

Подставляя в (3.8) приведенное выше выражение для τ_{ϕ} и численные значения всех величин, характеризующих разряд, можно убедиться, что в рассматриваемых условиях ΔT оказывается малым по сравнению с T_k , т. е. действительно процесс распространения разряда можно исследовать в квазистационарном приближении.

Авторы выражают благодарность Ю. П. Райзеру за подробное обсуждение данной работы.

Поступила 5 V 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А. Ф., Рухадзе А. А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. М., Атомиздат, 1976.
2. Андреев С. И., Байков О. Г., Дашук П. Н. Потери энергии из оптически тонкого слоя ксеноновой плазмы.— ТВТ, 1970, т. 8, вып. 5.
3. Мышенков В. И., Райзер Ю. П. Волна ионизации, распространяющаяся благодаря диффузии резонансных квантов и поддерживаемая сверхвысокочастотным излучением.— ЖЭТФ, 1971, т. 61, вып. 5(11).
4. Бункин Ф. В., Конов В. И., Прохоров А. М., Федоров В. Б. Лазерная искра в режиме «медленного горения».— «Письма в ЖЭТФ», 1969, т. 9.
5. Райзер Ю. П. Дозвуковое распространение световой искры и пороговые условия для поддержания плазмы излучением.— ЖЭТФ, 1970, т. 58.
6. Райзер Ю. П. Распространение сверхвысокочастотного разряда высокого давления.— ЖЭТФ, 1971, т. 61.
7. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
8. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.

УДК 533.9.07

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА НА ЭРОЗИЮ МНОГОКАНАЛЬНОГО ВОЛЬФРАМОВОГО КАТОДА

Г. В. Бабкин, А. В. Потанов

(Москва)

Среди практических вопросов обеспечения работоспособности стационарных источников и ускорителей плазмы в течение длительного времени функционирования определяющее значение имеет проблема сохранности электродов, сведения к минимуму их износа. С этой целью в известных конструкциях электроды изготавливаются, как правило, из тугоплавких металлов.

В особенности привлекателен вольфрам, имеющий наиболее высокие среди всех металлов температуры фазовых переходов, что позволяет заметно снизить скорость испарения материала в теплонапряженных условиях работы этих устройств. Однако, помимо испарения, существуют и другие факторы, влияющие на целостность горячих вольфрамовых электродов, их абляцию (химические процессы, эрозия в микродугах, ионная бомбардировка и др.). Одним из таких факторов, требующих специального исследования, является химическое взаимодействие вольфрама с кислородом, содержащимся в рабочем теле в качестве технической примеси. Подобная примесь может, например, присутствовать в технически чистых щелочных и щелочноземельных металлах, используемых как рабочие тела. Кроме того, эти металлы могут загрязняться кислородом воздуха

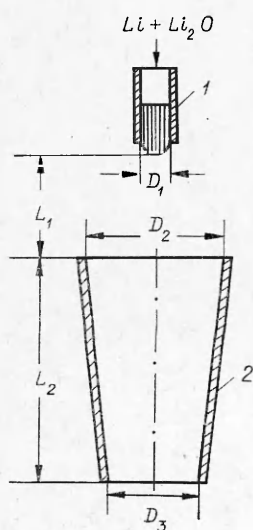
в процессе различных технологических операций, в частности при заправке систем подачи. Не исключено попадание в рабочее вещество кислорода, выделяющегося из элементов конструкции тракта подачи и рабочих полостей источника плазмы. Практически не удается избавиться от кислорода даже при использовании современных методов глубокой очистки лития из-за его большого сродства к кислороду.

Действительная роль примеси кислорода и необходимость ее учета при создании и эксплуатации плазменных устройств может быть выявлена в результате лишь прямого экспериментального исследования на образцах с геометрией электродов, аналогичной рассматриваемому классу источников или ускорителей.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования эрозии многоканального вольфрамового катода [1—4], коаксиального источника плазмы лития [5]. Применение лития в качестве основного плазмообразующего вещества обеспечивало поддержание распределенного по электродам разряда с малым значением прикатодного падения потенциала, лежащим ниже порога катодного распыления при бомбардировке поверхности поликристаллического вольфрама ионами лития [6]. Таким образом, явления разрушения катода, связанные с микродугами и ионной бомбардировкой, могли быть практически исключены из рассмотрения. Основными конкурирующими процессами, приводящими к уносу массы катода, оставались испарение и химическая абляция вследствие взаимодействия с кислородом рабочего тела. Поэтому для получения достоверных количественных зависимостей, характеризующих дифференцированно эрозию вследствие окисления и испарения, содержание кислорода в рабочем теле в описываемых экспериментах изменялось в пределах, выходящих за рамки обычной технической примеси, не превышающей десятых долей процента.

Следует отметить, что в процессе изучения роли технической примеси кислорода в осуществлении эрозии вольфрамового катода в плазме лития было выявлено ее непосредственное влияние на аномальный ток полого катода, характеризующийся значительным превышением снимаемых средних плотностей разрядного тока над величинами эмиссионного тока, даваемыми при той же температуре поверхности уравнением Ричардсона — Шоттки [7—9].

1. Экспериментальная методика. Для предпринятых экспериментальных исследований использовался стационарный коаксиальный источник литиевой плазмы в открытом варианте (фиг. 1), описанный в [5] с многоканальным вольфрамовым катодом, подобным [1—4]. Пары рабочего вещества, попадая в многоканальный вольфрамовый катод 1 и межэлектродное пространство, ионизируются, поддерживают горение разряда и в виде плазменной струи истекают через молибденовый анод 2, представляющий



Ф и г. 1

собой сужающийся усеченный конус ($D_2 = 85$ мм, $D_3 = 60$ мм) сравнительно большой длины ($L_2 = 175$ мм). Диаметр рабочей части катода $D_1 = 18$ мм, межэлектродное расстояние $L_1 = 80$ мм. Источник, состоящий из узла катода и анода с необходимыми токопроводами, собирался на специальном кронштейне и крепился на фланце охлаждаемой водой вакуумной камеры объемом ~ 20 м³.

Для создания в рабочем теле заданной концентрации кислорода, более высокой, чем техническая примесь, в него вносились определенные добавки окиси лития Li_2O , растворимость которой в жидком литии имеет хорошо выраженную температурную зависимость [10]. В экспериментах в источник из системы подачи вводился заранее получаемый насыщенный раствор окиси лития в жидком литии при заданной температуре, соответствующей требуемой концентрации кислорода в рабочем теле. Так, концентрация кислорода в 0,5 вес. % в рабочем теле обеспечивалась приготовлением насыщенного раствора окиси лития в жидком литии при $T = 759$

К (0,935 вес. % Li_2O), в 1 вес. % — при $T = 831$ К (1,87 вес. % Li_2O), в 1,5 вес. % — при $T = 893$ К (2,81 вес. % Li_2O), в 2 вес. % — при $T = 953$ К (3,75 вес. % Li_2O).

Рабочий вакуум в условиях работающего источника обычно составлял $\sim 10^{-4}$ мм рт. ст. В течение всей работы плазменного устройства на шлейфовом осциллографе НО04М записывались электрические параметры разряда (ток, напряжение), расход рабочего вещества, температура электродов, измерявшаяся с помощью оптического пирометра ОППИР-017. Параметры межэлектродной плазмы (концентрации и температуры нейтральных и заряженных частиц) определялись в необходимых случаях зондовым и спектроскопическим методами [5].

Унос материала поликристаллических вольфрамовых элементов катода в процессе горения разряда находился как разность величин, полученных взвешиванием катода на аналитических весах до запуска источника и после окончания его непрерывной работы, продолжавшейся в экспериментах до 2 ч и более. Примененная методика предусматривала тщательную очистку катода после эксперимента от загрязнения литием и его соединениями путем обработки кипящей дистиллированной водой в течение нескольких часов, промывки в растворителе и дальнейшего полного высушивания в сушильном шкафу, устанавливаемого периодически контрольным взвешиванием катода на аналитических весах.

В процессе работы источника осуществлялась также непрерывная запись на осциллографе подогрева узла испарения рабочего вещества и температуры жидкого раствора в системе подачи.

2. Особенности горения разряда. Как в случае подачи в источник плазмы технического лития, так и лития, искусственно обогащенного окисью лития, разряд легко поджигался при предварительном разогреве многоканального катода до температур ~ 1000 – 1500 К и появлении в межэлектродном пространстве паров рабочего вещества. Необходимое для этого напряжение было обычно меньше ~ 60 В. Разность потенциалов при горении разряда со среднемассовым расходом рабочего тела $\dot{m} = 0,01$ г/с для докритического тока $I_p = 800$ А составляла ~ 20 – 22 В. Оптическое изучение поведения разряда на катоде работающего источника в докритической области позволило установить характер его горения с распределением по всем каналам, в основном рабочем режиме при $\dot{m} = 0,01$ г/с и $I_p = 800$ А все каналы «светились», т. е. являлись активными в процессах эмиссии и плазмообразования. Контракция разряда и микропятна не наблюдалась, измеренная максимальная температура поверхности катода находилась на уровне 2700 – 2800 К.

Согласно уравнению Ричардсона — Дэшмана, этому значению температуры соответствует плотность термоэлектронного тока насыщения j_s с поликристаллического вольфрама ($\phi_w = 4,54$ эВ), равная ~ 3 – 6 А/см². В действительности реализуемая плотность разрядного тока в рассматриваемом катоде существенно выше.

Как показали разборка катодов, проработавших несколько часов на разрядных токах до 1000 А ($\dot{m} = 0,01$ г/с), и визуальный анализ состояния их вольфрамовых элементов, на внутренней поверхности каналов наблюдались хорошо выраженные следы горения разряда, простиравшиеся на глубину $\delta \sim 2$ – 4 мм (1–2 диаметра проволоки). Вид элементов катода свидетельствовал о локализации разряда в указанных областях как цветом металла в них по сравнению с остальной поверхностью, так и эрозионным изменением структуры поверхности вольфрама. Оцененная на основании этого фактического материала средняя плотность разрядного тока с эмиттирующей рабочей поверхностью катода с учетом также торце-

вой поверхности его элементов при $I_p = 800$ А была ≥ 36 А/см² (36—62 А/см² в зависимости от δ).

Как следует из оптических наблюдений, по-видимому, эффективно эмиттирующая поверхность в основном определяется стенками полостей катода. В этом случае реализуемая плотность разрядного тока с катода будет выше сделанной оценки, в рассматриваемом случае она в зависимости от принятой глубины проникновения разряда в каналы составит ~ 45 —90 А/см². Таким образом, вышеприведенное сопоставление термоэлектронных возможностей чистого поликристаллического вольфрама и практически полученных плотностей тока с вольфрамового многоканального катода в режиме распределенного горения обнаруживает их достаточно убедительное расхождение. Следует отметить, что поправка Шоттки не исправляет положения, она при имеющей место напряженности электрического поля в ленгмюровском слое ($E_w < 10^5$ В/см) сравнительно невелика ($\Delta j_s < 50\%$).

Благодаря применению специальной оптической системы наблюдения за поверхностью катода [11] удалось изучить физическое состояние литиевой плазмы на выходном участке каналов и определить ее параметры. Полученные результаты позволили при среднемассовом расходе в сотые доли грамма в секунду оценить величины потоков тяжелых частиц лития (ионы и атомы) из плазмы к эмиттирующей поверхности. Согласно этой оценке, в условиях экспериментов величина потока ν может составлять $\sim 10^{22}$ частиц/см²·с. По имеющимся данным [12] степень покрытия θ поверхности поликристаллического вольфрама адсорбированными частицами лития при этом ($T_w = 2500$ —2800 К) сравнительно мала и слабо влияет на работу выхода его поверхности. Однако присутствие кислорода в катодной плазме делает адсорбцию двухкомпонентной и заметно изменяет степень покрытия вольфрамовой поверхности. При одновременном попадании на поверхность частиц лития и кислорода образуется двойная молекулярная пленка, характеризующаяся большей высокотемпературной прочностью и эффективностью в снижении работы выхода.

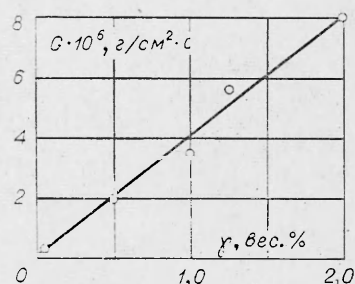
Представляет интерес оценить роль кислорода как примеси к литию в процессе адсорбции и эмиссии на рабочей поверхности вольфрамового катода. При весовом содержании кислорода в литии до $\sim 0,1$ вес. % (технический литий) адсорбция кислорода поликристаллического вольфрама при $T_w = 2500$ —2800 К в связанном β_1 -состоянии (первый слой хемосорбированных атомов кислорода, характеризующийся наиболее сильной связью с подложкой [13]) обуславливает, согласно расчету по методике [13], существование покрытия с $\theta_1 \approx 1$ (θ_1 — степень заполнения первого слоя). Согласно экспериментальным данным работы [14], этому покрытию в случае грани (100) соответствует увеличение работы выхода вольфрама на $\Delta\phi \approx 0,5$ —0,6 эВ. Принимая во внимание, что адсорбционные характеристики грани (100) и поликристаллического вольфрама близки между собой, количественную характеристику эмиссии вольфрама с кислородом для $\Delta\phi \approx 0,5$ эВ получим, воспользовавшись для оценки экспериментальными результатами по адсорбции лития на вольфраме (грань (100)), покрытом пленкой кислорода [15]. В расчетах по уравнениям изотермы адсорбции и Ричардсона — Дэшмана использовались экспериментальные значения работы выхода электронов ϕ_0 и теплоты десорбции атомов лития с оксидированной поверхности вольфрама в зависимости от концентрации адсорбированных частиц лития. Полученная плотность тока термоэлектронной эмиссии j для $T_w = 2500$ —2800 К и $\nu \approx 10^{22}$ — 10^{23} частиц/см²·с лежит в интервале ~ 40 —400 А/см².

Влияние кислорода на параметры литиевого разряда вследствие изменения поверхностных характеристик катода особенно наглядно

наблюдалось в испытаниях при специальном повышении давления в вакуумной камере примерно до 1 мм рт. ст. впуском в нее окружающего воздуха. Это повышение давления сопровождалось существенным снижением напряжения горения (до $\sim 25-30\%$). В случае напуска в камеру аргона изменения вольт-амперной характеристики литиевого разряда в модели не происходило. Кроме того, использование в качестве рабочего тела в аналогичном описанному здесь источнике плазмы аргона и азота приводило к усиленному разрушению вольфрамового катода в более низких по току режимах работы. После поджига разряда вследствие повышенной загрязненности кислородом первых порций лития (из-за окисления в процессе заправки системы подачи и в самой системе подачи, а также в результате газовыделения при нагреве из материалов конструкции) напряжение разряда устанавливается более низким, чем при длительной работе источника, когда улучшаются вакуумные условия и чистота лития.

Таким образом, сделанные оценки свидетельствуют о том, что примесь кислорода к рабочему телу может играть при определенных условиях важную роль в реализуемом механизме эмиссии электронов с рабочей поверхности многоканального вольфрамового катода источников и ускорителей литиевой плазмы.

3. Химическая эрозия катода. Экспериментальное изучение эрозии производилось при практически постоянных параметрах разряда ($I_p = 800$ А, $U_p = 22-24$ В) и различном дозированном содержании кислорода в литии, подаваемом в источник (расход лития $\sim 0,01$ г/с). Серия экспериментов поставлена с целью получения значения скорости эрозии при использовании технического лития, который далее применялся для изготовления составного рабочего тела. Содержание кислорода в техническом литии использованной партии составляло по данным проведенного лабораторного анализа $\sim 0,06$ вес.%. В результате разборки многоканального катода установлено, что поверхностные изменения (цвет, структура) и следы разрушения наблюдаются по всей длине его элементов, однако наибольшей эрозии подверглись участки, примыкающие к межэлектродному пространству. Площадь, занятая разрядом, согласно проведенному осмотру, по-видимому, в основном определяется боковой поверхностью элементов набивки катода на глубину до ~ 4 мм, некоторую добавку вносят торцы элементов (эта площадь составляет примерно $1/5$ общей площади элементов). Картина эрозии становилась более выразительной при осмотре деталей после работы катода в среде с повышенным содержанием кислорода. В связи с вышеуказанной картиной абляции при нахождении средней удельной скорости уноса вольфрама бралась общая поверхность элементов (проволочек) катода. Измеренная с помощью оптического пирометра максимальная температура катода в экспериментах составляла $\sim 2700-2800$ К. В результате применения вышеописанной экспериментальной методики исследования химической эрозии вольфрамового катода было найдено, что повышение содержания примеси кислорода в литии до 2 вес.% сопровождается увеличением уноса массы с элементов катода более чем на порядок с $\sim 3,3 \cdot 10^{-7}$ г/см²·с при $\sim 0,06$ вес.% кислорода (технический литий) до $\sim 8,0 \cdot 10^{-6}$ г/см²·с (литий, содержащий 2 вес.% кислорода). Полученная зависимость удельной эрозии G от содержания кислорода γ представлена на фиг. 2,



Ф и г. 2

она удовлетворительно аппроксимируется соотношением

$$(3.1) \quad G = G_0 + \alpha\gamma,$$

где $G_0 = 0,1 \cdot 10^{-6}$ г/см²·с соответствует уносу массы при работе на чистом литии ($\gamma = 0$); $\alpha = 3,83 \cdot 10^{-6}$ г/см²·с; γ , вес. %.

По существу, второй член в (3.1) дает вклад химической эрозии за счет окисления и уноса окислов вольфрама. Согласно проведенной ранее методической работе, с применением специальных индикаторов и оптической системы в сочетании с электронно-оптическим пирометром ЭОП-66 [11] было показано, что в рабочей области многоканального катода вдоль поверхности его элементов имеется существенный градиент температур. С учетом указанного факта можно считать, что член G_0 в (3.1) дает среднюю по элементам величину удельной эрозии вольфрама, обусловленной его испарением. Таким образом, в случае использования технического лития средняя скорость удельной эрозии поликристаллического вольфрамового катода будет $G \approx 0,33 \cdot 10^{-6}$ г/см²·с. Полученные результаты показывают, что химическая абляция катода при использовании технического лития может превалировать над эрозией вследствие испарения, в данном исследовании ее доля составляла $\sim 70\%$ от общего уноса массы.

В связи с полученными экспериментальными результатами интересно на основе современных представлений оценить скорость окисления поликристаллического вольфрама в области температур и низких парциальных давлений кислорода, характерных для работы многоканального катода на литии с примесью кислорода. Окислению вольфрама предшествует адсорбция и диссоциация молекулярного кислорода в двух различных связанных состояниях β_1 и β_2 (степени покрытия соответственно θ_1 и θ_2) [13]. Образование окислов WO_2 и WO_3 становится существенным после заполнения атомарным кислородом первого слоя (β_1 -состояние) и роста покрытия θ_2 второго слоя (β_2 -состояние). Одновременно с образованием этих окислов (а также полимеров W_2O_6 и W_3O_9 в малых количествах) происходит десорбция атомарного кислорода из первого слоя и молекулярного кислорода из второго слоя. Испарением атомарного кислорода из второго слоя можно пренебречь по сравнению с уходом O_2 . Для физической модели адсорбции и окисления вольфрама, основанной на теории активных центров [13], можно получить соотношения для скорости образования окислов вольфрама с учетом частичной диссоциации молекулярного кислорода в газовой фазе ($0 < \alpha_d < 1$).

По этим соотношениям для случаев $\alpha_d = 0$ и 1 проведен расчет скорости окисления поликристаллического вольфрама при парциальных давлениях кислорода $p_{O_2} = 1$ и 10 мкбар, характеризующих реализуемую область давлений в многоканальном катоде при применении технического лития. Экспериментальный результат по химической эрозии многоканального катода лежит в области величин абляции, даваемых теоретическим расчетом в грубом предположении, что все образующиеся окислы сносятся потоком.

Авторы выражают благодарность С. С. Келлину, Н. П. Межевому, В. Н. Белинскому за участие в подготовке и проведении эксперимента.

Поступила 17 IV 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Шадов В. П., Мышелов Е. П., Крот А. М. Измерение катодных падений в расходной дуге. — В кн.: Материалы II Всесоюзной конф. по плазменным ускорителям. Минск, 1973.
2. Норотников А. А., Петросов В. А., Острецов И. Н. Приэлектродные процессы. — В кн.: Физика и применение плазменных ускорителей. Минск, «Наука и техника», 1974.
3. Огарков В. М., Огородников С. Н., Степанов В. Н. К расчету многостержневого катода сильноточного источника плазмы. — «Радиотехника и электроника», 1976, т. 21, № 12.
4. Гришин С. Д., Литвак А. К., Огородников С. Н., Степанов В. Н. Исследование модели стационарного электроплазменного ускорителя средней мощности. — ЖТФ, 1977, т. 47, № 2.
5. Бабкин Г. В., Михалев В. Г., Огородников С. Н., Орлов Р. В., Потапов А. В. Экспериментальное исследование разряда в сильноточном коаксиальном источнике плазмы. — ЖТФ, 1975, т. 45, № 9.
6. Плевинцев Н. В. Катодное распыление. М., Атомиздат, 1966.
7. Delcroix J. L., Minoo H., Trindade A. R. Etablissement d'une regle generale pour une decharge d'arc à cathode creuse. — «J. de Physique», 1968, vol. 29, N 6.
8. Lorente-Arcas A., Bakhoule A. Mise en évidence d'une pression élevée dans le zone active d'une cathode creuse. — «C. R. Acad. Sci. Paris», 1970, t. 271 B, p. 180—183.
9. Lidsky L. M., Rothleder S. D., Ros D. I. et al. Highly ionized hollow cathode discharge. — «J. Appl. Phys.», 1962, vol. 33, N 8.
10. Субботин В. П., Иванковский М. П., Арнольдов М. П. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М., Атомиздат, 1970.
11. Бабкин Г. В., Михалев В. Г., Морозов Е. П., Потапов А. В. Экспериментальное исследование плазмы в многоканальном катоде. — ПМТФ, 1976, № 6.
12. Бабкин Г. В., Морозов Е. П., Потапов А. В., Цветкова Л. Е. Приэлектродный слой с отрицательным падением потенциала в плазме лития. — В кн.: Материалы VI Всесоюзной конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Фрунзе, «Илим», 1974.
13. Schissel P. O., Trulson O. C. Mass-spectrometric study of the oxidation of tungsten. — «J. Chem. Phys.», 1965, vol. 43, N 2.
14. Птушинский Ю. Г., Чуйков Б. А. Масс-спектрометрическое исследование взаимодействия кислорода с гранями (110) и (100) ионокристалла вольфрама. — ФТТ, 1968, т. 10, № 3.
15. Бабкин Г. В., Гупало М. С., Медведев В. К., Палюх Б. М., Смерека Т. П. Адсорбция смешанных лантаново-литиевых, кислородно-литиевых и кислородно-лантановых пленок на грани (100) вольфрама. — В кн.: Материалы XVI Всесоюзной конф. по эмиссионной электронике. Т. 1. Махачкала, 1976.

УДК 533.6.011.8

**ВРАЩАТЕЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА
В СВОБОДНО РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ СТРУЕ**

*А. Н. Варгин, Н. А. Ганина, Н. В. Карелов,
В. К. Конюхов, А. И. Луковников, А. К. Ребров,
Р. Г. Шарафутдинов*

(Москва, Новосибирск)

В связи с предположением о возможности создания газодинамического лазера на вращательных переходах двухатомных молекул [1, 2] и газодинамического конденс-лазера, использующего явление конденсации для создания инверсной заселенности [3—5], представляется необходимым количественное описание кинетики вращательной релаксации простейших двухатомных молекул. В отличие от традиционного подхода в газовой динамике и теории про-