

УДК 533.924, 621

Определение температуры электронов в микроплазменных разрядах, возбуждаемых на поверхности титана

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

Экспериментально исследован спектр излучения микроплазменного разряда, возбуждаемого на поверхности титанового образца при воздействии импульсного потока плазмы в режиме поддержания разряда импульсным электрическим током амплитудой 200 А и длительностью 20 мс. На основании анализа более 100 характерных линий излучения атомов и ионов титана в интервале длин волн 350—800 нм сделана оценка электронной температуры в микроплазменном разряде, величина которой находится в интервале 0,5—1,3 эВ.

PACS: 52.25.-b

Ключевые слова: микроплазменный разряд, спектральная линия, электрон, 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 меньшей величине напряжения ~ 100 В на металлических образцах [2—6].

Указанное явление существенного снижения порогов возбуждения МПР на металлах на много 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 ~ 100 кВ/см [6] происходит электрический пробой по срезу диэлектрической пленки вблизи ее края, а образовавшаяся плазма поверхностного электрического пробоя ($\sim 10^{20}$ см⁻³) [8—10] вызывает появление микроплазменных разрядов уже на металле с образованием плотной ($\sim 10^{20}$ см⁻³) [11] и сильно локализованной плазмы с характерными размерами 1—100 мкм [12, 13].

Воздействие такой плазмы на металл приводит к появлению в контактном слое плазмы и металла таких 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 локаль-

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 июля 2012 г.

© Иванов В. А., Коньжев М. Е., Зимин А. М., Тройнов В. И., Камолова Т. И., Летунов А. А., 2012

ных областей металла с характерной скоростью остывания $\sim 10^6$ К/с с образованием микрократеров различных размеров в пределах 0,1—20 мкм [15, 16]. В результате этих процессов происходит существенная перестройка морфологии и структуры поверхностного слоя металла на глубину 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 инициирование микроплазменных разрядов и, далее, плазма самих микроплазменных разрядов инициирует микрократеры 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 работы — изучение оптического излучения микроплазменного разряда и расчет по соотношению интенсивностей спектральных линий электронной температуры плазмы, возникающей на поверхности титана, частично покрытого оксидной диэлектрической пленкой.

Экспериментальные условия, постановка эксперимента и методы исследований

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

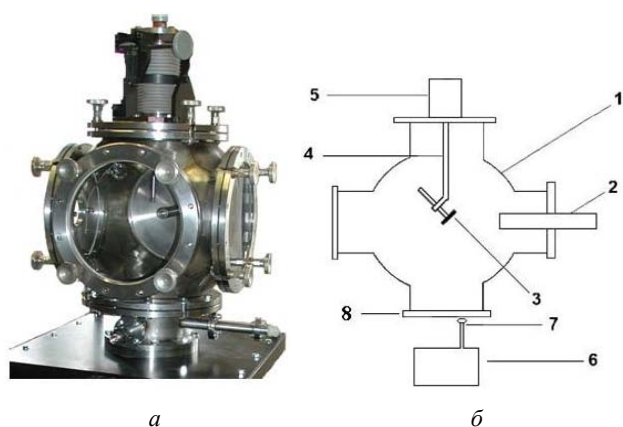


Рис. 1. Экспериментальная установка "Сфера":

- а — фотография внешнего вида установки;
 б — схема размещения плазменного инжектора, образца и спектральной аппаратуры на установке; 1 — вакуумная камера; 2 — плазменный инжектор; 3 — образец из титана на держателе манипулятора; 4 — шток вакуумного манипулятора; 5 — вакуумный манипулятор; 6 — спектрограф AVASPEC-2048; 7 — световод с коллимационной линзой; 8 — оптически прозрачное окно

Для получения спектров излучения микроплазменных разрядов, имеющих весьма малые размеры (как правило, не более 100 мкм) и быстро перемещающихся по поверхности титана, применялся метод интегральной оптической спектроскопии. Затем, анализируя спектры и соотношения интенсивностей линий атомов и ионов, выполнялись расчеты температуры на основании модели плазмы, наиболее близко описывающей условия в микроплазменных разрядах. Ранее выполненные исследования позволили прийти к заключению, что работа [11], посвященная исследованию возбуждения микрократеров на поверхности графита, наиболее близка по постановке и ожидаемым результатам к нашим исследованиям.

Результаты исследований [11] показали, что плотность плазмы в микроплазменных разрядах на графите 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 электрическом токе в разряде 100—400 А. Из этих измерений следует также, что при удалении от места локализации микрократеров 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 измерения 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 и электроны в этих условиях действуют электродинамические силы, способные ускорять и существенно нагревать электронную компоненту плазмы.

В экспериментах нас интересовала величина электронной температуры микроплазмы в непосредственной близости к поверхности образца, на котором возбуждаются и длительно (20 мс) существуют 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 параллелепипеда 3,5×3,5×12 мм и подвергались предварительной механической обработке (фрезерование, шлифование и полирование). Перед помещением в вакуумную камеру установки "Сфера" на поверхности образцов из титана формировалась диэлектрическая оксидная пленка. Для этого образцы выдерживались при температуре +400 °С в воздушной атмосфере в течение 60 мин. В этом термическом режиме на поверх-

ности титана формировалась оксидная диэлектрическая пленка толщиной около 1 мкм.

Закрепленный на держателе титановый образец помещался в вакуумную камеру, из которой откачивался воздух механическим насосом 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 трех-электродными зондами [31, 32]. По соотношению электронного и ионного токов насыщения было установлено, что основным компонентом плазмы являлись ионы водорода (90 %) и ионы углерода (9 %), а доля более тяжелых ионов составляла около 1 %. Измеренная по величине ионного тока насыщения плотность водородно-углеродной плазмы в потоке в области размещения образцов $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$; длительность импульсного потока плазмы по уровню 0,1 от максимальной плотности — 20 мкс; длительность переднего фронта импульса плазмы — 5 мкс, скорость распространения потока плазмы от инжектора к образцу — $5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$; электронная температура плазмы в плазменном потоке — 10 эВ. Фотография свечения плазменного потока и характерные осциллограммы импульса ионного тока насыщения плазмы вблизи образцов и тока в плазменном инжекторе представлены, соответственно, на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Фотография свечения плазменного потока из инжектора в видимом диапазоне длин волн (справа — плазменный инжектор диаметром 30 мм)

Возбуждение микроплазменных разрядов проводили при начальном электрическом напряжении —400 В на титановом образце. При взаимодействии внешнего потока плазмы с титаном на его поверхности возникали микроплазменные разряды (рис. 4), которые представляли собой локализованные ярко светящиеся плазменные образования с характерными размерами от 1 до 100 мкм.

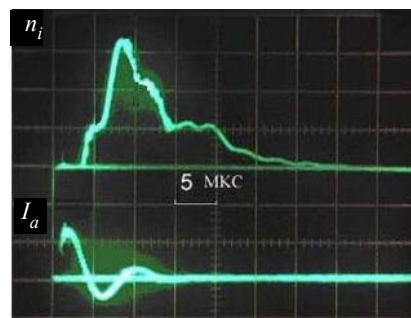


Рис. 3. Осциллограммы: n_i — импульс ионного тока насыщения плазмы вблизи поверхности образца, I_a — импульс электрического тока в плазменном инжекторе



Рис. 4. Фотография микроплазменных разрядов на образце (слева) при воздействии плазменного потока из инжектора (справа). Диаметр инжектора 30 мм

В местах локализации МПР происходило плавление металла. В результате воздействия сильного 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 микро-рельеф с характерными размерами выступов от 1 до 20 мкм (рис. 5).

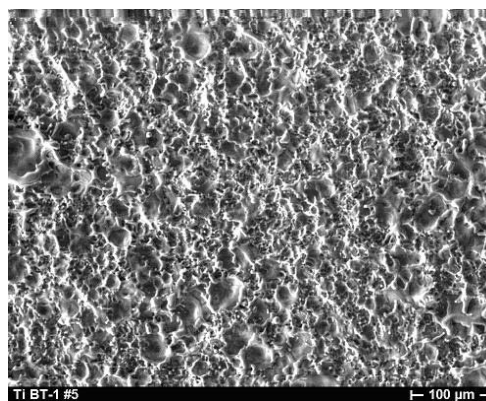


Рис. 5. Фрагмент поверхности титана с множеством микрократеров, образовавшихся в результате воздействия 10 микроплазменных разрядов в режиме: амплитуда тока разрядов 200 А, длительность импульсов 20 мс. Микрофотография получена с помощью растрового электронного микроскопа

В процессе возбуждения микроплазменных разрядов на титановых образцах регистрировались осциллограммы импульсного электрического тока МПР через образец $I(t)$ с почти постоянной амплитудой 200 А и длительностью импульсов от 1 до 20 мс (рис. 6, а, в) и электрического потенциала $U(t)$ на образцах (рис. 6, б, г). Установлено, что при протекании электрического тока МПР через образец его электрический потенциал изменялся от -400 до -30 В. Это свидетельствует о том, что импульсное напряжение -400 В прикладывалось к образцу до того, как начиналось взаимодействие внешнего потока плазмы с металлом. Обнаружено также, что при протекании электрического тока МПР через образец динамика изменения тока во времени $I(t)$ находится в противофазе с динамикой изменения электрического потенциала $U(t)$ на образце (рис. 6, в, г).

Исследования проводились в основном режиме при постоянных значениях амплитуды тока 200 А и длительности импульсов 20 мс.

В качестве основных спектроскопических приборов использовались 4 волоконно-оптических спектрографа AVASPEC-2048, настроенные на одновременное измерение спектров излучения в

девяти оптических диапазонах длин волн с высоким спектральным разрешением около 0,1 нм: 350—370; 370—390; 390—420; 420—450; 450—480; 480—510; 510—540; 540—600; 600—800 нм. Излучение микроплазменных разрядов с помощью прилагаемой к спектрографам специальной коллимационной линзы направлялось в оптоволоконный кабель длиной 1,5 м, по которому излучение поступало на дифракционную решетку спектрографа и далее регистрировалось встроенной в спектрограф CCD-матрицей. Использовались паспортные калибровки спектрального пропускания спектрографов, оптоволоконного кабеля, линзы и данные о чувствительности CCD-матрицы в указанных диапазонах. Эти данные позволяли проводить численные сопоставления интенсивностей измеренных линий во всех указанных диапазонах длин волн. Калибровка спектрографов по длинам волн осуществлялась по характеристическим линиям атомов ртути и неона в электрических разрядах. Также учитывалось время интегрирования при работе с калибровочными источниками излучения и время интегрирования в эксперименте с микроплазменными разрядами на титане, которое составляло 20 мс.

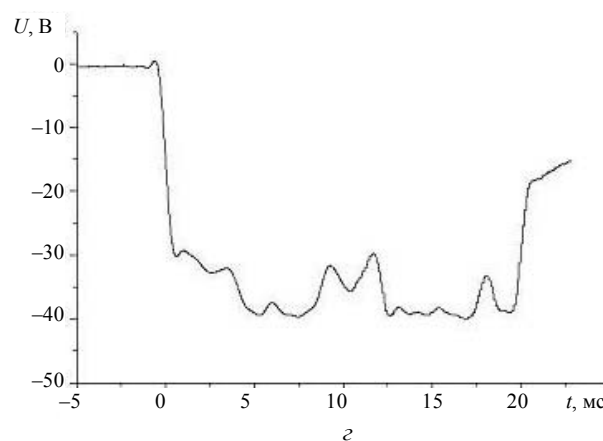
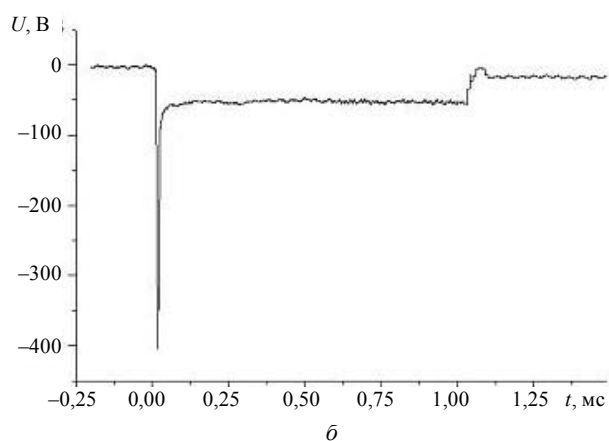
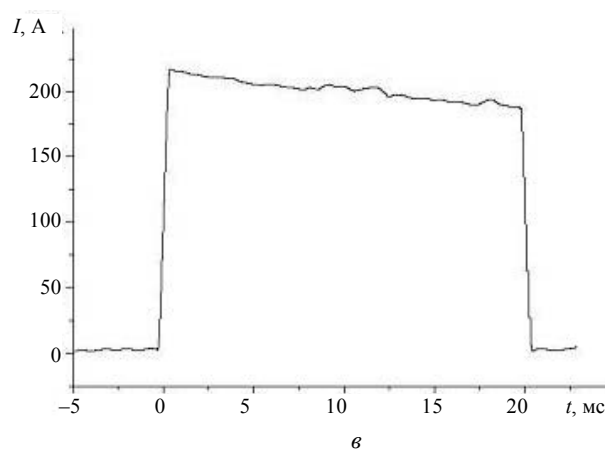
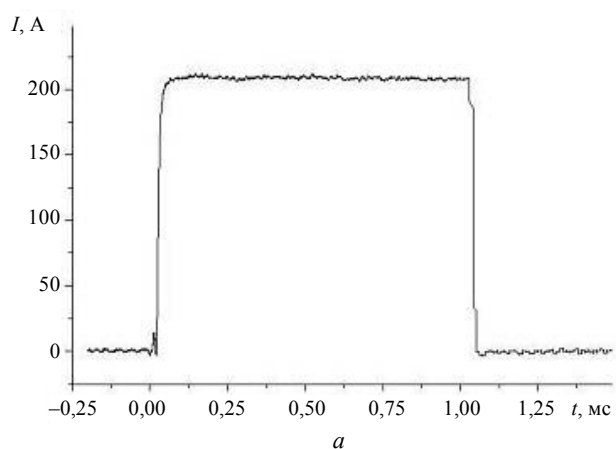


Рис. 6. Осциллограммы импульсов электрического тока (а, в) и падения напряжения на образце (б, г) при возбуждении МПР на титане:

а, б — соответствуют импульсам длительностью 1 мс; в, г — импульсам длительностью 20 мс

Область на образце, из которой принималось излучение микроплазменных разрядов, определялась путем измерения размеров светящегося пятна при вводе в оптоволоконный кабель с коллимационной линзой со стороны спектрографа излучения зеленого лазера. Диаметр пятна лазерного излучения на образце составлял около 10 мм. При этом такой размер области сбора излучения существенно превосходил размер светящейся области единичного микроплазменного разряда, но в область наблюдения могли попадать несколько локализованных ярких разрядных пятен. Тем самым, измерения характеристического спектра в данном эксперименте усреднялись по нескольким светящимся объектам, находящимся в области наблюдения.

Основные результаты экспериментальных исследований

В эксперименте получены спектры излучения микроплазменного разряда на титане в девяти диапазонах длин волн, перекрывающих интервал длин волн от 350 до 800 нм. На рис. 7 в качестве примера представлен спектр в диапазоне 350—370 нм.

Анализ полученных спектров показал, что наиболее яркие характеристические линии принадлежат возбужденным нейтральным атомам Ti I и возбужденным однократно ионизованным атомам — однозарядным ионам титана Ti II. Ярких линий двукратно и трехкратно ионизованных атомов титана не обнаружено. Всего идентифицировано 122 линии атомов и однозарядных ионов титана, которые имеют достаточный уровень интенсивности. Кроме линий титана зарегистрированы

линии атомарного водорода серии Бальмера — H_{α} ($\lambda = 656,3$ нм) и H_{β} ($\lambda = 485,1$ нм), линия атомарного кислорода O ($\lambda \approx 777$ нм), линии молекулярного углерода C_2 ($\lambda \approx 516, 513, 474, 472, 470, 468$ нм). Все эти 9 линий принадлежат атомам и молекулам, входящим либо в состав титана, либо в состав оксидной пленки, получаемой на поверхности образцов путем термического отжига в воздушной атмосфере. 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 этого, были зарегистрированы линии дублета атомарного натрия Na ($\lambda \approx 589$ нм) и две линии однозарядных ионов кальция Ca ($\lambda \approx 393, 397$ нм). Поскольку натрий и кальций не входят в состав титанового сплава образцов и оксидной пленки на поверхности титанового образца, то выяснение их происхождения потребовало дополнительных исследований. В результате было установлено, что натрий и кальций присутствуют на поверхности держателя образцов, который монтировался в вакуумной камере либо непосредственно незащищенными руками без перчаток (этим обусловлено присутствие натрия в разряде), либо с помощью латексных перчаток, покрытых порошком, в состав которого входил кальций. При многократных возбуждениях микроплазменных разрядов на титане линии натрия и кальция постепенно ослабевают от импульса к импульсу, в то время как линии титана остаются стабильными. Эти результаты позволили сделать вывод, что в состав плазмы микроплазменных разрядов входят в основном атомы и однозарядные ионы титана.

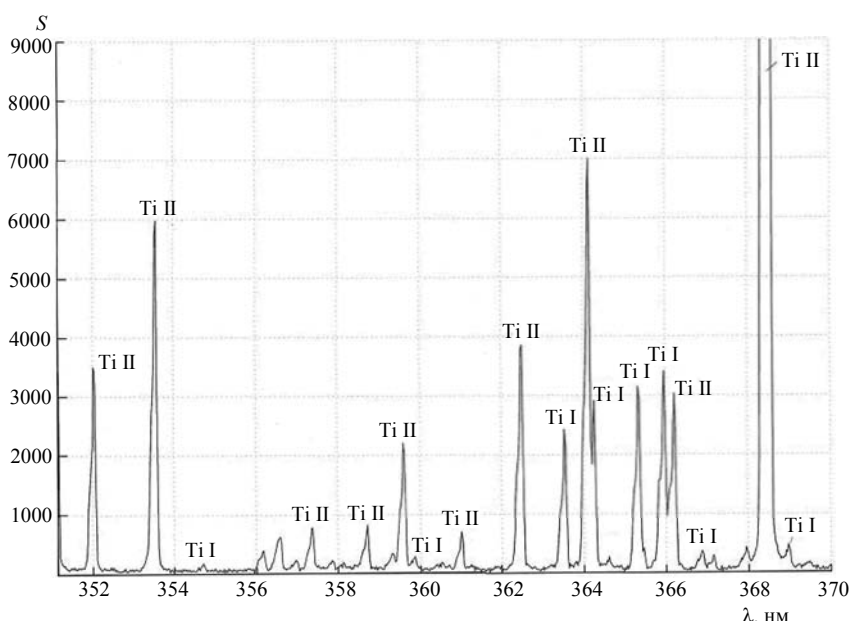


Рис. 7. Спектр излучения микроплазменного разряда на титановом образце в диапазоне длин волн $\lambda = 350\text{—}370$ нм. S — интенсивность линий в отсчетах без учета спектральной чувствительности

Отсутствие линий высокоионизованных атомов титана указывает на то, что температура электронов в плазме разрядов не может быть выше нескольких эВ. Действительно, линии двухзарядных ионов титана в интервале длин волн 350—800 нм отсутствуют. Линии трехзарядных ионов титана в этом интервале длин волн имеют длины волн 549, 540, 358 нм, а энергии возбуждения этих линий равны 28,6; 29,6; 32,1 эВ, соответственно. Из работы [33] известно, что при температуре электронов плазмы, составляющей всего 10 % от величины энергии ионизации или возбуждения, такие возбужденные ионы будут обязательно присутствовать в плазме. Поскольку трехкратно ионизован-

ные ионы титана с характерной энергией возбуждения около 30 эВ не зарегистрированы, то следует полагать, что температура электронов в плазме микрозарядов ниже 3 эВ.

Далее перейдем к анализу соотношения интенсивностей линий атомов и однозарядных ионов титана в микрозаряде. Для этого были отобраны только те линии атомов и ионов титана, которые не имеют насыщения по интенсивности и не сливаются с близко расположенными соседними линиями. Таких оказалось 101 линия. Для учета спектральной чувствительности использовались данные калибровки оптического тракта. Результаты представлены в таблице.

Экспериментально зарегистрированные линии излучения титана в микроплазменном разряде

№	λ_e	Ti	λ_T	J	№	λ_e	Ti	λ_T	J	№	λ_e	Ti	λ_T	J
1	352,01	Ti II	352,02	7372253	35	405,50	Ti I	405,50	196856	69	480,47	Ti II	480,51	246420
2	353,56	Ti II	353,54	15420468	36	407,83	Ti I	407,85	128487	70	481,09	Ti I	481,11	88978
3	357,38	Ti II	357,37	1605850	37	411,30	Ti I	411,27	171202	71	482,01	Ti I	482,04	74774
4	358,71	Ti II	358,71	866137	38	417,17	Ti II	417,19	724510	72	484,09	Ti I	484,09	216365
5	359,59	Ti II	359,60	3032434	39	429,44	Ti II	429,41	744295	73	485,56	Ti I	485,60	167857
6	361,02	Ti I	361,02	912389	40	430,57	Ti I	430,59	501533	74	487,01	Ti I	487,01	181486
7	362,50	Ti II	362,48	3163735	41	431,28	Ti II	431,28	357170	75	489,99	Ti I	489,99	204883
8	364,13	Ti II	364,13	7680957	42	431,51	Ti I	431,48	370969	76	491,35	Ti I	491,36	176279
9	364,26	Ti I	364,27	2885918	43	433,82	Ti II	433,79	695306	77	491,96	Ti I	491,99	74937
10	364,61	Ti I	364,62	261176	44	439,49	Ti II	439,50	1796225	78	492,18	Ti I	492,18	94669
11	365,33	Ti I	365,35	3903228	45	439,99	Ti II	439,98	245747	79	498,17	Ti I	498,17	694474
12	365,97	Ti II	365,97	3453023	46	441,80	Ti II	441,77	432431	80	499,11	Ti I	499,11	706248
13	366,22	Ti II	366,22	3555479	47	442,72	Ti I	442,71	228923	81	500,72	Ti I	500,72	401351
14	366,87	Ti I	366,89	335994	48	445,53	Ti I	445,53	121006	82	501,42	Ti I	501,42	613053
15	367,16	Ti I	367,17	321117	49	445,74	Ti I	445,74	159823	83	502,01	Ti I	502,00	179002
16	368,96	Ti I	368,99	399989	50	446,88	Ti II	446,85	1369284	84	502,30	Ti I	502,29	171061
17	370,61	Ti II	370,62	2508490	51	448,11	Ti I	448,13	103161	85	504,00	Ti I	504,00	444116
18	372,15	Ti II	372,16	2541953	52	448,83	Ti II	448,83	242044	86	506,47	Ti I	506,47	592693
19	372,96	Ti I	372,98	1132799	53	450,11	Ti II	450,13	1069306	87	511,34	Ti I	511,34	174358
20	374,17	Ti II	374,16	8426666	54	451,25	Ti I	451,27	106858	88	512,07	Ti I	512,04	216822
21	377,60	Ti II	377,61	725723	55	451,80	Ti I	451,80	142568	89	517,38	Ti I	517,38	480485
22	378,61	Ti I	378,60	623525	56	452,26	Ti I	452,28	129434	90	518,59	Ti I	518,63	134252
23	388,29	Ti I	388,29	926119	57	453,38	Ti II	453,39	1764495	91	518,87	Ti II	518,87	338105
24	390,02	Ti II	390,05	3163342	58	454,47	Ti I	454,47	111175	92	519,30	Ti I	519,30	580461
25	390,45	Ti I	390,48	294189	59	454,97	Ti II	454,96	2409092	93	521,04	Ti I	521,04	706165
26	391,31	Ti II	391,35	2537108	60	455,26	Ti I	455,25	151506	94	522,65	Ti II	522,66	224013
27	394,87	Ti I	394,87	354777	61	456,40	Ti II	456,38	908637	95	533,70	Ti II	533,68	121796
28	395,62	Ti I	395,63	373067	62	457,20	Ti II	457,20	1836789	96	564,45	Ti I	564,41	119535
29	395,84	Ti I	395,82	472625	63	458,99	Ti II	458,99	134666	97	566,27	Ti I	566,29	67950
30	398,14	Ti I	398,18	496343	64	461,76	Ti I	461,73	156722	98	595,30	Ti I	595,32	168134
31	398,97	Ti I	398,98	511079	65	462,29	Ti I	462,31	116225	99	596,60	Ti I	596,58	151767
32	399,84	Ti I	399,86	710292	66	465,67	Ti I	465,65	384473	100	597,88	Ti I	597,86	117463
33	401,24	Ti II	401,24	177276	67	466,79	Ti I	466,76	464619	101	674,30	Ti I	674,31	55685
34	402,84	Ti II	402,83	281360	68	468,17	Ti I	468,19	565013					

Примечание. № — 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 всех элементов оптической системы.

Энергии возбуждения линий титана, приведенных в таблице, попадают в интервал значений 2—5,8 эВ. Следовательно, оценка минимального значения электронной температуры в микроразряде составит около 0,6 эВ. Таким образом, можно полагать, что электронная температура в микроразряде лежит в интервале значений 0,6—3 эВ.

Из фотографий микроплазменных разрядов рис. 4 видно, что размер области 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 10^{15} см^{-3} . Полагая, что температура электронов лежит в интервале значений 0,6—3 эВ, получаем из [35] оценку частоты электрон-ионных столкновений ν_{ei} :

$$\nu_{ei} \approx 2,9 \cdot 10^{-6} \frac{n_e L}{T_e^{\frac{3}{2}}},$$

где n_e — плотность электронов плазмы;

L — кулоновский логарифм;

T_e — температура электронов в эВ.

Для оценок примем, что $L \approx 10$, $n_e \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $T_e \approx 1$ эВ, тогда оценка частоты столкновений $\nu_{ei} \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Поскольку характерное время спонтанного излучения атомов и ионов титана $\tau \approx 10^{-8} \text{ с}$, то они излучают не спонтанно, а под воздействием столкновений с электронами. Тогда это соотношение позволяет рассматривать модель локального термодинамического равновесия для излучения плазмы, т. е. интенсивность линий характеристического излучения атомов и ионов в равновесной максвелловской плазме определяется заселенностями энергетических уровней, с которых происходит излучение. Оценка из соотношения частоты электрон-ионных столкновений согласуется с критерием, приведенным в [36]:

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

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

При температуре электронов около 1 эВ и при средней величине ΔE 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 этом случае соотношение интенсивностей, например, двух линий будет определяться заселенностями соответствующих возбужденных уровней и опи-

сываться экспоненциальной формулой Больцмана с электронной температурой T_e , входящей в показатель экспоненты [36]:

$$\frac{J_m}{J_{m^*}} = \frac{n_m}{n_{m^*}} = \frac{g_m}{g_{m^*}} \times \exp\left(\frac{E_{m^*} - E_m}{T_e}\right),$$

где J_m и J_{m^*} — интенсивности линий уровней m и m^* ;

n_m и n_{m^*} — заселенности уровней m и m^* ;

g_m и g_{m^*} — статистические веса уровней m и m^* ;

E_m и E_{m^*} — энергии возбуждения соответствующих уровней.

Были построены графики зависимости относительных интенсивностей линий атомов и ионов титана в полулогарифмическом масштабе в зависимости от энергии возбуждения верхнего уровня соответствующей линии излучения в различных диапазонах длин волн. На рис. 8 приведен в качестве примера график для диапазона волн $\lambda = 485—521 \text{ нм}$ [37].

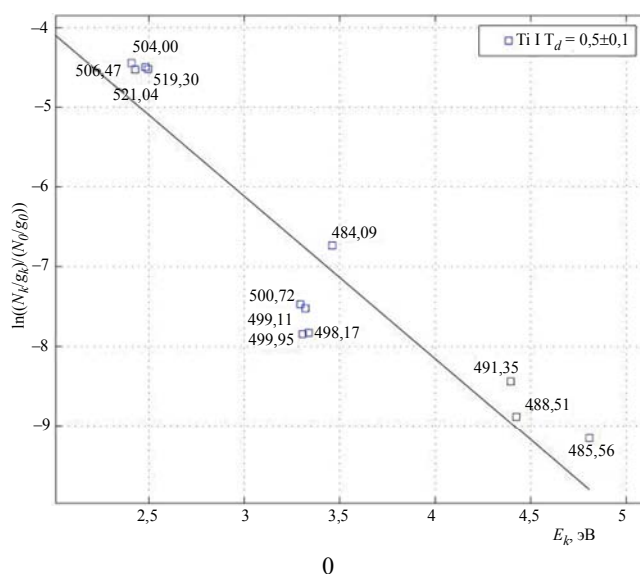


Рис. 8. График относительных интенсивностей линий атомов титана в полулогарифмическом масштабе в зависимости от энергии возбуждения E_k верхнего уровня линий для диапазона длин волн $\lambda = 485—521 \text{ нм}$. Средняя расчетная температура электронов составляет $T_d = 0,5 \pm 0,1 \text{ эВ}$

Обсуждение результатов

В проведенных исследованиях экспериментально установлено, что электронная температура, рассчитанная на основе сравнения интенсивностей линий излучения возбужденных в микроплазменном разряде атомов титана, составляет величину в интервале значений 0,2—0,5 эВ, в то время как для однозарядных ионов титана значение электронной температуры оказывается существенно выше, а именно, 1,2—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 (или в энергетической шкале 0,18 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 под воздействием силы Ампера. Поэтому энергия электронов по мере движения от поверхности к периферии плазмы будет нарастать, что приводит к увеличению скорости ионизации атомов и возбуждения образовавшихся ионов. Таким образом, 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 будет происходить ионизация атомов титана и возбуждение ионов 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.

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 200 А и длительности импульса тока 20 мс в возбуждаемых микроплазменных разрядах получены и исследованы спектры оптического излучения атомов и ионов титана. Анализ этого излучения показал, что в спектрах присутствуют, в основном, линии атомов и однозарядных ионов титана. Линии ионов титана двух- и трехкратной ионизации не обнаружены. Наблюдаются также слабые молекулярные полосы С₂, линии атомов Са и дублет Na, обусловленные наличием примесей.

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

На основе модели локального термодинамического равновесия и с использованием характеристик более ста спектральных линий излучения атомов и ионов титана проведены расчеты температуры электронов в плазме микроразрядов. При этом установлено, что электронная температура для линий возбужденных атомов титана находится в интервале 0,2—0,5 эВ. Электронная температура, определенная по линиям возбужденных однозарядных ионов титана, лежит в интервале значений 1,2—1,3 эВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 11-08-00263).

Литература

1. Мезяц 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. // Там же. 2006. № 6. С. 114.
4. Ivanov V. A., Sakharov A. S., Konyzhev M. E. // Plasma Physics Reports. 2008. V. 34. No. 2. P. 150.
5. Ivanov V. A., Jüttner B., Pursch H., Siemroth P. // Adw DDR Beitrage aus der Plasma Physik 1983. B. 23. H. 6. P. 551.
6. Ivanov V. A., Sakharov A. S., 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).
7. Plasma Diagnostic Techniques / 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., Гавриленко В. П., Окс Е. А., Летунов А. А. // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 40.
10. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Gavrilenko V. P., Oks E., Letunov A. A. Creation of super dense plasma due to contracting of microwave discharge on surface of dielectric / In book: Strong Microwaves in plasmas. — Nizhny Novgorod, 2005.
11. Ivanov V. A., Jüttner B., Pursch H. // Pub. Nuclear and Plasma Sciences Society USA. IEEE Plasma Science. 1985. V. PS-13. No. 5. P. 334.
12. Ivanov V. A., Jüttner B., 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.
13. Ivanov V. A., Jüttner B., Zimin A. M. // Plasma Devices and Operations. 2002. V. 10. P. 109.

14. Зирот П., Иванов В. А. Измерение механического давления плазмы вакуумной дуги/ Плазменные генераторы и процессы: Матер. Ш совещ. междунар. рабочей группы "Физика низкотемпературной плазмы". Проблемная комиссия многостороннего сотрудничества социалистических стран. — Минск: ИТМО АН БССР. 1988.
15. Иванов В. А., Кonyзhev М. Е., Куksенова 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., Кonyзhev М. Е., Спиpин А. М. и др. // Прикладная физика. 2007. № 6. С. 60.
18. Иванов В. А., Кonyзhev М. Е., Сатунин С. И. и др. // Там же. 2008. № 6. С. 62.
19. Иванов В. А., Куksенова Л. И., Лаптева В. Г., Кonyзhev М. Е. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 3. С. 84.
20. Иванов В. А., Куksенова Л. И., Лаптева В. Г., Кonyзhev М. Е. // Там же. 2007. № 6. С. 81.
21. Иванов В. А., Кonyзhev М. Е., Спиpин А. М. и др. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 97.
22. Иванов В. А., Кonyзhev М. Е., Спиpин А. М. и др. // Там же. 2007. № 6. С. 60.
23. Иванов В. А., Куksенова Л. И., Лаптева В. Г., Кonyзhev М. Е. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 6. С. 81.
24. Иванов В. А., Куksенова Л. И., Лаптева В. Г., Кonyзhev М. Е. // Там же. 2008. № 1. С. 74.
25. Иванов В. А., Кonyзhev М. Е., Куksенова Л. И. и др. // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 4. С. 396.
26. Куksенова Л. И., Лаптева В. Г., Иванов В. А., Кonyзhev М. Е. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 5. С. 10.
27. Иванов В. А., Кonyзhev М. Е., Куksенова Л. И. и др. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 57.
28. Иванов В. А., Кonyзhev М. Е., Куksенова Л. И. и др. // Там же. 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. V. // Pub. Nuclear and Plasma Sciences Society USA. IEEE Plasma Science. 1985. V. PS-13. No. 5. P. 336.
31. Иванов В. А. // Краткие сообщения по физике/ФИАН. 1988. № 2. 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. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. Таблицы спектральных линий: Справочник. — М.: Наука, 1977.
35. David L. NRL Plasma Formulary. Book. Laboratory for Computational Physics. Naval Research Laboratory. — Washington. D.C. 20375 (Memorandum Report No. 3332).
36. Plasma Diagnostics. Kiel University. Edited by W. Lohte-Holtgreven. — Amsterdam: Nord-Holland Publishing Company, 1968.
37. Градов В. М., Зимин А. М., Кривицкий С. Е., Шумов А. В. // ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 2009. Вып. 1. С. 64.

Determination of an electron temperature of microplasma discharges excited on the titanium surface

V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, A. A. Letunov
Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

A. M. Zimin, V. I. Troinov
Bauman Moscow State Technical University
5 Second Bauman str., Moscow, 105005, Russia

The emission spectrum of microplasma discharge, excited on titanium by pulsed plasma flow, in the mode with the electric current amplitude of 200 A and with the pulse duration of 20 ms, was studied experimentally. Based on analysis of over 100 characteristic emission lines of titanium atoms and titanium ions in the wavelength band 350—800 nm, the electron temperature of microplasma discharge was estimated to be in the range 0.5—1.3 eV.

PACS: 52.25.-b

Keywords: microplasma discharge, spectral line, electron, temperature.

Bibliography — 37 references.

Received July 20, 2012