УДК 537.538

А.С.МУСТАФАЕВ, *д-р физ.-мат. наук, профессор, alexmustafaev@yandex.ru*
К.И.СИДОРОВА, *студентка, ksu_s1991@mail.ru*
М.А.МАМЕЛЬКИНА, *студентка, mamelia26@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

A.S.MUSTAFAEV, *Dr. in phys.& math., professor, alexmustafaev@yandex.ru*
K.I.SIDOROVA, *student, ksu_s1991@mail.ru*
M.A.MAMELKINA, *student, mamelia26@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Фундаментальные исследования в области плазменной энергетики открыли новую возможность достижения высокой эффективности термоэмиссионных преобразователей тепловой энергии в электрическую (ТЭП). Межэлектродная среда таких ТЭП содержит конденсат возбужденных состояний атомов цезия (КВС), состоящий из 1000 возбужденных атомов цезия, которые могут находиться в форме упорядоченного плазменного кристалла (ридберговского вещества).

В лабораторных прототипах ТЭП с КВС цезия в режиме генерирования электрической энергии получено значение КПД ~25 % при температуре эмиттера T_E ~1600 К и температуре коллектора T_C ~700 К. Уникальное сочетание низкого значения T_E с высоким КПД термоэмиссионной системы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую открывает перспективу внедрения этих систем в наземную автономную малую ядерную энергетику. Основные результаты получены совместно с ГНЦ РФ ФЭИ (Обнинск).

***Ключевые слова*:** нанотехнологии, термоэмиссионная плазменная энергетика.

NANOTECHNOLOGIES IN MODERN PLASMA ENERGETICS

Fundamental research in the field of plasma energetics provides a new opportunity to achieve high efficiency of thermionic converters (TIC). The interelectrode gap of such TICs contains the condensate of excited states (CES), consisting of up to 1000 excited Cs atoms in the form of a plasma crystal (Rydberg matter).

In a laboratory TIC with Cs CES the efficiency of ~25 % was registered by emitter's temperature T_E ~1600 K and collector's temperature T_C ~700 K. A unique combination of low T_E and high efficiency of the system provides a prospect to implement such systems in small nuclear energetics. The results were obtained with SSC RF – Institute for Physics and Power Engineering (Obninsk).

***Key words*:** nanothechnology, thermionic plasma energetics.

Ридберговское вещество. Атомы цезия при энергии возбуждения, близкой к энергии ионизации, увеличивают свои размеры до 10^{-6}-10^{-5} см и при плотности 10^{17}-10^{18} см$^{-3}$ образуют метастабильный КВС со свободным газом валентных электронов. Цезий в состоянии КВС имеет газовую плотность (~10^{17} см$^{-3}$), низкую работу выхода электронов (0,2-0,7 эВ) и высокую электропроводность (~10^{-3} Ом·м). В определенных условиях КВС цезия может находиться в упорядоченной форме за счет образования плазменного кристалла (рис.1).

КВС цезия имеет привлекательные для технических приложений свойства:

• температура плавления 450-550 К;

• внутренняя энергия ~4 эВ/атом;

• время жизни до 100 ч (существенно превосходит время жизни возбужденных атомов).

Это вещество интересно не только как объект физического исследования, но и тем, что условия его образования и ожидаемые свойства таковы, что оно может быть с большой эффективностью использовано в термоэмиссионном преобразователе тепловой энергии в электрическую (ТЭП).

Нами продолжены экспериментальные исследования КВС совместно с ГНЦ РФ ФЭИ (Обнинск).

Цель исследования. Основная цель настоящего этапа НИР – выявление связи условий образования КВС в межэлектродной среде ТЭП с данными исследований элементного состава, структуры и химического состояния атомов на поверхности и в приповерхностной области электродов.

В рамках настоящей работы проводились экспериментальные исследования образцов электродов в вакууме. Перфорированный коллектор представляет собой диск из танталовой фольги с 400 отверстиями диаметром 0,1 мм в центральной области. Перед монтажом коллектор покрывали углеродом путем нанесения коллоидного раствора графита типа «Аквадаг».

Методы исследований. Исследование электродов проводилось на универсальной сверхвысоковакуумной установке для анализа свойств поверхности. В работе использовались следующие нанотехнологические методы:

• электронная Оже-спектроскопия – для анализа элементного состава поверхности;

• дифракция медленных электронов – для кристаллографического анализа поверхности электродов;

• контактная разность потенциалов – для измерения работы выхода электродов;

• спектроскопия полного тока высокого разрешения – модернизированный метод для увеличения точности измерения работы выхода монокристаллов с различной кристаллографической ориентацией;

• магнитный метод термоэмиссионной микроскопии – для анализа степени анизотропии работы выхода электродов и измерения коэффициента отражения электронов;

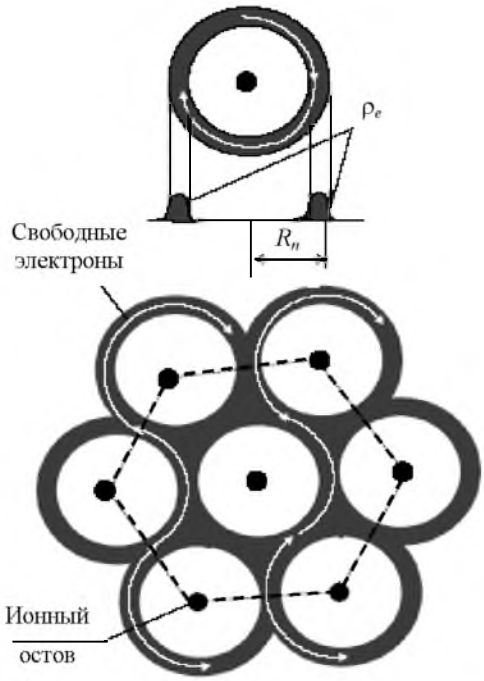


Рис.1. Принципиальная схема образования плазменного кристалла КВС цезия (ридберговского вещества)
R_n – радиус ридберговского атома (n – главное квантовое число); ρ_e – плотность электронов газа

• лазерная масс-спектрометрия – для послойного изучения элементного состава поверхности электродов;

• ядерный микроанализ – для неразрушающего контроля толщины пленок и дефектов кристаллической структуры.

Химический состав поверхности эмиттера. На рис.2 представлены обобщенные данные по концентрации основных элементов в приповерхностных атомных слоях и работе выхода электрона в вакууме эмиттера. Слева на рисунке находится ось концентраций для основных компонентов приповерхностных атомных слоев: Pt, Mo и C. Справа – ось значений работы выхода. Видно, что при низкой (до 1000 К) температуре происходит очистка приповерхностных атомных слоев от примесей, в основном от углерода, и формирование приповерхностного сплава Pt с Mo. При температуре 1200-1700 К наблюдается максимум выделения платины и регистрируются максимальные значения вакуумной работы выхода образца.

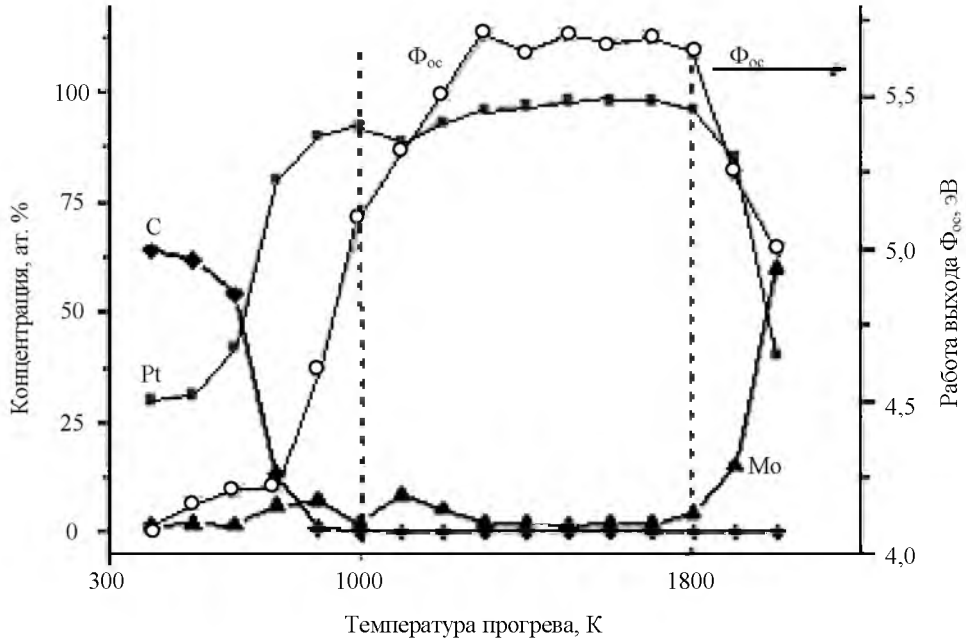


Рис.2. График зависимости элементного состава и вакуумной работы выхода эмиттера от температуры

Таким образом, эмиссионное покрытие на эмиттере при рабочих температурах состоит в основном из платины и имеет вакуумную работу выхода, достаточную для обеспечения стабильного термоэмиссионного тока в парах цезия.

Зависимость работы выхода коллектора от параметра Рейзора. На рис.3 представлена зависимость работы выхода коллектора от параметра Рейзора (отношения температуры эмиттера к температуре цезия). На рисунке кривая 1 соответствует режиму равновесной подачи цезия, а экспериментальные данные 2 – режиму с динамической подачей цезия. При равновесной подаче минимальное значение 1,05, а при динамической 0,97. Минимальное значение достигается при монослое Cs на поверхности коллектора.

Поверхность коллектора. Исследования проведены на аналитической установке японской фирмы JEOL* типа JSM-6700F,

Рис.3. Зависимость работы выхода коллектора (1) от параметра Рейзора (2)

* Экспериментальное изучение возможности образования конденсата возбужденных состояний вещества (ридберговской материи) / В.И.Ярыгин, В.Н.Сидельников, И.И.Касиков и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т.77. Вып.6. С.330-334.

Yarigin V.I., Sidelnikov V.N., Kasikov I.I. et al. Experimental study on the possibility of CES (Rydberg matter) formation // Technical Physics Letters. 2003. Vol.77. Issue 6. P.330-334.

Экспериментальное изучение условий образования и свойств конденсата возбужденных состояний вещества (ридберговской материи) / В.И.Ярыгин, В.Н.Сидельников, И.И.Касиков, В.С.Миронов и др. // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Калуга, 2004. Вып.7. С.219-234.

Yarigin V.I., Sidelnikov V.N., Kasikov I.I., Mironov V.S. et al. Experimental study on the conditions of formation and properties of CES (Rydberg matter) // Works of regional scientific project competition. Kaluga, 2004. Issue 7. P.219-234.

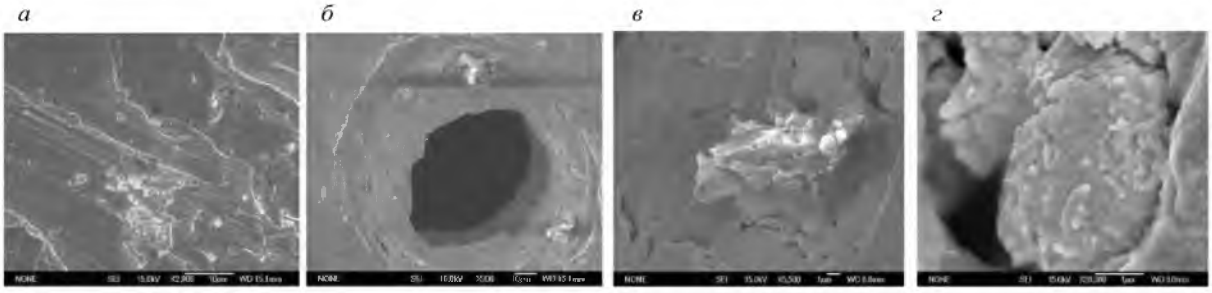
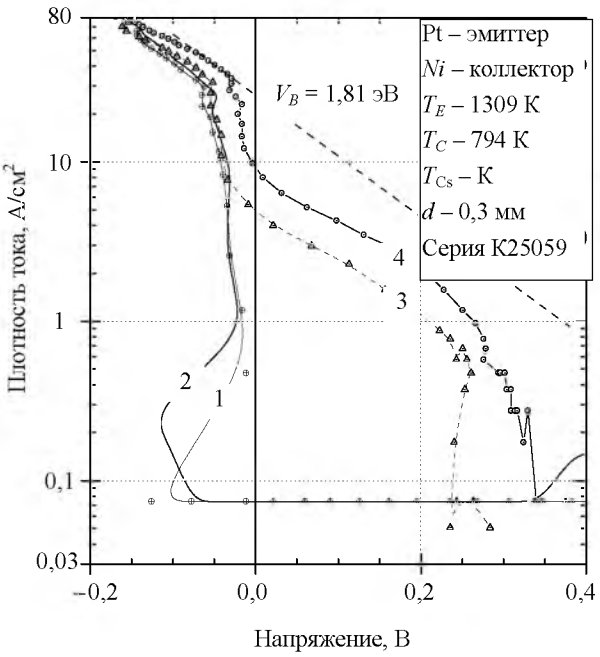
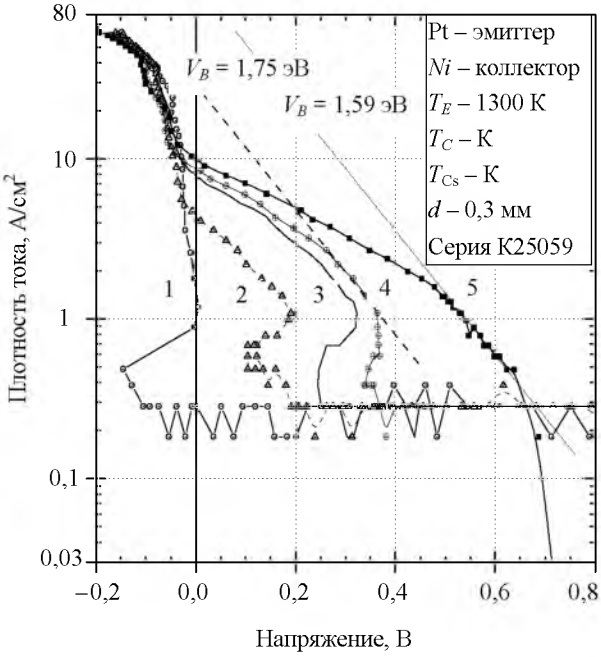


Рис.4. Поверхность коллектора на JSM-6700F



Номер кривой	Время, мин/с	T_E, К	T_C, К	T_{Cs}, К	P_{Cs}, мм рт.ст.
1	00/00	1303	793	644	11,4
2	04/30	1306	793	656	14,6
3	08/11	1306	797	667	18,3
4	15/22	1321	798	673	20,8

Рис.5. Зависимость формы ВАХ от температуры цезиевого резервуара



Номер кривой	Время, мин/с	T_E, К	T_C, К	T_{Cs}, К	P_{Cs}, мм рт.ст.
1	00/00	1302	776	648	12,5
2	04/47	1301	740	653	13,7
3	06/36	1300	726	655	14,5
4	08/22	1290	718	657	15,0
5	15/06	1294	696	662	16,4

Рис.6. Зависимость формы ВАХ от температуры коллектора и цезиевого резервуара

сочетающей возможности растрового электронного микроскопа с модернизированным вариантом методики рентгеновского микроанализа.

Изображения некоторых областей поверхности коллектора представлены на рис.4: *а* – участок поверхности вне перфорированной области коллектора; *в* и *г* – с последовательно возрастающим разрешением детали светлого объекта, который наблюдается справа внизу на периферийной области отверстия *б*. Видно, что на поверхности танталового коллектора наблюдаются единичные объекты с микро- и нанометровыми размерами.

Результаты энергодисперсионного анализа на JSM-6700F показали, что основные элементы в приповерхностном слое коллектора – тантал и углерод.

Вольт-амперные характеристики ТЭП. На предыдущих этапах НИР было установлено, что в результате динамической подачи пара цезия в МЭЗ на ВАХ в области токов ниже 20 А/см^2 присутствуют характерные пологие участки, на которых замечено снижение барьерного индекса вплоть до V_B = 1,6 эВ и работы выхода коллектора до Φ_C = 1,0 эВ.

На рис.5 и 6 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ), иллюстрирующие пологие участки и их изменения в зависимости от температуры коллектора и (или) цезиевого резервуара. Параметры измерений приводятся в таблицах: номер кривой; время, прошедшее после регистрации 1-й ВАХ; температура эмиттера T_E, коллектора T_C, цезиевого резервуара T_{Cs}, по которой рассчитывалось давление пара цезия в тракте высокого давления P_{Cs}.

К традиционному виду ВАХ относятся кривые 1 и 2 (рис.5) и кривая 1 (рис.6). На других кривых на участке от 1 до 10 А/см^2 наклон ВАХ уменьшается, т.е. появляется дополнительный пологий участок ВАХ.

Ход изменения формы ВАХ при постоянной температуре электродов в зависимости от давления пара цезия в тракте его подачи иллюстрирует рис.5. Динамику изменения формы ВАХ при уменьшении T_C и увеличении P_{Cs} (при сближении температур T_C и T_{Cs}) иллюстрирует рис.6.

Выводы

1. Получены сведения по эмиссионно-адсорбционным свойствам, а также микроструктуре и элементному составу поверхности электродов в ТЭП.

2. Подтверждены результаты, доказывающие существование высокоэффективных режимов ТЭП, связанных с возникновением ридберговского вещества в МЭЗ.

3. Обнаружена связь режима подачи пара цезия в МЭЗ с появлением и существованием высокоэффективных характеристик, особенности которых не укладываются в рамки традиционных представлений о работе ТЭП.

В дальнейшем планируются оптические исследования в условиях динамической подачи пара цезия в МЭЗ.