УДК 537.538

А.С.МУСТАФАЕВ, *д-р физ.-мат. наук, профессор, alexmustafaev@yandex.ru*
С.А.ВЫСОЦКИЙ, *студент, ассистент профессора, corinth@rambler.ru*
М.А.ЧЕРКАСОВА, *студентка, ассистент профессора, margaret_90@mail.ru*
М.А.МАМЕЛЬКИНА, *студентка, ассистент профессора,mamelia@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

A.S.MUSTAFAEV, *Dr. in phys.& math., professor, alexmustafaev@yandex.ru*
S.A.VYSOTSKIY, *student, professor's assistant, corinth@rambler.ru*
M.A.CHERKASOVA, *student, professor's assistant, margaret_90@mail.ru*
M.A.MAMELCKINA, *student , professor's assistant, mamelia@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

ЯВЛЕНИЕ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ОБРЫВА РАЗРЯДНОГО ТОКА И СОЗДАНИЕ ПОЛНОСТЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Впервые в мире разработаны методы диагностики анизотропной плазмы. Созданы современные цифровые измерительно-вычислительные комплексы, плазменные установки, приборы плазменной энергетики нового поколения и специальные математические программы для фундаментальных исследований анизотропной плазмы. Разработки СПГГИ (ТУ) используются для решения проблем плазменной энергетики.

Ключевые слова: плазма, ключевые элементы, обрыв тока, модификация катодов.

THE PHENOMENON OF SPONTANEOUS TERMINATION OF THE DISCHARGE CURRENT AND THE ESTABLISHMENT OF FULLY-MANAGED KEY ELEMENTS OF THE PLASMA

For the first time magnetic and probe technique for diagnostics of anisotropic plasma have been worked out. Contemporary digital measuring methods, plasma plants and new generation devices of plasma energetics as well as special mathematical programs for fundamental investigations of anisotropic plasma were created. The inventions of Saint Petersburg Mining Institute are used for solving of plasma energetic problems.

Key words: plasma, the key elements, current breakage, modification of cathodes/

Космическая ядерная энергетика является сегодня одним из важнейших факторов обороноспособности, экономики и политики ведущих стран мира. Достижения России в этой области во многом зависят от успехов в создании плазменных термоэмиссионных реакторов-преобразователей нового поколения.

Для решения проблем плазменной энергетики при создании современных орбитальных станций и боевых космических аппаратов нового поколения необходимы эффективные электронные устройства, способные работать в условиях космоса, магнитных полей, высокого уровня радиации и температуры среды выше 1000 К. Таким экстремальным требованиям могут удовлетворить лишь приборы плазменной электроники, использующие анизотропную плазму.

Широкое внедрение плазменных приборов в промышленность сдерживается сегодня рядом нерешенных физико-технических проблем. Важное место среди них принадлежит приэлектродной проблеме, решение которой связано с пониманием процессов, происходящих на поверхности электродов и в приэлектродной плазме.

В основу методологии исследования анизотропной плазмы положен принцип модели-

рования физических явлений, включающий создание модельных объектов, измерение параметров анизотропной плазмы, построение самосогласованных теоретических моделей и сравнение результатов теории с экспериментом. Моделировались кнудсеновская плазма с поверхностной ионизацией и пучковая плазма с объемной ионизацией.

Поясним принцип моделирования на примере анизотропной плазмы с поверхностной ионизацией. Плазма создается в условиях кнудсеновского цезий-бариевого диода с поверхностной ионизацией (КДПИ). Ионы рождаются за счет поверхностной ионизации атомов цезия, поступающих из межэлектродного промежутка; электроны – за счет термоэлектронной эмиссии. Анод, поглощающий заряженные частицы, располагается параллельно катоду на расстоянии, меньшем длины свободного пробега электронов. Силы, действующие на заряженные частицы в плазме, обусловлены самосогласованным электрическим полем. Изменением давления паров бария регулируется работа выхода катода, что позволяет в широких пределах варьировать концентрации заряженных частиц, напряженность электрического поля в прикатодном слое, направленную скорость электронов, исследовать условия возникновения двойных потенциальных слоев в плазме и их влияние на кинетику процессов переноса тока [1, 3].

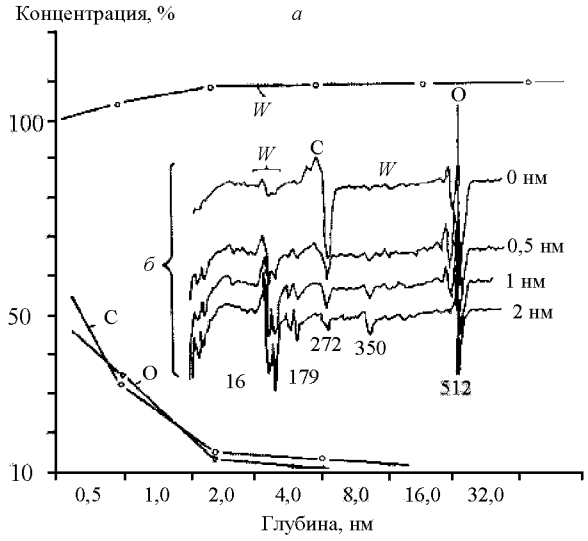


Рис1. Распределение элементарного состава (*а*) и характерный вид спектров (*б*) по глубине покрытия $W_{фт}$ [111] по данным ЭОС: направление анализа – [121]

Это делает КДПИ хорошей моделью приэлектродной анизотропной плазмы с поверхностной ионизацией.

Одна из важных проблем катодной электроники состоит в создании термоэмиссионных катодов, способных обеспечить при температуре порядка 2300 К плотность эмиссионного тока около 100 А/см^2.

При исследовании КДПИ были использованы следующие методы:

1) электронная Оже-спектроскопия (ЭОС) и электронная ионизационная спектроскопия – для анализа элементарного состава поверхности и приповерхностной области;

2) дифракция медленных электронов – для кристаллографического анализа поверхностных систем на электродах;

3) термоэмиссионная электронная микроскопия – для анализа эмиссионной неоднородности электродов;

4) лазерная масс-спектрометрия – для послойного изучения элементарного состава электродов методом лазерного микроанализа.

Совместно с Физико-энергетическим институтом (г.Обнинск) нами выполнены исследования эмиссионно-адсорбционных характеристик, кристаллической структуры монокристаллических материалов (рис.1). В СПГГИ (ТУ) создан цифровой измерительный комплекс для анализа структуры и эмиссионных свойств поверхности термокатодов и исследования плазменных преобразователей нового поколения.

Исследования показали, что модифицирование свойств поверхности термоэмиссионных катодов атомами Ba и Cs решает поставленную задачу. При этом следует использовать монокристаллические катоды из тугоплавких металлов W, W-Re, Mo и Ta с ориентацией по грани [110]. Поскольку грань (110) имеет наиболее плотную упаковку атомов, она же бладает наиболее высокой вакуумной работой выхода электрона ($W(110) = 5{,}35$ эВ) и, следовательно, на ней адсорбция атомов бария будет максимальна. Но для наиболее эффективной адсорбции атомов бария на поверхности электродов необходимо проводить вакуумный отжиг.

В ходе исследований было получено характерное время существования плазмы – не-

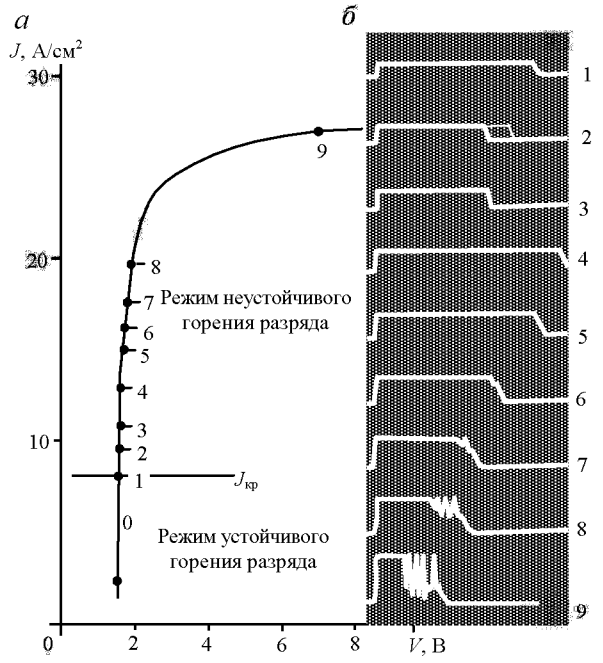


Рис.2. Вольт-амперная характеристика ключевого элемента (*а*) и форма импульсов разрядного тока в режиме неустойчивого горения разряда (*б*)

Точкам 1-9 соответствуют значения тока в импульсе, А/см^2: 1 – 8,1; 2 – 9,5; 3 – 10,8; 4 – 12,8; 5 – 14,9; 6 – 16,2; 7 – 17,6; 8 – 19,6; 9 – 27; потенциал сетки относительно катода u_g близок к нулю, $T_к$ = 1700 К; $p_{Cs} = 8 \cdot 10^{-4}$ тор; $p_{Ba} = 2{,}6 \cdot 10^{-4}$ тор; масштаб времени для импульсов 1-3 и 4-9 – 20 и 50 мкс/см

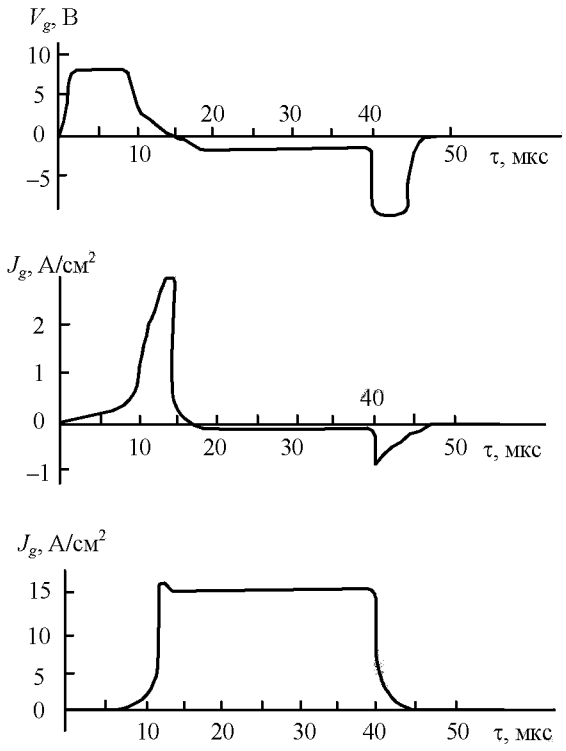


Рис.3. Изменение во времени управляющих импульсов V_g сеточного J_g и анодного J_a токов; $p_{Cs} = 6 \cdot 10^{-3}$ тор; $p_{Ba} = 8 \cdot 10^{-3}$ тор; $T_к$ = 1630 К; T_g = 1015 К; E_A = 30 В; V_0 = 1,1 В

сколько микросекунд, что намного превышает время пробега атомов и ионов между электродами. Установлено что указанная особенность разряда в парах бария и цезия связана с количеством адсорбированных на электродах атомов цезия.

Обнаружено, что критическая плотность тока близка к плотности тока, которая может быть скомпенсирована при полной ионизации атомов цезия. Время существования плазмы в зазоре убывает по мере увеличения плотности тока выше значений, соответствующих критическому току. Происходит самопроизвольный обрыв тока [2].

Рассмотрим вольт-амперную характеристику (ВАХ) цезий-бариевого ключевого элемента для одного из типичных режимов, в которых наблюдается самопроизвольный обрыв тока (рис.2). На участке 0-1 разряд устойчив и вольт-амперная характеристика может быть зарегистрирована статическими методами. В точке 1 плотность разрядного тока достигает предельного значения, при котором разряд теряет устойчивость и самопроизвольно гаснет через некоторое время после поджига положительным сеточным импульсом (рис.2, *б*, 1). При дальнейшем увеличении анодного напряжения (или уменьшении анодной нагрузки), когда значение тока после поджига разряда оказывается больше предельного, разряд переходит в режим неустойчивого горения. Участок ВАХ выше точки 1 может быть зарегистрирован только импульсным методом.

Явление самопроизвольного обрыва тока может являться основой для эффективного способа модуляции тока управляющей сеткой (рис.3). Чем больше эмиссионная способность катода, обеспечиваемая слоями бария, и меньше давление паров цезия, тем более эффективно сеточное управление. Наилучшие параметры модуляции были получены при давлении паров цезия, равном $6 \cdot 10^{-3}$ тор. При этом модулировалось напряжение 60 В и плотность тока 15 А/см^2, т.е. преобразуемая мощность

составила 0,9 кВт/см^2. Амплитуда гасящего сеточного импульса составила 15 В, а поджигающего 10 В. Падение напряжения в проводящем состоянии равнялось 2,5 В, т.е. потери мощности на поддержание разряда в ключе не превышали 3 %.

Результаты исследований могут быть использованы для создания автономных источников энергии глубоководных аппаратов с целью изучения океанического дна, энергетических систем космических аппаратов, обеспечивающих полеты в глубокий космос.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мустафаев А.С.* Методы диагностики анизотропной плазмы в термоэмиссионных приборах…: Автореф. дис. … д-ра физ.-мат. наук / ОНТИ ФТИ. Обнинск. 2004, 63 с.

2. *Мустафаев А.С.* Метод исследования анизотропной астрофизической плазмы / А.С.Мустафаев, А.В.Морин // Тр. Международ. конференции по физике низкотемпературной плазмы. 2007. Том 1. С.79-83.

3. Thermionic converter in the mode with surface ionisation obtained using on extended surface cathode/ V.I.Babanin, A.S.Mustafaev, A.Ya.Ender all // Contr. pap. Intern. Thermionic Convertion specialist meeting, Eindhoven. FRG. 1975. № 10. P.6.

REFERENCES

1. *Mustafaev A.S.* Diagnostic methods of anisotropic plasmas on thermionic energetic equipments: Referat …Doctor of Phys.-math. Sci / ONTI FEI. Obninsk, 2003. 63 p.

2. *Mustafaev A.S., Morin A.V.* Investigation method of anisotropic astrophysical plasmas // Contr. Papers of International Conference of low-temperature plasma physics. 2007. V.1. P.79-83/

3. *Babanin V.I., Mustafaev A.S., Ender A.Ya. et all.* Thermionic converter in the mode with surface ionizations obtained using on extended surface cathode // Contr. pap. of Intern. Thermionic Convertion specialist meeting, Eindhoven. FRG. 1975. № 10. P. 6.

Научный руководитель д-р физ.-мат. наук, профессор *А.С.Мустафаев*