

ТЭП-выпрямитель с фазовой регулировкой выходного напряжения.

I. Цезиевый тиратрон с низким прямым падением напряжения

© Н.М. Афанасьев,¹ В.С. Васильковский,¹ В.Б. Каплан,² И.И. Касиков,³
 А.М. Марциновский,² В.С. Мионов,³ Н.С. Разор, И.И. Столяров,²
 Л.К. Хансен, В.И. Ярыгин³

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие „Красная Звезда“,
 115230 Москва, Россия
 e-mail: serbin@dol.ru

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
 194021 Санкт-Петербург, Россия
 e-mail: istc_2306@mail.ru

³ Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского,
 249033 Обнинск, Россия
 e-mail: ecs@ippe.ru

(Поступило в Редакцию 4 октября 2007 г.)

Изложены результаты исследования напряжения поджига низковольтной цезиевой дуги и прямых падений напряжения на разряде для цезиевых триодов с мелкоструктурной (ячейка ~ 0.2 mm) и крупноструктурной (~ 2 mm) управляющими сетками. Показано, что в области давлений паров цезия 0.05–0.1 Torr и разрядных токов 5–10 A/cm² даже для мелкоструктурной сетки прямые падения можно снизить до 0.7–0.5 V. Для крупноструктурной сетки, электропрочность которой оказалась достаточной для выпрямления низких напряжений (~ 15 –20 V), прямые падения получаются практически такими же, как и для диода, даже при токах ~ 1 A/cm² и менее. Критическим фактором потери электропрочности является уровень эмиссии сетки (~ 1 mA/cm²).

PACS: 52.80.-s, 51.50.+v

Введение

Возможность использовать термоэмиссионный преобразователь (ТЭП) как сильноточный вентиль с нулевым прямым падением напряжения для мощных низковольтных выпрямителей, широко применяемых в гальваническом производстве, является новой и весьма перспективной областью наземного применения ТЭП [1–3]. Традиционные выпрямители для гальваники обычно имеют относительно высокие прямые падения на вентилях ($V_{\text{dir}} \sim 1$ V для выпрямителей на кремниевых диодах и ~ 2 V — для тиристорных выпрямителей, которые несмотря на вдвое большие падения применяются даже чаще диодных из-за возможности регулировать выходное напряжение за счет изменения угла отсечки выпрямителей синусоиды [4]). Поэтому даже при относительно высоких выходных напряжениях ТЭП ~ 0.3 –0.4 V сэкономленная электрическая мощность в ТЭП-выпрямителе $\sim (V_W + V_{\text{dir}})I_a$ (I_a — рабочий ток вентиля, V_W — выходное напряжение, соответствующее максимуму выходной мощности ТЭП) оказывается в 2–5 раза большей, чем мощность, снимаемая с ТЭП в режиме генерации $V_W I_a$, что существенно повышает допустимый порог стоимости для рентабельного применения ТЭП-вентиля в сравнении с генерирующим ТЭП [3].¹

¹ В ТЭП-вентиле, в отличие от всех других вентилях, проводимость в прямом направлении создается не за счет части выпрямляемого напряжения, а за счет тепловой энергии, идущей на нагрев катода, которая примерно в три раза дешевле электрической.

Реальная возможность создания достаточно мощного ТЭП-вентиля с газопламенным подогревом для использования в низковольтных гальванических выпрямителях была показана в [3]. Оказалось, что решение основных технологических проблем газопламенного ТЭП в настоящее время принципиально возможно, хотя еще и представляет определенные трудности; однако вопрос здесь сводится к вопросу стоимости таких устройств в массовом производстве. Поэтому, учитывая большие преимущества выпрямителей с фазовой регулировкой выходного напряжения,² нами был поставлен вопрос о возможности создания устройства на базе ТЭП, позволяющего осуществлять фазовое управление при прямом падении, существенно меньшем 2 V.

Управлять моментом включения тока относительно нуля выпрямляемой синусоиды для ТЭП в принципе можно несколькими путями:

а) поджигая разряд (для ТЭП в дуговом режиме) коротким положительным анодным импульсом напряжения [5];

б) подавая поджигающий импульс напряжения на вспомогательный электрод, введенный в межэлектродный промежуток ТЭП;

в) подавая поджигающий импульс на сетку, расположенную между катодом и анодом, обеспечивающую рав-

² Такое регулирование делает излишними сложные способы изменения амплитуды выпрямляемого переменного напряжения, которые особенно неудобны при программной регулировке параметров гальванического процесса в автоматизированных производственных линиях.

номерный поджиг и дополнительную электропрочность промежутка;

г) поджига вспомогательный разряд в ТЭП с вспомогательным разрядом [6,7].

Первый способ, хотя и обладает тем существенным преимуществом, что не требует никаких конструктивных изменений в обычном ТЭП и обеспечивает минимальные прямые падения напряжения, связан с заметными дополнительными затратами мощности и значительным усложнением схемы выпрямителя из-за необходимости подавать на анод сильноточный импульс — с током порядка рабочего анодного тока. Второй способ практически исключает эти потери, но тоже обеспечивает малые прямые падения. Еще более привлекательным для фазовой регулировки выпрямленного напряжения является использование ТЭП с вспомогательным разрядом, поскольку в этом случае в принципе возможно существенное уменьшение падения напряжения на межэлектродном промежутке по сравнению с дуговым режимом, а значит, и прямых падений. Но отсутствие стабильных катодных материалов с очень низкими работами выхода, что необходимо для формирования в зазоре глубокой потенциальной ямы для ионов и их эффективного захвата и удержания [8–10], является существенным препятствием реализации таких ТЭП (хотя в последние годы в этом направлении намечился определенный прогресс [11,12]).

Однако все три указанных способа позволяют осуществлять регулировку выходного напряжения во всем диапазоне от нуля до максимального значения $U/\sqrt{2}$ (U — амплитудное значение выпрямляемой синусоиды) только для относительно небольших напряжений $U < V_b \approx 5\text{--}10\text{ В}$ [13] (где V_b — напряжение поджига низковольтной дуги или самостоятельного разряда в ТЭП с вспомогательным разрядом). При больших напряжениях диапазон соответственно уменьшается (хотя во многих случаях возможность даже частичного регулирования оказывается очень полезной). Поэтому в качестве основного был выбран сеточный вариант фазовой регулировки, поскольку сетка в ТЭП уже при небольших отрицательных смещениях может увеличивать напряжение поджига разряда до десятков вольт [14].

Таким образом, настоящая работа посвящена исследованию возможности создания и изучению особенностей работы сильноточного цезиевого тиратрона с малыми прямыми падениями напряжения — существенно меньшими, чем для мощных кремниевых тиристоров.

Выбор этого варианта как основного был также обусловлен опытом исследования и разработки цезиевых таситронов — плазменных ключевых элементов с полным сеточным управлением (ПКС),³ в которых разряд зажигался и гасился подачей на сетку положительных и отрицательных управляющих импульсов сравнительно небольшой мощности [14–20]. Необходимость гашения разряда обусловила использование в таких плазменных ключах режима кнудсенсовской низковольтной дуги при отрицательно низких давлениях цезия $\sim (1\text{--}2) \cdot 10^{-2}$ Торг и применение мелкоструктурных

³ ПКС разрабатывались для инвертировки постоянного выходного напряжения термоэмиссионных реакторов-преобразователей.

сеток с размером ячейки $\sim 0.1\text{--}0.2\text{ мм}$, обладающих большой собирающей поверхностью витков. Последнее обстоятельство приводит к значительному отбору ионного тока на сетку и дополнительному увеличению напряжения горения дуги до $\sim 2\text{ В}$, что не позволяет непосредственно использовать эти приборы как вентили ТЭП-выпрямителя. Однако отказ от полного управления допускает в принципе использование сеток с большим размером ячейки и меньшей собирающей поверхностью, а также работу при более высоких давлениях цезия и температурах катода, за счет чего можно было регистрировать на существенное уменьшение прямых падений.

Выяснение вопроса, обеспечивает ли необходимую электропрочность крупнотрунтурная сетка, и насколько при этом можно снизить минимальное напряжение горения разряда, составляло главную задачу настоящих исследований.

Конструкция экспериментальных приборов

В основу конструкции был положен лабораторный макет триода с плоскопараллельными электродами в стеклянной колбе на стеклянной многоштырьковой ножке с молибденовыми вводами, который успешно применялся при разработке и исследовании плазменных ключей с полным сеточным управлением [14]. Использовалась традиционная конструкция катодного узла (рис. 1) с косвенным разогревом катода (1) излучением низковольтного сильноточного подогревателя (2). Катод выполнялся в виде полого молибденового цилиндра диаметром $\sim 1\text{ см}$, на торцевую рабочую поверхность которого для увеличения эмиссии подваривалась платиновая фольга толщиной 0.1 мм ; U -образный подогреватель из танталовой фольги устанавливался на расстоянии $\sim 0.2\text{--}0.3\text{ мм}$ от внутренних стенок катода. Толщина подогревателя выбиралась (в пределах $0.1\text{--}0.2\text{ мм}$) такой, чтобы в рабочих режимах падение напряжения на нем не превышало $\sim 2\text{ В}$ и между его концами в парах цезия не зажигался паразитный разряд, шунтирующий ток канала. В торце катода просверливалось отверстие диаметром 1 мм , в которое заштифтовывалась $W\text{--Re}$ термопара (3). Катод, подогреватель, тепловые отражающие экраны катода (4) монтировались на керамическом (Al_2O_3) диске с отверстиями (5), который через массивные никелевые держатели подогревателя (6) крепился на накальных вводах ножки (7); катод соединялся с выводом ножки (8) никелевой фольгой. На боковую поверхность катода вровень с его торцом с зазором менее 0.1 мм надевался сапфировый диск (9) толщиной 1 мм , закрепленный на плоском никелевом экране с цилиндрической юбкой (10), который полностью закрывал катодный узел и отделял его от остального объема прибора с рабочим межэлектродным промежутком. Это позволяет, как правило, существенно увеличить напряжение пробоя паразитных разрядов на анод с нерабочей площадки катода и подогревателя.

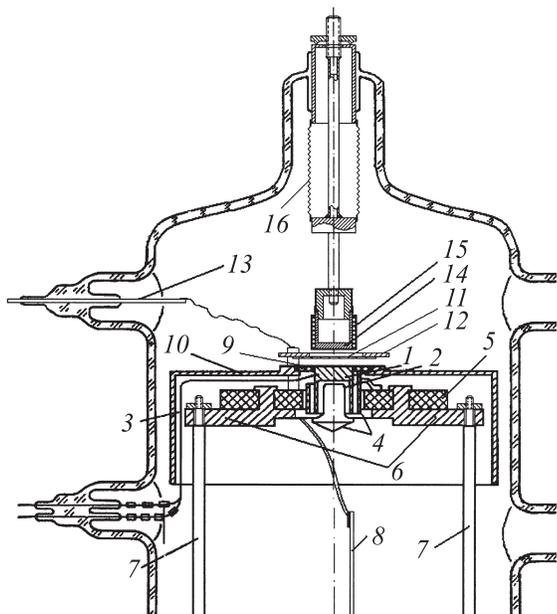


Рис. 1. Лабораторный макет ТЭП-выпрямителя с крупноструктурной сеткой: 1 — катод, 2 — подогреватель, 3 — катодная W-Re-термопара, 4 — тепловые экраны катода, 5 — Al_2O_3 монтажный диск, 6 — держатель подогревателя, 7 — выводы подогревателя, 8 — вывод эмиттера, 9 — сапфировый диск, 10 — общий экран катодного узла, 11 — сетка, 12 — оправка сетки, 13 — вывод сетки, 14 — анод, 15 — BeO -трубка, 16 — сиффон.

Управляющая сетка (11) закреплялась в жесткой оправке (12) на стойке, проходящей через катодный экран, а ее электрический вывод делался через боковой штенгель колбы (13).

Нами были испытаны два прибора с разными сетками. В первом из них, главной задачей которого было исследование особенностей работы выпрямителя с ТЭП в качестве вентиля в режиме фазовой регулировки выходного напряжения, использовалась мелкоструктурная плетеная молибденовая сетка, применявшаяся для плазменных ключей, с квадратной ячейкой размером $a = 0.15 \text{ mm}$ в свету и диаметром витков 0.03 mm . Это гарантировало высокую электропрочность и успешное исследование ТЭП в режимах с фазовой регулировкой, большое прямое падение было при этом несущественно. Плетеная сетка хорошо натягивалась на цилиндрическую оправку (обеспечивая практически идеальную плоскую поверхность) и туго закреплялась цилиндрическим фиксатором несколько большего диаметра (диаметр оправки $\sim 35 \text{ mm}$). В оправке и фиксаторе пропиливались смотровые окна, позволяющие наблюдать разряд в области сетка-анод. Сетка находилась приблизительно посередине межэлектродного зазора, составлявшего 2.7 mm .

Для второго прибора была использована крупноструктурная фотолитографическая сетка с ячейкой в виде правильного шестиугольника, расстояние между противоположными вершинами которого было $\approx 2 \text{ mm}$. Сетка

подваривалась точечной сваркой к плоской прямоугольной никелевой оправке толщиной 0.3 mm . Расстояние катод-сетка составило 2 mm , расстояние сетка-анод могло регулироваться за счет подвижного анодного узла. Это было сделано для того, чтобы подбором оптимального расстояния сетка-анод максимально увеличить электропрочность, если она окажется слишком малой для крупноструктурной сетки.

Анодом (14) служила также торцевая поверхность молибденового цилиндра, на который надевалась керамическая (BeO) охранный трубка (15) для предотвращения распространения разряда на его боковую поверхность. Неподвижный анодный узел, как и сетка, крепился через стойку на вводе ножки, подвижный (через сиффон (16)) — вплавлялся в верхний штенгель колбы.

Процесс откачки и обезгаживания не отличался от традиционного: колба прогревалась до 470°C , катод — до 1700 K (электронной бомбардировкой за счет эмиссии подогревателя). Ампула с цезием вскрывалась перед отпайкой прибора, отпайка производилась при вакууме $(1-2) \cdot 10^{-7} \text{ Torr}$.

В экспериментах регистрировались в основном анодные и сеточные вольт-амперные характеристики (ВАХ), а температура катода и давление цезия (температура цезиевого резервуара) стабилизировались электронными стабилизаторами с точностью $\sim 0.02 \text{ mV}$ по показаниям W-Re и хромель-алюмелевой термопар (методика измерений была подробно описана в [14]).

Электропрочность крупноструктурной сетки

На рис. 2, *a* представлено типичное семейство кривых запириания (зависимости напряжения поджига V_b от сеточного смещения $-U_g$), полученных для прибора с крупноструктурной сеткой при различных температурах катода T_k и одном и том же давлении цезия, а также соответствующие вольт-амперные характеристики сетки, показывающие ее эмиссию (см. вставку на рис. 2, *a*). Видно, что увеличение размеров сеточной ячейки на порядок действительно существенно снизило электропрочность разрядного промежутка (ср. рис. 2 и рис. 6, *a* (см. ниже), а также рис. 3 в работе [14]), но все же она остается достаточно высокой для обеспечения полной фазовой регулировки при выпрямлении напряжений $10-20 \text{ V}$ (кривые 1 и 2). Перегиб („полка“) на кривой 2 вызван влиянием эмиссии сетки — он всегда наблюдался при температурах катода немного ниже критической (при которой теряется электропрочность — кривая 3) — и исчезает при дальнейшем снижении температуры катода и соответственно температуры сетки и ее эмиссии, как это видно из рис. 2.

На рис. 2, *b* проиллюстрировано влияние на электропрочность давления цезия — при достаточно высоком уровне сеточной эмиссии, когда соответствующий перегиб на кривых поджига хорошо выражен. Как видно из

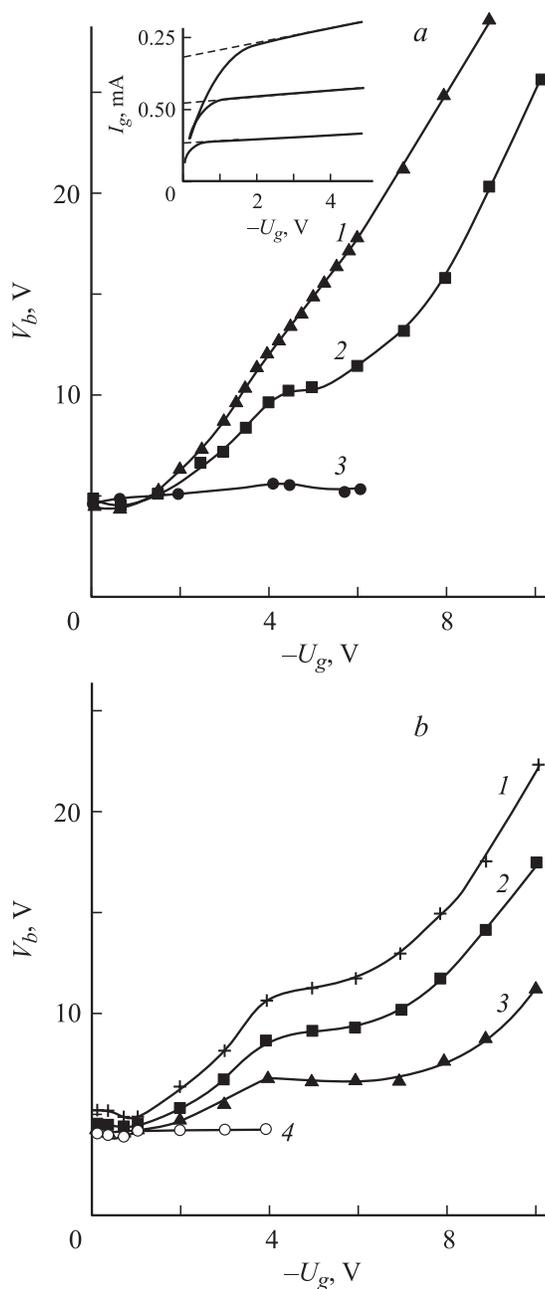


Рис. 2. *a* — влияние температуры катода (эмиссии сетки I_g) на электропрочность; $P_{Cs} = 0.013$ Торр. 1 — $T_K = 860$ К, $I_g = 0.12$ мА; 2 — 885 К, 0.26 мА; 3 — 920 К, 0.41 мА; вставка — ВАХ сетки при тех же температурах; *b* — кривые запирания при изменении давления цезия и постоянной температуре катода $T_K = 293$ К. P_{Cs} : 1 — 0.0074; 2 — 0.013; 3 — 0.024; 4 — 0.039 Торр. Расстояние сетка–анод $d_{ga} = 0.9$ мм.

рисунка, рост давления приводит к расширению и опусканию „полки“, вплоть до исчезновения электропрочности. Заметим, что данные (рис. 2, *b*) были получены после того, как в процессе измерений эмиссия сетки несколько уменьшилась (за счет ионной бомбардировки в разряде), и сетка стала сохранять электропрочность до более высоких температур катода — 930–950 К.

Приведенные результаты наглядно показывают, насколько электропрочность сетки чувствительна к ее эмиссии вблизи критического значения носителей.

При низкой эмиссии сетки, когда перегибы на кривых запирания практически отсутствуют, влияние давления на электропрочность традиционно и соответствует „кривой Пашена“ (рис. 3) — с ростом давления напряжение поджига уменьшается, достигает минимума при $P_{Cs} \sim 0.024$ Торр (при этом длина свободного пробега электронов порядка межэлектродного зазора), а затем снова начинает возрастать. Перегиб на кривой $V_b(U_g)$, связанный с влиянием эмиссии сетки, наблюдается только на кривой 6, соответствующей наибольшему измеренному давлению 0.1 Торр.

Во время этой серии измерений сеточная эмиссия тщательно контролировалась. Оказалось, что при низких давлениях увеличение P_{Cs} немного уменьшает ее (как видно из рис. 3), а при высоких — увеличивает. Минимум эмиссии примерно соответствует давлению 0.024 Торр, при котором напряжения поджига минимальны. Следовательно, увеличением напряжений поджига от минимума и в сторону низких, и в сторону высоких давлений действительно обусловлено изменением давления, а не эмиссии сетки. Так как изменение сеточной эмиссии влияет при этом на напряжение поджига в направлении, противоположном влиянию P_{Cs} , при $I_g = \text{const}$ изменение электропрочности с давлением должно быть даже несколько более сильным, чем на рис. 3.

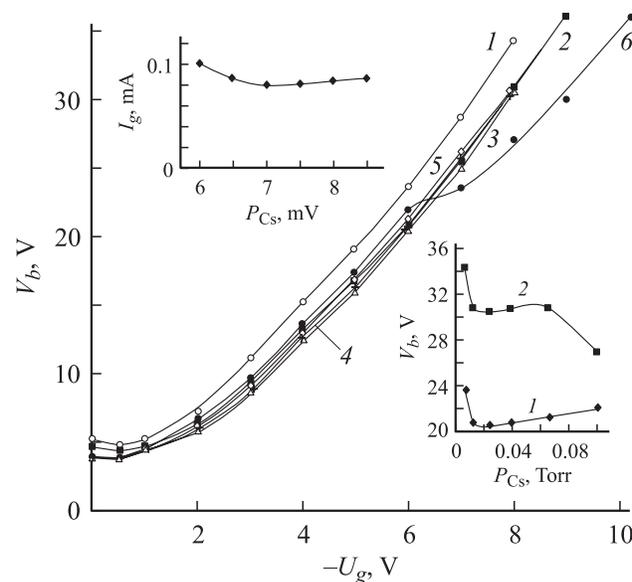


Рис. 3. Влияние давления цезия на электропроводность при малой эмиссии сетки. $T_K = 885$ К. P_{Cs} : 1 — 0.0073; 2 — 0.013; 3 — 0.024; 4 — 0.039, 5 — 0.066, 6 — 0.1. Вставка сверху — изменение эмиссии сетки с давлением. Температуре цезия 6 мВ соответствует $P_{Cs} = 0.007$ Торр, 8.5 мВ — 0.1 Торр. Вставка внизу — зависимость напряжения поджига от давления при постоянном сеточном смещении $U_g = -6$ В (1) и -8 В (2); $d_{ga} = 0.9$ мм.

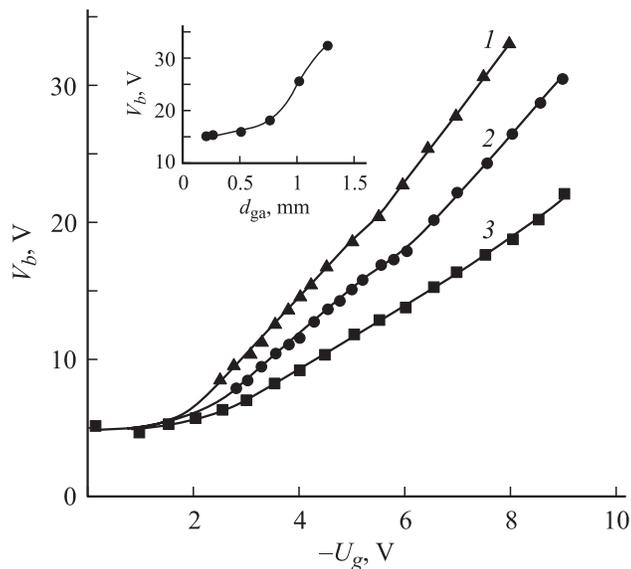


Рис. 4. Влияние на электропрочность расстояния сетка–анод; d_{ga} : 1 — 0.9; 2 — 0.65; 3 — 1.15. Вставка сверху — зависимость напряжения поджига от расстояния сетка–анод при $U_g = -8$ V. $T_k = 920$ K, $P_{Cs} = 0.0074$ Torr.

Была также измерена зависимость напряжения поджига от расстояния сетка–анод (все представленные выше данные соответствуют одному и тому же $d_{ga} = 0.9$ mm). Даже при низких давлениях напряжение поджига растет с ростом d_{ga} , причем существенный рост начинается при d_{ga} меньше ~ 0.7 mm (рис. 4). По-видимому, этот рост обусловлен уменьшением провисания анодного потенциала сквозь ячейки сетки, которое и является определяющим фактором пробоя промежутка. Интересно, что увеличение d_{ga} для относительно низких давлений приводит к заметному сдвигу ВАХ в сторону меньших анодных напряжений — так, для $P_{Cs} = 0.0074$ Torr минимальное напряжение горения разряда V_0 уменьшается на 0.25 V при увеличении d_{ga} с 0.4 до 1.4 mm.

Следует особо обратить внимание на сравнительно низкий уровень катодных температур, при котором сохраняется электропрочность на исследуемом приборе — он заметно ниже обычных рабочих температур плазменных ключей, которые доходили до 1000–1100 K. Основная причина этого заключается в необычно большой эмиссии сетки у исследуемого прибора.

Приведенные выше данные по сеточной эмиссии соответствуют суммарному току сетки, а так как площадь поверхности ее витков почти на порядок меньше площади катода, удельная эмиссия, соответствующая критическим температурам катода $T_k \sim 950$ – 970 K, оказывается порядка 3–5 mA/cm². Это даже больше, чем удельная эмиссия мелкоструктурных сеток, при которой они теряют электропрочность (~ 1 mA/cm²), но для молибденовых сеток, использовавшихся в ПКС, такая эмиссия достигалась при температурах катода на 100–200 K выше (еще ниже была эмиссия сеток со специальными антиэмиссионными покрытиями). Высо-

кая эмиссия обусловлена материалом сетки, каковым, вероятнее всего, является нержавеющая сталь (а не молибден, как полагалось при изготовлении прибора). Об этом говорит тот факт, что при сильном разогреве катода во все время обезгаживания какие-то компоненты материала сетки испарились и отравили катод. Другой причиной трудно объяснить наблюдавшееся на этом приборе уменьшение эмиссии платинового катода в парах цезия на два порядка по сравнению с обычным уровнем (причем эмиссию удалось восстановить, хотя и не полностью, только длительной ионной бомбардировкой в разряде).⁴ Поэтому можно с уверенностью говорить о том, что крупноструктурные молибденовые сетки, и тем более сетки с антиэмиссионными покрытиями, должны обеспечить необходимую для фазовой регулировки электропрочность ~ 15 – 20 V при оптимальных для Pt-катода температурах ~ 1100 – 1200 K и выше.

Увеличение T_k в ТЭП-вентиле по сравнению с температурой катода ПКС возможно в принципе из-за низкой температуры анода в ТЭП-выпрямителе, который наверняка будет охлаждаться водой, и его температура, скорее всего, будет не более чем на 50–150 K превышать температуру резервуара с цезием ($T_a \approx 600$ – 700 K). Поэтому температура сетки (а значит, и ее эмиссия) при прочих равных условиях будут существенно ниже, чем в плазменных ключах, где предпочтение отдается „изотемпературному“ варианту с примерно одинаковыми температурами катода, анода и сетки, когда катод разогревается отработанным теплом реактора-преобразователя.

Пути снижения прямого падения напряжения на цезиевом тиратроне

Достаточно высокая электропрочность крупноструктурных сеток открывает возможность существенного снижения прямого падения в цезиевом тиратроне. Однако прежде чем перейти к изложению данных, полученных в этом направлении, целесообразно остановиться на довольно неожиданных и интересных результатах по снижению напряжения горения низковольтной дуги в приборе с мелкоструктурной сеткой за счет повышения рабочего давления и температуры катода по сравнению с традиционными режимами ПКС. Оказалось, что этот путь действительно может быть достаточно эффективным.

На рис. 5, а для двух давлений цезия приведены зависимости минимального напряжения горения разряда от температуры катода, и соответственно работы выхода катода ϕ_k , полученные на приборе с мелкоструктурной сеткой (работа выхода определялась из тока j_0). Кривые 1 и 3 соответствуют наиболее типичному для плазменных ключей давлению $P_{Cs} = 0.013$ Torr, а максимальные температуры катода были несколько большими,

⁴ С таким поведением платинового катода мы никогда не сталкивались за все время его использования.

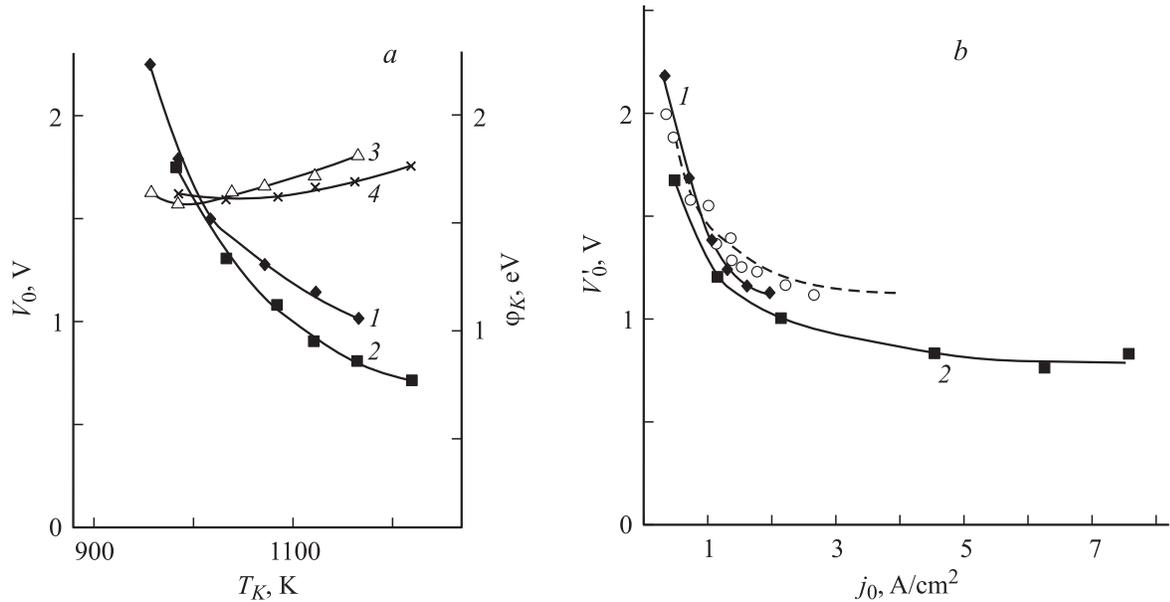


Рис. 5. *a* — снижение минимального падения напряжения на ТЭП при увеличении температуры катода и давления цезия (1, 2) и изменение при этом работы выхода эмиттера (3, 4). 1, 3 — $P_{Cs} = 1.3 \cdot 10^{-2}$, 2, 4 — $5.3 \cdot 10^{-2}$ Торр; *b* — зависимость падения напряжения на плазме V'_0 (с учетом контактной разности потенциалов катода и анода) от тока эмиссии катода. 1 — $P_{Cs} = 1.3 \cdot 10^{-2}$, 2 — $5.3 \cdot 10^{-2}$ Торр, $U_g \approx 0$. Для сравнения из [14] приведены значения (\circ) V'_0 , измеренные для диода с $d = 1.3$ мм при $P_{Cs} = 1.3 \cdot 10^{-2}$ Торр, и результаты расчета для тех же условий (пунктир).

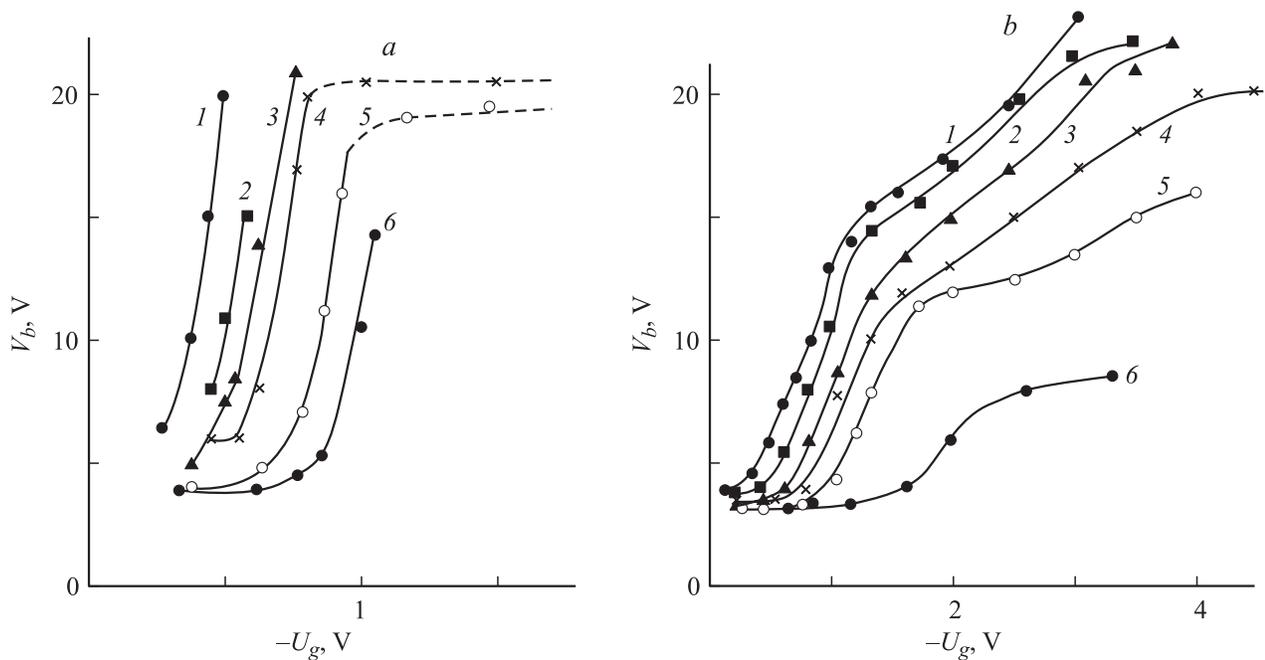


Рис. 6. Зависимость напряжения поджига разряда от отрицательного сеточного смещения для различных температур катода. *a* — $P_{Cs} = 1.3 \cdot 10^{-2}$ Торр, T_K К: 1 — 975, 2 — 1025, 3 — 1040, 4 — 1085, 5 — 1120, 6 — 1165 К. *b* — $P_{Cs} = 5.3 \cdot 10^{-2}$ Торр, T_K , К: 1 — 985, 2 — 1030, 3 — 1085, 4 — 1120, 5 — 1165, 6 — 1220. Пунктир — поджиг через паразитный разряд.

чем обычно для ПКС (переходили уже за максимумом *S*-образной кривой). Видно, что увеличение температуры катода заметно снижает минимальное напряжение горения разряда — примерно на один вольт для приведенного на рисунке температурного интервала, сначала —

за счет увеличения эмиссии катода (разрядного тока), а затем — за счет увеличения его работы выхода. Это следует из сопоставления с рис. 5, *b*, на котором по данным рис. 5, *a* построена зависимость минимального падения напряжения на плазме $V'_0 = V_0 + (\varphi_K - \varphi_a)$

(где φ_a — работа выхода анода, которая принималась равной 1.7 eV).⁵ При этом электропрочность сетки, как видно из рис. 6, *a*, сохраняется вплоть до максимальных температур (насыщение на кривых запирания при $-U_g \sim 20$ V связано с поджигом паразитного разряда и обусловлено недостатками конструкции прибора).⁶

Кривые 2 и 4 на рис. 5, *a* соответствуют более высокому давлению $P_{Cs} = 5.3 \cdot 10^{-2}$ Торр, которое было близко к оптимальному с точки зрения минимизации падения напряжения на приборе — при дальнейшем увеличении давления прямое падение (хоть и медленно) начинало возрастать. Видно, что повышение давления позволило еще более снизить прямое падение — примерно на 0.2 V — при весьма значительном увеличении разрядных токов (см. рис. 5, *b*).

Интересные заключения позволяет сделать сопоставление полученных данных с результатами измерения (и расчета) падения напряжения на разрядной плазме для диода при давлении $P_{Cs} = 1.3 \cdot 10^{-2}$ Торр, приведенных в [21] (рис. 5, *b*, кружки и пунктир соответственно). Прежде всего обращает на себя внимание сравнительно небольшая разница в величине V'_0 для исследуемого триода (кривая 1) и диода. Причем если в области малых токов кривая 1, как и положено, идет выше значений V'_0 диода, то с ростом тока разница уменьшается и даже меняет знак. Скорее всего, это связано с бóльшим межэлектродным расстоянием катод—анод в исследуемом сеточном приборе (2.7 mm) по сравнению с диодом (1.3 mm).

Для области низких давлений увеличение параметра „ P_d “ вдвое в какой-то мере компенсирует наличие сетки в межэлектродном промежутке [21]. Возможно, и работа выхода анода на этом приборе несколько меньше, чем для прибора, исследовавшегося в [21]. Во всяком случае, приведенные результаты наглядно показывают, что возмущающее воздействие сетки на разряд оказывается тем большим, чем меньше разрядный ток (и концентрация плазмы), что, в общем, вполне объяснимо. Хотя с ростом концентрации энергии, выносимая на сетку из плазмы с ионным током, растет по абсолютной величине, относительная роль этих потерь в балансе энергии разряда должна падать. Этот результат хорошо согласуется со сделанным в [20] выводом о том, что именно отбор ионного тока на сетку является главным возмущающим фактором при введении сетки в плазму.

Как видно из рис. 6, *b*, с ростом давления электропрочность хотя и заметно снижается (при $P_{Cs} = 1.3 \cdot 10^2$ Торр для запирания даже при высокой температуре катода достаточно сеточного смещения ~ -1 V,

⁵ На исследуемых приборах работа выхода непосредственно не измерялась из-за низкой температуры анода и малой его эмиссии. Но предыдущий опыт показывает, что в таких условиях она если и отличается от этого значения, то незначительно. Отметим, что в работе [21], с данными которой сравниваются полученные результаты, также полагалось $\varphi_a = 1.7$ eV.

⁶ Появление паразитных разрядов — это специфика лабораторных макетов. Для промышленных ТЭП, где катодная и анодная области полностью разделены сеткой, паразитные разряды принципиально не могут иметь места.

при $P_{Cs} = 5.3 \cdot 10^{-2}$ Торр для этого необходимо уже -3 – -4 V), но остается вполне достаточной для фазовой регулировки. Стоит отметить, что увеличение давления снижает напряжения появления паразитного разряда — свечение появляется при анодных напряжениях ~ 10 – 15 V, соответствующих перегибу на кривых $V_b(U_g)$. Однако из-за уменьшения коэффициента амбиполярной диффузии с ростом давления паразитный разряд влияет на поджиг основного разряда значительно слабее, так что, как видно из рис. 5, *b*, увеличением $-U_g$ удастся сохранять электропрочность и при анодных напряжениях, несколько бóльших 10–15 V.

Таким образом, даже на мелкоструктурной сетке за счет рационального выбора рабочего давления и температуры катода тиратрона удалось получить более чем существенное снижение прямого падения напряжения — до величины 0.7–0.8 V. В результате для $T_K \sim 1150$ K и $P_{Cs} = 5.3 \cdot 10^{-2}$ Торр можно было осуществлять выпрямление с полной фазовой регулировкой выходного напряжения при токах в несколько A/cm².

На рис. 7 в качестве примера приведена осциллограмма напряжения на аноде и проходящего тока для одного из режимов выпрямления — когда поджиг разряда (положительным сеточным импульсом) производится далеко за максимумом синусоиды, вентиль отперт только на $\sim 1/4$ часть положительного полупериода, и среднее выпрямленное напряжение совсем мало. Возможно, оптимизация геометрии межэлектродного промежутка (величины d , положение сетки), позволит даже для мелкоструктурной сетки уменьшить прямое падение напряжения по крайней мере до ~ 0.5 V, что сделает такой вариант тиратрона вполне приемлемым для практики.

Более того, при уже реализованном $V_0 = 0.75$ V цезиевый тиратрон оказывается заметно экономичней кремниевых тиристоров. Как известно, основной расход тепла в ТЭП связан с компенсацией электронного охлаждения катода j_0 , φ_K . Он составляет в среднем $\sim 75\%$ от общего расхода тепла на поддержание теплового режима

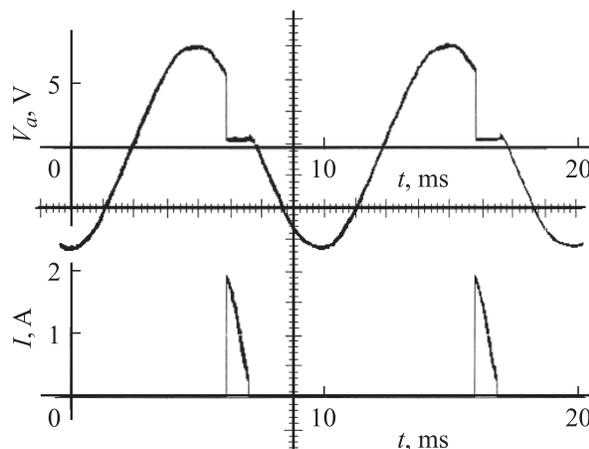


Рис. 7. Фазовое управление при выпрямлении напряжения с амплитудой $E_0 = 7.5$ V при прямом падении на ТЭП 0.75 V. Сопротивление нагрузки 4 Ω . $T_K = 1150$ K, $P_{Cs} = 5.3 \cdot 10^{-2}$ Торр, $U_g = -2$ V.

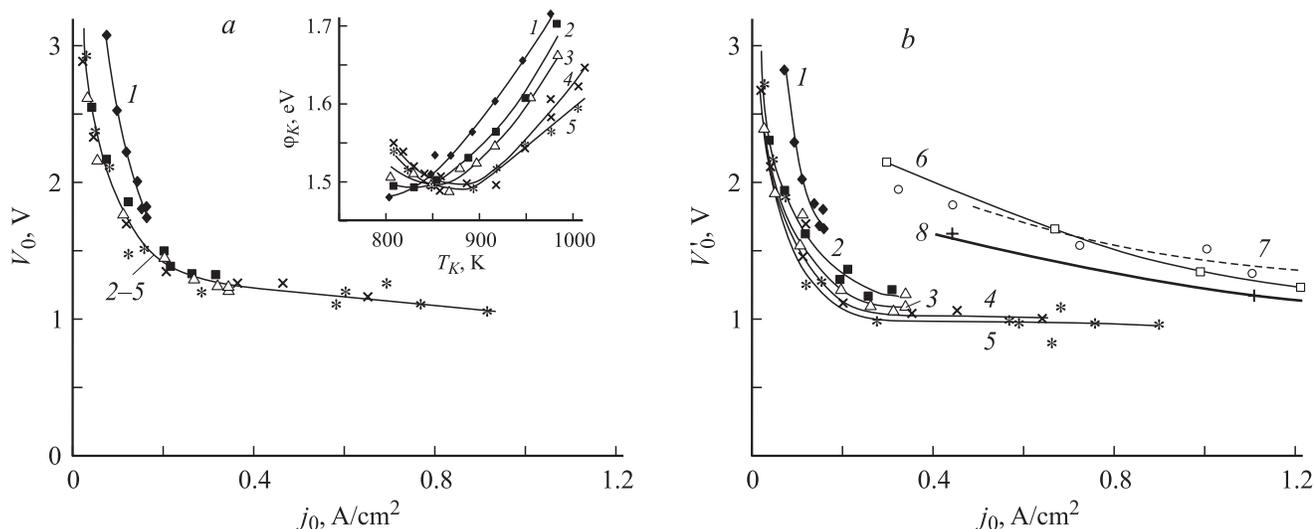


Рис. 8. Зависимость прямого падения напряжения V_0 от тока эмиссии катода на приборе с крупноструктурной сеткой (а) и (b) падения напряжения на плазме V'_0 (1–5) в соответствии с результатами для мелкоструктурной сетки (6, 8) и диодом (7, пунктир [21]). P_{Cs} : 1, 6, 7 — 0.013; 2 — 0.024; 3 — 0.039, 4 — 0.66; 5 — 0.1, 8 — 0.053 Torr; $U_g \approx 0$.

ТЭП [10]. При рассматриваемых температурах катода и давлениях цезия работа выхода катода невелика — $\phi_K = 1.6–1.8$ eV (см. рис. 6, а, кривые 3 и 4); для указанного выше режима $\phi_K = 1.68$ eV. Следовательно, общие потери тепла составят $j_0 1.68/0.75 \approx 2.25 j_0$. Но тепловая энергия примерно в три раза дешевле электрической (КПД электростанций $\sim 30–40\%$), поэтому эквивалентные потери составят для ТЭП $(0.75 + 2.25/3)j_0 \approx 1.5$ W электрической мощности на выпрямляемый ампер тока — что заметно лучше, чем 2W для тиристора. Если учитывать утилизацию высокопотенциального отработанного тепла ТЭП, его экономичность будет выше по крайней мере в два–три раза.

Еще более интересными оказались данные по прямым падениям напряжения для прибора с крупноструктурной сеткой. На рис. 8 представлена зависимость величины V_0 от тока эмиссии катода (тока j_0), полученная для широкого диапазона давлений (0.01–0.1 Torr). Сразу обращают на себя внимание несколько моментов.

Во-первых, зависимость прямого падения напряжения на разряде V_0 от давления оказалась существенной только при самых низких давлениях — лишь кривая 1 для самого низкого из измеренных давлений $P_{Cs} = 1.3 \cdot 10^{-2}$ Torr лежит обособленно и заметно выше точек для всех больших давлений. Остальные кривые, хотя и несколько смещаются вниз по мере возрастания P_{Cs} , но столь незначительно, что их можно объединить одной кривой (2–5). Для падения напряжения на плазме V'_0 (рис. 8, б) зависимость от давления получается несколько большей (можно хотя бы провести кривые $V'_0(j_0)$ для разных давлений), но все же остается незначительной. Такой результат хорошо согласуется со слабой зависимостью падения напряжения на плазме для диода при $P_{Cs} > 0.013$ Torr, полученной в [21].

Во-вторых, и это главное, переход к крупноструктурной сетке действительно приводит к существенному

уменьшению прямых падений напряжения — на 0.5–1 V при токах в десятки A/cm^2 . С ростом тока разница уменьшается (для более плотной плазмы возмущающее действие мелкоструктурной сетки сказывается слабее), но и при токе $\sim 1 A/cm^2$, как видно из рис. 8, б, она составляет около 0.2 V. Полученный результат подтверждает, что увеличение размеров ячейки сетки является реальным методом снижения прямого падения в тиратроне. Однако необходимо отметить, что приведенные данные по прямым падениям для крупноструктурной сетки могут быть несколько занижены для области больших токов. Причиной является специфический вид вольт-амперных характеристик прибора, связанный с влиянием сеточной эмиссии на разряд при относительно высоких температурах катода, и при разогреве сетки ионным током из плазмы.

Из-за большой величины ячейки сетки развитие разряда на этом приборе начинается с режима, когда разрядный шнур практически целиком локализован внутри одной сеточной ячейки. При невысоких катодных температурах увеличение анодного напряжения приводит, как обычно, к постепенному распространению разряда на весь межэлектродный зазор, анодный ток растет при этом почти вертикально, и ВАХ имеют нормальный вид (рис. 9, кривые 1–б). Но при больших T_K при увеличении V_a в режиме „одной ячейки“ разряд некоторое время продолжает оставаться локализованным в той же ячейке, напряжение на аноде при этом может возрастать на несколько десятых вольта, интенсивность свечения сильно возрастает, а анодный ток хотя и возрастает, но медленно, как на участке насыщения обычной ВАХ (начальный участок характеристики 7 на рис. 9, показанный стрелкой). При некотором значении V_a такой характер развития разряда заканчивается, и разрядный шнур либо переходит на соседнюю ячейку, либо перескакивает в

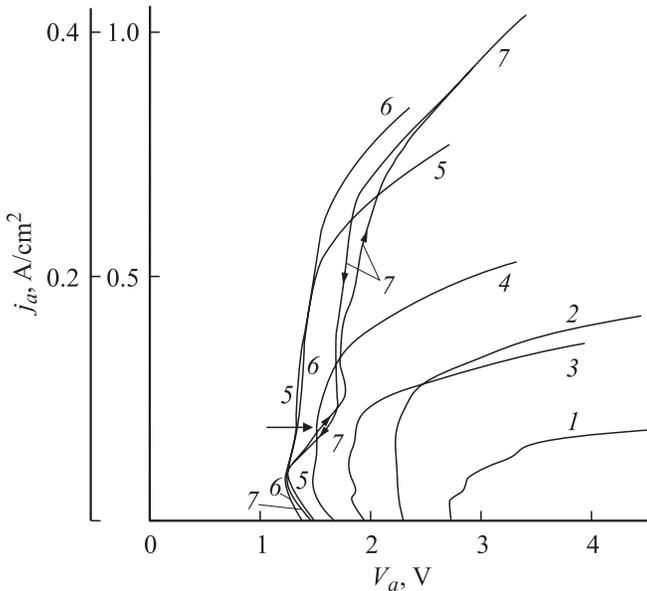


Рис. 9. ВАХ прибора с крупноструктурной сеткой. $P_{Cs} = 0.039$ Torr, T_k : 1 — 800, 2 — 825, 3 — 850, 4 — 870, 5 — 900, 6 — 920, 7 — 955 K; $U_g \approx 0$. Масштаб по току для кривых 1, 2 — справа от оси, для кривых 3–7 — слева. Горизонтальной стрелкой указан участок на ВАХ 7, где разряд локализуется в одной ячейке, стрелки на кривых указывают прямой и обратный ход при снятии ВАХ.

другое место, в результате чего вертикальная ветвь ВАХ обычно оказывается очень неустойчивой и плохо прописывается. Поэтому правильно определить величину V_0 в таких условиях достаточно сложно.

Результатам исследования влияния эмиссии сетки на развитый разряд (а не только на его поджиг), поскольку этот вопрос новый и принципиальный, будет посвящена вторая часть настоящей работы. Здесь следует подчеркнуть, что для области относительно небольших анодных токов, где температуры катода невелики, а снижение прямого падения наиболее значительно (так что применение крупноструктурной сетки дает наибольший эффект), фактор сеточной эмиссии сказывается незначительно.

Заключение

Проведенные исследования показали, что создание цезиевого тиратрона с низкими прямыми падениями напряжения ~ 0.5 V и даже ниже для реализации ТЭП-выпрямителя с фазовой регулировкой выпрямляемого напряжения является технически обоснованным и вполне реальным.

Для максимального снижения прямого падения напряжения на ТЭП-вентиле с управляющей сеткой необходимо стремиться к возможно более высоким рабочим температурам катода и плотностям тока, вплоть до $T_k \sim 1200$ – 1300 K (возможно, даже и до $T_k \sim 1400$ K). При высоких плотностях тока и концентрациях плазмы

уменьшается возмущающее воздействие сетки на разряд, а повышение температуры катода позволяет увеличить его работу выхода (при том же уровне эмиссии) и использовать контактную разность потенциалов для снижения прямого падения.

Максимальный уровень T_k определяется допустимым уровнем эмиссии сетки, при котором сетка еще сохраняет электропрочность (~ 1 mA/cm²). При этом нужный уровень эмиссии катода можно выбрать, подбирая давление цезия. Поэтому желательно применять для сеток эффективные антиэмиссионные покрытия, или даже применять конструкции с принудительным охлаждением сеточного узла тем же теплоносителем, что и анода.

Выбор размера ячейки сетки определяется прежде всего предполагаемым уровнем рабочих токов вентиля. При больших плотностях тока (~ 5 – 10 A/cm²) целесообразно использовать сетки с достаточно малой ячейкой, что увеличивает электропрочность. Если по каким-либо причинам предполагается работать при небольших токах (~ 1 – 2 A/cm²), использование крупноструктурных сеток позволит и в этом случае свести прямые падения к минимуму.

Уменьшение работы выхода анода, безусловно, является одним из существенных факторов снижения прямых падений. Для примера отметим, что, поскольку прямые падения 0.7–0.8 V, полученные при испытании прибора с мелкоструктурной сеткой в режиме фазовой регулировки выпрямленного напряжения, получены при работе выхода анода, близкой к 1.7 eV, одно лишь снижение ϕ_a до уровня 1.4–1.5 eV (достигнуто для генерирующих ТЭП [22]) позволит обеспечить $V_0 \approx 0.5$ V.

Проблема более детальной оптимизации параметров вентиля и его режима работы оказывается, таким образом, многофакторной и даже более сложной, чем оптимизации генерирующего ТЭП, и будет определяться конкретными условиями его применения.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 2306).

Список литературы

- [1] Марциновский А.М. Способ выпрямления переменного напряжения и выпрямитель тока. Патент РФ 2114484. 1994.
- [2] Martsinovsky A.M. // TEC-Rectifier — a New Possible Terrestrial Application of the Thermionic Converters. Space Technology and Application International Forum (STAIF-99). E18 Thermionic Technology and Application-II, Albuquerque, 1999.
- [3] Ярыгин В.И., Касиков И.И., Миронов В.С. и др. // ЖТФ (в печати).
- [4] Лайнер В.И. Современная гальванотехника. М.: Металлургия, 1967. 384 с.
- [5] Lubbers S.S. // Proc. Thermionic Conversion Specialist Conference. Carmell, 1969. P. 511.
- [6] Fatmi H.A., Gabor D., Nilson I.A. // Proc. 1st Int. Conf. on Thermionic Electrical Pow. Gen. London, 1965.

- [7] *Bacal M., Grabari V.* // Proc. 2nd Int. Conf. on Thermionic Electrical Pow. Gen. Streza, 1968.
- [8] *Кайбышев В.З., Каретников Р.В., Трутнев А.Л.* Препринт ИАЭ 17/485. 1975.
- [9] *Hatch G.L., Rhiner W., Rasor N.S.* et al. // Proc. 12th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf. Washington, D.C., 1977. P. 1563.
- [10] *Rasor N.S.* // IEEE Transact. Plasma Sci. 1991. Vol. 19. P. 1191.
- [11] *Rasor N.S.* // Proc. 33rd IECEC. Colorado, 1998. P. 98–211.
- [12] *Lucke J.R.* // Proc. 37th IECEC. Washington, D.C., 2002. Paper 20065.
- [13] Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Под ред. Г.Е. Пикуса и Б.Я. Мойжеса. М.: Наука, 1973. Гл. 9.
- [14] *Каплан В.Б., Макаров А.Н., Марциновский А.М.* и др. // ЖТФ. 1977. Т. 42. Вып. 2. С. 274–296.
- [15] *Грязнов Г.М., Каплан В.Б., Марциновский А.М.* и др. // Тр. III Междунар. конф. по ТЭП. Эйндховен, 1975.
- [16] *Бакиит Ф.Г., Каплан В.Б., Марциновский А.М.* и др. // ЖТФ. 1978. Т. 43. Вып. 11. С. 2273–2296.
- [17] *Kaplan V.B., Martsinovsky A.M., Tsirkei V.I.* // J. Phys. (Paris). 1979. Vol. 40. Suppl. 7. P. 495–496.
- [18] *Алексеев Н.И., Каплан В.Б., Марциновский А.М.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 9. С. 70–83.
- [19] *Алексеев Н.И., Каплан В.Б., Марциновский А.М.* и др. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 6. С. 15–21.
- [20] *Андронов А.Н., Воронин С.А., Марциновский А.М.* и др. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 3. С. 36–41.
- [21] *Бакиит А.Г., Дюжнев Г.А., Каплан В.Б.* и др. // ЖТФ. 1977. Т. 42. вып. 2. С. 263–273.
- [22] *Ярыгин Д.В., Миронов В.С., Соловьев Н.П.* и др. // Атомная энергия, 2000. Т. 89. № 1. С. 39–48.