

E. E. Antonov, Yu. P. Korchevoi, I. Ya. Podolyukh, Emission properties of cathodes and relaxation characteristics of Cs-N₂ thermionic energy converters with pulse ionization, *TVT*, 1993, Volume 31, Issue 2, 181–184

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt3733>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.173

May 12, 2025, 22:18:19



УДК 533.93

ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА КАТОДОВ И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Cs-N₂ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ С ИМПУЛЬСНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ

© 1993 г. Е. Е. Антонов, Ю. П. Корчевой, И. Я. Подолуц

Институт проблем энергосбережения Академии наук Украины

Поступила в редакцию 11.03.92 г.

Исследована релаксация азотно-цезиевой плазмы в условиях, близких к рабочим режимам термоэмиссионных преобразователей энергии (ТЭП) с импульсной ионизацией атомов Cs. Установлен ряд факторов, способствующих увеличению длительности рабочей стадии таких преобразователей при добавлении молекулярного азота. Изучено пространственное распределение параметров релаксирующей плазмы в зазоре ТЭП и эмиссионные свойства катодов, определяющие кинетику распада плазмы.

В предыдущей работе [1] исследовалась возможность экспериментальной реализации предложения [2] использовать молекулярный азот в качестве буферного газа в ТЭП с импульсной ионизацией атомов Cs. Полученные в [1] данные по релаксации Cs-N₂ плазмы в узком зазоре ТЭП показали возможность существенного увеличения по сравнению с диффузионным времени распада плазмы за счет колебательно возбужденного азота N₂^{*}, что важно для повышения эффективности таких преобразователей. Позднее подобные вопросы рассматривались в [3], где, в частности, изучалась релаксация разрядного тока $I_p(t)$ в распадающейся Cs-N₂ плазме ТЭП в схожих с [1] условиях. Однако заметного влияния N₂ на характер зависимости $I_p = f(t)$ в [3] обнаружено не было. Целью данной работы являлось дальнейшее развитие этих исследований и анализ некоторых вопросов, получивших различное толкование в [1, 3].

Все эксперименты с релаксирующей и стационарной Cs-N₂ плазмой были выполнены на установке, которая существенно не отличалась от описанной в [1]. Плазма импульсно создавалась в диодной системе, эмиттером которой являлся плоский оксидный катод площадью $S_k = 9 \text{ см}^2$, а коллектором – разрезной анод из Ni, охватывающий катод со всех сторон. В отличие от [1] межэлектродное расстояние L можно было изменять от 1 до 5 мм.

Давление атомов цезия P_a составляло $10^{-2} - 1.5 \text{ Па}$, молекулярного азота $P_M = 0 - 300 \text{ Па}$, концентрация плазменных электронов на стадии разряда $n_{e_0} = 10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$, их температура $T_{e_0} = 2500 - 8000 \text{ К}$ при начальном разрядном токе $I_{p_0} = 3.5 - 8.0 \text{ А}$, длительность возбуждающего импульса тока $t_0 = 100 - 400 \text{ мкс}$. Схема регистрации позволяла определить величину тока через диод

I_p в любой момент времени t , исследовать на стадии распада плазмы с помощью лентгюровского зонда временной ход n_e, T_e и их пространственное распределение по зазору, а также измерять с помощью специального импульсного источника питания эмиссионную способность катода в вакуумном режиме и при наличии Cs и N₂.

Ранее в [1, 2] определен ряд условий, при выполнении которых процесс ионизации атомов Cs за счет передачи им энергии колебательного возбуждения N₂ (V-I-процесс) играет определяющую роль в кинетике распада Cs-N₂ плазмы. Одним из таких условий является наличие значительной эмиссии электронов из катода ($j_e \approx 1 \text{ А/см}^2$), которая обеспечивала бы быстрое остывание плазменных электронов и отрыв температуры T_e от колебательной температуры T_v молекул N₂^{*} на начальной стадии распада плазмы. Например, проведенные эксперименты с импрегнированным пористым W-BaO катодом (работа выхода $\phi_k \approx 3 \text{ эВ}$, плотность тока эмиссии $j_e \approx 0.1 \text{ А/см}^2$) показали, что в этом случае распад Cs-N₂ плазмы при прочих равных условиях носит чисто диффузионный характер, т.е. роль V-I-процесса не существенна. В то же время требованию достаточно высокой эмиссии, несомненно, удовлетворяет хорошо известный оксидный катод, обладающий значительной эмиссией ($j_e \approx 10 \text{ А/см}^2$) уже при сравнительно невысоких температурах $T_k \approx 1200 - 1300 \text{ К}$. Еще одним достоинством в данном случае является то, что вследствие низкой работы выхода ($\phi_k \approx 1.6 - 1.8 \text{ эВ}$) физическая адсорбция атомов цезия на его поверхности маловероятна, и поэтому при наличии паров Cs не должно происходить, с одной стороны, заметного изменения эмиссионных свойств, а с другой – увеличения эффективности процесса девозбуждения колебательно возбужденных молекул N₂^{*} на поверхности (V-J-процесс).

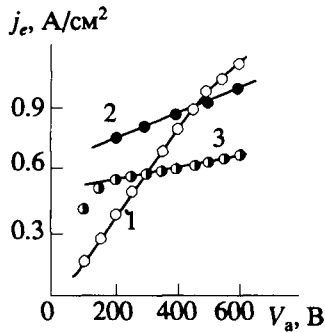


Рис. 1. Эмиссионная способность оксидного катода в некоторых режимах: 1 - $P_a = 0$; $P_M = 0$; 2 - 0; 2,0 Па; 3 - 0,13 Па; 0; $T_k = 1100$ К; $L = 1$ мм; $S_k = 4,5$ см².

Учитывая важность указанных выше процессов для эффективной работы импульсных ТЭП в данной работе исследовалось изменение эмиссионных характеристик оксидного катода при добавлении атомов Cs и молекул N₂. Экспериментально получено семейство вольт-амперных характеристик плазменного диода в широком диапазоне T_k , P_a и P_M . В этих экспериментах величина L составляла 1 мм, ток эмиссии регистрировался лишь с одной поверхности катода ($S_k = 4,5$ см²). Характерные кривые для одного из режимов приведены на рис. 1.

Прежде всего отметим отсутствие хорошего насыщения на кривых для чисто вакуумного режима (кривая 1), что характерно для оксидного катода и объясняется несколькими причинами. Одной из них является шероховатость поверхности, что приводит к увеличению напряженности электрического поля E у выступов и концентрации здесь тока эмиссии. Более существенной является неоднородность поверхности, так называемая "зернистость", когда разные участки катода обладают разной работой выхода ϕ_k . Еще одной причиной является падение напряжения на оксидном слое.

При напуске в диод паров Cs или молекул N₂ происходит перераспределение потенциала в зазоре вследствие компенсации отрицательного объемного заряда положительными ионами. В этих режимах величина E вблизи катода значительна уже при относительно невысоких напряжениях на диоде ($V_a \sim 100 - 150$ В) и с ростом V_a наблюдается хорошее насыщение (рис. 1, кривые 2, 3). В рассматриваемых условиях ток через разрядный промежуток определяется эмиссией электронов из катода, так как вклад объемной ионизации в суммарный ток невелик.

Как следует из рис. 1, плотность тока эмиссии j_e при наличии атомов Cs и молекул N₂ в этом режиме составляет $\sim 0,5$ А/см², что примерно соответствует расчетным значениям j_e для оксидного катода в вакуумном режиме при этих же значениях T_k . В данных экспериментах величина T_k со-

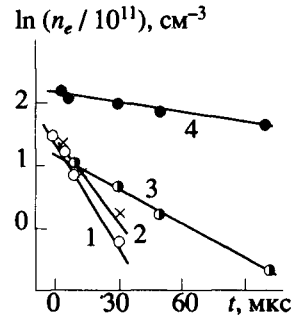


Рис. 2. Релаксация электронной плотности в распадающейся Cs-N₂ плазме: 1 - $P_M = 0$; 2 - 25; 3 - 65; 4 - 130 Па; $P_a = 0,45$ Па; $L = 5$ мм; $T_k = 1400$ К; $T_a = 700$ К; $t_0 = 360$ мкс.

ставляла 1000 - 1200 К, что существенно ниже рабочих температур ТЭП с импульсной ионизацией и не соответствует значениям $T_k = 1390$ К в работах [1, 3]. Это связано только с ограниченными возможностями импульсной схемы регистрации при $j_e \approx 8 - 10$ А/см², соответствующих этой температуре. Однако известно, что с ростом температуры поверхности вероятность адсорбции снижается, и при $T_k = 1400$ К добавление Cs и N₂ тем более не окажет существенного влияния на свойства эмиттирующей поверхности. При дальнейшем повышении T_k происходит термическое разложение оксидной пленки, эти режимы авторами не исследовались.

В условиях, близких к рабочим режимам ТЭП с импульсной ионизацией, были проведены эксперименты, аналогичные [1], на усовершенствованном разрядном приборе с улучшенной системой генерации паров Cs, где имелась возможность определять с помощью перемещаемого зонда кроме временного хода n_e и T_e еще и пространственное распределение этих параметров. Был подтвержден эффект существенного увеличения в определенных режимах времени τ_p релаксации плотности зарядов в диоде при добавлении азота (рис. 2), что невозможно объяснить лишь уменьшением скорости диффузионного распада плазмы. Например, в условиях рис. 2 характерное время распада плазмы τ_p возрастает при напуске N₂ от ~ 18 мкс, соответствующих примерно времени диффузионного распада (τ_p)_{диф} для чисто цезиевого наполнения, до ~ 170 мкс в случае $P_M = 130$ Па, хотя в этом режиме (τ_p)_{диф} ≈ 40 мкс. Следует отметить, что этот эффект наблюдался при $P_a = 0,45$ Па. К сожалению, приведенное в [1] для аналогичных экспериментов по релаксации значение $P_a = 1,3$ Па оказалось несколько завышенным ($\sim 1,5$ раза) из-за погрешностей в определении температуры резервуара с жидким цезием, обусловленных конструктивными особенностями разрядной части установки. Некоторое отличие в значениях τ_p по сравнению с [1], по-видимому,

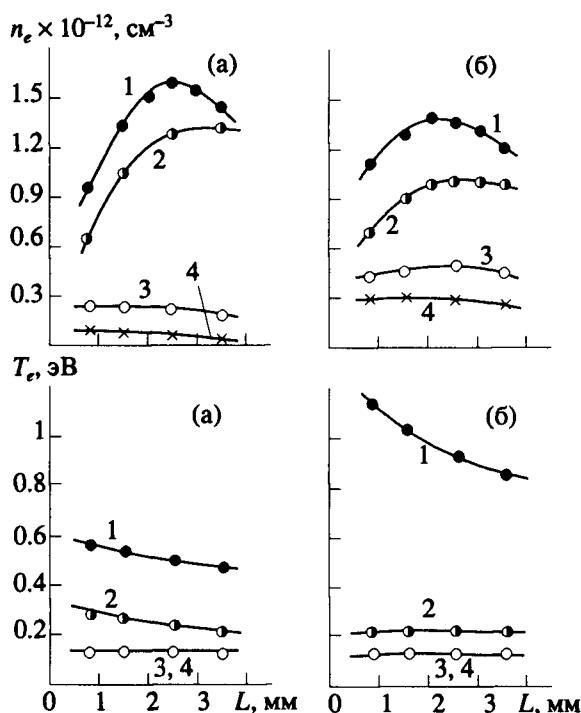


Рис. 3. Пространственное распределение параметров в зазоре диода в процессе распада Cs-N₂ плазмы: 1 - t = 0; 2 - 5; 3 - 25; 4 - 50 мкс; (а) - P_M = 0; I_{p0} = 4.4 А; (б) - 65 Па; 7.3 А; P_a = 1.3 Па; L = 5 мм; t₀ = 200 мкс.

связано с возможными небольшими различиями в эмиссионных свойствах катодов в этих двух экспериментах и изменением вследствие этого величины потенциальной ямы для ионов в межэлектродном промежутке. При повышении P_a до 1.3 Па и n_{e0} до 1.5 × 10¹² см⁻³ величина τ_p заметно снижается (~70 мкс). Этот результат хорошо согласуется с теоретическими оценками [2], из которых следует, что V-I-процесс может существенно влиять на распад Cs-N₂ плазмы лишь в достаточно узком диапазоне начальных параметров (P_a ~ 1.0 Па, P_M ~ 150 Па, n_{e0} ~ 10¹¹ см⁻³).

Типичное пространственное распределение n_e и T_e по зазору в релаксирующей Cs-N₂ плазме ТЭП иллюстрируется на рис. 3. Отметим, что временной ход n_e существенно различен для разных точек плазменного диода, особенно на начальной стадии распада. В процессе релаксации распределение симметризуется. В некоторых режимах изменение распределения n_e по зазору может приводить даже к росту этой величины после обрыва разрядного импульса (см., например, рис. 5 в [1]). Отметим также, что в отличие от импульсного ТЭП с Cs-Ag-наполнением [4], где максимум распределения n_{e0} на стадии разряда располагается вблизи катода и затем наблюдалось его смещение к аноду по мере распада плазмы, в слу-

чае Cs-N₂ диода распределение n_{e0} в момент t = 0 практически симметричное. Скорость же охлаждения электронов, как и в [4], больше в прикатодной области. Это непосредственно связано с эмиссией холодных электронов из катода.

Условия проведенных экспериментов в некоторых деталях существенно отличались от [3], где в качестве эмиттера использовался монокристалл платины Pt(III) площадью 1 см², а анодом являлся поликристаллический никелевый диск такой же площади, расположенный на расстоянии L = 5 мм от катода. Подобная открытая геометрия плазменного диода представляется менее оптимальной по сравнению с используемой в данной работе замкнутой системой электродов с точки зрения ограничения ухода колебательно возбужденных молекул N₂^{*} из зоны разряда. Хотя площадь S₀ торцевых зон диодной системы в проведенных экспериментах действительно сопоставима с размерами боковой поверхности межэлектродной зоны в [3], отношение S₀ к рабочему объему ТЭП в [1] меньше, чем в [3] примерно на порядок. Примерно также отличаются и диффузионные потери молекул N₂^{*} в этих двух работах, а значит, и относительная роль V-I-процесса в [1] была существенно больше.

Открытым остается вопрос о колебательном девозбуждении молекул N₂ на поверхностях электродов (V-J-процесс). Трудно согласиться с выводом [3], что в условиях [1] покрытие обоих электродов соединениями Ва и Sr исключало адсорбцию цезия и по этой причине снижалась роль V-J-процесса. Рабочая температура оксидного катода в проведенных экспериментах не превышала 1500 К, что ниже температуры его термического разложения. Кроме того, отсутствие испарения Ва и Sr легко контролировалось с помощью зонда: покрываясь слоем металлов, зонд резко увеличивал свою собирающую поверхность, и возникали утечки, препятствующие зондовым измерениям. В то же время при P_a ≅ 0.5 Па, T_x = 1390 К, T_a = 700 К и L = 5 мм (условия [1]) анод и другие достаточно холодные части разрядного прибора несомненно покрыты толстой пленкой Cs. Об этом свидетельствует и появление утечек в зондовой цепи с ростом P_a, которое приходилось устранять путем специального прогрева зонда. Сколь эффективен V-J-процесс для цезированных металлических подложек полностью пока не ясно, по крайней мере авторам такие работы не известны. Это касается также возможности применения в импульсных ТЭП цезированных металлических эмиттеров, например из Pt(III) [3], поскольку свойство высокой эмиссионной способности может вступить в противоречие с требованием низкого значения коэффициента аккомодации γ для N₂^{*}, который, согласно [2], не должен превышать 10⁻³ - 10⁻⁴.

Установленное экспериментально возрастание в ряде режимов величины τ_p по сравнению с $(\tau_p)_{\text{диф}}$ косвенно свидетельствует о малом количестве в балансе молекул N_2^* в условиях V - J -процесса на обоих электродах по сравнению с V - I -процессом. Однако вопрос о влиянии цезирования на величину коэффициента аккомодации γ молекул N_2^* для ряда металлов, прежде всего Ni, Pt, Ta, W, несомненно, требует дополнительного изучения.

Следует отметить, по крайней мере, два обстоятельства, связанные с отсутствием наблюдаемого эффекта в [3]. Автором рассматривалась лишь релаксация разрядного тока $I_p(t)$. Существует, однако, целый ряд параметров, таких, как величина контактной разности потенциалов в зазоре $\Delta\phi_{\text{ак}}$, приложенное к диоду постоянное напряжение смещения ΔV_a и др., которые, наряду с n_e и T_e , определяют временной ход I_p . Для выяснения роли V - I -процесса, который прежде всего влияет на величину n_e , гораздо более информативными являются прямые измерения $n_e(t)$ в распаде.

Весьма проблематична также необходимость наличия смещения $\Delta V_a = -0.8$ В для компенсации контактной разности потенциалов в диоде в условиях [3], поскольку при $T_a = 700$ К анод полностью цезирован, т.е. $\phi_a \approx 1.7$ эВ, а ϕ_k оксидного катода также хорошо известно и составляет 1.6 - 1.8 эВ, т.е. $\Delta\phi_{\text{ак}} \approx 0$. Отметим, что отрицательное смещение на диоде очень сильно уменьшает характерное время спада разрядного тока. Согласно данным, приведенным здесь, уже небольшое смещение $\Delta V_a = -0.5$ В приводит к ускорению распада тока на начальной стадии релаксации более чем в

5 раз, что значительно превышает возможное затягивание распада за счет добавления N_2 (см. рис. 4 в [1]). По-видимому, для получения рассматриваемого эффекта в условиях [3] необходимо уменьшить давление P_a до 0.5 Па, исключить внешнее смещение на аноде ΔV_a и, прежде всего, ограничить уход молекул N_2^* из зоны разряда.

Таким образом, в работе подтвержден полученный ранее эффект увеличения рабочей стадии Cs- N_2 ТЭП с импульсной ионизацией за счет введения в зазор молекул азота. В диоде изучено в широком диапазоне изменения давлений азота и цезия пространственное распределение концентрации и температуры плазменных электронов на стадии распада. Исследовано влияние примеси Cs и N_2 на эмиссионные свойства оксидного катода, определяющие характер релаксации азотно-цезиевой плазмы в зазоре ТЭП.

Авторы выражают благодарность М.А.Лебедеву, В.А.Жеребцову, А.А.Соболеву за многочисленные обсуждения полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Е.Е., Жеребцов В.А., Корчевой Ю.П. и др. // ТВТ. 1989. Т. 27. № 2. С. 209.
2. Жеребцов В.А., Лебедев М.А., Соболев А.А., Черковец В.Е. // ТВТ. 1984. Т. 22. № 1. С. 150.
3. McVey J.B. // Proc. 25th Intersociety Energy Conversion Engng. Conf. Nevada, 1990. P. 357.
4. Богданов А.А., Марциновский А.М. // ЖТФ. 1980. Т. 50. № 7. С. 1400.