

УДК 533.924, 621

Измерение электронной температуры в микроплазменных разрядах, развивающихся на поверхности титана при импульсном электрическом токе 100 А

В.А. Иванов, М.Е. Коньжев, А.М. Зимин,
В.И. Тройнов, Т.И. Камолова, А.А. Летунов

В статье представлены результаты исследования спектра излучения микроплазменного разряда, возбуждаемого на поверхности титанового образца при воздействии импульсного потока плазмы в режиме поддержания разряда импульсным электрическим током амплитудой 100 А и длительностью до 20 мс. На основании анализа соотношений интенсивностей линий излучения атомов и ионов титана в интервале длин волн 390–525 нм сделана оценка электронной температуры в микроплазменном разряде, величина которой находится в интервале 0,3–1,5 эВ.

PACS 52.25.-b

Ключевые слова: плазма, разряд, титан, измерение, электронная температура.

Введение

В работе [1] было экспериментально установлено, что в вакууме при остаточном давлении воздуха $p < 0,001$ Па воздействие импульсного (длительностью ~ 1 мкс) потока плазмы с объемной плотностью заряженных частиц $n_e > 10^{15}$ см $^{-3}$ и температурой электронов около 10 эВ приводит к возникновению электрических разрядов между двумя чистыми металлическими электродами, находящимися при большой разности потенциалов ~ 100 кВ. В работах [2–6] экспериментально и теоретически показано, что существенную роль в процессе возбуждения разрядов на поверхности металлов при воздействии внешнего потока плазмы играют естественные или специально нанесенные на поверхность металлов диэлектрические пленки. При этом в вакууме воздействие потока плазмы на металлические образцы с нанесенной на их поверхность диэлектрической пленкой толщиной 0,1–1 мкм приводит к возбуждению микроплазменных разрядов (МПР) при существенно меньшей плотности плазмы ($n_e < 10^{12}$ см $^{-3}$), чем это было обнаружено в [1], и при значительно меньшем значении напряжения ~ 100 В на металлических образцах.

Это явление существенного снижения порогов возбуждения МПР на металлах на несколько порядков как по плотности плазмы, так и по величине приложенного

напряжения обусловлено тем, что при взаимодействии плазменного потока с металлом, покрытым диэлектрической пленкой, происходит накопление электрического заряда на внешней поверхности пленки. В результате поверхность пленки заряжается до плавающего потенциала плазмы, величина которого близка к потенциалу стенок вакуумной камеры [7]. В местах разрыва пленки или на ее краю вблизи открытой поверхности металла, т.е. на срезе пленки толщиной около 1 мкм, за короткое время ~ 1 мкс [4] могут возникать разности потенциалов порядка приложенного к образцу напряжения, и, таким образом, большие электрические поля ~ 1 МВ/см. При таких или даже при существенно меньших величинах электрических полей, например, при ~ 100 кВ/см [6], происходит электрический пробой по срезу диэлектрической пленки вблизи ее края, а образовавшаяся плазма поверхностного электрического пробоя ($n_e \sim 10^{20}$ см $^{-3}$) [8–10] вызывает появление микроплазменных разрядов уже на металле с образованием плотной ($n_e \sim 10^{20}$ см $^{-3}$) [11] сильно локализованной плазмы с характерными размерами 1–100 мкм [12, 13]. Воздействие такой плазмы на металл приводит к появлению в контактном слое плазма–металл сильных электрических полей ~ 20 МВ/см, которые инициируют ток электронной эмиссии большой плотности из металла в плазму и переход к взрывной эмиссии [1]. При этом происходят разогрев и плавление металла в локальных областях на поверхности титана с формированием над расплавом области высокого давления [14]. Вследствие быстрого движения МПР по поверхности образца со скоростью до 500 м/с [12, 13] происходит затвердевание расплавленных локальных областей металла с характерной скоростью остывания $\sim 10^6$ К/с и с образованием микрократеров с характерными размерами 0,1–20 мкм [15, 16]. В результате этих процессов происходит существенная перестройка морфологии и структуры поверхностного слоя металла глубиной до 20 мкм и формирование прочного микрорельефа на его поверхности [17–29].

Следует отметить, что внешний поток плазмы с длительностью импульса около 20 мкс производит

Иванов Вячеслав Алексеевич, заведующий отделом.
Коньжев Михаил Евгеньевич, научный сотрудник.
Камолова Татьяна Ивановна, научный сотрудник.
Летунов Александр Алексеевич, старший научный сотрудник.
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru
Зимин Александр Михайлович, профессор.
Тройнов Владислав Игоревич, аспирант.
Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2013 г.

© Иванов В.А., Коньжев М.Е., Зимин А.М., Тройнов В.И., Камолова Т.И., Летунов А.А., 2014

иницирование микроплазменных разрядов, и далее плазма самих микроплазменных разрядов инициирует микроплазменные разряды в тех местах, где имеется край диэлектрической пленки на открытой поверхности металла. Поскольку электрическое поле E , возникающее на краю диэлектрической пленки, зависит от плотности плазмы n и температуры электронов T_e как $E \sim \sqrt{nT_e}$, то для оценки величины поля важно измерять эти параметры в микроплазменных разрядах.

Цель данной работы состояла в измерении температуры электронов по соотношению интенсивностей спектральных линий атомов и ионов в микроплазменных разрядах с импульсным током 100 А, возбуждаемых внешним потоком плазмы на поверхности титана, частично покрытой диэлектрической пленкой.

Экспериментальные условия, постановка эксперимента и методы исследований

Исследования микроплазменных разрядов проводились на титановых образцах на установке «Сфера» [15, 16] (рис. 1).

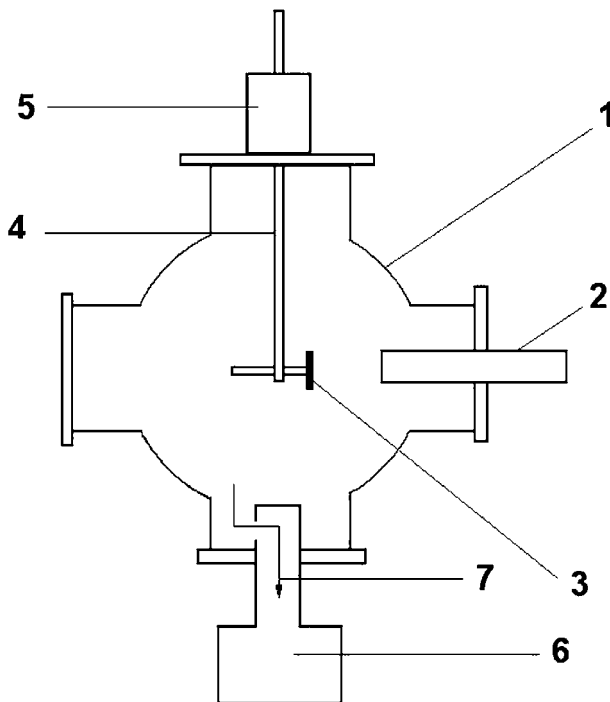


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «Сфера»: 1 – вакуумная камера, 2 – плазменный инжектор, 3 – образец на держателе, 4 – шток вакуумного манипулятора, 5 – вакуумный манипулятор, 6 – вакуумный насос, 7 – поток откачиваемого воздуха из камеры.

Для получения спектров излучения микроплазменных разрядов, имеющих размеры не более 100 мкм и быстро перемещающихся по поверхности титана, применялся метод интегральной оптической спектроскопии. Излучение собиралось из области, существенно превышающей характерные размеры микроплазменных разрядов, а время его регистрации выбиралось совпадающим с длительностью разряда. По результатам анализа спектра и соотношения интенсивностей линий атомов и ионов выполнялись оценки температуры, основанные на модели плазмы, наиболее близко описывающей условия в микроплазменных

разрядах. Ранее выполненные исследования позволили прийти к заключению, что работа [11], посвященная исследованию возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности графита, наиболее близка по постановке и ожидаемым результатам к нашим исследованиям. В [11] показано, что плотность плазмы в микроплазменных разрядах на поверхности графита в местах локализации достигает значений $\sim 10^{20}$ см⁻³, а температура электронов в непосредственной близости к месту локализации разряда составляет около 1 эВ при токе в разряде от 100 до 400 А. Из этих измерений следует также, что при удалении от места локализации микроплазменных разрядов температура электронов возрастает от 1 эВ на расстоянии менее 1 мм до величины около 6 эВ на расстоянии 7 см от поверхности графита. Близкие результаты измерений температуры электронов (3–4 эВ) на расстояниях около 1 см от поверхности электрода были получены в работе [30] при токах разряда 500–1000 А. Рост температуры электронов с удалением от поверхности металла при протекании тока закономерен, так как на плазму в этих условиях действуют электродинамические силы, способные ускорять и существенно нагревать электронную компоненту плазмы.

В описываемых в настоящей статье экспериментах нас интересовала величина электронной температуры микроплазмы в непосредственной близости к поверхности образца, на котором возбуждаются и могут длительно (с имеющимся источником тока до 20 мс) существовать микроплазменные разряды.

В экспериментах использовали образцы из технического титана марки ВТ-1, имеющего следующий атомный состав: титан (Ti) – 99,52%, железо (Fe) – 0,18%, кремний (Si) – 0,10%, углерод (C) – 0,07%, кислород (O) – 0,12%, водород (H) – 0,01%. Исходные образцы имели форму цилиндра диаметром 8 мм и высотой 8 мм. Образцы подвергались предварительной механической обработке (фрезерование, шлифование и полирование). Перед установкой в вакуумную камеру установки «Сфера» на поверхности образцов из титана формировалась диэлектрическая оксидная пленка следующим образом: образцы выдерживались при температуре 400 °С в воздушной атмосфере в течение 60 минут. В таком термическом режиме на поверхности титана формировалась оксидная диэлектрическая пленка толщиной около 1 мкм.

Закрепленный на держателе титановый образец помещался в вакуумную камеру, из которой механическим насосом откачивался воздух до остаточного давления ~ 3 Па. В вакуумной камере размещался плазменный инжектор, который в результате высоковольтного электрического разряда (напряжение 7 кВ, ток 1,5 кА, длительность знакопеременного импульса 20 мкс) по поверхности полиметилметакрилата создавал импульсный поток плазмы. Измерения параметров импульсного потока плазмы выполнялись трехэлектродными зондами [31, 32]. По соотношению электронного и ионного токов насыщения было установлено, что основными компонентами плазмы в первые 5 мкс воздействия плазменного потока, когда возбуждались микроплазменные разряды, являлись ионы водорода (90%) и ионы углерода (9%), а доля более тяжелых ионов не превышала 1%. Было показано, что измеренная по величине ионного тока насыщения плотность водородно-углеродной плазмы в потоке в

области размещения образцов составляла $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$; длительность импульсного потока плазмы по уровню 0,1 от максимальной плотности – 20 мкс; длительность переднего фронта импульса плазмы – 5 мкс, а скорость распространения потока плазмы от инжектора к образцу имеет величину $5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ при электронной температуре плазмы в потоке на уровне 10 эВ. Характерные осциллограммы импульса ионного тока насыщения в плазменном потоке вблизи образцов и тока в плазменном инжекторе представлены на рис. 2.

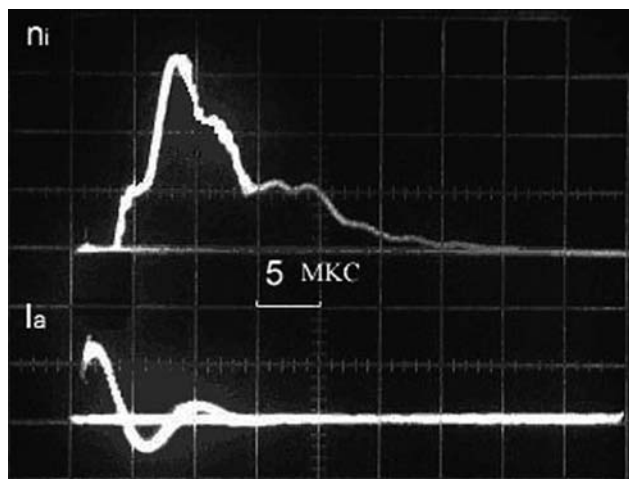


Рис. 2. Осциллограммы: n_i – импульс ионного тока насыщения плазмы вблизи поверхности образца, I_a – импульс электрического тока в плазменном инжекторе.

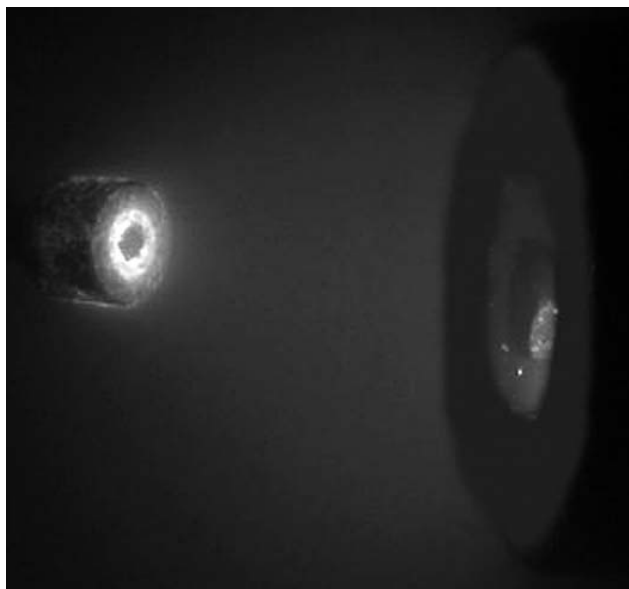


Рис. 3. Фотография микроплазменных разрядов на образце (слева) при воздействии плазменного потока инжектора (справа). Диаметр инжектора 30 мм.

Возбуждение микроплазменных разрядов проводили при начальном электрическом напряжении на титановом образце –400 В. При взаимодействии внешнего потока плазмы с титаном на его поверхности возникали микроплазменные разряды (рис. 3), которые представляли собой яркие локализованные светящиеся плазменные образования с характерными размерами от 1 до 100 мкм.

В местах локализации МПР возникало плавление металла. В результате воздействия давления плазмы на расплавленный металл образовывались впадины с выступающими краями, т.е. в расплавленном металле формировались микрократеры. Вследствие быстрого охлаждения расплавленного металла и его кристаллизации эти кратеры в значительной степени сохраняли свою форму уже в твердом виде, формируя микрорельеф с характерными размерами выступов от 1 до 20 мкм (рис. 4).

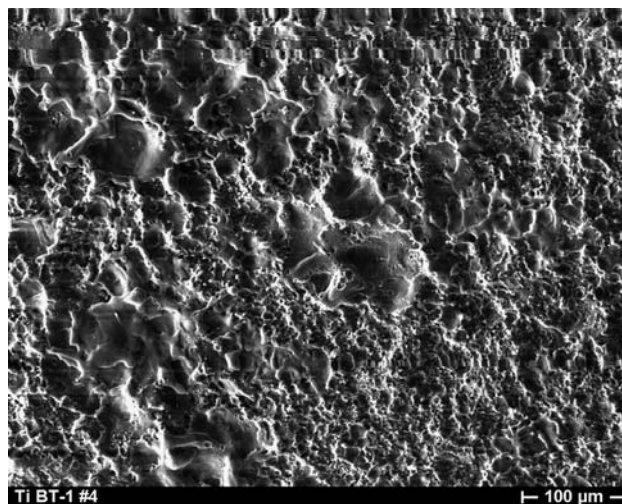


Рис. 4. Фрагмент поверхности титана с множеством микрократеров, образовавшихся в результате воздействия 10 микроплазменных разрядов в режиме: амплитуда тока разрядов 100 А, длительность импульсов 20 мс. Микрофотография получена с помощью растрового электронного микроскопа.

В процессе возбуждения микроплазменных разрядов на титановых образцах регистрировались осциллограммы тока МПР через образец $I(t)$ с практически постоянной амплитудой 100 А, длительностью импульсов от 1 до 20 мс, а также осциллограммы потенциала $U(t)$ на образцах. Установлено, что при протекании тока МПР через образец его электрический потенциал изменялся от –400 В до –30 В. Это свидетельствует о том, что импульсное напряжение –400 В оказывалось приложенным к образцу еще до того, как начиналось взаимодействие внешнего потока плазмы с металлом.

В основном режиме исследования проводились при постоянных значениях амплитуды тока 100 А и длительности импульсов 20 мс.

Для регистрации спектров излучения использовался спектрометр AvaSpec-3648 фирмы Avantes со спектральным разрешением 0,3 нм в диапазоне длин волн от 370 до 920 нм. Излучение микроплазменных разрядов с помощью коллимационной линзы фокусировалось на торце оптоволоконного кабеля, по которому поступало в спектрометр и регистрировалось с помощью встроенной ССD-линейки. Область на образце, из которой принималось излучение микроплазменных разрядов, определялась предварительно путем измерения размеров светящегося пятна при вводе со стороны спектрометра в оптоволоконный кабель с коллимационной линзой вспомогательной подсветки. Диаметр светового пятна на образце составлял около 10 мм. Такой размер области сбора излучения существенно превосходил размер светящейся области единичного микроплазменного разряда, а в

область наблюдения могли попадать несколько локализованных ярких разрядных пятен. Тем самым, измерения спектра в данном эксперименте усреднялись по нескольким светящимся объектам, находящимся в области наблюдения.

При измерениях использовался режим спектрометра Irradiance Mode, автоматически учитывающий паспортные данные амплитудной калибровки прибора. Поглощение в материале волоконного световода, линзы и окна камеры пренебрежимо мало во всем диапазоне регистрации. Основная часть, в целом, небольших потерь определялась отражениями от поверхностей этих элементов оптического тракта, но они в рабочем диапазоне не велики и слабо зависят от длины волны. Все это позволяло работать непосредственно с регистрируемыми интенсивностями линий, не вводя поправок во всем диапазоне длин волн регистрируемых спектральным прибором.

Основные результаты экспериментальных исследований

Зарегистрированные спектры содержат большое количество линий, наиболее яркие из которых принадлежат нейтральным атомам (Ti I) и однозарядным ионам титана (Ti II). Эти линии сосредоточены в диапазоне 390–525 нм. Ярких и однозначно идентифицируемых линий двукратно и трехкратно ионизованных атомов титана не обнаружено. Кроме линий титана, присутствуют и линии примесей. Это линии атомарного водорода серии Бальмера – H_{α} ($\lambda = 656,3$ нм) и H_{β} ($\lambda = 485,1$ нм), линия атомарного кислорода ($\lambda \approx 777$ нм), две характерного вида молекулярные полосы C_2 системы Свана (канты $\lambda \approx 516,5$ нм и $512,9$ нм) несколько слившихся в две группы ярких линий железа в районе $374,6$ и $376,5$ нм, а также некоторые другие. Все эти линии принадлежат атомам и молекулам, входящим либо в состав материала образца, либо в состав оксидной пленки, получаемой на поверхности образцов

путем термического отжига в воздушной атмосфере, либо материала держателя образца. При этом на поверхности оксидной пленки возможно образование конденсата водяного пара из атмосферы, что также может привести к появлению линий водорода и кислорода в спектре микроплазменных разрядов. Кроме того, были зарегистрированы линии дублета атомарного натрия Na ($\lambda \approx 589$ нм). Натрий не входит в состав титанового сплава образцов и оксидной пленки на поверхности титанового образца, но было установлено, что натрий присутствует на поверхности держателя образцов, который, как правило, монтировался в вакуумной камере непосредственно незащищенными руками без перчаток. При многократных возбуждениях микроплазменных разрядов на титане линии натрия постепенно ослабевают от импульса к импульсу, в то время как линии титана остаются стабильными. Эти результаты позволили сделать вывод, что в состав плазмы микроразрядов входят в основном атомы и однозарядные ионы титана.

Отсутствие линий высокоионизованных атомов титана указывает на то, что температура электронов в плазме разрядов не может превышать нескольких эВ. Действительно, интенсивные линии двухзарядных ионов титана в интервале длин волн 370 – 920 нм отсутствуют. Две обычно наиболее яркие линии трехзарядных ионов титана в этом диапазоне, имеющие длины волн 549 нм и 540 нм и энергии возбуждения $\sim 28,6$ эВ, также отсутствуют. Как известно [33], при температуре электронов плазмы, составляющей всего 10% от величины энергии ионизации или возбуждения, такие возбужденные ионы обязательно будут в ней присутствовать в значительных количествах. Поскольку упомянутые линии Ti^{+++} с характерной энергией возбуждения около 30 эВ не зарегистрированы, следует полагать, что температура электронов в плазме микроразрядов ниже 3 эВ.

Таблица 1

Характеристики экспериментально зарегистрированных линий излучения атомов и ионов титана в микроплазменных разрядах

Линии атомов Ti					Линии ионов Ti ⁺				
No.	λ_e	Ti	λ_T	J	No.	λ_e	Ti	λ_T	J
1	390.21	Ti I	390.10	5007.29	1	391.36	Ti II	391.35	4782.28
2	395.8	Ti I	395.821	1032.98	2	416.45	Ti II	416.37	2749.32
3	430.81	Ti I	430.85	1213.32	3	417.27	Ti II	417.19	2040.69
4	444.47	Ti I	444.43	3816.3	4	429.02	Ti II	429.02	1330.79
5	445.12	Ti I	445.09	791.86	5	430.00	Ti II	430.00	5129.53
6	455.01	Ti I	454.88	9632.32	6	430.81	Ti II	430.79	1213.32
7	456.47	Ti I	456.35	2911.48	7	433.91	Ti II	433.79	1604.56
8	466.81	Ti I	466.76	1008.55	8	439.60	Ti II	439.50	5857.76
9	468.26	Ti I	468.19	1179.04	9	444.47	Ti II	444.38	3816.3
10	475.99	Ti I	475.93	679.71	10	445.12	Ti II	445.05	791.86
11	480.5	Ti I	480.54	644.99	11	446.91	Ti II	446.85	4587.83
12	485.64	Ti I	485.60	438.1	12	450.15	Ti II	450.13	3125.14
13	488.53	Ti I	488.51	578.42	13	455.01	Ti II	454.96	9632.32
14	491.25	Ti I	491.36	878.66	14	456.47	Ti II	456.38	2911.48
15	498.14	Ti I	498.17	2642.07	15	457.28	Ti II	457.20	6927.71
16	499.1	Ti I	499.11	2519.12	16	480.50	Ti II	480.51	644.99
17	500.7	Ti I	500.72	1197.6	17	512.98	Ti II	512.92	682.73
18	512.03	Ti I	512.04	410.83	18	518.87	Ti II	518.87	528.91
19	514.57	Ti I	514.55	318.25	19	522.68	Ti II	522.66	619.11
20	515.37	Ti I	515.22	286.72					
21	517.44	Ti I	517.38	880.32					
22	518.87	Ti I	518.96	528.91					

Примечание. Заголовки столбцов: No. – порядковый номер линии, λ_e – экспериментально измеренная длина волны линии, λ_T – табличное значение длины волны линии [34], Ti – состояние атома (Ti I) или однозарядного иона (Ti II) титана, J – относительная интенсивность линии с учетом калибровочных коэффициентов спектрометра.

Список идентифицированных линий атомов и однозарядных ионов титана в спектре излучения микроплазменного разряда, зарегистрированных в диапазоне длин волн от 390 до 525 нм, представлен в табл. 1. Эти отобранные 22 линии атомов и 19 линий ионов титана не имеют насыщения и не сливаются с близко расположенными соседними линиями, что позволяет использовать их непосредственно зарегистрированные интенсивности в расчетах.

Оценки параметров плазмы

Отметим, что энергии возбуждения линий титана, приведенных в таблице, находятся в интервале значений 2–5,8 эВ. Следовательно, оценка минимального значения электронной температуры в микроразряде составит около 0,2 эВ. Таким образом, на основании проведенных оценок можно полагать, что электронная температура в микроразряде лежит в интервале значений 0,2–3 эВ. Из фотографий микроплазменных разрядов (см. рис. 3) видно, что размер локальных областей свечения микроплазменного разряда не превышает 1 мм. Опираясь на данные работы [11], рассчитаем параметры плазмы и характерные частоты электрон-ионных столкновений в плазме микроразрядов. Из графика зависимости плотности плазмы от расстояния от центра микроразряда получаем, что плотность плазмы на границе области свечения составляет величину $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Полагая, что температура электронов лежит в интервале значений 0,2–3 эВ, получаем из [35] оценку частоты электрон-ионных столкновений ν_e :

$$\nu_e \approx 2,9 \cdot 10^{-6} \frac{nL}{T_e^{3/2}},$$

где n – плотность электронов плазмы, L – кулоновский логарифм, T_e – температура электронов в эВ. Для оценок примем $L \approx 10$, $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $T_e \approx 1$ эВ. Для этих условий оценка частоты столкновений дает $\nu_e \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Т.е. время между соударениями значительно меньше характерного времени спонтанного излучения атомов и ионов титана $\tau \sim 10^{-8} \text{ с}$, и для определения параметров плазмы по соотношениям между интенсивностями излучаемых ею спектральных линий можно использовать модель локального термодинамического равновесия. Приведенная оценка частоты электрон-ионных столкновений согласуется с критерием, приведенным в [36]:

$$n \geq 10^{14} T_e^{1/2} (\Delta E)^3,$$

где ΔE – разность энергий между верхним и нижним возбужденными уровнями в атоме или ионе.

При температуре электронов около 1 эВ и при средней величине около 2 эВ получаем оценку минимальной плотности плазмы для применения модели локального термодинамического равновесия $n_e > 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что согласуется с приведенным выше критерием с точки зрения соотношения частоты столкновений и обратного времени жизни атома или иона в возбужденном состоянии.

В случае локального термодинамического равновесия населенности возбужденных уровней, описываются формулой Больцмана с температурой равной T_e . Тогда, согласно [36], отношение интенсивностей любых двух линий, принадлежащих одному и тому же атому или иону, будет описываться соотношением:

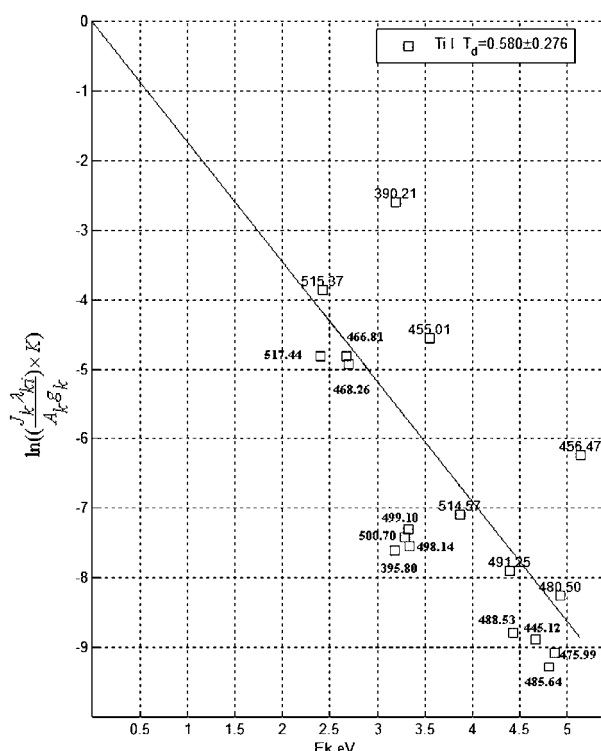


Рис. 5. На графике представлены логарифмы нормированных и обезразмеренных относительных интенсивностей линий атомов титана в зависимости от энергии возбуждения E_k верхнего уровня линии. Температура электронов, определенная по совокупности линий Ti в диапазоне 390–525 нм, составляет $T_e = 0,6 \pm 0,3$ эВ.

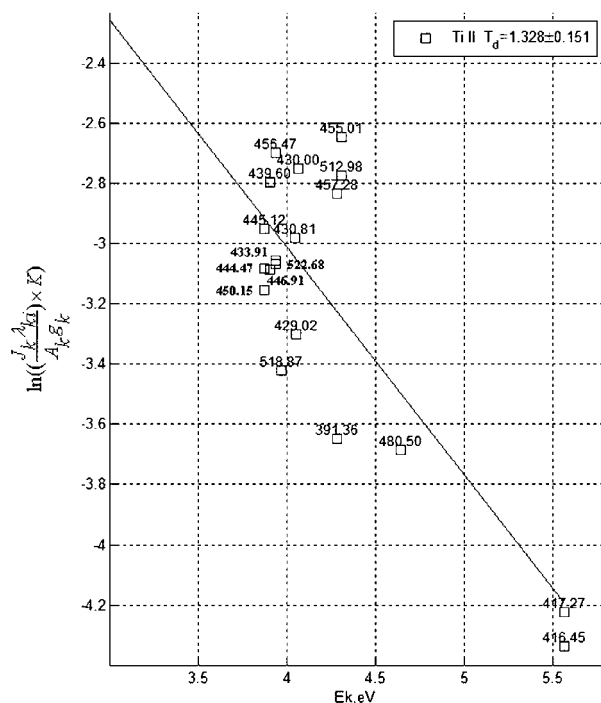


Рис. 6. На графике представлены логарифмы нормированных и обезразмеренных относительных интенсивностей линий ионов титана (Ti^+) в зависимости от энергии возбуждения E_k верхнего уровня линии. Температура электронов, определенная по совокупности линий Ti^+ в диапазоне 390 - 525 нм, составляет $T_e = 1,3 \pm 0,15$ эВ.

$$\frac{J_k}{J_{k1}} = \frac{A_k g_k \lambda_{k1,i} n_k}{A_{k1} g_{k1} \lambda_{k,i} n_{k1}} = \frac{A_k g_k \lambda_{k1,i}}{A_{k1} g_{k1} \lambda_{k,i}} \cdot \exp\left(\frac{E_{k1} - E_k}{T_e}\right)$$

Здесь J_k и J_{k1} – интенсивности линий, соответствующих переходам с уровней k и $k1$, A_k и A_{k1} – вероятности переходов, g_k и g_{k1} – статистические веса уровней k и $k1$, $\lambda_{k,i}$ и $\lambda_{k1,i1}$ – длины волн линий переходов с уровней k и $k1$ на уровни i и $i1$, n_k и n_{k1} – населенности уровней k и $k1$, E_k и E_{k1} – энергии соответствующих возбужденных уровней.

Это соотношение использовано нами для оценки электронной температуры микроплазменных разрядов. При этом, в соответствии с методикой [37], для большей достоверности при вычислениях использовались не две, а все идентифицированные линии атомов или ионов титана, не имеющие насыщения и не сливающиеся с близко расположенными соседними линиями. Методика состоит в определении методом наименьших квадратов температуры, характеризующей распределение атомов или ионов по уровням с разной энергией, а следовательно в условиях ЛТР и энергетическое распределение электронов плазмы. Переноса в левую часть предэкспоненциальный множитель и логарифмируя, получим:

$$\ln\left(\left(\frac{J_k \lambda_{ki}}{A_k g_k}\right) / \left(\frac{J_{k1} \lambda_{k1i1}}{A_{k1} g_{k1}}\right)\right) = \frac{E_{k1} - E_k}{T_e}$$

При заданных $k1$, $i1$, переходя к координатам

$$x = E_k, \quad y = \ln\left(\left(\frac{J_k \lambda_{ki}}{A_k g_k}\right) \times K\right),$$

получаем уравнение прямой, причем наклон этой прямой задается величиной T_e . Здесь K выбирается таким образом, чтобы выражение под логарифмом было безразмерным. В этой работе для обработки результатов использована программа, определяющая величину T_e методом наименьших квадратов [37]. Для представления результатов в форме графиков в алгоритме этой программы заложено определение и использование значения множителя K , при котором проводимая прямая проходит через точку (0, 0) – начало координат.

На рис. 5 и 6 приведены графики, иллюстрирующие результаты такой обработки.

Обсуждение результатов

Таким образом, экспериментально установлено, что электронная температура, рассчитанная на основе сравнения интенсивностей линий излучения возбужденных в микроплазменном разряде атомов титана находится в интервале значений 0,3–0,9 эВ, в то время как значение электронной температуры, определенной из сравнения интенсивностей линий однозарядных ионов титана, оказывается существенно выше, а именно ~1,3 эВ.

По-видимому, температура электронов, определенная из относительных интенсивностей нейтральных атомов, соответствует областям плазмы, наиболее близко расположенным к поверхности расплавленного в микроплазменном разряде титана, находящегося при температуре,

близкой к температуре плавления 2000 К (в энергетической шкале $\approx 0,2$ эВ). В этих условиях температуры расплава титана и неполностью ионизованной плазмы вблизи поверхности должны быть близки.

В присутствии магнитных полей токов разрядов и электрических полей реализуются процессы ускорения ионов и электронов от поверхности титана в периферийную зону плазмы вследствие действия силы Ампера. Поэтому энергия электронов по мере движения от поверхности к периферии плазмы будет нарастать, что приводит к увеличению скорости процесса ионизации атомов и возбуждения образовавшихся ионов. Следовательно, свечение ионов должно возникать в периферийных областях плотной плазмы, т.е. там, где температура электронов вырастает до величин, обеспечивающих возбуждение уже и ионной компоненты плазмы. Критическая температура электронов, при которой процесс ионизации затронет и ионы с уровнями возбуждения до 10 эВ, составляет величину около 1 эВ. Такая феноменологическая модель плазмы микроплазменных разрядов на поверхности титана согласуется с результатами экспериментальных исследований микроплазмы на графите [11], в которых установлен рост температуры электронов плазмы микродуговых разрядов по мере удаления от центральной области плотной плазмы катодного пятна к периферии. Результаты данной работы согласуются с результатами работы [38], в которой измерения электронной температуры дали величину 0,2–0,5 эВ при значении импульсного тока в микроплазменных разрядах 200 А. Важно, что величины температуры электронов в микроплазменных разрядах с импульсными токами 100 А и 200 А, определенные по линиям свечения нейтральных атомов титана, лежат в интервале 0,2–0,6 эВ, что практически совпадает с температурой плавления титана 2000 К. Это согласуется с представлениями о том, что вблизи поверхности расплавленного металла температура плазмы может быть близкой к температуре плавления металла независимо от величины тока разряда до тех пор, пока существует поверхность расплава.

Заключение

При взаимодействии в вакууме импульсного потока плазмы с плотностью 10^{12} – 10^{13} см⁻³ и длительностью импульса 20 мкс с титановыми образцами, покрытыми тонкой диэлектрической пленкой толщиной ~1 мкм, на поверхности этих образцов возбуждаются микроплазменные разряды. При амплитуде электрического тока 100 А и длительности импульса тока 20 мс в возбуждаемых микроплазменных разрядах получены и проанализированы спектры оптического излучения атомов и ионов титана. Анализ показал, что в спектрах присутствуют в основном линии атомов и однозарядных ионов титана. Линии ионов титана двух и трехкратной ионизации не обнаружены.

Показано, что для светящейся области микроплазменного разряда выполняются условия локального термодинамического равновесия.

На основе модели локального термодинамического равновесия и с использованием нескольких десятков спектральных линий излучения атомов или ионов титана

проведены расчеты температуры электронов в плазме микроразрядов. Установлено, что электронная температура для линий возбужденных атомов титана лежит в интервале 0,3–0,6 эВ. Электронная температура для линий возбужденных однозарядных ионов титана лежит в интервале значений 1,1–1,5 эВ.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект РФФИ 13-08-01174а.

Литература

1. *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. %М.: Наука, 2000.
2. *Иванов В.А.* // Прикладная физика. 2001. № 2. С. 5.
3. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Сахаров А.С.* // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 114.
4. *Ivanov V.A., Sakharov A.S., and Konyzhev M.E.* // Plasma Physics Reports. 2008. V. 34. No. 2. P. 150.
5. *Ivanov V.A., Juttner B., Pursch H., Siemroth P.* // Adw DDR Beitrage aus der Plasma Physik B. 1983. V. 23. No. 6. P. 551.
6. *Ivanov V.A., Sakharov A.S., and Konyzhev M.E.* Plasma initiation of vacuum arcs on a metal surface partially covered with a dielectric film / Proceedings of the XXIII-rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Bucharest, Romania, September 15-19, 2008) V. 2.
7. Plasma Diagnostic Techniques. Edited by R.H. Huddlestone and S.L. Leonard. Plasma Research Laboratory, Aerospace Corporation, Los Angeles, California. Academic Press, New-York-London. 1965.
8. *Ivanov V.A., Konyzhev M.E., Gavrilenko V.P., Oks E.* Super Dense Plasma Created in Contracted Microwave Discharge on Surface of Dielectrics. / Proceedings of the 5th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware (MULCOPIM-2005 Workshop). 12-14 September 2005. European Space Agency (ESA/ESTEC), Noordwijk, Netherlands.
9. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., В.П. Гавриленко, Е.А. Окс, А.А. Летунов.* // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 40.
10. *Ivanov V.A., Konyzhev M.E., Gavrilenko V.P., et al.* Creation of super dense plasma due to contracting of microwave discharge on surface of dielectric // In book: Strong Microwaves in plasmas. Ed. A.G. Litvak. V. 2. P. 784-792. Nizhny Novgorod-2005. ISBN 5-8048-0039-X.
11. *Ivanov V.A., Juttner B., Pursch H.* // Pub. Nuclear and Plasma Sciences Society USA. IEEE Plasma Science V. PS-13. 1985. No. 5. P. 334.
12. *Ivanov V.A., Juttner B., and Zimin A.M.* Dynamics of Cathode Spots on the Beryllium in Vacuum Arc Discharges. // In book: Proceedings of the XX-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tiurs(France)– July 1-5, 2002. Ed. SFV 2002. IEEE Catalogu Number 02CH37331.
13. *Ivanov V.A., Juttner B., and Zimin A.M.* // Plasma Devices and Operations. 2002. V. 10. P. 109.
14. *Зимрот П., Иванов В.А.* Измерение механического давления плазмы вакуумной дуги. // В сб. Плазменные генераторы и процессы. Материалы III совещ. международной рабочей группы «Физика низкотемпературной плазмы». Проблемная комиссия многостороннего сотрудничества социалистических стран. Минск.: ИТМО АН БССР. 1988.
15. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Куксенова Л.И. и др.* // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 76.
16. *Ivanov V.A., Konyzhev M.E., Kuksenova L.I. et al.* // Plasma Physics Reports. 2010. V. 36. No. 13. P. 1241.
17. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Спирун А.М. и др.* // Прикладная физика. 2007. № 6. С. 60
18. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Сатунин С.И. и др.* // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 62.
19. *Иванов В.А., Куксенова Л.И., Лантева В.Г., Коньжев М.Е.* // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 3. С. 84.
20. *Иванов В.А., Куксенова Л.И., Лантева В.Г., Коньжев М.Е.* // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 6. С. 81.
21. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Спирун А.М. и др.* // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 97.
22. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Спирун А.М. и др.* // Прикладная физика. 2007. № 6. С. 60.
23. *Иванов В.А., Куксенова Л.И., Лантева В.Г., Коньжев М.Е.* // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 6. С. 81
24. *Иванов В.А., Куксенова Л.И., Лантева В.Г., Коньжев М.Е.* // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 74.
25. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Куксенова Л.И. и др.* // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 4. С. 396.
26. *Куксенова Л.И., Лантева В.Г., Иванов В.А., Коньжев М.Е.* // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 5. С. 10.
27. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Куксенова Л.И. и др.* // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 57.
28. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Куксенова Л.И. и др.* // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 59.
29. *Ivanov V.A., Konyzhev M.E., Kuksenova L.I. et al.* // Plasma Physics Reports. 2011. V. 37. No. 13. P. 1230.
30. *Shkol'nik S.M.* // Pub. Nuclear and Plasma Sciences Society USA. IEEE Plasma Science V. PS-13. 1985. No. 5. P. 336.
31. *Иванов В.А.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1988. С. 33.
32. *Ivanov V.A.* Triple Probe Method for Charaterization of Arc Cathode Plasmas. / Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut fur Elektronenphysik. Preprint 85-1.
33. *Франк-Каменецкий Д.А.* Лекции по физике плазмы. %М.: Атомиздат, 1968.
34. Таблицы спектральных линий. Справочник. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977.
35. NRL Plasma Formulary. David L. Book. Laboratory for Computational Physics. Naval Research Laboratory/ Washington. D.C. 20375 (Memorandum Report No. 3332).
36. Plasma Diagnostics. Edited by W.Lohte-Holtgreven. Kiel University. Nord-Holland Publishing Company. Amsterdam. 1968.
37. *Градов В. М., Зимин А. М., Кривицкий С. Е., Шумов А. В.* // ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 2009. Вып. 1. С. 64.
38. *Иванов В.А., Коньжев М.Е., Зимин А.М. и др.* // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 133.

Measurements of electron temperature of microplasma discharges developing on the surface of titanium with 100 A pulse electric current

V. A. Ivanov¹, M. E. Konyzhev¹, A. M. Zimin²,
V. I. Troinov², T. I. Kamolova¹, and A. A. Letunov¹

¹A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

²N.E. Bauman Moscow State Technical University
5, 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia

Received November 20, 2013

The emission spectrum of microplasma discharge, excited on titanium by pulsed plasma flow, in the mode with the electric current amplitude of 100 A and with the pulse duration of 20 ms was studied experimentally. Based on analysis of emission lines of titanium atoms and titanium ions in the wavelength band 390-525 nm, the electron temperature of microplasma discharge was estimated to be in the range 0.3-1.5 eV.

PACS 52.25.-b

Keywords: plasma, discharge, titanium, measurement, electron temperature.

References

1. G. A. Mesyats, *Ectons in the Vacuum Discharge: Breakdown, Spark, Arc* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
2. V. A. Ivanov, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 5 (2001).
3. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, and A. S. Sakharov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 114 (2006).
4. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, *Plasma Physics Reports* **34**, 150 (2008).
5. V. A. Ivanov, B. Juttner, H. Pursch, P. Siemroth, *Adw DDR Beitrage aus der Plasma Physik B*, **23**, 551 (1983).
6. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, in *Proceedings of the XXIII-rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum* (Bucharest, Romania, September 15-19, 2008) V. 2.
7. *Plasma Diagnostic Techniques*. Ed. by R.H. Huddleston and S.L. Leonard. (Plasma Research Laboratory, Aerospace Corporation, Los Angeles, California. Academic Press, New-York-London. 1965).
8. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, V. P. Gavrilenko, and E. A. Oks, in *Proceedings of the 5th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware* (MULCOPIM-2005 Workshop.. European Space Agency, Noordwijk, Netherlands, 12-14 September 2005).
9. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, V. P. Gavrilenko, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 40 (2005).
10. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, V. P. Gavrilenko, et al., in *Book: Strong Microwaves in plasmas*. Ed. A.G. Litvak. (Nizhny Novgorod-2005. ISBN 5-8048-0039-X), vol. 2. pp. 784-792.
11. V. A. Ivanov, B. Juttner, and H. Pursch, *Pub. Nuclear and Plasma Sciences Society USA. IEEE Plasma Science* **PS-13**, 334 (1985).
12. V. A. Ivanov, B. Juttner, and A. M. Zimin, in *Proceedings of the XX-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Ed. SFV 2002. (Tiurs(France), July 1-5, 2002) IEEE Catalogu Number 02CH37331.
13. V. A. Ivanov, B. Juttner, and A. M. Zimin, *Plasma Devices and Operations* **10**, 109 (2002)
14. P. Zimrot and V. A. Ivanov, in *Proc. on Plasma Generators and Processes; Materials of III Meeting of International Work Group "Physics of Low-Temperature Plasma"* (Minsk, Belarus, 1988) [in Russian].
15. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 76 (2009).
16. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, et al., *Plasma Physics Reports* **36**, 1241 (2010).
17. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, A. M. Spirin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 60 (2007).
18. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, S. I. Satunin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 62 (2008).
19. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, et al., *J. Mach. Manuf. Relieb.*, No. 3, 84 (2008).
20. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, et al., *J. Mach. Manuf. Relieb.*, No. 6, 81 (2007).
21. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, S. I. Satunin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 97 (2006).
22. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, S. I. Satunin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 60 (2007).
23. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, et al., *J. Mach. Manuf. Relieb.*, No. 6, 81 (2007).
24. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, et al., *J. Mach. Manuf. Relieb.*, No. 1, 74 (2008).
25. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, et al., *J. Frict. Wear* **30**, 396 (2009).
26. L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, V. A. Ivanov, et al., *Trenie. Smazka*. No. 5, 10 (2009)
27. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 57 (2010).
28. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 59 (2011).
29. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, et al., *Plasma Physics Reports* **37**, 1230 (2011).
30. S. M. Shkol'nik, *Pub. Nuclear and Plasma Sciences Society USA. IEEE Plasma Science*, **PS-13**, 336 (1985)
31. V. A. Ivanov, *Bull. Lebedev Phys. Inst.* No. 3, 33 (1988).

32. V. A. Ivanov, Preprint 85-1 (Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Electronenphysik, 1985).
33. D. A. Frank-Kamenetskii, *Lectures on Plasma Physics* (Atomizdat, Moscow, 1968) [in Russian].
34. *Tables of Spectral Lines. Reference Book* (Nauka, Moscow, 1977) [in Russian].
35. *NRL Plasma Formulary*. Ed. by David L. Book. (Laboratory for Computational Physics. Naval Research Laboratory/ Washington. D.C. 20375, Memorandum Report No. 3332).
36. *Plasma Diagnostics*. Ed. by W.Lohte-Holtgreven. (Kiel University. Nord-Holland Publishing Company. Amsterdam. 1968).
37. V. M. Gradov, A. M. Zimin, et al., *Vopr. At. Nauki Tekh., Ser. Termoyad. Syntez*, No. 1, 64 (2009).
38. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, A. M. Zimin, et al., *Prilkladnaya Fizika*, No. 6, 133 (2012).