT_{1,8}$; TiO ; Al_2O_3 и др., создания высокоадгезионных подслоев умеренной толщины (0,1—1,0 мкм), которые доращиваются другими плазменными устройствами до необходимых больших толщин (10^{-1} — 10^0 мм). С помощью данных устройств получены лазерные зеркала с высокой лучевой прочностью, рентгеношаблоны с особо контрастными слоями урана, радиационно-безопасные радиоизотопные приборы (мишени генераторов нейтронов, генераторы униполярных ионов, нейтрализаторы статического электричества), пленочные терморезисторы, плунжерные пары форвакуумных насосов, форсунки дизельных двигателей и т. д. [40].

Электронно-лучевые разряды

В электронно-лучевых разрядах испарение рабочего вещества электрода в вакууме осуществляется электронным лучом. Если в области расположения испаряющегося электрода нет электрического и магнитного полей, то сам электронный луч производит незначительную ионизацию паров рабочего вещества (доли процента). Ее можно увеличить, если испаряемый электрод и электронный луч поместить в магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ — $1,0$ Т и зажечь пучково-плазменный разряд [9], в котором основная ионизация производится не быстрыми низкоконцентрированными электронными лучами, а медленными электронами плазмы па-

ров рабочего вещества. Медленные электроны плазмы получают энергию для ионизации от электронных колебаний, которые возбуждаются в системе "плазма — пучок" [9].

При этом коэффициент ионизации паров рабочего вещества может достигать 100 %. Схема устройства для зажигания пучково-плазменного разряда с испаряемым электродом показана на рис. 12. Электронный луч (пучок) 4 формируется электронной пушкой, состоящей из электродов 1—3. Последний электрод электронной пушки заземлен. Рабочее вещество либо загружается в водоохлаждаемый тигель 7, который является коллектором электронного луча, либо подается на периферию электронного луча в виде прутка 5. В обоих случаях у поверхности испаряемого электрода 5 в магнитном поле $B = 0,1—1,0$ Т образуется плазма 6 паров рабочего вещества при давлении насыщенных паров у поверхности электрода $P > 1$ Па. Область плазмы на рис. 12 заштрихована. Рабочим веществом может служить газ, жидкость или твердое вещество (металл, полупроводник, диэлектрик). Химически сложные вещества под действием электронного луча разлагаются на химические элементы и их простые соединения, которые после этого испаряются и ионизируются. Типичное распределение извлекаемого из разряда тока ионов плазмы I_Z , пронормированного на максимальное значение тока I_{Zmax} , по зарядам Z_i показано на рис. 13. Пучок ионов извлекался поперек магнитного поля и анализировался масс-спектрометром. В плазме Si (кривая 1) преобладают однозарядные ионы ($Z_i = 1$), в плазме Mo (кривая 2) и W (кривая 3) преобладают двухзарядные ионы ($Z_i = 2$) при мощности электронного луча $P = 1,5$ кВт. Последнее указывает на то, что уже при небольших мощностях луча образуется плазма с высоким коэффициентом ионизации ($\alpha > 75$ %). Это используется в ионных источниках [9]. Практического источника плазмы с пучково-плазменным разрядом не разработано. Однако именно этот разряд наиболее перспективен в качестве ионизатора к электронным пушкам с мощностью луча $P > 100$ кВт, когда другие методы ионизации, известные сейчас, неприменимы.

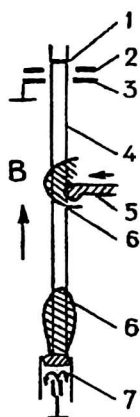
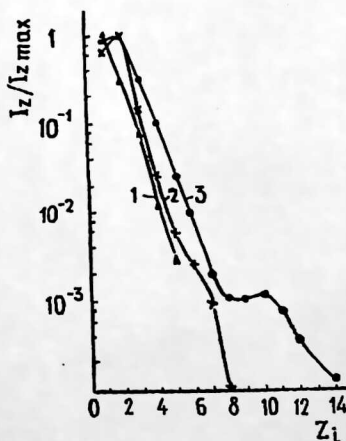


Рис. 12. Устройство пучково-плазменного разряда [9]

Рис. 13. Распределение ионов плазмы по зарядности Z_i для разных рабочих веществ [9]:
1 — Si; 2 — Mo; 3 — W



Если рабочее вещество подается на периферию электронного пучка, для устойчивого горения разряда необходимо выполнение соотношения (1). При ионизации паров рабочего вещества, создаваемых пушками мощностью $P = 1-10$ кВт, чаще всего над испаряемым электродом-тиглем располагается вольфрамовый термокатод (рис. 14) под отрицательным по отношению к тиглю потенциалом и зажигается дуговой разряд с накалившимся катодом [41, 42]. Для уменьшения загрязнения плазмы материалом электродов и стенок вакуумной камеры поток плазмы окружается усеченным конусом под потенциалом катода 6. Если рабочим веществом в тигле является тугоплавкий материал, который эмитирует термоэлектроны, то катод может отсутствовать, но в поток пара помещают дополнительный электрод (анод) под положительным потенциалом относительно тигля (на рис. 14 не показан) и зажигают тот же дуговой разряд с накалившимся катодом. Поскольку часто электронные пушки формируют лучи, хорошо сфокусированные на рабочем веществе, то поверхность эмиссии электронов тугоплавкого рабочего вещества образуется небольшая, и конструкция с дополнительным термокатодом более предпочтительна по сравнению с конструкцией с дополнительным анодом, поскольку позволяет получить большее α . В области мощностей электронных пушек $P = 1-10$ кВт возможно применение высокочастотного разряда в качестве ионизатора паров рабочего вещества [34]. Однако устройства с дополнительным катодом обладают большим α .

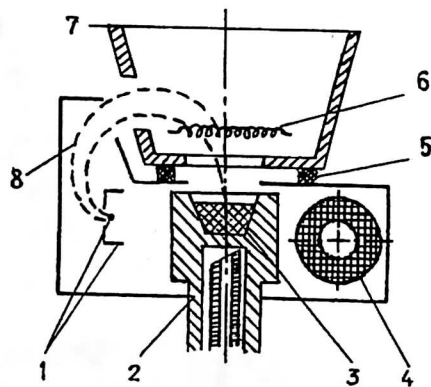


Рис. 14. Источник плазмы с дополнительным термокатодом [42]:

- 1 — электронная пушка; 2 — водоохлаждаемый тигель; 3 — рабочее вещество; 4 — катушка магнитного поля; 5 — изолятор;
- 6 — термокатод; 7 — усеченный конус-экран;
- 8 — электронный луч

К электронно-лучевым источникам плазмы примыкают источники плазмы, в которых электронный луч формируется с помощью дугового разряда с полым катодом [30, 43, 44]. Для этого в полый катод подается Ag и зажигается вспомогательный разряд между полым катодом и промежуточными электродами (рис. 15). Этот разряд создает электронный луч, который магнитной катушкой и постоянным магнитом направляется на испаряемый тигель-анод 7. Ток электронов луча усиливается диском из La B₆ [44]. Кроме быстрых электронов луча, на

тигель-анод попадают электроны плазмы дугового разряда с полым катодом. Концентрация плазменных электронов значительно превосходит концентрацию электронов пучка. Плазменные электроны ионизируют пары рабочего вещества, так как обладают температурой T_e , составляющей в энергетических единицах несколько электрон-вольт [45]. Коэффициент ионизации плазмы паров рабочего вещества составляет десятки процентов [46] и обеспечивает высокое качество пленок на подложке. При получении газометаллических пленок в технологический объем камеры 6 подается реактивный газ. Такие источники плазмы имеют большую надежность работы по сравнению с электронно-лучевыми источниками плазмы с дополнительным термокатодом при близких для обеих конструкций значениях α . Показанный на рис. 15 источник плазмы особенно удобен при получении газометаллических пленок типа TiN , Al_2O_3 по сравнению с другими электронно-лучевыми источниками, так как не требует специальной откачки электронной пушки. Вместе с тем электронные пушки обладают большим сроком службы и диапазоном изменения мощностей луча по сравнению с разрядом с полым катодом.

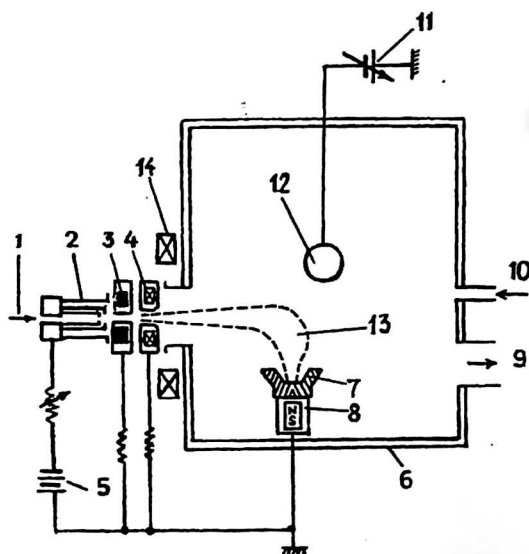


Рис. 15. Источник плазмы полым катодом [44]:
 1 — подача балластного газа Ar ; 2 — дисковый катод из LaB_6 ; 3 — постоянный магнит (первый промежуточный электрод); 4 — катушка электромагнита (второй промежуточный электрод); 5 — источник анодного напряжения; 6 — вакуумная камера; 7 — водоохлаждаемый тигель —анод; 8 — постоянный магнит; 9 — откачка; 10 — подача реактивного газа; 11 — источник напряжения для подложки; 12 — подложка; 13 — поток плазмы; 14 — катушка магнитного поля

Заключение

В настоящее время в основном изучены физические процессы в ИСЭРОИВЭ и созданы физические модели разрядов, но ряд эффектов остается не объясненным. Разработаны новые виды источников плазмы и ионов на основе ИСЭРОИВЭ. Среди них необходимо отметить:

создание направленных источников плазмы на основе разряда с испарением рабочего вещества из полого катода;

создание плазменных ускорителей на основе разряда с испаряемым анодом;

создание электронно-лучевых источников плазмы с испарением анода электронным пучком из разряда с истечением газа из полого катода;

перспективу создания мощных электронно-лучевых источников плазмы с ионизацией паров рабочего вещества в пучково-плазменном разряде.

Практически все устройства с ИСЭРОИВЭ могут работать с напуском газа в технологический вакуумный объем. Это значительно расширяет технологические возможности устройств по получению сложных газометаллических пленок, покрытий и композиционных материалов. Разработанные источники плазмы паров твердых тел применены в технологии конкретных производств. Применение устройств с ИСЭРОИВЭ будет непрерывно расширяться. В дальнейшем улучшении моделей разрядов, устройств и технологий таятся особенно большие резервы будущего развития исследований по ИСЭРОИВЭ. Несмотря на то, что задача получения плазмы любого химического элемента и их многих соединений практически решена, исследования ИСЭРОИВЭ с целью совершенствования устройств и технологий будут продолжаться.

Среди научных задач, которые необходимо решать в ближайшем будущем, необходимо отметить следующие:

исследования различных неустойчивостей положительного столба всех типов ИСЭРОИВЭ с резко неоднородным распределением плотности плазмы рабочего вещества в пространстве и со специфическими процессами на испаряющемся электроде (капиллярные волны, контрагированное испарение и т.д.). Определение методов стабилизации неустойчивостей;

объяснение особенностей вольт-амперных характеристик несомостоятельного дугового разряда с испарением материала анода, который известен более 40 лет, но остается малоизученным до сих пор, в частности, объяснение существования высоковольтной ($U_a = 10^3$ В [19, 38]) и низковольтной ($U_a = 10$ В [48]) форм разряда и определение различия возможностей их использования;

описание механизма зажигания пучково-плазменного разряда при взаимодействии электронного пучка с твердым телом в продольном по отношению к направлению пучка магнитном поле [9];

описание механизма поддержания ионизации паров в электронно-лучевых источниках с испарением материала анода электронами из разряда с истечением газа из полого катода и надежное установление соотношения между атомами рабочего вещества и газа в различных режимах горения разряда [43—46].

Среди научно-технических проблем, стоящих на повестке дня, следующие:

упрощение конструкции источников плазмы и ионов, а также их электропитания в разрядах с испаряемым катодом и испаряемым анодом;

увеличение срока службы прямонакального катода в устройствах с испаряемым анодом и нахождение оптимальной области подачи реактивного и буферно-

го газов при газовом поджиге и синтезе окислов, нитридов, карбидов и других пленок, состоящих из атомов твердых веществ и газов;

создание пучково-плазменных источников плазмы всех веществ, помещенных в неоднородное магнитное поле, которое легче согласовать с электронными пушками различной конструкции;

создание мощных плазмохимических реакторов с однородно-испаряющимся электродом для высокопроизводительного синтеза новых материалов, нанесение защитных, антиэрозионных, сверхпроводящих и других уникальных покрытий;

проведение контрольных экспериментов (масс-спектрометрия, оптика, обратное резарфордовское рассеяние, рентгеновский флюоресцентный анализ, ожеспектроскопия и др.) по определению засорения плазмы рабочего вещества устройств материалом электродов и вакуумной оснастки, подверженных ионному распылению. Исследование новых структур и свойств термоионных конденсаторов, расширение их ассортимента и применений;

автоматизация и интеграция технологических процессов, включение их в поточные линии производства.

Следовательно, исследования ИСЭРОИВЭ далеки от завершенности и существует значительная перспектива их развития в будущем.

* * *

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и технологий Украины.

Литература

1. Schüler H. Über eine neue lichtquelle und ihre anwendungsmöglichkeiten // Zeitschr. für Physik, 1926. V 35. №2. P. 323—337.
2. Гусев В. М. Ультравысокотемпературный источник ионов для электромагнитного разделения изотопов щелочных металлов // В сб. Труды Всесоюзной научно-техн. конф. по применению радиоактивных и стабильных изотопов и излучений в народном хозяйстве и науке. Получение изотопов. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 68—72.
3. Золотарев В. Р., Ильин А. И., Комар Е. Г. Разделение изотопов на электромагнитных установках в Советском Союзе // В сб. Труды Второй Международной конф. по мирному использованию атомной энергии. Доклады советских ученых. — М.: Изд-во Главного управления по использованию атомной энергии при Совете Министров СССР, 1959. С. 94—108.
4. Bohm D., Burhop E., Massy H. S., Williams R. The Characteristics of Electrical Discharge in Magnetic Fields, Eds. A. Guthrie and R.K. Wakerling, New York, McGraw-Hill, 1949. 248 p.
5. Mattox D. M. Fundamental of ion plating // J.Vac. Sci. Technol. 1973. V. 10, № 1. P. 47—64.
6. Саенко В. А. Экспериментальное исследование особенностей разрядов низкого давления в продольном магнитном поле: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — КГУ, Киев, 1968.
7. Bohman R. I., Goldsmith S. 19-th century beginnings to vacuum arc deposition // Proc. 14-th Int. Sympos on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Santa Fe, New Mexico. — 1990. P. 176.
8. Никитин М. М., Клебанов Г. Н., Рыкалин Н. Н. и др. Способ электронно-лучевого напыления; А.с. 213553. Б.И. 1976. № 31. С. 169.

9. Владимиров А. И., Саенко В. А., Третьяков Ю. П. Источник ионов с рабочим веществом в твердой фазе: Препринт ОИЯИ. Р. 13—5559. — Дубна, 1971.
10. M o g o z o v A. I., C h u s o v I. V., P o k r o v s k y I. B. et al. Caesium plasme source for the araks experiment // Space Science Instrumentation. — 1978. № 4. Р. 139—141.
11. В а с и н А. И., Д о р о д н о в А. М., П е т р о с о в В. А. О существовании вакуумной дуги с распределенным разрядом на расходуемом катоде. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 24. С. 1499—1504.
12. Саенко В. А., Владимиров А. И., Веремейченко Г. Н. Плазменный испаритель. // ПТЭ, 1983. № 4. С. 166—169.
13. Полищук В. П., Сырчев П. Е., Шабашов В. И., Ярцев И. М. Стационарная вакуумная дуга с диффузной катодной привязкой на горячем термоэмиссионном катоде // ЖТФ, 1986. Т. 56 № 11. С. 2233.
14. Асиновский Э. И., Полищук В. П., Пронин В. А. и др. Исследование вакуумных разрядов на горячих испаряющихся электродах // Матер. 8-й Всес. конф. "Физика низкотемпературной плазмы". Ч. 2 // Под ред. О. Г. Мартыненко. — Минск: АНК "ИТМО" им. А. В. Лыкова, 1991. С. 15.
15. Саенко В. А., Деркач А. А. О диффузной привязке разряда с испаряемым в вакууме легкоплавким катодом. // ТВТ, 1991. Т. 29. № 3. С. 378.
16. Владимиров А. И., Горюк С. В., Саенко В. А. Источник плазмы паров металлов // ПТЭ, 1987. № 2. С. 136—140.
17. Борисенко А. Г., Кравченко А. В., Саенко В. А. Безмагнитный плазменный металлатор // ПТЭ, 1992. № 2. С. 257—261.
18. Саенко В. А., Борисенко А. Г. О срыве разряда с испаряющимся анодом в скрещенных полях. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. ядерно-физических исследований, 1992. № 1(22). С. 41—43.
19. Саенко В. А. Устройства термоионного осаждения // ПТЭ, 1985. № 3. С. 9—21.
20. Саенко В. А. Стационарные электрические разряды с испаряющимся в вакууме электродом. // Теплофизика высоких температур, 1989. Т. 27. № 5. С. 1007—1017.
21. Саенко В. А., Владимиров А. И., Веремейченко Г. Н., Кравцкий В. А. Испарители с полым катодом // ПТЭ, 1985. № 1. С. 210—215.
22. S a y e n k o V. A., V l a d i m i r o v A. I., V e r e m e i c h e n k o G. N. Static characteristics of the discharge with hollow cathode evaporated in vacuum. // Proc. 11-th ISDEIV, Berlin. 1984. P. 237—241.
23. Саенко В. А., Деркач А. А., Веремейченко Г. Н. Источник ионов металлов с горячим полым катодом // ПТЭ, 1987 № 1. С. 154—157.
24. Саенко В. А., Деркач А. А. Разрядная камера источника ионов металлов // ПТЭ, 1990. № 4. С. 176—178.
25. S i d e n i u s G. The High Temperature Hollow Cathode Ion Source // Nucl. Instrum. and Methods, 1965. V. 38. № 1. P. 19—24.
26. B r o w n I. A., Vacuum arc ion sources for particle accelerators and ion implentation. // Proc. 15-th ISDEIV, Darmstadt, 1992. P. 661—666.
27. Саенко В. А., Деркач А. А., Борисенко А. Г. Температурные исследования полого катода-тигла в электрическом разряде // Теплофизика высоких температур, 1988. Т. 26, № 3. С. 450—454.
28. D e l c r o i x J. L., T r i n d a d e A. R. Hoolow Cathode Arcs. // Adv. Electron and Electr. Phys. 1974. V. 35. № 1. P. 88—94.
29. L u c e J. S. High Ionized Plasma Reseiving // Proc 2-nd United Nations Internat: Conf. on the Peacefull Uses of Atomic Energy. — U.N. Geneva, 1958. V. 31. P. 305.
30. W i l l i a m s D. G. Vacuum coating with a hollow cathode source. // J. Vac. Sci. Technol., 1974. V. 11. P. 374—379.
31. L a v r o v B. P., R u d a k o v a T. V., S i m o n o v V. Y. Low pressure arc with variable cross section of discharge channal. // 9ht Int. Simp. Plasma Chem., Simp. Proc, 1989. V. 1. P. 579—583.
32. Деркач А. А., Саенко В. А. Источник плазмы паров металлов с осевым анодом // ПТЭ, 1990. № 6. С. 174—177.
33. H a l e G. Y., W h i t e G. W., M e y e r D. E. Ion Plating Using a Pure Ion Source: An Answer Looking for Problem // Electronic Packaging and Production, 1975. № 5. P. 39—45.
34. Кузьмичев А. И., Цибульский Л. Ю. Термоионное устройство с индукционным испарителем // ПТЭ, 1992. № 2. С. 262—265.

35. Корсаков В. С., Мишачев В. И., Никулин И. Г. и др. Прецизионная технология изготовления рентгеношаблонов // Электронная промышленность, 1992. № 3. С. 21—26.
36. Полищук В. П., Ярцев И. М., Вакуумные дуги на испаряющихся горячих анодах // ТВТ, 1996. Т. 34. С. 385,
37. Борисенко А. Г., Саенко В. А. Несамостоятельный дуговой разряд в парах материала анода как источник технологического плазменного потока // Труды Укр. Вакуумного общества, 1995. Т. 1. С. 106—109.
38. Саенко В. А., Владимиров А. И., Горюк С. В. Устройство термоионного осаждения // Сибирский физико-технический журнал, 1992. № 1. С. 113.
39. Борисенко А. Г., Саенко В. А., Рудницкий В. А. Влияние добавки газа на характеристики разряда с испаряемым анодом // Материалы ежегодной науч. конф. ИЯИ. — Киев, 1995. С. 252.
40. Ключников А. А., Коломиец Н. Ф., Минчук Г. Я., Червинский В. Н. Принципы построения и применения металло-третиевых структур. — Киев: Наукова думка, 1992. — 186 с.
41. Kawashimo Y., Nakasone M., Suzuki A. Ionization of Evaporated Particles in High Vacuum // J. Vac. Soc. Japan. 1983. V. 26. № 5. p. 511—516.
42. Саенко В. А., Савильный Н. Е. Ионизаторы к электронно-лучевым испарителям // ПТЭ. 1993. № 2. С. 209—213.
43. Shulin Z., Jichang W. A new type of hollow cathode discharge gun used in ion beam coating apparatus and theory analysis // Vacuum. 1989. V. 39. № 10. P. 945—949.
44. Takahashi Y., Nitobe K., Uramoto Y. et al. Thin Film Deposition by Reactive Ion Plating Using the Cathode System Composed of LaB_6 Disc and Ta Pipe // J. Vac. Sci. Technol. A. 1993. V. 11. № 4. P. 1491—1495.
45. Whang K. W., Seo Y. W. Characteristics of Hollow Cathode Discharge Plasma and its Application for the Reactive Ion Plating of TiN and TiC // Ibid. P. 1496—1501.
46. Vetter Y., Burgmer W. The state of the art of PVD coating // Proc. 15-th ISDEIV, Darmstadt. 1992. P. 647—651.
47. Waits R. K. Planar magnetron sputtering // J. Vac. Sci. Technol. 1978. 12 (2). P. 179.
48. Дороднов А. М., Кузнецов А. Н., Петросов В. А. О новом типе вакуумной дуги в парах анода с нерасходуемым полым катодом // Письма в ЖТФ, 1979. Т. 5. С. 1001.
49. Толок В. Т., Падалка В. Г. Разработка и внедрение новых методов вакуумно-плазменной технологии высоких энергий // Вестник АН УССР. 1979. № 4. С. 40—48.
50. Hantshе E. A Hydrodynamic Model of Vacuum Arc Plasmas // Proc. 14-th ISDEIV, Santa Fe, New Mexico. 1990. P. 177—181.

INTENSIVE STATIONARY ELECTRICAL DISCHARGE WITH AN ELECTRODE VAPORIZING UNIFORMLY IN VACUUM

V. A. Saenko

Scientific center "Nuclear Research Institute", Kiev, Ukraine

The review contains brief description of modern physics, techniques and technological applications of electrical discharge with an electrode vaporizing uniformly in vacuum. A vacuum arc with local vaporizing cathode-anodes spots is not considered as good famous.