

Экспериментальное изучение возможности образования конденсата возбужденных состояний вещества (Ридберговской материи)

В. И. Ярыгин¹⁾, В. Н. Сидельников, И. И. Касиков, В. С. Миронов, С. М. Тулин

ГНЦ физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского
249033 Обнинск, Калужская обл., Россия

Поступила в редакцию 13 февраля 2003 г.

Представлены результаты экспериментального исследования конденсата возбужденных состояний цезия (Ридберговской материи), возможность образования которого была впервые теоретически предсказана в работах профессора Э. А. Манькина с коллегами из Российского научного центра “Курчатовский институт” и экспериментально обнаружена в работах Л. Холмлида²⁾ с коллегами из Чалмерского университета в Швеции. В термоэмиссионном преобразователе энергии с межэлектродной средой, в которой по данным шведских исследователей образуется Ридберговская материя, нами установлены сходства и отличия в протекании процесса образования конденсата возбужденных состояний цезия по сравнению с экспериментом шведских исследователей.

PACS: 64.60.Mу, 79.40.+z

1. Введение. Атомы щелочных металлов при энергии возбуждения, близкой к энергии ионизации, достигают размеров 10^{-6} – 10^{-5} см. Такие сильно возбужденные атомы при плотности $\sim 10^{17}$ – 10^{18} см⁻³ могут образовать метастабильный конденсат со свободным газом валентных электронов. Возможность существования конденсата возбужденных состояний (КВС) при температуре, равной нулю градусов Кельвина, предсказана в теоретических работах профессора Э. А. Манькина с коллегами из Российского научного центра “Курчатовский институт” [1–3]. Область существования КВС при температурах, отличных от нуля, теоретически определена профессором Г. Э. Норманом [4].

По расчетам, цезиевый КВС при плотности 10^{17} – 10^{18} см⁻³ обладает следующими физическими свойствами: энергия связи ~ 0.1 эВ, температура плавления 450–550 К, время жизни до ~ 100 ч, удельное сопротивление $\sim 10^{-3}$ Ом·м, работа выхода электронов ~ 0.2 эВ. Отметим, что КВС обладает большой внутренней энергией (для цезия ~ 4 эВ/атом). Образование макроскопических количеств конденсата не может происходить в равновесных изотермических условиях. В то же время, выделение такого количества энергии при распаде КВС могло бы служить прямым доказательством его действительного существования.

В настоящее время в литературе не описаны способы получения КВС. Однако группа шведских исследователей из Чалмерского университета провела эксперименты, подтверждающие, по их мнению, существование КВС [5, 6]. Шведские исследователи назвали это вещество Ридберговской материей (РМ). Они получили основные результаты в экспериментах с лабораторным термоэмиссионным преобразователем тепловой энергии в электрическую (ТЭП), представляющим собой цезиевый диод, электроды (эмиттер и коллектор) которого поддерживались при разных температурах, пары цезия подавались через сетчатый коллектор в межэлектродный зазор (МЭЗ), а затем конденсировались на стенках вакуумного колпака, в который был помещен ТЭП. Таким образом осуществлялась непрерывная прокачка паров цезия через коллектор, в котором было проделано большое количество отверстий ($\sim 10^3$ см⁻², диаметр ~ 0.1 мм), и МЭЗ. Поверхность коллектора, свободная от отверстий, была покрыта тонким слоем углерода с помощью коллоидного раствора графита (“Ак-вадаг”).

Замеченные в экспериментах шведских исследователей особенности характеристик ТЭП с динамической подачей паров цезия в МЭЗ свидетельствуют о необычных свойствах межэлектродной среды и состоянии поверхности электродов, что можно объяснить, допустив существование КВС в межэлектродном пространстве. Необычный вид вольт-амперных характеристик (ВАХ) ТЭП в экспериментах шведских исследователей служил главным свидетельством появления РМ. В них было установлено, что

¹⁾ e-mail: ecs@ippe.obninsk.ru

²⁾ L. Holmlid; Reaction Dynamics Group, Department of Chemistry, Göteborg University, Göteborg, Sweden.

в рабочих режимах основными признаками появления КВС (РМ) являются большой обратный ток (уменьшение работы выхода коллектора до величины $< 0.7 \text{ эВ}$) и переход ВАХ в квадрант генерации электрической энергии (значительное увеличение выходного напряжения, [6]). Экспериментально было обнаружено, что ридберговские частицы в большом количестве образуются на поверхности, покрытой углеродом или металлическими оксидами, и не образуются на металлической поверхности. Проведенный при этом масс-спектрометрический анализ показал наличие в межэлектродном пространстве тяжелых кластеров (до 10^3 атомов).

Как утверждают авторы [6, 7], необходимым условием получения РМ является активация электродов в составе ТЭП перед началом эксперимента при следующих параметрах: температура эмиттера $T_E = 1570 \text{ К}$, температура коллектора $T_C = 670 \text{ К}$, температура цезиевого резервуара $T_{Cs} = 570 \text{ К}$, время активации – не менее 1 ч. Они также отмечают, что в ридберговских условиях МЭЗ был темный, из него наблюдалась значительно меньшее видимое излучение по сравнению с обычным плазменным режимом [5].

Основной целью наших экспериментальных исследований было независимое повторение результатов и выводов шведских исследователей о существовании РМ путем проведения экспериментов в более совершенном по используемому аппаратуре и методикам лабораторном ТЭП, оснащенный любезно предоставленными Р. Свенссоном³⁾ оригинальными сетчатым коллектором и коллоидным раствором графита “Аквадаг”. Необходимо было в одном эксперименте, в условиях постоянной систематической погрешности, сравнить характеристики ТЭП при динамической подаче паров цезия в МЭЗ (как в экспериментах шведских исследователей) и при традиционной подаче паров цезия в МЭЗ из цезиевого резервуара (равновесная подача).

2. Эксперимент. Исследование условий образования КВС цезия проводилось в лабораторном ТЭП с электродами плоской формы и переменным МЭЗ ($d = 0.2\text{--}3 \text{ мм}$), содержащем вакуумно-цезиевый тракт подачи цезия и позволяющем в условиях одного эксперимента осуществлять либо равновесную, либо динамическую подачу паров цезия. В качестве электродов ТЭП использовались, как и в экспериментах шведских исследователей, следующие материалы: эмиттер – “таблетка” из поликристалличес-

кого молибдена вакуумной плавки диаметром 14 мм и толщиной 11 мм; коллектор – диск диаметром 8 мм из танталовой фольги толщиной 0.2 мм.

В центральной части коллектора размером ($4 \times 3.1 \text{ мм}$) лучом лазера были пробиты 400 отверстий диаметром 0.1 мм. Поверхность коллектора без отверстий была покрыта углеродом толщиной $0.1 \div 0.2 \text{ мм}$ (с помощью “Аквадаг”).

Эмиттерная “таблетка” имела одно отверстие диаметром 1 мм на боковой поверхности, которое имитировало черное тело и использовалось для независимого измерения температуры с помощью эталонного оптического микропирометра, а также пять отверстий с внутренней стороны для установки в них вольфрам-рениевых термодар. Нагрев эмиттера осуществлялся электронной бомбардировкой.

В корпусе ТЭП имелись два смотровых лейкокапфировых окна, через которые производилось измерение величины МЭЗ с помощью оптического прибора (катетометр КМ-6) и визуальные наблюдения (фотографирование, видеосъемка и т.п.). Откачка ТЭП и полости нагревателя эмиттера проводилась высоковакуумными электроразрядными насосами НОРД-100.

Подготовка ТЭП к измерениям включала общепринятые процедуры обезгаживания [8].

При динамической подаче паров цезия они подавались по трактам высокого давления цезия к сетчатому коллектору, проходили через него, попадали в МЭЗ, а затем – в рабочую полость ТЭП и, конденсируясь на холодных стенках вакуумных трактов низкого давления, стекали в сборник для жидкого цезия. Запаса жидкого цезия хватало на несколько часов работы. Затем проводилась перегонка цезия из сборника цезия в рабочий Cs-термостат. После этого цикл измерений и оптимизации ВАХ повторялся.

При равновесной подаче паров цезия их давление в МЭЗ и рабочей полости ТЭП определялось температурой резервуара с цезием (Cs-термостата). ВАХ измерялись импульсным методом путем развертки электрического тока из статической рабочей точки, как правило, соответствующей диффузионному режиму ТЭП [9].

После окончания первого этапа исследований (измерение и оптимизация ВАХ при равновесной подаче) была проведена активация электродов ТЭП по режиму, предложенному шведскими исследователями в [6, 7].

В ходе экспериментальных исследований переход от равновесной подачи паров цезия к динамической и обратно к равновесной осуществлялся десятки раз.

³⁾R. Svensson; Chalmers Lindholmen University College, Göteborg, Sweden.

2.1. *Результаты измерений.* При равновесной подаче паров цезия были проведены измерения ВАХ ТЭП для получения реперных точек (исходной базы данных) с целью сравнения с характеристиками ТЭП, полученными при моделировании условий образования КВС. Одно из полученных семейств таких ВАХ при изменении температуры цезиевого резервуара для $T_E = 1573$ К приведено на рис.1. Здесь эмиссионная рабочая площадь ТЭП принималась рав-

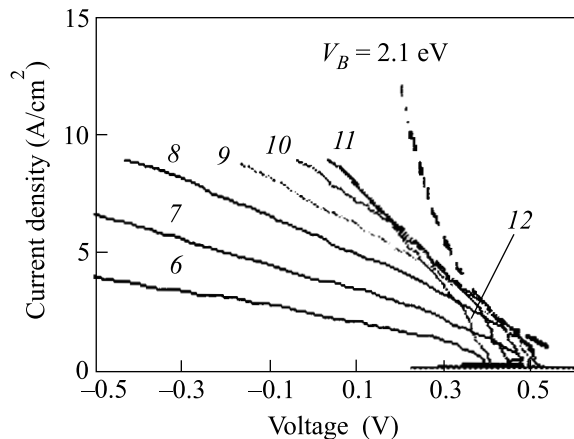


Рис.1. Равновесный режим подачи цезия. Семейство ВАХ при изменении температуры цезиевого резервуара для $T_E = 1573$ К, $T_C = 900$ К, $d = 0.3$ мм: 5 – $T_{Cs} = 528.7$ К; $P_{Cs} = 0.585$ мм рт.ст.; 6 – 539.5; 0.817; 7 – 551.3; 1.16; 8 – 562.7; 1.6; 9 – 571.3; 2.03; 10 – 580.2; 2.57; 11 – 587.5; 3.1; 12 – 594.7; 3,72

ной полной площади коллектора ($S_C = 0.5$ см²). Оптимизация выходных электрических характеристик ТЭП (по T_{Cs} , d , T_C) показала, что они соответствуют минимальному барьерному индексу $V_B = 2.1$ эВ. В рабочей области параметра $T_E/T_{Cs} = 2.3$ – 3.0 величина вакуумной работы выхода эмиттера $\Phi_{E0} = 4.6$ – 4.7 эВ. Она характерна для поликристаллического молибдена. Вакуумная работа выхода эмиттера Φ_{E0} практически не зависит от температуры коллектора в диапазоне рабочих температур $T_C = 740$ – 950 К, что свидетельствует об отсутствии в межэлектродной среде кислородсодержащих примесей. Такие данные свойственны обычным характеристикам ТЭП, работающих в традиционном низковольтном дуговом режиме с электродной парой, аналогичной Мо–Та и не являющейся оптимальной для достижения высокой эффективности ТЭП по критерию V_B [10].

При динамической подаче паров цезия в МЭЗ были проведены измерения и оптимизация ВАХ ТЭП в широком диапазоне изменения T_E , T_{Cs} , d и T_C . На рис.2 приведен пример такого семейства ВАХ при тех

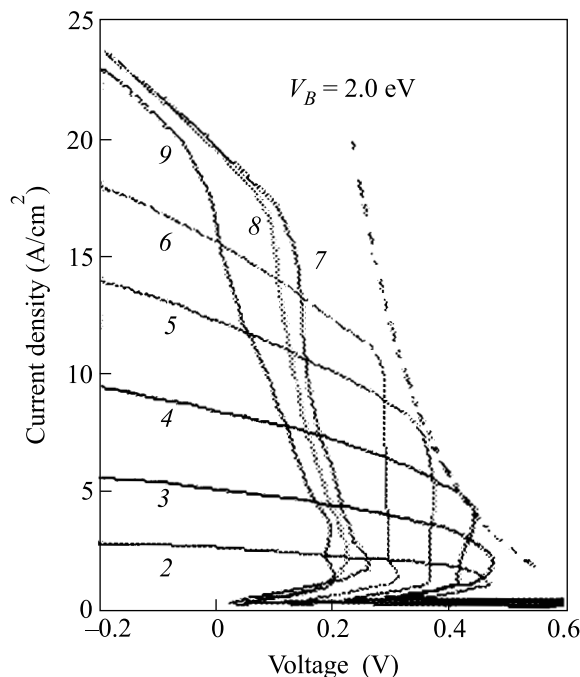


Рис.2. Динамический режим подачи цезия. Семейство ВАХ при изменении температуры цезиевого резервуара для $T_E = 1572$ К, $T_C = 903$ К, $d = 0.3$ мм: 2 – $T_{Cs} = 602.2$ К; $P_{Cs} = 4.47$ мм рт.ст.; 3 – 616.6; 6.28; 4 – 628.1; 8.14; 5 – 638.1; 10.1; 6 – 646.4; 12.1; 7 – 655.2; 14.5; 8 – 656.4; 14.8; 9 – 660.4; 16.1

же T_E , T_C и d , что и на рис.1. Здесь эмиссионная (рабочая) площадь принималась равной площади коллектора $S_C = 0.125$ см² (площадь сетчатой части коллектора). По данным визуальных наблюдений и видеосъемки МЭЗ и окружающего его пространства с увеличением ($\times 25$) без и с подсветкой диодным лазером, контроля характера и формы свечения низковольтного дугового разряда на экране телевизора разрядный электрический ток был “привязан” к этой эмиссионной (рабочей) площади электрода. Заметим, что при равновесной подаче паров цезия, по данным такого же контроля МЭЗ, разряд происходил со всей поверхности коллектора ($S_C = 0.5$ см²).

В экспериментах с динамической подачей паров цезия нами установлены эмиссионные характеристики коллектора и энергетические эффекты в межэлектродной среде, которые пока условно назовем “аномальными”, но которые в принципиальном плане можно отнести к наблюдаемому шведскими исследователями КВС (РМ). Это прежде всего уменьшение работы выхода коллектора с величины 1.4–1.5 эВ при равновесной подаче паров цезия до величины 1.0–1.1 эВ при динамической подаче и появление капельной плазменной фракции, окрашенной в зеленые тона.

Результаты эмиссионных измерений работы выхода коллектора Φ_C^{Em} в зависимости от параметра Рейзора представлены на рис.3.

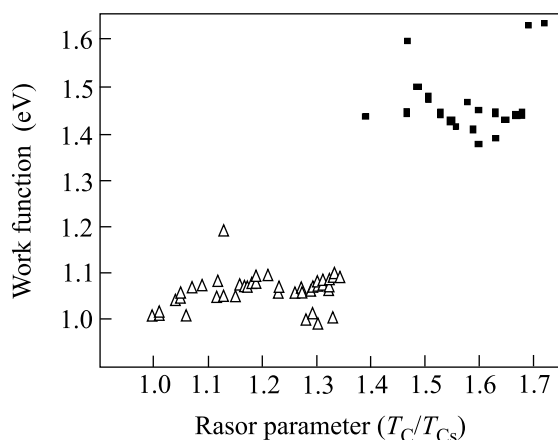


Рис.3. Сравнение значений работы выхода коллектора Φ_C^{Em} , полученных по эмиссионным измерениям при различных способах подачи пара цезия. Режим подачи цезия: ■ – равновесный; △ – динамический

2.2. Появление капельной плазменной фракции. В режимах с динамической подачей паров цезия поверхность коллектора находилась в одном из трех состояний: 1 – поверхность покрыта устойчивой видимой пленкой цезия; в цезиевой камере подачи паров цезия нет избыточного давления; 2 – поверхность “сухая”, в цезиевой камере подачи паров цезия избыточное давление достигало величины 25–50 мм рт.ст.; 3 – на поверхности периодически возникает видимая пленка цезия, в камере подачи паров цезия есть избыточное давление. Первое состояние удерживалось 10–15 мин, второе – несколько часов. В первом и втором состояниях низковольтный дуговой разряд имел обычный вид, а ВАХ не имели существенных качественных или количественных особенностей.

Третье состояние возникало периодически в течение времени до ~ 1 ч. Время работы, так же как и в случае 2, ограничивалось запасом цезия в рабочем резервуаре (Cs-термостате). В полном цикле этого состояния также можно выделить три фазы: а) коллектор “сухой”, б) коллектор покрыт видимой пленкой жидкого цезия, в) разбрызгивание капель цезия и “осушение” поверхности коллектора. Возможность поддержания этого состояния, длительность цикла и его отдельных фаз зависела от соотношения между температурой коллектора и цезиевого резервуара.

Если в течение всего времени измерений ТЭП находился в точке короткого замыкания диффузионной части ВАХ, то никаких “аномальных” явлений не наблюдалось. Если в процессе развертки напряжения

при измерении ВАХ разряды происходили в фазе а или б, то ВАХ и характер низковольтного дугового разряда были обычными. Если же разряд совпадал с фазой в, то в пространстве между электродами (МЭЗ) и внешними по отношению к МЭЗ стенками корпуса лабораторного ТЭП с некоторым отставанием по времени от основного разряда возникало необычное свечение. Корпус находился под потенциалом эмиттера и отстоял от электродов на расстоянии 2–3 см. Наблюдаемый цвет свечения (светло-зеленый) резко отличался от привычного (традиционного) цвета основного разряда (красных тонов). Свечение было кратковременным и, к сожалению, зарегистрировать ВАХ точно в момент появления капельной плазменной фракции цезия, окрашенной в зеленые тона, на текущем этапе исследований не удалось.

По результатам проведенных нами экспериментов можно констатировать, что светло-зеленое свечение капельной плазменной фракции возникает только при совместном действии двух факторов: прокачки паров цезия и пробоя межэлектродного пространства ТЭП. Заметим, что в более ранних экспериментах с динамической подачей паров цезия через отверстие в коллекторе [11] наблюдались сильные неоднородность протекающего тока в центре и на периферии коллектора и эрозия эмиттера, происходящие только при совместном воздействии на МЭЗ разряда и прокачки.

КВС, обладая большой внутренней энергией, может образовываться только при наличии источников энергии. В условиях проведенных экспериментов действуют два таких источника энергии. Первый – это изотермическое расширение паров цезия в отверстиях сетчатого коллектора. Нами было установлено, что при прохождении паров цезия через сетчатый коллектор его давление снижается примерно в 10 раз. При этом в расчете на одну молекулу производится работа ~ 0.1 – 0.2 эВ. Однако даже при самом лучшем использовании этой энергии в КВС можно было бы превратить 2–5% протекающих паров цезия. Другим источником энергии может служить низковольтный электрический разряд. Оценки показывают, что выделяющаяся в таком разряде энергия на порядок превышает работу расширения паров цезия.

Поскольку электрический разряд, по нашим данным, является необходимым условием образования КВС, то это объясняет и некоторое отличие наших характеристик от данных шведских исследователей, у которых частота повторения разрядных импульсов в несколько раз (~ 3) выше, чем у нас. Возможно, это обстоятельство не позволило нам на текущем

этапе исследований полностью воспроизвести характеристики КВС (РМ).

3. Расчетные оценки размеров кластеров при образовании капельной плазменной фракции. При попадании капель распыляемого с коллектора цезия на горячий эмиттер или на горячие стенки корпуса ТЭП, окружающие электроды, происходит их быстрое испарение. При динамической подаче паров цезия в МЭЗ образуется комбинированная плазма, состоящая из электронов, ионов, нейтральных атомов и капель жидкого цезия различного размера.

Проведем оценку времени распада такой плазмы после снятия электрических полей. Распад низкотемпературной плазмы в МЭЗ величиной $d = 0.1-1.0$ см осуществляется преимущественно за счет ухода ионов на электроды и потери заряда на них. Характерное время распада плазмы, то есть снижение ее плотности в e раз, составляет $t_0 = d^2/lv$, где $l \approx 10^{-3}$ см — длина свободного пробега ионов цезия ($P_{Cs} \approx 1$ мм рт.ст.), $v \approx 10^4$ см · с⁻¹ — тепловая скорость ионов цезия [12].

Снижение концентрации возбужденных атомов цезия происходит примерно с таким же характерным временем.

Для МЭЗ $d = 0.1$ см получаем характерное время распада $t_0 \approx 10^{-3}$ с, а для $d = 1$ см — $t_0 \approx 0.1$ с.

В нашем эксперименте наблюдалось зеленое свечение капельной плазменной фракции в межэлектродном зазоре и в примыкающем к электродам пространстве с характерным $d = 1$ см в течение нескольких секунд. Это в 10–100 раз больше времени распада бескластерной плазмы.

Следовательно, наблюдаемая в эксперименте плазменная фракция содержала кластеры с массой, соответствующей ≈ 100 атомам. Заметим, что по данным шведских исследователей образующиеся в РМ кластеры могут содержать по несколько сот атомов цезия (до 1000).

Таким образом, проведенная по данным наших измерений в условиях образования КВС, проявляющегося в виде окрашенной в зеленые тона межэлектродной среды цезиевого ТЭП с динамической подачей

паров цезия, оценка скорости распада плазмы косвенно свидетельствует о наличии капельной плазменной фракции в виде кластеров с массой $\sim 10^2$ атомов цезия в возбужденном или ионизованном состоянии.

Авторы благодарны Р. Свенссону из Швеции за предоставление образцов коллекторных материалов для изучения Ридберговской материи, участникам научно-координационной сессии “Исследования неидеальной плазмы” под руководством академика РАН В. Е. Фортова (3–4 декабря 2002 г.) научного совета Российской Академии Наук по физике низкотемпературной плазмы за обсуждение нашей работы.

Исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (проект # 02-02-96021).

1. Э. А. Маныкин, М. И. Ожован, П. П. Полуэктов, Доклады АН СССР **260**, 1096 (1981).
2. E. A. Manykin, *Proc. Thermionic Energy Conversion Specialist Conference*, Goeteborg, 1993, p. 35.
3. Э. А. Маныкин, М. И. Ожован, П. П. Полуэктов, *Химическая физика* **18**, 87 (1999).
4. Г. Э. Норман, *Письма в ЖЭТФ* **73**, 13 (2000).
5. L. Holmlid, *Proc. Thermionic Energy Conversion Specialist Conf.*, Göteborg, 1993, p. 47.
6. R. Svensson, L. Holmlid, and E. Kennel, *Proc. Thermionic Energy Conversion Specialist Conf.*, Goeteborg, 1993, p. 93.
7. R. Svensson and L. Holmlid, *Proc. 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conf.*, 1997, p. 1071.
8. С. Дешман, *Научные основы вакуумной техники*, М.: Мир, 1964 (S. Dushman, *Scientific Foundations of Vacuum Technique*, New York-London, 1949).
9. А. В. Андриашин, Е. А. Мелета, В. С. Миронов и др., в сб. *Избранные труды ГНЦ РФ-ФЭИ за 1996 год*, Обнинск: ФЭИ, 1997, с. 97.
10. В. И. Ярыгин, *Автореф. дис. д.т.н.*, ФЭИ, Обнинск, 1999.
11. В. К. Цхакая, В. И. Ярыгин, *Письма в ЖТФ* **1**, 25, (1975).
12. *Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии*, под ред. И. П. Стаханова, М.: Атомиздат, 1973.