

УДК 621.314.671

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕССЕТОЧНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭМИССИОННОГО ДИОДА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКА

© 2017 г. Кузнецов В.И.¹, Бабанин В.И.¹, Пашина А.С.²

¹Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ РАН)
Политехническая ул., 26, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021,
e-mail: post@mail.ioffe.ru

²Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)
Ижорская ул., 13, стр. 2, г. Москва, Российская Федерация, 125412,
e-mail: oivtran@oivtran.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований модулятора тока, созданного на основе термоэмиссионного диода и предназначенного для космических систем преобразования тока. Модуляция тока в этом устройстве осуществляется за счет развития плазменных структур в межэлектродном промежутке и не требует использования каких-либо внешних воздействий. Причиной формирования таких структур является развитие электронной неустойчивости в плазме. Эксперименты, проведенные в кнудсеновском диоде с цезий-бариевым наполнением, продемонстрировали возможность полной модуляции тока при напряжении горения 5...6 В и плотности тока в разряде ~ 10 А/см². При величине межэлектродного зазора 0,2...2,0 мм устойчивая модуляция тока и напряжения с частотой 5...20 кГц и полным прерыванием тока существовала в диапазоне давлений цезия $1,5 \cdot 10^{-3}$... $3,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Обнаружена возможность управления процессом модуляции с помощью дополнительных внешних воздействий (вспомогательный разряд, электрические и магнитные поля), что представляется перспективным для расширения диапазона параметров и функциональных возможностей диода-модулятора.

Ключевые слова: модуляция тока, термоэмиссионный диод, разрядная плазма, электронная неустойчивость, плазменные структуры.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMIONIC DIODE-BASED GRIDLESS HIGH-CURRENT MODULATOR FOR SPACE CURRENT CONVERSION SYSTEMS

Kuznetsov V.I.¹, Babanin V.I.¹, Pashchina A.S.²

¹Ioffe Institute RAS
26 Politekhnicheskaya str., St. Petersburg, 194021, Russian Federation, e-mail: post@mail.ioffe.ru

²Joint Institute for High Temperatures RAS (JIHT)
13 bld. 2 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russian Federation,
e-mail: oivtran@oivtran.ru

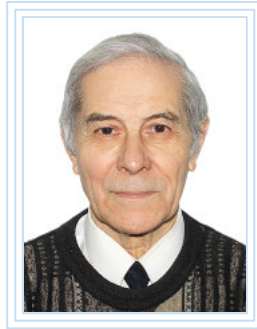
The paper presents results of experimental studies of a current modulator based on a thermionic diode and intended for use in space systems for current conversion. This device effects current modulation through propagation of plasma structures in the electrode gap and does not require any use of external forces. Such structures are formed through propagation of electronic instability in plasma. Experiments conducted in a Knudsen diode with a Cs-Ba filling demonstrated the feasibility of full modulation of current at burning voltage of 5...6 V and discharge current density of ~ 10 A/cm². With electrode gap 0,2...2,0 mm wide, a stable modulation of current and voltage with frequencies of 5...20 kHz and complete current cut-off existed at Cs pressures ranging from

1,5 · 10⁻³ to 3,5 · 10⁻³ mm Hg. It was discovered that the modulation process can be controlled using additional external forces (auxiliary discharge, electric and magnetic fields), which seems to hold promise for expanding the range of parameters and functionality of the diode modulator.

Key words: *current modulation, thermionic diode, discharge plasma, electron instability, plasma structures.*



КУЗНЕЦОВ В.И.



БАБАНИН В.И.



ПАЩИНА А.С.

КУЗНЕЦОВ Виктор Иосифович — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией ФТИ РАН, e-mail: victor.kuznetsov@mail.ioffe.ru
KUZNETSOV Victor Iosifovich — Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior research scientist, Head of Laboratory at Ioffe Institute RAS, e-mail: victor.kuznetsov@mail.ioffe.ru

БАБАНИН Валентин Иванович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий инженер ФТИ РАН, e-mail: vibab@mail.ru
BABANIN Valentin Ivanovich — Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior research scientist, Lead engineer at Ioffe Institute RAS, e-mail: vibab@mail.ru

ПАЩИНА Анатолий Степанович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией ОИВТ РАН, e-mail: fgrach@mail.ru
PASHCHINA Anatoly Stepanovich — Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior research scientist, Head of Laboratory at JIHT RAS, e-mail: fgrach@mail.ru

Одним из перспективных устройств получения электрической энергии в космосе является ядерная энергетическая установка (ЯЭУ), использующая термоэмиссионный метод преобразования тепловой энергии в электрическую. Термоэмиссионные ЯЭУ в нашей стране начали разрабатываться в конце 1950-х — начале 1960-х гг. в ряде организаций: ГНЦ РФ ФЭИ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, РНЦ «Курчатовский институт», РКК «Энергия», ГП «Красная Звезда», НИИ НПО «Луч» и др. В результате были созданы термоэмиссионные ЯЭУ «Топаз» электрической мощностью 6 кВт [1, 2], которые успешно работали на орбите в составе двух космических аппаратов «Космос». Например, на космическом аппарате «Космос-1867» энергетическая установка проработала около года. Параллельно была создана термоэмиссионная ЯЭУ «Енисей» мощностью 5 кВт, которая прошла успешные наземные испытания в течение полутора лет [3]. Подробное описание методов реакторных испытаний термоэмиссионных

электрогенерирующих сборок можно найти, например, в монографии [4].

При эксплуатации ЯЭУ на основе термоэмиссионного метода преобразования тепловой энергии в электрическую для преобразования постоянного напряжения в переменное необходимы высокоточные низковольтные ключевые элементы, способные функционировать при температурах выше 1 000 К и высоком уровне радиации, поскольку они должны стоять в реакторной зоне [5]. Ранее были разработаны приборы с сеточным управлением, причем особенно высокого уровня тока удалось достигнуть при использовании бинарного цезий-бариевого наполнения [6–10]. Слабым звеном сеточных ключевых элементов является такой сложный и малонадежный конструктивный элемент, как сетка. В работе [11] предложен высокотемпературный термоэмиссионный вентиль, в котором управление током осуществляется за счет дополнительного теплового воздействия на ионный слой

около эмиттера. С этой целью в область ионного слоя помещался дополнительный эмиттер, конструктивно совмещенный с катодом вентиля, и управление током осуществлялось путем импульсного увеличения его температуры. Преимуществом такого вентиля является отсутствие сетки, а недостатками — дополнительные затраты энергии на нагрев управляющего эмиттера и сложность его конструкции.

Специалисты ФТИ РАН предложили бессеточный вариант инвертора на основе диода, в котором может зажигаться кнудсеновский разряд [12, 13]. Управление током в этом устройстве осуществляется за счет развития плазменных структур в межэлектродном промежутке без использования каких-либо внешних воздействий. Для того чтобы можно было реализовать модуляцию тока с приемлемой для практики частотой ($f \sim 10^4$ Гц), необходимо обеспечить два условия:

- 1) в плазме диода должен осуществляться обрыв тока за время, много меньшее f^{-1} ;
- 2) запертое состояние диода должно сохраняться в течение промежутка времени $\sim f^{-1}$.

Рассмотрим оба эти явления.

Физические предпосылки модуляции тока в кнудсеновском плазменном диоде

Кнудсеновским плазменным диодом будем называть устройство, имеющее два плоскопараллельных электрода, промежутки между которыми заполнены парами вещества, которое ионизируется либо на поверхности, либо в объеме. При этом для плазмы должны быть выполнены два условия:

$$Kn = \lambda_{ea}/d > 1; \quad d/\lambda_D \gg 1.$$

Здесь Kn — число Кнудсена; λ_{ea} — длина свободного пробега электронов для электрон-атомных столкновений; λ_D — дебаевская длина в плазме; d — межэлектродное расстояние. *Первое условие* выполняется при достаточно низких давлениях паров наполнителя. *Второе условие* означает, что эмиттер обладает достаточно большой эмиссионной способностью.

Развитие электронной неустойчивости и обрыв тока в кнудсеновском диоде. Плазма в кнудсеновском диоде может создаваться путем ионизации паров наполнителя на поверхности одного из электродов. Такой диод в литературе получил название кнудсеновский диод с поверхностной ионизацией (КДПИ). Типичными представителями КДПИ являются термоэмиссионный преобразователь энергии и односторонняя Q -машина. В КДПИ электроны и ионы поступают в межэлектродный промежуток с горячей поверхности эмиттера:

электроны за счет термоэмиссии, а ионы — за счет поверхностной ионизации атомов наполнителя. Частицы испускаются с максвелловским распределением по скоростям с температурой эмиттера T_E и движутся в межэлектродном пространстве без столкновений. В обоих типах КДПИ экспериментально наблюдались нелинейные колебания тока [14–17].

Теория нелинейных колебаний описана в работах [18–20]. Согласно этой теории, колебательный процесс в КДПИ состоит из чередования медленной и быстрой стадий. На *медленной стадии* происходит перераспределение ионов в межэлектродном пространстве. Характерное время ее протекания — порядка среднего времени пролета ионов между электродами. Для ионов Cs это время при величине межэлектродного зазора $d \sim 1$ мм составляет несколько микросекунд. В определенные моменты медленной стадии в плазме возникают условия для развития электронной неустойчивости: в окрестности эмиттера формируется скачок потенциала, обеспечивающий ускорение электронов, и через плазму, фактически, движется пучок электронов, имеющий небольшой разброс по скоростям. Было доказано, что это неустойчивость Бурсиана–Пирса [21–23]. В ходе развития неустойчивости происходит сильное изменение распределения потенциала в межэлектродном пространстве при практически неизменном распределении ионов. Это *быстрая стадия* колебательного процесса. Время ее протекания — порядка среднего времени пролета электронов между электродами, что в $(m_i/m_e)^{1/2}$ меньше характерного времени медленной стадии (здесь m_e и m_i — массы электрона и иона, соответственно).

В результате развития неустойчивости может возникать интересное физическое явление — резкий обрыв тока. Это происходит в том случае, когда в ходе быстрой стадии формируется распределение потенциала с виртуальным катодом, т. е. вблизи эмиттера образуется область с потенциальным барьером для электронов. Электроны интенсивно отражаются от барьера, что приводит к сильному уменьшению тока, достигающего коллектора. Поскольку процесс формирования виртуального катода происходит за время порядка среднего времени пролета электронов между электродами (при $d \sim 1$ мм оно составляет несколько наносекунд), можно говорить, что ток в диоде изменяется мгновенно.

Развитие электронной неустойчивости начинается только при вполне определенных распределениях ионов в межэлектродном промежутке. При этом неважно, как эти распределения сформировались. Такие

распределения ионов могут иметь место и в кнудсеновском разряде, т. е. и в разряде при развитии неустойчивости может образоваться распределение потенциала с виртуальным катодом, резко ограничивающим электронный ток. В результате произойдет уменьшение генерации ионов в объеме, что, в свою очередь, должно привести к дальнейшему снижению электронного тока. Таким образом, можно ожидать, что при определенных условиях в диодах с кнудсеновским разрядом будет также происходить обрыв тока. И действительно, в экспериментах на таких диодах наблюдалось развитие релаксационных нелинейных колебаний, подобных колебаниям в КДПИ [24].

Явление самопроизвольного обрыва тока наблюдалось и в триодных ключевых элементах с Cs-Va наполнением [6–10]. Было установлено, что обрывы возникают при достижении током некоторой критической плотности j_{cr} , величина которой пропорциональна давлению паров цезия. При $j > j_{cr}$ горение разряда сопровождается уменьшением концентрации атомов. Одновременно происходит перераспределение ионов в межэлектродном зазоре, что на определенной стадии процесса может привести к развитию электронной неустойчивости и обрыву тока. В работе [9], например, на временных осциллограммах непосредственно перед обрывом наблюдалось развитие колебаний тока, что свидетельствует о плазменной природе обрыва тока.

Особенности зажигания кнудсеновского разряда. В кнудсеновском разряде электроны движутся через межэлектродный промежуток практически без столкновений. Лишь незначительная доля электронов, сталкиваясь с атомами в анодной области, где потенциал превышает потенциал ионизации атомов наполнителя, ионизует атомы. Образующиеся ионы, обладая большой массой, движутся по направлению к эмиттеру достаточно медленно и эффективно компенсируют отрицательный пространственный заряд. Доля электронов, принимающих участие в ионизации, оказывается порядка $(m_e/m_i)^{1/2}$. Для цезия эта величина составляет около 1/500.

Кинетическая теория начальной стадии развития кнудсеновского разряда предложена в работах [25–27]. Показано, что с ростом приложенного напряжения анодная область, где происходит генерация ионов, расширяется. Увеличение генерации ионов приводит к появлению на вольт-амперной характеристике (ВАХ) точки, начиная с которой ток возрастает не при увеличении потенциала анода, а при его уменьшении, т. е. возникает участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением

(рис. 1). Потенциал точки бифуркации на ВАХ представляет собой напряжение зажигания разряда. Из рис. 1, а видно, что напряжение зажигания возрастает с уменьшением давления P паров наполнителя. При достаточно низких давлениях оно оказывается настолько большим, что необходимо учитывать немонотонный характер зависимости сечения ионизации от энергии электронов, т. е. наличие максимума у сечения и его убывание при дальнейшем росте энергии. На рис. 1, в показаны предразрядные ВАХ для цезиевого наполнения. Видно, что существует критическое значение $(P \cdot d)_0$, ниже которого разряд не зажигается (кривые 1–3). Для цезия $(P \cdot d)_0 \sim 3,3 \cdot 10^{-3}$ Тор·мм. При $P \cdot d$ выше критической величины на ВАХ существуют две ветви: низковольтная и высоковольтная (кривые 6–10). Таким образом, кнудсеновский разряд может зажигаться при не слишком малых значениях $P \cdot d$ и в диапазоне напряжений, ограниченном как со стороны малых, так и со стороны больших значений. Для того чтобы обеспечить зажигание разряда при заданном давлении, необходимо подобрать электродвижущую силу (ЭДС) и сопротивление нагрузки такими, чтобы нагрузочная характеристика лежала в «окне» между устойчивыми предразрядными участками ВАХ.

Отсутствие зажигания разряда, т. е. низкая электропроводность диода, при давлениях, меньших критического, или при больших напряжениях и давлениях, больших критического, позволяет в процессе модуляции достаточно долго удерживать диод в запертом состоянии после обрыва тока. Действительно, горение сильноточного разряда сопровождается уменьшением концентрации атомов за счет интенсивной ионизации и выноса их из межэлектродного зазора. Если работать в окрестности давления $P_0 = (P \cdot d)_0/d$, то в момент обрыва тока давление может оказаться ниже P_0 , и повторное зажигание будет невозможным до тех пор, пока давление не восстановится. Время пребывания диода в запертом состоянии будет определяться достаточно медленными процессами, в частности — десорбцией атомов с поверхностей. Наличие высоковольтной ветви на ВАХ позволяет использовать также реактивную нагрузку для регулирования времени существования запертого состояния. При обрыве тока в диоде напряжение сильно возрастает за счет индуктивности, и рабочая точка может оказаться на высоковольтной ветви ВАХ. В этом случае повторное зажигание разряда должно произойти не сразу после завершения восстановления давления в межэлектродном зазоре, а лишь после завершения переходных процессов во внешней цепи.

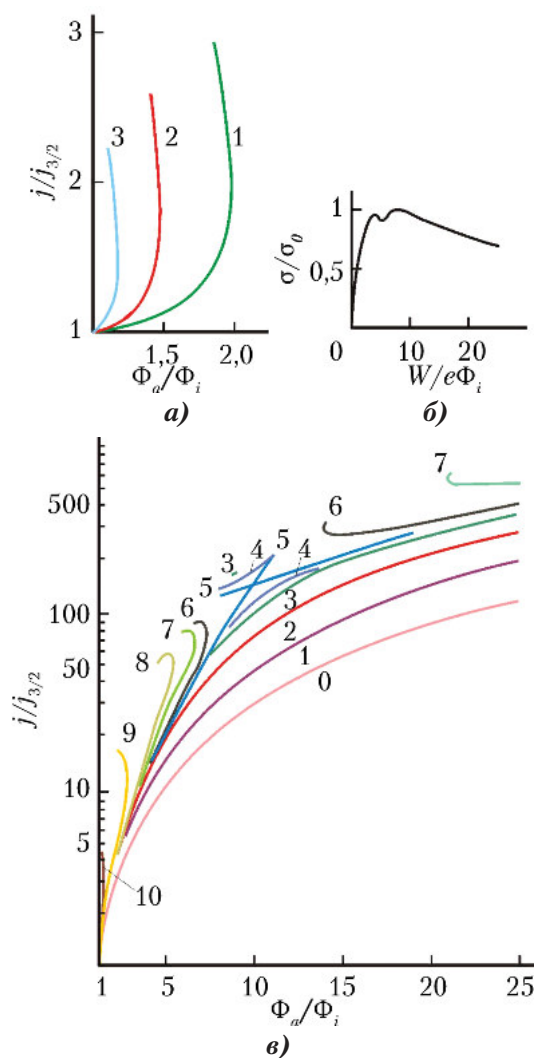


Рис. 1. Расчетные вольт-амперные характеристики для цезиевого наполнения: а – линейная аппроксимация сечения ионизации: 1 – $b = 3,3$; 2 – 9,0; 3 – 42,6; б – зависимость сечения ионизации атомов цезия σ от энергии электронов W ; в – сечение ионизации имеет максимум $\sigma_0 = 10^{-5} \text{см}^2$: 0 – $b = 0$; 1 – 1,0; 2 – 1,4; 3 – 1,54; 4 – 1,55; 5 – 1,56; 6 – 1,6; 7 – 1,7; 8 – 1,8; 9 – 2,5; 10 – 10,6

Примечание. $j_{3/2}$ – плотность электронного тока, определяемая законом степени 3/2; Φ_a и Φ_i – потенциалы анода и ионизации; параметр на кривых $b = (m_i/m_e)^{1/2} \sigma_0 n_a d$; n_a – концентрация атомов; $\sigma_0 = K e \Phi_i$; K – пороговое сечение ионизации; e – заряд электрона.

Результаты экспериментальных исследований

Возможность модуляции тока в диоде изучалась с помощью кнудсеновского диода с цезий-бариевым наполнением (рис. 2). Использование пара бария позволяет обеспечить достаточно низкую работу выхода эмиттера, т. е. высокий уровень тока эмиссии, в кнудсеновском режиме. Эмиттер 1 и коллектор 3 плоской геометрии были изготовлены из поликристаллического вольфрама и молибдена и имели диаметр 15 мм. Эмиттер разогревался электронной бомбардировкой. Коллектор представлял собой массивный шток, крепившийся через изоляторы 4 внутри фланца. Фланец подсоединялся к корпусу прибора через гибкую танталовую диафрагму.

Это позволяло плавно изменять величину межэлектродного зазора от 0 до 2 мм. Во фланец дополнительно вставлялась графитовая втулка 5, чтобы при перемещении коллектора не возникали перекосы и заклинивания. Герметичность прибора обеспечивалась плотным стягиванием пришлифованных поверхностей металла и керамики, а также ножевыми уплотнениями. Эмиттер окружался тремя тепловыми экранами, изготовленными из вольфрамовой и танталовой фольги. Боковая поверхность коллектора закрывалась керамикой из окиси алюминия. Основная конструктивная особенность прибора заключалась в том, что межэлектродный зазор экранировался от остального объема прибора кольцевым танталовым электродом 2 с толщиной стенки 5 мм и высотой 14 мм, потенциально развязанным от остальных электродов. Расстояние между боковой поверхностью эмиттера и экраном составляло 2 мм. Прибор помещался в вакуумную камеру, в которой вакуум поддерживался на уровне 10^{-6} мм рт. ст.

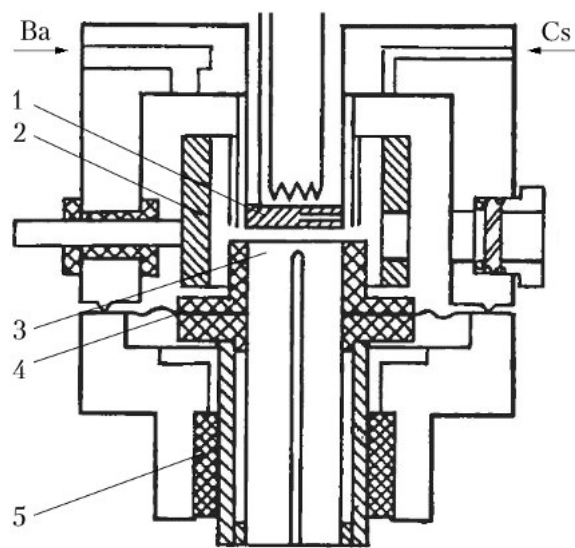


Рис. 2. Схема экспериментального прибора: 1 – эмиттер, 2 – кольцевой электрод; 3 – коллектор; 4 – изоляторы; 5 – графитовая втулка

Для регистрации ВАХ диода на осциллографе использовалась система импульсного съема, исключающая остывание эмиттера и разогрев коллектора при больших плотностях тока. Длительность импульса регулировалась от 0,1 до 5,0 мс, период повторения – от 20 мс до 2 с, а амплитуда напряжения – от 1 до 100 В.

При исследовании режима модуляции тока к диоду прикладывался прямоугольный импульс напряжения. Амплитуда импульса могла изменяться от 10 до 100 В. Для исследования влияния параметров внешней цепи использовался параллельный контур, подключаемый последовательно с диодом, в котором можно

было изменять емкость C , индуктивность L и сопротивление R [13].

Эксперименты проводились в широком диапазоне изменения параметров: давление пара цезия P_{Cs} изменялось от 10^{-3} до 10^{-2} мм рт. ст., давление пара бария P_{Ba} — от 10^{-5} до 10^{-1} мм рт. ст., температура эмиттера T_E — от 900 до 1800 °С, величина межэлектродного зазора d — от 0,3 до 2,0 мм. Устойчивая модуляция тока и напряжения с полным прерыванием тока была обнаружена в довольно узком интервале давлений пара цезия: $1,5 \cdot 10^{-3} \dots 3,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. При этом характерное значение амплитуды тока разряда составляло примерно 10 А/см², частота модуляции 1–10 кГц, а приложенное напряжение варьировалось в диапазоне 15...100 В.

На рис. 3 приведена типичная осциллограмма тока и напряжения в цезий-бариевом диоде-модуляторе. Видно, что разряд развивается за время, малое по сравнению с временем его горения. Напряжение горения разряда составляет 4–6 В. По прошествии ~100 мкс после зажигания происходит обрыв тока. Сам процесс обрыва тока протекает за время порядка 1 мкс. Уровень тока после обрыва оказывается близким к нулю. Сразу же вслед за обрывом тока в контуре начинается переходный процесс, сопровождающийся значительным увеличением напряжения на диоде — выброс напряжения существенно превышает напряжение внешнего источника. Переходный процесс заканчивается примерно через 40 мкс. Напряжение, приложенное к диоду, оказывается равным напряжению внешнего источника E . Диод сохраняет электропрочность еще 140 мкс. Только спустя 180 мкс после обрыва тока в диоде зажигается разряд. Следовательно, частота модуляции (в приведенном примере ~5 кГц) не определяется параметрами внешнего контура, а связана с процессами, протекающими в диоде. Отсутствие зажигания разряда в течение длительного времени связано с наличием в приборе кольцевого электрода, экранирующего межэлектродный зазор от внешнего объема. Если бы экран отсутствовал, то после обрыва тока в межэлектродном зазоре происходило бы зажигание разряда во внешнем объеме, поскольку для такого разряда величина $P \cdot d$ оказывается больше критической даже при пониженных давлениях. Наиболее существенное влияние на процесс модуляции оказывает давление пара цезия. Оказалось, что устойчивая модуляция осуществляется при давлениях пара вблизи порогового значения. При низких давлениях пара цезия разряд просто не поджигается, а при высоких колебания принимают стохастический характер.

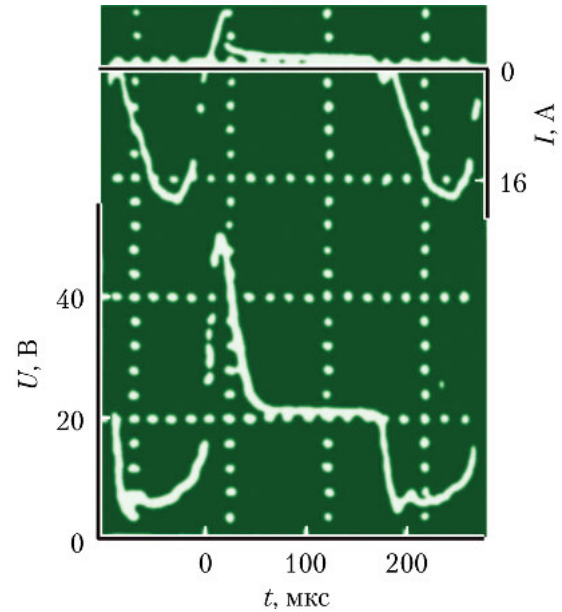


Рис. 3. Осциллограммы зависимостей тока (сверху) и напряжения (снизу) от времени в диоде-модуляторе

Примечание. Параметры режима: $P_{Cs} = 2,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; $P_{Ba} = 5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.; $T_E = 1315$ °С; $d = 2$ мм; $R = 20$ Ом; $L = 75$ мкГн; $C = 2$ мкФ; $E = 20$ В.

Варьирование температуры эмиттера от 1300 до 1900 °С и давления бария от 10^{-3} до $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. практически не изменяло характер модуляции. При $P_{Ba} > 10^{-1}$ мм рт. ст. модуляция в диоде прекращается, и горит разряд, насыщенный высокочастотными колебаниями.

Необходимый уровень тока в разряде выставляется путем варьирования ЭДС источника и сопротивления нагрузки. При фиксированном значении R с ростом E увеличивается амплитуда тока, а времена проводящего и запертого состояний уменьшаются (рис. 4). Путем изменения сопротивления нагрузки от 1 до 40 Ом можно было изменять плотность тока в разряде примерно от 10 до 1 А. И во всем этом диапазоне токов мы наблюдали устойчивую модуляцию. Поведение тока на стадии горения неплохо описывается зависимостью

$$j(t) = (E - U_b)(1/R + t/L); \quad t < t_b,$$

где U_b — напряжение горения; t_b — время горения разряда. Изменение индуктивности оказывает сильное влияние на t_b , в то время как влияние емкости на t_b выражено слабо.

После обрыва тока диод имеет высокую электропрочность, так что выброс напряжения на индуктивности может существенно превосходить приложенное напряжение. Это позволяет использовать диод-модулятор в схеме широтно-импульсного преобразования.

Было исследовано влияние величины межэлектродного зазора d на процесс модуляции при фиксированном давлении пара цезия.

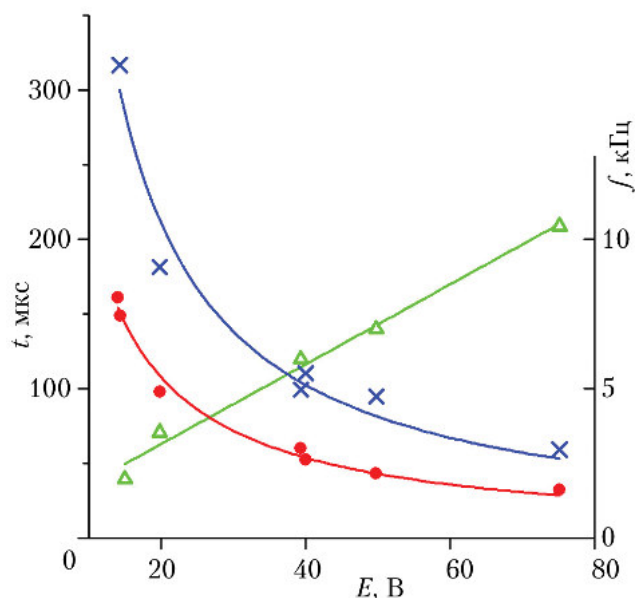


Рис. 4. Зависимости времени проводящего (●) и запертого (×) состояний и частоты модуляции (Δ) от E
 Примечание. Параметры режима: $P_{Cs} = 2,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; $P_{Ba} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; $T_E = 1\ 315$ °С; $d = 2$ мм; $R = 20$ Ом; $L = 75$ мкГн; $C = 2$ мкФ.

Результаты представлены на рис. 5. Видно, что уменьшение d приводит к существенному уменьшению длительности горения разряда. С ростом d растет величина выброса напряжения на диоде ($U^M - E$). Это связано с тем, что с ростом d увеличивается уровень тока перед обрывом. Заметное влияние величины межэлектродного зазора на длительность горения и величину напряжения после обрыва указывает на то, что модуляция тока определяется процессами в основном промежутке. Однако наличие модуляции при величинах d , существенно меньших критического для данного давления пара цезия, свидетельствует о сложности процесса зажигания разряда в приборе.

Можно предположить, что зажигание разряда в основном промежутке инициируется зажиганием вспомогательного разряда в полости между эмиттером и кольцевым электродом (экраном). Эта гипотеза может объяснить, почему существенное уменьшение величины межэлектродного зазора не приводило к прекращению зажигания разряда, а незначительное уменьшение $P \cdot d$ за счет уменьшения давления пара цезия — приводило. Действительно, характерный размер вспомогательного разряда d_a , определяемый расстоянием между боковой поверхностью эмиттера и экраном, равен 2 мм. При давлениях $P_{Cs} > 1,15 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., когда наблюдается модуляция, он удовлетворяет условию $P_{Cs} d_a > (P \cdot d)_0$. Поэтому разряд зажигается независимо от величины основного зазора. Поступление ионов из полости между эмиттером и экраном приводит к уменьшению критического значения $P \cdot d$, и зажигание оказывается

возможным и в основном промежутке. Влиянием указанного вспомогательного разряда на модуляцию тока можно объяснить и тот факт, что минимальная плотность тока в диоде, при которой еще возникает явление обрыва тока, оказалось на порядок ниже, чем критическая плотность тока в триоде [9, 10].

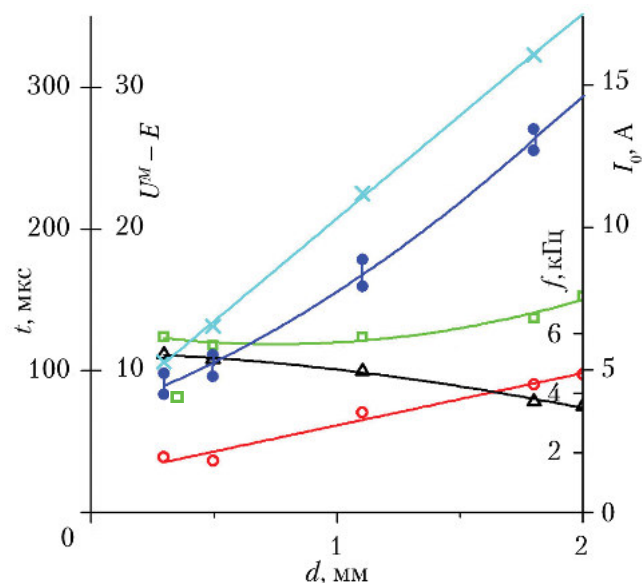


Рис. 5. Зависимости времен проводящего (○) и запертого состояний (□), частоты модуляции (Δ), выброса напряжения (●) и тока перед обрывом (×) от величины межэлектродного зазора d

Примечание. Параметры режима: $P_{Cs} = 2,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; $P_{Ba} = 4,8 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; $T_E = 1\ 339$ °С; $R = 20$ Ом; $L = 75$ мкГн; $C = 2$ мкФ; $E = 26$ В.

Было исследовано влияние магнитного поля (как поперечного, так и продольного) на процесс модуляции. Показано, что наложение поперечного магнитного поля позволяет управлять задержкой зажигания разряда. Сильное воздействие поля на процесс модуляции (при фиксированном значении E) происходит примерно при одних и тех же значениях напряженности поля и не зависит от величины d . Это связано с тем, что магнитное поле действует в основном на разряд во вспомогательном промежутке, где характерное расстояние в ходе эксперимента не изменяется. Аналогичная картина наблюдается и с воздействием продольного поля.

Была исследована зависимость длительности проводящего состояния от плотности разрядного тока в приборе без вспомогательного разряда. В этом приборе экранирующее эмиттер кольцо находилось под плавающим потенциалом, $d = 1,5$ мм, а диаметр электродов составлял 30 мм. Наблюдалась полная модуляция тока с плотностью 10...20 А/см². В отличие от прибора, описанного выше, здесь самопроизвольный обрыв тока наступал при превышении разрядным током критического

значения j_{cr} , величина которого прямо пропорциональна давлению пара цезия. При $j < j_{cr}$ наблюдалось устойчивое горение разряда. Также обнаружено, что отсутствие вспомогательного разряда приводит к сужению диапазона модулируемых токов за счет повышения его нижней границы.

На рис. 6 приведены зависимости длительности проводящего состояния t_b от плотности разрядного тока j для разных давлений пара цезия в отсутствие реактивных элементов во внешней цепи. Эти зависимости неплохо описываются выражением

$$t_b = q / (j - j_0),$$

где q — константа, определяемая давлением пара цезия.

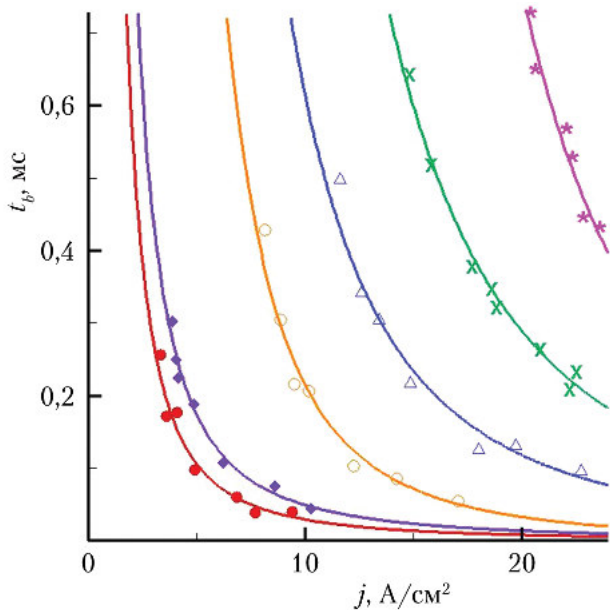


Рис. 6. Зависимости $t_b(j)$ в приборе без вспомогательного разряда при $P_{Ba} = 5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и различных давлениях пара цезия:

- — $P_{Cs} = 7,3 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., $T_E = 1470$ °C, $T_C = 860$ °C, $q = 0,23$ мКл/см², $j_{cr} = 2,51$ А/см²;
- ◆ — $P_{Cs} = 8,4 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., $T_E = 1280$ °C, $T_C = 820$ °C, $q = 0,4$ мКл/см², $j_{cr} = 2,6$ А/см²;
- — $P_{Cs} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $T_E = 1440$ °C, $T_C = 850$ °C, $q = 0,6$ мКл/см², $j_{cr} = 6,9$ А/см²;
- △ — $P_{Cs} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $T_E = 1290$ °C, $T_C = 830$ °C, $q = 1,3$ мКл/см², $j_{cr} = 8,8$ А/см²;
- × — $P_{Cs} = 3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $T_E = 1260$ °C, $T_C = 800$ °C, $q = 2,6$ мКл/см², $j_{cr} = 10,9$ А/см²;
- * — $P_{Cs} = 4,4 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $T_E = 1500$ °C, $T_C = 890$ °C, $q = 3,2$ мКл/см², $j_{cr} = 16,01$ А/см²

Наличие экрана позволяет реализовать дополнительную возможность управления процессом модуляции. Предпосылкой для такой возможности является то, что изменение потенциала экрана может изменить условия отбора ионов из полости на стенки и, таким образом, повлиять на процесс модуляции. Для исследования этого вопроса были поставлены специальные эксперименты по изучению влияния

параметров потенциала экрана U_s (относительно эмиттера) на процесс модуляции тока. Обнаружено, что потенциал экрана, прежде всего, влияет на зажигание разряда, облегчая его при $U_s < 0$. Таким образом, путем изменения потенциала экрана можно слабыми сигналами воздействовать на момент зажигания разряда.

Проведены эксперименты с подачей на экран относительно эмиттера короткого импульса напряжения длительностью $t_p \sim 10$ мкс с регулируемым временным сдвигом относительно начала процесса. Оказалось, что подача импульса на экран, когда диод находится в запертом состоянии, может инициировать разряд до момента его естественного зажигания. Однако существует интервал времени t_n , в течение которого не удастся инициировать зажигание разряда. Его продолжительность зависит от амплитуды и полярности управляющего импульса. Подача отрицательного импульса любой амплитуды всегда облегчает условия зажигания разряда. То же самое наблюдается и при подаче импульса положительной полярности небольшой амплитуды (~6...10 В). Однако, при большой амплитуде импульса положительной полярности (15...20 В) не удастся инициировать основной разряд. Таким образом, с помощью небольшого по амплитуде и длительности импульса, подаваемого на экран, можно управлять процессом модуляции. Сам факт возможности такого управления модуляцией может быть использован для синхронизации работы двух модуляторов, которые в инверторе должны работать в противофазе.

Таким образом, обнаруженный в термоэмиссионном диоде с цезий-бариевым наполнением режим полной модуляции тока, а также возможность управления параметрами модуляции (плотностью критического тока, частотой, длительностью проводящего и запертого состояний) открывают перспективу использования такого ключевого элемента в системах преобразования напряжения ТЭП. Частоты лежат в диапазоне от единиц до десятков килогерц. Нижняя граница диапазона определяется условием стабильности длительности проводящего и запертого состояний, а верхняя — временем перехода в запертое состояние, которое в наших экспериментах оказалось ~1 мкс. Последний параметр является одним из факторов, определяющих КПД преобразования, величина которого зависит от отношения длительности переходных процессов к длительности проводящего (и/или запертого) состояния. Главным источником потерь в диоде, определяющем КПД преобразования (при условии, что длительность

переходных процессов существенно меньше длительности проводящего/запертого состояний), является величина падения напряжения $U_{\text{разр}}$ на разрядном промежутке. Она в наших экспериментах составила 4...6 В. Очевидно, что при указанных значениях падения напряжения такие ключевые элементы целесообразно использовать в относительно высоковольтных системах преобразования напряжения. В частности, при ЭДС термоэмиссионных реакторов-преобразователей $U_{\text{ТРП}} = 100$ В величина КПД может достигать $\eta = U_{\text{разр}}/U_{\text{ТРП}} = 94...96\%$. В то же время, обнаруженная экспериментально зависимость падения напряжения разряда от температуры катода (снижение напряжения разряда при повышении температуры эмиттера) позволяет надеяться на возможность (и указывает пути) повышения КПД преобразователя, например, за счет применения материалов эмиттера с низкой работой выхода, развития его поверхности и др. Несомненно, проведение комплексной оптимизации параметров модулятора с учетом особенностей схемно-технических решений должно стать приоритетной задачей будущих исследований, направленных на повышение эффективности такого рода преобразователей.

Заключение

В результате экспериментальных исследований показана возможность осуществления полной модуляции тока в термоэмиссионном кнудсеновском диоде. В отличие от аналогичных устройств, в которых для управления процессом модуляции служит сетка, модуляция тока в диоде осуществляется за счет развития электронной неустойчивости и образования нелинейных структур в плазме.

Образование нелинейных структур в плазме кнудсеновского разряда оказывается возможным благодаря обмену энергией между заряженными частицами и электрическим полем. Особенно интенсивно этот обмен происходит на быстрой стадии процесса (стадии обрыва тока) и инициируется развитием электронной неустойчивости Бурсиана–Пирса. Именно этой стадией определяется высокая скорость переходного процесса, а узкие фронты импульсов тока, в свою очередь, обеспечивают высокий КПД процесса модуляции.

Список литературы

1. Грязнов Г.М. Космическая атомная энергетика и новые технологии (Записки директора) / М.: ФГУП «ЦНИИАтоминформ», 2007. 136 с.

2. Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе // Атомная энергия. 1989. Т. 66. № 6. С. 371–373.

3. Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием — «Ромашка» и «Енисей») / Под ред. Пономарева-Степного Н.Н. М.: ИздАТ, 2012. 203 с.

4. Синявский В.В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных электрогенерирующих сборок / М.: Энергоатомиздат, 2000. 378 с.

5. Ярыгин В.И., Ружников В.А., Синявский В.В. Космические и наземные ядерные энергетические установки прямого преобразования энергии. / М.: НИЯУ МИФИ, 2016. 364 с.

6. Кайбышев В.З., Кузин Г.А., Мельников В.М. О возможности использования термоэмиссионного преобразователя для управления током в электрических цепях // ЖТФ. 1972. Вып. 6. Т. 42. С. 1265–1269.

7. Кайбышев В.З., Кузин Г.А. Влияние третьего электрода на обрыв тока в низковольтной дуге // ЖТФ. 1975. Вып. 1. Т. 45. С. 320–328.

8. Каплан В.Б., Марциновский А.М., Мустафаев А.С., Сербин В.И., Ситнов В.И., Эндер А.Я., Юрьев В.Г. Импульсное управление током сильноточного низковольтного разряда на смеси паров цезия и бария // ЖТФ. 1977. Вып. 10. Т. 47. С. 2068–2078.

9. Каплан В.Б., Марциновский А.М., Мустафаев А.С., Ситнов В.И., Эндер А.Я., Юрьев В.Г. Особенности самопроизвольного обрыва тока сильноточного разряда низкого давления в смеси цезия и бария // ЖТФ. 1979. Вып. 3. Т. 49. С. 567–572.

10. Babanin V.I., Kaplan V.B., Kolyshkin I.N., Kuznetsov V.I., Martsinovskii A.M., Mustafaev A.S., Sitnov V.I., and Ender A.Ya. Optical investigations of the spontaneous extinction of the high-current Knudsen arc discharge in Cs-Ba gas mixture // *J. de Physique*. 1979. Col. C7. Т. 40. № 7. P. C7-201–C7-202.

11. Онуфриев В.В., Синявский В.В. Результаты экспериментального исследования высоковольтного термоэмиссионного вентиля с тепловым управлением // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 1. С. 36–42.

12. Авторское свидетельство № 1563488 МКИ H01J17/40. СССР. Способ модуляции тока в газовом разряде сильноточного ключевого элемента. Бабанин В.И., Кольшкин И.Н., Кузнецов В.И., Пашина А.С., Ситнов В.И., Эндер А.Я.; заявитель и патентообладатель — ФТИ им. А.Ф. Иоффе; заявка № 4416030; приоритет от 21.04.1988 // БИ. № 39. 1991. С. 251.

13. Бабанин В.И., Кольшикин И.Н., Кузнецов В.И., Пашина А.С., Ситнов В.И., Эндер А.Я. Развитие структур в ограниченной бесстолкновительной плазме и полная модуляция тока в кнудсеновском разряде // ЖТФ. 1994. Вып. 6. Т. 64. С. 61–82.

14. Ott W. Investigation of cesium plasma diode using an electron beam probing technique // Z. Naturforsch. 1967. V. 22a. № 7. P. 1057–1067.

15. Гвердцители И.Г., Караханов В.Я., Каширский Е.А., Кучеров Р.Я., Оганезов З.А. О механизме колебаний тока в кнудсеновском цезиевом диоде // ЖТФ. 1972. Вып. 1. Т. 42. С. 103–110.

16. Бабанин В.И., Кольшикин И.Н., Кузнецов В.И., Мустафаев А.С., Ситнов В.И., Эндер А.Я. Экспериментальное исследование колебаний тока большой амплитуды в Cs-Ва диоде // ЖТФ. 1982. Вып. 7. Т. 52. С. 1304–1312.

17. Iizuka S., Michelsen P., Rasmussen J.J., Schrittwieser R. Double layer dynamics in a collisionless magnetoplasma // J. Phys. Soc. Jap. 1985. V. 54. № 7. P. 2516–2528.

18. Кузнецов В.И., Эндер А.Я. О нелинейных колебаниях в одномерной ограниченной кнудсеновской плазме // ЖТФ. 1977. Вып. 11. Т. 47. С. 2237–2246.

19. Кузнецов В.И., Эндер А.Я. Особенности электронной стадии колебательного процесса в кнудсеновском диоде с поверхностной ионизацией // ЖТФ. 1981. Вып. 11. Т. 51. С. 2250–2259.

20. Кузнецов В.И., Эндер А.Я. Расчет нелинейных самосогласованных колебаний в кнудсеновском диоде с поверхностной ионизацией. Исследование функции распределения ионов

по скоростям // ЖТФ. 1983. Вып. 12. Т. 53. С. 2329–2338.

21. Бурсиан В.Р., Павлов В.И. Об одном частном случае влияния объемного заряда на прохождение потока электронов в пустоте // Журнал Русского физико-химического общества. 1923. Вып. 1–3. Т. 55. С. 71.

22. Pierce J.R. Limiting stable current in electron beams in the presence of ions // J. Appl. Phys. 1944. V. 15. № 10. P. 721–726.

23. Ender A.Ya., Kuznetsov V.I., Schamel H., Akimov P.V. Switching of nonlinear plasma diodes. i. Analytic theory // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. № 10. P. 3212–3223.

24. Klinger T., Greiner F., Rohde A., Piel A. Nonlinear dynamical behavior of thermionic low pressure discharges. ii. Experimental // Phys. Plasmas. 1995. V. 2. № 6. P. 1822–1836.

25. Бабанин В.И., Эндер А.Я. Расчет потенциала поджига кнудсеновской дуги в газонаполненном диоде // ЖТФ. 1971. Вып. 4. Т. 41. С. 720–727.

26. Бабанин В.И., Эндер А.Я. Численное исследование нестационарных кинетических процессов начальной стадии кнудсеновского разряда в газонаполненном диоде // ЖТФ. 1976. Вып. 6. Т. 46. С. 1240–1249.

27. Бабанин В.И., Эндер А.Я. Особенности поджига кнудсеновского разряда с учетом максимума на зависимости сечения ионизации от энергии электронов // ЖТФ. 1981. Вып. 11. Т. 51. С. 2260–2270. Статья поступила в редакцию 17.11.2016 г.

Reference

1. Gryaznov G.M. Kosmicheskaya atomnaya energetika i novye tekhnologii (Zapiski direktora) [Space atomic power engineering and new technologies (Director notes)]. Moscow, FGUP TsNIIatominform publ., 2007. 136 p.

2. Ponomarev-Stepnoi N.N. Yadernaya energetika v kosmose [Nuclear power in space]. Atomnaya energiya, 1989, vol. 66, no. 6, pp. 371–373.

3. Kukharkin N.E., Ponomarev-Stepnoi N.N., Usov V.A. Kosmicheskaya yadernaya energetika (yadernye reaktory s termoelektricheskimi i termoemissionnymi preobrazovaniyami — «Romashka» i «Enisei») [Space nuclear power (nuclear reactors with thermoelectric and thermionic conversion — Romashka and Enisei)]. Ed. Ponomarev-Stepnoi N.N. Moscow, Izdat publ., 2012. 203 p.

4. Sinyavskiy V.V. Metody i sredstva eksperimental'nykh issledovaniy i reaktornykh ispytaniy termoemissionnykh elektrogeneriruyushchikh sborok [Methods and means of experimental studies and the reactor tests of thermionic power generating assemblies]. Moscow, Energoatomizdat publ., 2000. 378 p.

5. Yarygin V.I., Ruzhnikov V.A., Sinyavskiy V.V. Kosmicheskie i nazemnye yadernye energeticheskie ustanovki pryamogo preobrazovaniya energii [Space and ground nuclear power plants for direct power conversion]. Moscow, NIYaU MIFI publ., 2016. 364 p.

6. Kaibyshev V.Z., Kuzin G.A., Mel'nikov V.M. O vozmozhnosti ispol'zovaniya termoemissionnogo preobrazovatelya dlya upravleniya tokom v elektricheskikh tsepyakh [The capability of using a thermionic converter to control the current in electric circuits]. ZhTF, 1972, issue 6, vol. 42, pp. 1265–1269.

7. Kaibyshev V.Z., Kuzin G.A. Vliyaniye tret'ego elektroda na obryv toka v nizkovol'tnoi duge [The effect of the third electrode on the current break in the low-voltage arc]. ZhTF, 1975, issue 1, vol. 45, pp. 320–328.

8. Kaplan V.B., Martsinovskii A.M., Mustafaev A.S., Serbin V.I., Sitnov V.I., Ender A.Ya., Yur'ev V.G. Impul'snoye upravleniye tokom sil'notochnogo nizkovol'tnogo razryada na smesi parov tseziya i bariya

[The pulse current control of the high-current low-voltage discharge in a mixture of barium and cesium vapor]. *ZhTF*, 1977, issue 10, vol. 47, pp. 2068–2078.

9. Kaplan V.B., Martsinovskii A.M., Mustafaev A.S., Sitnov V.I., Ender A.Ya., Yur'ev V.G. *Osobennosti samoproizvol'nogo obryva toka sil'notochnogo razryada nizkogo davleniya v smesi tseziya i bariya* [Features of the spontaneous current break of the high-current low-pressure discharge in a mixture of cesium and barium]. *ZhTF*, 1979, issue 3, vol. 49, pp. 567–572.

10. Babanin V.I., Kaplan V.B., Kolyshkin I.N., Kuznetsov V.I., Martsinovskii A.M., Mustafaev A.S., Sitnov V.I., and Ender A.Ya. *Optical investigations of the spontaneous extinction of the high-current Knudsen arc discharge in Cs-Ba gas mixture*. *J. de Physique*, 1979, col. C7, vol. 40, no. 7, pp. C7-201–C7-202.

11. Onufriev V.V., Sinyavskii V.V. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya vysokovol'tnogo termoemissionnogo ventilya s teplovym upravleniem* [The results of experimental studies of the high-voltage thermionic valve with heat control]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2009, no. 1, pp. 36–42.

12. *Avtorskoe svidetel'stvo № 1563488 MKI H01J17/40. SSSR. Sposob modulyatsii toka v gazovom razryade sil'notochnogo klyuchevogo elementa* [The method of the current modulation in the gas discharge of a high-current key element]. Babanin V.I., Kolyshkin I.N., Kuznetsov V.I., Pashchina A.S., Sitnov V.I., Ender A.Ya.; the applicant and the patent owner – FTI im. A.F. Ioffe; application 4416030; priority of 21.04.1988. *BI*, 1991, no. 39, pp. 251.

13. Babanin V.I., Kolyshkin I.N., Kuznetsov V.I., Pashchina A.S., Sitnov V.I., Ender A.Ya. *Razvitie struktur v ogranichennoi besstolknovitel'noi plazme i polnaya modulyatsiya toka v knudsenovskom razryade* [The development of structures in the bounded collisionless plasma and the total current modulation in the Knudsen discharge]. *ZhTF*, 1994, issue 6, vol. 64, pp. 61–82.

14. Ott W. *Investigation of cesium plasma diode using an electron beam probing technique*. *Z. Naturforsch*, 1967, vol. 22a, no. 7, pp. 1057–1067.

15. Gverdtsiteli I.G., Karakhanov V.Ya., Kashirskii E.A., Kucherov R.Ya., Oganezov Z.A. *O mekhanizme kolebanii toka v knudsenovskom tsezievom diode* [The mechanism of the current oscillations in the Knudsen cesium diode]. *ZhTF*, 1972, issue 1, vol. 42, pp. 103–110.

16. Babanin V.I., Kolyshkin I.N., Kuznetsov V.I., Mustafaev A.S., Sitnov V.I., Ender A.Ya. *Eksperimental'noe issledovanie kolebanii toka bol'shoi amplitudy v Cs-Ba diode* [Experimental studies of the large-amplitude current oscillations in Cs-Ba diode]. *ZhTF*, 1982, issue 7, vol. 52, pp. 1304–1312.

17. Iizuka S., Michelsen P., Rasmussen J.J., Schrittwieser R. *Double layer dynamics in a collisionless magnetoplasma*. *J. Phys. Soc. Jap*, 1985, vol. 54, no. 7, pp. 2516–2528.

18. Kuznetsov V.I., Ender A.Ya. *O nelineinykh kolebaniyakh v odnomernoi ogranichennoi knudsenovskoi plazme* [Nonlinear oscillations in a one-dimensional bounded Knudsen plasma]. *ZhTF*, 1977, issue 11, vol. 47, pp. 2237–2246.

19. Kuznetsov V.I., Ender A.Ya. *Osobennosti elektronnoi stadii kolebatel'nogo protsessa v knudsenovskom diode s poverkhnostnoi ionizatsiei* [Features of the electronic stage of the oscillatory process in the Knudsen diode with surface ionization]. *ZhTF*, 1981, issue 11, vol. 51, pp. 2250–2259.

20. Kuznetsov V.I., Ender A.Ya. *Raschet nelineinykh samosoglasovannykh kolebanii v knudsenovskom diode s poverkhnostnoi ionizatsiei. Issledovanie funktsii raspredeleniya ionov po skorostyam* [Calculations of nonlinear self-consistent oscillations in the Knudsen diode with surface ionization. Study of the velocity ion distribution function]. *ZhTF*, 1983, issue 12, vol. 53, pp. 2329–2338.

21. Bursian V.R., Pavlov V.I. *Ob odnom chastnom sluchae vliyaniya ob "emnogo zaryada na prokhozhdenie potoka elektronov v pustote* [One particular case of the effect of the bulk charge on the electron flow passage in vacuum]. *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva*, 1923, issue 1–3, vol. 55, p. 71.

22. Pierce J.R. *Limiting stable current in electron beams in the presence of ions*. *J. Appl. Phys.*, 1944, vol. 15, no. 10, pp. 721–726.

23. Ender A.Ya., Kuznetsov V.I., Schamel H., Akimov P.V. *Switching of nonlinear plasma diodes. i. Analytic theory*. *Phys. Plasmas*, 2004, vol. 11, no. 10, pp. 3212–3223.

24. Klinger T., Greiner F., Rohde A., Piel A. *Nonlinear dynamical behavior of thermionic low pressure discharges. ii. Experimental*. *Phys. Plasmas*, 1995, vol. 2, no. 6, pp. 1822–1836.

25. Babanin V.I., Ender A.Ya. *Raschet potentsiala podzhiga knudsenovskoi dugi v gazonapolnennom diode* [The calculation of the ignition potential of the Knudsen arc in the gas filled diode]. *ZhTF*, 1971, issue 4, vol. 41, pp. 720–727.

26. Babanin V.I., Ender A.Ya. *Chislennoe issledovanie nestatsionarnykh kineticheskikh protsessov nachal'noi stadii knudsenovskogo razryada v gazonapolnennom diode* [The numerical analysis of unsteady kinetic processes of the initial stage of the Knudsen discharge in the gass-filled diode]. *ZhTF*, 1976, issue 6, vol. 46, pp. 1240–1249.

27. Babanin V.I., Ender A.Ya. *Osobennosti podzhiga knudsenovskogo razryada s uchetom maksimuma na zavisimosti secheniya ionizatsii ot energii elektronov* [Features of the Knudsen discharge ignition with regard to the maximum dependence of the ionization section on the electron energy]. *ZhTF*, 1981, issue 11, vol. 51, pp. 2260–2270.