

04; 11

© 1990 г.

СРАВНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КАТОДОВ С ИЗОТРОПНЫМ И АНИЗОТРОПНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА

Ю. В. Глуценко, В. Е. Лаврентюк, И. В. Подмошенский, Н. Н. Яновская

Рассмотрена возможность предотвращения искрообразования в объемном разряде с помощью катодов, обладающих изотропным и анизотропным сопротивлениями. Экспериментальным сравнением этих катодов между собой и с металлическим впервые выделено влияние анизотропии сопротивления материала на расширение диапазонов существования объемного разряда и увеличение энерговклада в него. Проведен анализ причин различия токовыравнивающих свойств указанных катодов. Предложена методика выбора основных параметров анизотропно-резистивного катода для импульсного самостоятельного объемного разряда.

Используемый для задержки шнуrowания объемного разряда (ОР) метод секционирования электродов будет наиболее эффективен, если шаг секционирования сделать соизмеримым с характерным размером токовых неустойчивостей, а изменение потенциала на каждой секции поставить в обратную зависимость от изменения тока, протекающего через нее. При околоатмосферном давлении, когда требуемый шаг секционирования уменьшается до 10^{-2} — 10^{-1} см, для задержки искрообразования успешно используются электроды из изотропно-резистивного (ИР) [1] или анизотропно-резистивного (АР) [2, 3] материалов. В обоих случаях стабилизация ОР и выравнивание плотности тока по поверхности электрода достигаются за счет компенсации отрицательного динамического сопротивления катодного слоя в локальной области возрастания тока положительным сопротивлением той части материала электрода, через которую протекает увеличенный ток.

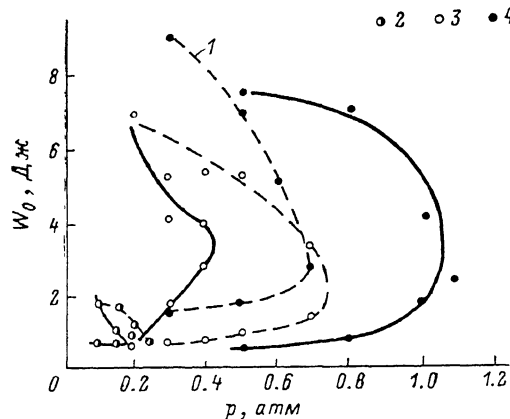
В настоящей работе проведено прямое экспериментальное сравнение указанных типов материалов при использовании их в качестве катодов в условиях самостоятельного ОР с радиоизотопной ионизацией, а также предпринята попытка анализа наблюдаемых при этом различий. Кроме того, поскольку эксперименты показали значительное преимущество АР катода, то для него предложена методика выбора основных параметров.

1. Экспериментальное сравнение токовыравнивающих свойств АР и ИР катодов проведено при неизменной электрической схеме [3], одинаковых профилях электродов и условиях предварительной ионизации. Разрядный промежуток величиной 10.7 мм был образован алюминиевым анодом с плоской рабочей частью 30×300 мм и сменными катодами (алюминиевым, АР и ИР). Катоды имели плоскую рабочую поверхность 8×160 мм, которая сопрягалась с боковыми плоскостями с помощью скругления радиусом 2 мм. АР материал изготовлен из токопроводящих углеграфитных нитей с плотностью укладки $N = 450$ см $^{-2}$ и имел объемное удельное сопротивление вдоль нитей $\rho_{\parallel} = 4$ Ом·см, а в поперечном направлении $\rho_{\perp} = 200$ Ом·см. ИР материал был изготовлен смешиванием неорганического связующего с углеграфитным порошком, около 80 % зерен которого имели диаметр менее 90 мкм. Подбором соотношения компонент было получено равенство его удельного сопротивления значению ρ_{\parallel} .

Вдоль длинных сторон электродов симметрично располагались две кассеты с радиоизотопными источниками α -излучения с общей активностью около

$1.2 \cdot 10^{10}$ Бк. В зависимости от состава и давления газовой смеси это обеспечивало получение в межэлектродном промежутке средней скорости ионизации q в диапазоне $0.3-3 \cdot 10^{10}$ см³с⁻¹ [4].

В результате проведенных экспериментов установлено, что и диапазоны безыскрового горения ОР (рис. 1), и величины полного и удельного энерго- вкладов в него (рис. 2), и равномерность свечения разрядного объема увеличиваются при переходе от металлического катода к ИР, а затем к АР. В случае алюминиевого и ИР катодов в опытах с начальными условиями, выходящими за границы (рис. 1, сплошные линии), наблюдается появление крупномасштабных неоднородностей свечения ОР, характерные размеры которых сравнимы с величиной разрядного промежутка. По мере удаления значений энергии W_0 , запасенной в емкостном накопителе, и давления p от указанных границ сначала



происходит увеличение неоднородности свечения, а затем у катода появляется несколько четко выраженных токовых каналов длиной 1—3 мм. Один из них при дальнейшем увеличении W_0 и p завершается ярким шнуром, перекрывающим разрядный промежуток. Границы зон, показанных штрихо-

Рис. 1. Диапазоны безыскрового горения ОР при алюминиевом (2), ИР (3) и АР (4) катодах.

Смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$, $C_0 = 8.8$ нФ; 1 — АР катод без предыонизации.

выми линиями, соответствуют вероятности искробразования не более 0.3. В опытах с АР катодом крупномасштабные неоднородности замечены не были, а диффузное свечение разряда занимало область длиной около 160 мм и шириной от 5.5 до 8 мм в зависимости от W_0 и p . В этом случае при выходе за границы безыскрового горения ОР токовый канал был более ярким и четким у анода, а у катода становился шире и имел размытые границы.

Повышение допустимого рабочего давления за счет использования АР катода сопровождается повышением напряжения на межэлектродном промежутке и увеличением энерговклада в ОР. Как видно из графиков на рис. 2, даже при сравнительно небольшой анизотропии сопротивления катода, примененного в наших экспериментах, удалось достигнуть приблизительно двукратного повышения энерговклада W_p и эффективности преобразования W_0 в W_p . По сравнению с алюминиевым катодом анизотропно-резистивный позволяет увеличить W_p приблизительно в 7—8 раз. Во то же время следует отметить, что переход от давления 0.5 атм к околоатмосферному в используемой нами установке не привел к пропорциональному увеличению энерговклада в ОР. Объясняется это тем, что из-за малости активного сопротивления разряда перераспределение напряжения на элементах разрядной цепи приводит к нарушению пропорциональности между напряжением на разрядном промежутке U_p и p и, как следствие, к уменьшению E/p . Происходящее при этом уменьшение тока разряда приводит к компенсации увеличения его сопротивления и стабилизации энерговклада. Потери энергии в АР катоде при увеличении p уменьшаются (рис. 2), а отношение W_p/W_k вследствие этого увеличивается.

Таким образом, как сопоставление фотографий разряда с различными катодами при одинаковых начальных условиях экспериментов, так и характеристики ОР при вариации начальных условий подтверждают предположение, что анизотропия сопротивления материала катода позволяет получить дополнительное увеличение энерговклада в разряд и улучшить его однородность.

Еще одним свидетельством эффективности использования АР катода явились эксперименты по получению ОР с радиоизотопной ионизацией в смеси CO_2 : воздух = 1 : 1 и без предыонизации в смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$. Оба случая

соответствуют условиям зажигания разряда при практически полном отсутствии в газе свободных электронов. Как и ожидалось, это привело к ухудшению однородности ОР и, как следствие, к нестабильности его электрических характеристик, что особенно отчетливо наблюдалось в экспериментах без предыонизации. Однако и в этих условиях стабилизирующие свойства АР катода проявились в широкой области значений W_0 и p , что позволило в обоих случаях, поставив резонаторные зеркала, получить лазерную генерацию.

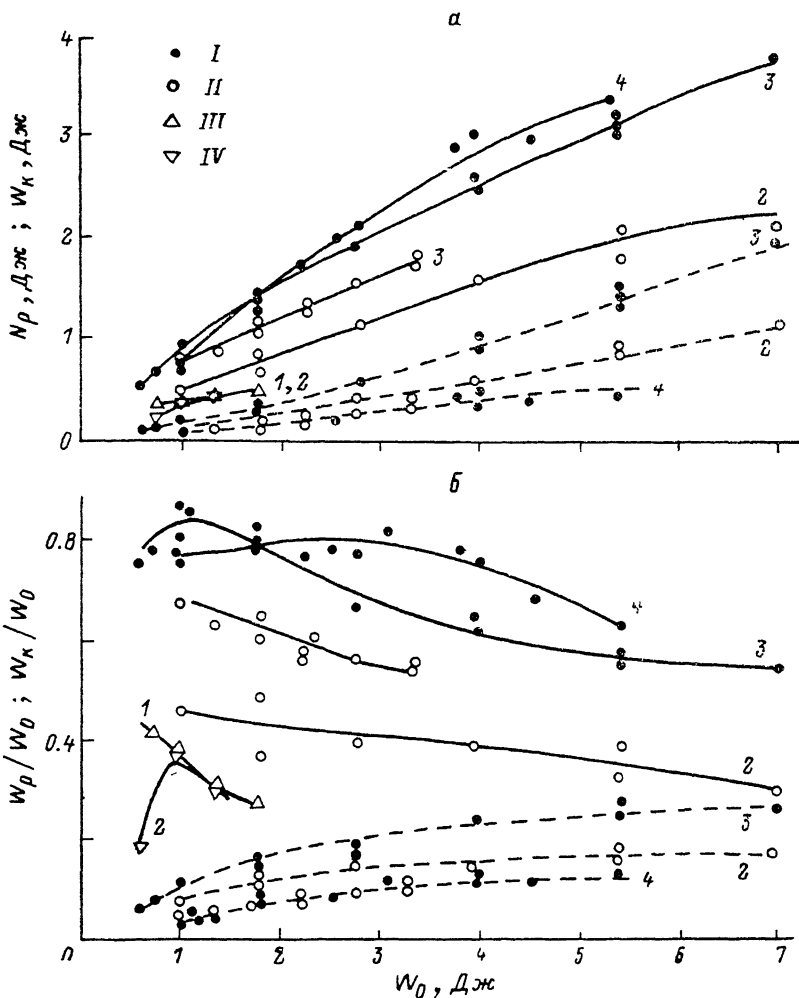


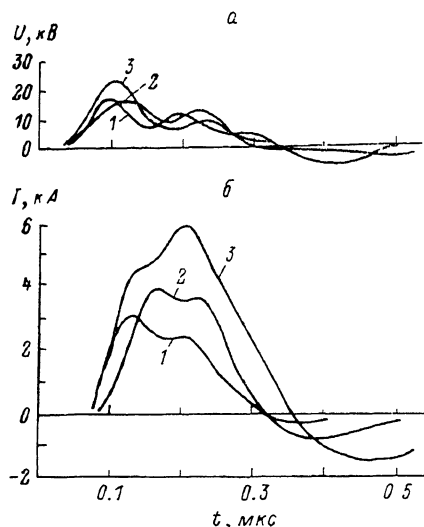
Рис. 2. Зависимости абсолютного (а) и относительного (б) энерговкладов в ОР (W_p и W_k/W_0) и в катод (W_k и W_k/W_0) от запасенной энергии W_0 при алюминировании (III, IV), ИР (II) и АР (I) катодах.

Смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$; давление, атм: 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.5, 4 — 1; $C_0 = 8.8$ нФ; сплошные линии — W_p и W_p/W_0 , штриховые — W_k и W_k/W_0 .

Амплитуда, длительность, характер изменения переднего фронта и спада импульсов напряжения и тока (рис. 3) определяются величиной напряжения заряда накопителя U_0 , индуктивностью разрядного контура, емкостью накопителя C_0 , дополнительной емкостью C_g , включенной параллельно разрядному промежутку, динамикой изменения нелинейных сопротивлений разряда и коммутатора. При больших U_0 сопротивление ОР уменьшается до единиц и даже долей Ом. Поскольку паразитное активное сопротивление элементов разрядного контура составляет 1 Ом, а его волновое сопротивление при $C_0 = 8.8$ нФ — 5.5 Ом, то в большей части диапазона безыскрового горения ОР процесс разряда C_0 через него был колебательным и лишь при малых U_0 (вблизи нижней границы безыскрового горения) аperiodическим. Вследствие этого при фиксированных

величинах C_0 и U_0 наблюдается не очень большое отличие амплитуды тока I_m для разных смесей газов и давлений. Типичные зависимости I_m и максимальной плотности тока j_m от W_0 представлены на рис. 4. Штриховой линией на этом рисунке обозначена зависимость I_m при неравномерном свечении ОР в случае ИР катода. Как видно, максимально достигнутые плотности тока равномерно светящегося ОР в случае АР катода приблизительно вдвое выше, чем для ИР катода. Значения j_m , при которых АР катод еще предотвращает шнурование, в условиях проведенных экспериментов соответствуют падению напряжения на катоде около 400 В.

2. Наблюдаемые преимущества АР катода по сравнению с ИР определяются различиями в картине протекания тока по материалу и возникающими вследствие этого различиями в величине и распределении потенциала на поверхности электродов. В материале с большой анизотропией $\rho_{\perp} \gg \rho_{\parallel}$ растекание тока по объему электрода мало. Тогда можно считать, что к области ОР с площадью контакта с поверхностью электрода S_p



подключено балластное сопротивление $R = \rho_{\parallel} l S_p^{-1}$, где l — длина нитей. Протекание тока по этому сопротивлению приводит к появлению на поверхности электрода локального потенциала, пропорционального S_p^{-1} . На такую же величину уменьшится напряжение, приложенное к рассматриваемой области ОР, причем в начальный момент образования

Рис. 3. Временной ход напряжения на разрядном промежутке (а) и тока ОР (б) при АР катоде. Смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$; давление, атм: 1 — 1; 2 — 0.5; 3 — 0.5; C_0 , нФ: 1, 2 — 8.8; 3 — 18.3; $U_0 = 30$ кВ.

токовой неустойчивости все изменение напряжения будет приложено к катодному слою разряда. При $\rho_{\perp} = \rho_{\parallel}$ величина сопротивления ИР катода, подключенного к макронеоднородности тока ОР, характерный размер которой сравним с величиной межэлектродного промежутка, будет больше сопротивления всего катода $\rho_{\parallel} l S^{-1}$, но меньше величины сопротивления в случае АР катода. Очевидным следствием этого будет ослабление эффекта сглаживания макронеоднородностей тока по сравнению с АР материалом.

Аналогично влияют электроды и на микронеоднородности тока, при которых локальное повышение его плотности сверх некоторого критического значения, например на выступах поверхности, приводит к изменению знака производной вольт-амперной характеристики катодного слоя разряда, взрывной эмиссии и образованию катодных пятен [5]. Поскольку наблюдаемые в экспериментах характерные размеры катодных пятен намного меньше размеров электродов, то сопротивление растеканию тока из каждого пятна намного превосходит сопротивление всего электрода. Для АР катода оно равно $\rho_{\parallel} l (\pi r^2)^{-1}$, а для ИР приблизительно $\rho_{\parallel} (1.5 \pi r)^{-1}$, где r — радиус катодного пятна. Сравнивая эти выражения, видим, что при равенстве размеров катодных пятен балластные сопротивления, подключенные к ним, в случае АР материала приблизительно в $1.5 l r^{-1}$ раза больше, чем для ИР. Можно ожидать, что во столько же раз будет больше и демпфирующее действие АР катода в отношении колебаний величины тока через отдельное катодное пятно (при постоянной плотности тока в нем). Такое же соотношение между локальным падением напряжения на АР и ИР материалах имеет место и в случае возрастания плотности тока в катодном пятне при сохранении или уменьшении тока через другие пятна.

Кроме того, регулярное расположение токопроводящих нитей и наличие между ними слоев диэлектрика обуславливают «привязку» каждого катодного пятна к индивидуальному токовому и, как следствие, приводят к более рав-

померному распределению пятен на поверхности электрода. При этом величина напряжения, заметно влияющего на протекание тока в прикатодном слое, имеет для разных точек поверхности близкие значения порядка $U_p \delta d^{-1}$ [2], где U_p — напряжение на межэлектродном промежутке шириной d , а δ — шаг между витями. Поскольку $\delta \ll d$, то это напряжение может быть на несколько порядков величины меньше U_p .

В ИР материале хаотичность расположения микронеоднородностей профиля поверхности и микровключений приводит к нерегулярному расположению катодных пятен, вследствие чего необходимая для подавления флуктуаций тока величина напряжения может иметь весьма большой разброс (от $2U_p r d^{-1}$ при расстоянии между пятнами $\sim 2r$ до величин $\sim U_p$).

3. Поскольку и результаты экспериментов, и общий анализ указывают на существенные преимущества АР катодов, то возникает необходимость опреде-

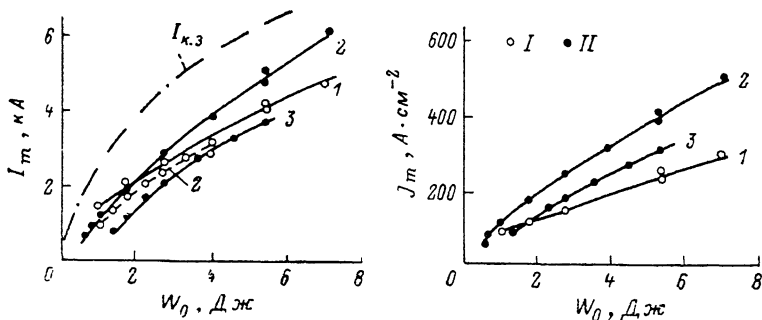


Рис. 4. Зависимости амплитуды I_m и плотности j_m тока ОР при ИР (I) и АР (II) катодах. Смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$; давление, атм: 1 — 0,2, 2 — 0,5, 3 — 1; $C_0 = 8,8$ нФ; $I_{к.з}$ — ток короткого замыкания.

ления диапазонов допустимых и оптимальных значений их электрофизических и геометрических параметров. Для случая использования АР катода в импульсном самостоятельном ОР можно рекомендовать следующий подход.

Нижнюю границу диапазона допустимых значений ρ_{II} АР катода можно оценить исходя из условия ограничения флуктуаций плотности тока в прикатодной области [6], имеющего в нашем случае вид

$$\rho_{II} l \geq - \frac{\partial U_k}{\partial j} \cdot \quad (1)$$

Согласно результатам вычислений, проведенных в работе [7] для азота, максимум правой части этого неравенства должен наблюдаться при значениях j , в 2—3 раза превосходящих критическую плотность тока, в которой у вольт-амперной характеристики катодного слоя меняется знак производной. Для наших условий оценка дает значение $-\partial U_k / \partial j \sim 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Если зависимость $U_k(j)$ неизвестна, то оценку нижней границы ρ_{II} , хотя и более грубую, можно провести исходя из условия образования новых катодных пятен рядом с уже существующими, т. е. из условия «растекания» разряда по поверхности катода. Для существования такого эффекта надо, чтобы падение напряжения из-за прохождения тока I_n через отдельную нить с сопротивлением R_n было больше падения напряжения на катодном слое $I_n R_n \geq U_k$. Поскольку $I_n \geq jN^{-1}$ и $R_n = \rho_{II} N l$, это условие можно преобразовать к виду

$$\rho_{II} l \geq U_k j^{-1}, \quad (2)$$

где N — плотность укладки нитей, а j — плотность тока, начиная с которой можно ожидать его стабилизации.

При $j = 100 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ и $U_k = 10^2 - 10^3 \text{ В}$ получаем $\rho_{II} l \geq 1 - 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Верхняя граница диапазона для ρ_{II} задается выражением

$$\rho_{II} l \leq k p d j_m (E/p)^*, \quad (3)$$

где k — доля допустимых потерь энергии в АР катод; p — давление газа; d — величина межэлектродного промежутка; $(E/p)^*$ — характеристика для каждой смеси газов величина приведенной напряженности поля, при которой достигаются максимальные плотность тока ОР и энерговыход в него.

Подставив характерные значения $(E/p)^* = 10^4$ В·см⁻¹, $p = 1$ атм·см, $j_m = 100$ А·см⁻² и выбрав $k = 0.1$, получим $\rho_{\parallel} l \leq 10$ Ом·см². Сопоставление численных оценок по условиям (1)–(3) показывает, что они могут быть одновременно удовлетворены, если величину $\rho_{\parallel} l$ выбрать приблизительно равной 10 Ом·см². В наших экспериментах $\rho_{\parallel} l = 8$ Ом·см².

При выборе плотности укладки нитей N желательно одновременно удовлетворить условию близости толшины катодного слоя шагу между токопроводящими нитями и условию малости тока утечки из отдельной нити в соседние по сравнению с током в ней. Второе условие можно записать в виде $Nl^2 \ll \rho_{\perp} \rho_{\parallel}^{-1}$, где ρ_{\perp} — удельное сопротивление АР катода в поперечном направлении. Минимальное значение толшины слоя изоляции Δ между волокнами определяется соотношением между падением напряжения на них и допустимой величиной напряженности поля в материале изоляции $E_{\text{доп}}$: $\Delta > j_m \rho_{\parallel} E_{\text{доп}}^{-1}$.

Из анализа выражений для скоростей разогрева газа в приэлектродной области и материала токопроводящих нитей следует, что для их уменьшения необходимо увеличить коэффициент заполнения электрода нитями, а также удельное сопротивление, плотность и теплоемкость резистивного материала самих нитей.

Список литературы

- [1] Gibson A. F., Rickwood K. R., Walker A. C. // Appl. Phys. Lett. 1977. Vol. 31. N 3. P. 176–178. Hogan D. C., Kearsley A. J., Webb C. E. // J. Phys. D. Appl. Phys. 1980. Vol. 13. P. L225–L228.
- [2] Великий А. А., Гуревич Д. Б., Канатенко М. А., Подмошенский И. В. // ЖТФ. 1985. Т. 85. Вып. 6. С. 1222–1224.
- [3] Лаурентюк В. Е., Подмошенский И. В. // Квантовая электрон. 1986. Т. 13. № 11. С. 2352–2353.
- [4] Глуценко Ю. В., Лаурентюк В. Е. // Квантовая электрон. 1986. Т. 13. № 10. С. 2031–2037.
- [5] Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. 252 с.
- [6] Ульянов К. Н. // ТВТ. 1972. Т. 10. Вып. 5. С. 931–938.
- [7] Козырев А. В., Королев Ю. Д., Месяц Г. А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 1. С. 58–64.

Поступило в Редакцию
25 мая 1988 г.
В окончательной редакции
8 декабря 1988 г.