

Изучение диодных свойств двойного слоя комбинированного газового разряда

© Б.М. Бржозовский,¹ М.Б. Бровкова,¹ С.Г. Гестрин,² Е.П. Зинина,¹ В.В. Мартынов¹

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
101990 Москва, Россия

² Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
410054 Саратов, Россия
e-mail: gestrin.s@yandex.ru

Поступило в Редакцию 24 января 2023 г.

В окончательной редакции 26 апреля 2023 г.

Принято к публикации 29 апреля 2023 г.

Показано, что при зажигании вблизи поверхности обрабатываемого изделия, размещенного в резонаторной камере, комбинированного газового разряда, возникает двойной слой, обладающий диодными свойствами. Повышение уровня подводимой в камеру СВЧ мощности привело к уменьшению сопротивлений эквивалентного диода в открытом и закрытом режимах и увеличению тока, протекающего через установку. Попадающие на поверхность изделия ионы ионизированного СВЧ полем технологического газа (азота или аргона), наполняющего камеру, диффундируют внутрь изделия в результате процесса термодиффузии, что привело к образованию упрочняющего поверхностного слоя. Разогрев изделия происходил при подаче на него положительного потенциала смещения потоком поступающих на поверхность высокоэнергичных электронов, ускоренных до энергий в десятки и сотни электронвольт в зоне ускорения разряда.

Ключевые слова: комбинированный разряд, низкотемпературная плазма, ионно-плазменное диффузионное внедрение, плазменная упрочняющая обработка, двойной слой, диодный эффект.

DOI: 10.21883/JTF.2023.08.55971.11-23

Введение

Сложившаяся картина развития мирового промышленного производства показывает, что проблема повышения долговечности металлических изделий различного назначения продолжает оставаться актуальной.

Решение проблемы повышения долговечности осуществляется за счет упрочняющей обработки поверхностного слоя изделий [1–3]. К известным методам плазменной упрочняющей обработки относятся: термоупрочнение [4–6], ионно-плазменное диффузионное внедрение [7–9], ионно-лучевая упрочняющая обработка [10,11], МРАСVD-метод (Microwave Plasma Assisted CVD) осаждения поликристаллических алмазных пленок [12–14], позволяющие изменять свойства поверхностного слоя и способствующие повышению его твердости.

Ионно-плазменное диффузионное насыщение поверхностного слоя изделия азотом называется азотированием. Обрабатываемую деталь, находящуюся под отрицательным потенциалом $\sim 0.4\text{--}1.1\text{ кВ}$, погружают в плазму тлеющего разряда низкого давления в газе, содержащем азот. Положительно заряженные ионы атомарного азота ускоряются в катодном слое по направлению к детали. При бомбардировке ионы внедряются в поверхность, разогревая ее до температуры $500\text{--}600^\circ\text{C}$ и выше, что обеспечивает термодиффузию насыщающего элемента в объеме детали.

Для химико-термической обработки материалов в плазме могут эффективно использоваться не только газовые разряды, но и создающие плазму низкоэнергетические электронные пучки с плотностью потока энергии $1\text{--}10\text{ Вт/см}^2$ [15–17].

Рассмотрению воздействия тлеющего и СВЧ газовых разрядов на поверхность изделий посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ [18–31]. Так, в работах [30,31] обсуждается обработка изделий, размещенных вблизи антенны — катода внутри резонаторной камеры, заполненной аргоном при давлении $P = 40\text{--}130\text{ Па}$, в облаке сверхплотной плазмы $\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_e} > \omega$, где e — элементарный электрический заряд, m_e — масса электрона, $\omega = 1.54 \cdot 10^{10}\text{ с}^{-1}$ — частота колебаний СВЧ поля, создаваемого магнетроном.

К данному направлению исследований можно отнести и работы [26–29], в которых изучалось упрочнение поверхности обрабатываемых металлических образцов под воздействием низкотемпературной плазмы асимметричного комбинированного газового разряда в разработанной авторами технологической установке.

Воздействию плазмы подвергались образцы и изделия из конструкционных и легированных сталей (45, ШХ-15, Х16НЗМАД, 40Х, 12Х13, 40Х13, 12Х18Н10Т, Х12МФ, Р6М5, Р18), а также сплавов (латуни, Д16Т), включая твердые (вольфрамо- и титано-вольфрамокобальтовые).

В резонаторной камере установки находился при давлении $P = 200\text{--}400\text{ Па}$ слабо ионизированный техноло-

гический газ (азот, аргон, или их смесь) под одновременным воздействием СВЧ поля, создаваемого магнетроном с рабочей циклической частотой $\omega = 1.54 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$, и постоянного электрического поля, возникающего при подаче на обрабатываемое изделие постоянного положительного потенциала смещения $\varphi_0 \approx 50\text{--}250 \text{ V}$. Плазменное облако разряда формировалось вблизи поверхности изделия. Предложенный в [26–29] способ обработки позволяет сфокусировать СВЧ энергию непосредственно на обрабатываемом изделии, и этим он существенно отличается от подхода, развитого в [30,31]. Обычно используемая для обработки СВЧ мощность, составляющая $P_0 \approx 30\text{--}150 \text{ W}$, поступала от магнетрона по кольцевому волноводу через прорези в резонаторную камеру. В [27,29] было показано, что комбинированный разряд имеет слоистую структуру и состоит из приповерхностного слоя, зоны ускорения электронов до высоких энергий $\sim 50\text{--}200 \text{ eV}$, зоны замедления электронов и зоны амбиполярной диффузии электронов с ионами к стенкам резонаторной камеры.

В настоящей работе показано, что зона ускорения, приобретающая вследствие ухода из нее быстрых электронов положительный заряд, и отрицательно заряженная зона замедления образуют двойной слой, обладающий диодными свойствами. Сопротивление „диода“ в закрытом режиме работы в $100\text{--}1000$ раз превосходит его сопротивление в открытом режиме $R_{\text{back}} \gg R_{\text{forw}}$.

Низкая пропускная способность „диода“ в закрытом режиме связана с наличием на изделии отрицательного плавающего потенциала $-U_f$, что приводит к существованию в приповерхностном слое разряда потенциального барьера eU_f , не подпускающего электроны с энергией $\varepsilon_e \leq eU_f$ к поверхности, в то время как электроны с энергией $\varepsilon_e > eU_f$ создают отрицательный ток $I_e = 0.1\text{--}10 \text{ mA}$, компенсирующий ток положительных ионов. При этом образующиеся в зоне ускорения высокоэнергичные электроны, ускоренные СВЧ полем, свободно движутся к стенкам камеры, создавая диффузионный ток $I_e = 0.1\text{--}2 \text{ A}$ и теряя энергию в зоне замедления, которая затрачивается на возбуждение и ионизацию находящихся там молекул или атомов технологического газа. В зоне замедления, таким образом, происходит окончательная диссипация основной части подводимой от магнетрона СВЧ мощности.

При подаче на изделие положительного потенциала смещения φ_0 высота потенциального барьера уменьшается, а электронный ток, направленный к поверхности, увеличивается, достигая значений $I_e = 2\text{--}20 \text{ mA}$, превосходящих ионный ток насыщения $I_e > I_{i0}$. Изменяя величину потенциала смещения, можно управлять высотой потенциального барьера для электронов, а тем самым и сопротивлением „диода“ в закрытом режиме R_{back} .

Уменьшение R_{back} приводит к увеличению поступления высокоэнергичных электронов из зоны ускорения на поверхность изделия, а тем самым и к увеличению температуры изделия до значений $500\text{--}600^\circ \text{C}$ и выше

(вплоть до температуры плавления), необходимых для термодиффузии ионов в объеме детали.

Таким образом, рассматриваемый в настоящей работе метод можно считать разновидностью ионно-плазменного диффузионного внедрения, в котором вместо тлеющего разряда используется комбинированный газовый разряд, а разогрев поверхности изделия осуществляется не за счет ускоренных ионов, а за счет потока высокоэнергичных электронов.

Новизна предлагаемого подхода упрочнения состоит в возможности обработки изделий со сложным рельефом поверхности без использования устройств их сканирования и малых мощностях СВЧ разряда — $0.03\text{--}0.3 \text{ kW}$, что осуществляется благодаря локализации разряда на самом изделии. При этом максимальная скорость роста толщины упрочняющего слоя $0.4 \mu\text{m}/\text{min}$ достигается на участках поверхности с максимальной положительной кривизной. При обработке таких металлорежущих инструментов, как фреза, сверло, резец максимальное упрочнение поверхности происходит вблизи их режущих кромок. Подробно сравнение возможностей предложенной авторами технологии нанесения упрочняющего слоя с возможностями нанесения алмазных покрытий с помощью современных МРАСVD-методов произведено в разд. 3.

Основными результатами воздействия плазмы комбинированного газового разряда на поверхностный слой обрабатываемого изделия являются изменения морфологии и химического состава. Микротвердость и плотность слоя повышаются, а его электро- и теплопроводность понижаются. Понижение теплопроводности имеет большое значение для металлорежущего инструмента различного назначения, например, цельных и сборных резцов, поскольку поступление в него избыточного тепла приводит к интенсификации процессов ползучести материала и, как следствие, повышению скорости формирования дефектов (лунка и фаска износа), приводящих к потере работоспособности.

Воздействие на поверхностный слой плазмы комбинированного разряда приводит к существенному изменению его свойств [29]: повышению прочности по параметру микротвердости в среднем в 1.5 раза; износостойкости в 2–3 раза, коррозионной стойкости в 2–6 раз и, как следствие, увеличению долговечности изделий.

Целями настоящей работы являются:

1) Изучение диодных свойств формирующегося вблизи поверхности обрабатываемого изделия двойного слоя, образованного зоной ускорения и зоной замедления разряда, определение их зависимости от уровня подводимой в камеру СВЧ мощности, а также возможности управления данными свойствами с помощью подачи на изделие постоянного потенциала смещения φ_0 ;

2) изучение процессов, происходящих в технологической установке, на основе анализа ее эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами;

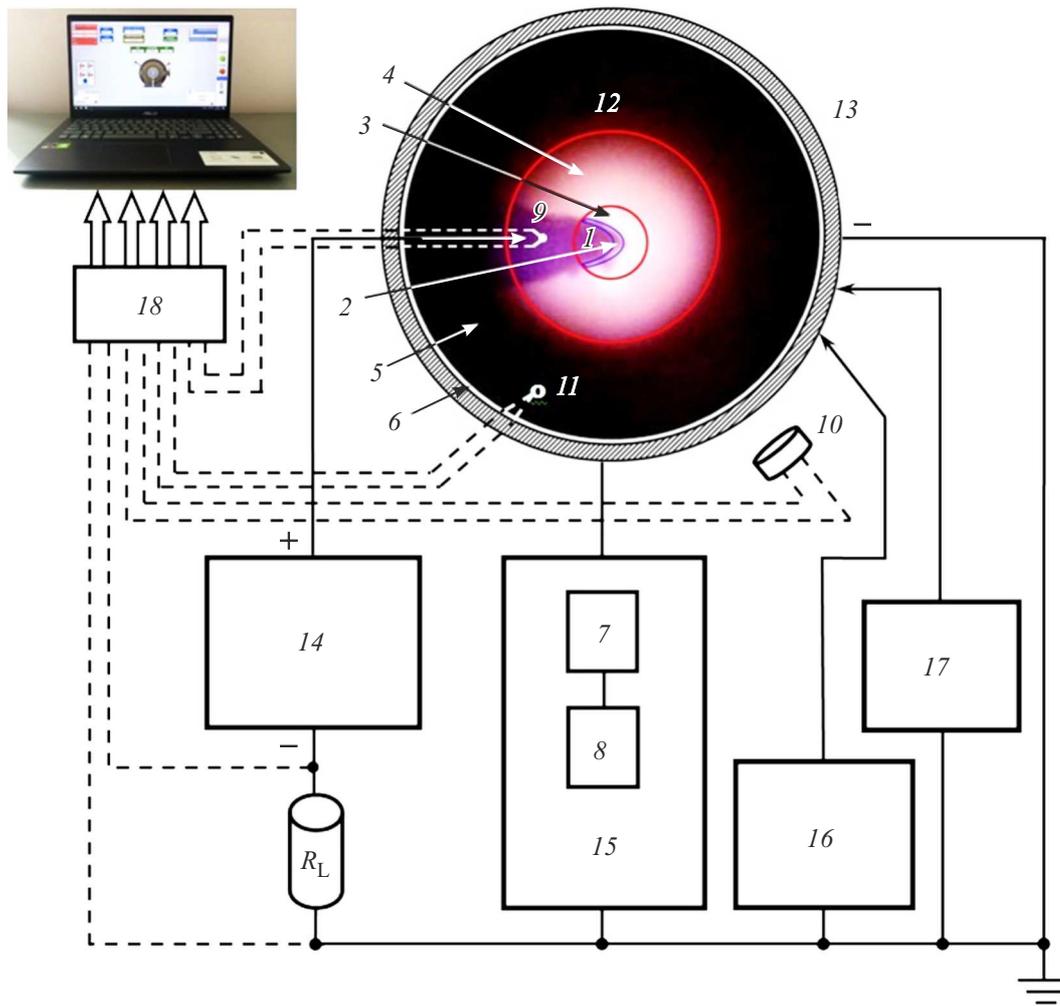


Рис. 1. Схема установки и процесса низкотемпературной плазменной модификации: 1 — изделие, 2 — приповерхностный слой, 3 — зона ускорения электронов, 4 — зона замедления электронов, 5 — зона амбиполярной диффузии, 6 — катодный слой, 7 — магнетрон, 8 — автономный накальный трансформатор, 9 — термопара, 10 — фотодиод, 11 — вакуумметр, 12 — разряд, 13 — рабочая камера, 14 — источник постоянного напряжения, 15 — генератор СВЧ энергии, 16 — вакуумная система, 17 — система напуска газа, 18 — аналого-цифровой преобразователь, R_L — нагрузочное сопротивление.

3) нахождение оптимальных условий обработки изделия для дальнейшего повышения показателей долговечности.

1. Оборудование, методы и подходы

1.1. Краткое описание технологической установки

Процесс низкотемпературной плазменной модификации реализуется в специальной установке, в состав которой входят (рис. 1):

— вакуумная система и система напуска технологического газа, создающие в рабочей камере среду пониженного давления (~ 300 Па), в которой непрерывно протекают ионизационные процессы;

— генератор СВЧ энергии и источник постоянного напряжения, формирующие сверхвысокочастотное электромагнитное и электростатическое поля в рабочей камере, взаимодействие которых обеспечивает зажигание разряда плазмы непосредственно вокруг поверхности изделия и передачу ей энергии электронами и ионами плазмы.

Для наблюдения за воздействием разряда на поверхность изделия в системе управления установкой реализованы каналы обратной связи, по которым передаются сигналы о токе смещения, температуре на конце изделия, не подвергающемся непосредственному воздействию плазмы (лаговой температуре), интенсивности свечения разряда и давлению в рабочей камере. Данные сигналы регистрируются с помощью вольтметра, термопары, фотодиода и манометрического датчика,

отображающих параметры электрических, тепловых и оптических процессов (рис. 1).

Цилиндрическая резонаторная камера установки с внутренним радиусом стенок $r_{wall} = 7.5 \text{ см}$ и длиной $l = 30 \text{ см}$ имеет собственные частоты колебаний вида E_{mnp} :

$$\omega_{mnp} = c \sqrt{\left(\frac{\nu_{mn}}{r_{wall}}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2}, \quad (1)$$

где ν_{mn} — корень с номером m функции Бесселя порядка n .

Подставляя в (1) $\nu_{11} = 3.832$, а также размеры резонаторной камеры, находим $\omega_{110} = 1.53 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ для моды E_{110} , что близко к циклической частоте магнетрона $\omega = 1.54 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

1.2. Эквивалентная схема установки и определение ее сосредоточенных параметров

Эквивалентная схема рабочей установки представлена на рис. 2. Определим значения основных параметров входящих в нее элементов. Участок 1–2 представляет магнетрон, характеризуемый мощностью P_0 и частотой ω . Контур 3–6 ограничивает эквивалентную схему резонаторной камеры с основным колебанием E_{110} , C , L , G_{wall} — емкость, индуктивность, и активная проводимость стенок соответственно. C_1 и C_2 — взаимные емкости обрабатываемого изделия и стенок резонаторной камеры. При возникновении разряда в резонаторной камере проявляется диодный эффект, сопровождающийся возникновением двойного слоя, состоящего из слоев положительного и отрицательного зарядов, окружающих изделие (зон ускорения и замедления электронов соответственно). В открытом режиме „диод“ пропускает быстрые электроны из зоны ускорения в зону замедления и обладает относительно малым сопротивлением R_{forw} .

Убывание быстрых электронов в этой области постоянно пополняется за счет ускорения медленных электронов в высокочастотном электрическом поле СВЧ разряда. В закрытом режиме (потенциал изделия $\Delta\varphi > -U_f$) сопротивление „диода“ R_{back} велико и через „диод“ протекает небольшой электронный ток, несколько превышающий ионный ток насыщения $|i_e| > i_{i_satur}$.

Если провести аналогию между двойным слоем и вакуумным диодом, то зона ускорения исполняет роль катода, а ускоренные в ней до больших энергий электроны аналогичны электронам, выходящим из катода вследствие термоэлектронной эмиссии. Участки 6–7 и 5–9 содержат соответствующий двойному слою газового разряда диод VD , сопротивления которого R_{forw} и R_{back} — в открытом и закрытом режимах.

Участок схемы 8–10 содержит источник постоянного напряжения, ЭДС которого ε и внутреннее сопротивление $r = 1 \text{ к}\Omega$, нагрузочное сопротивление R_L и вольтметр V . Источник необходим для подачи на

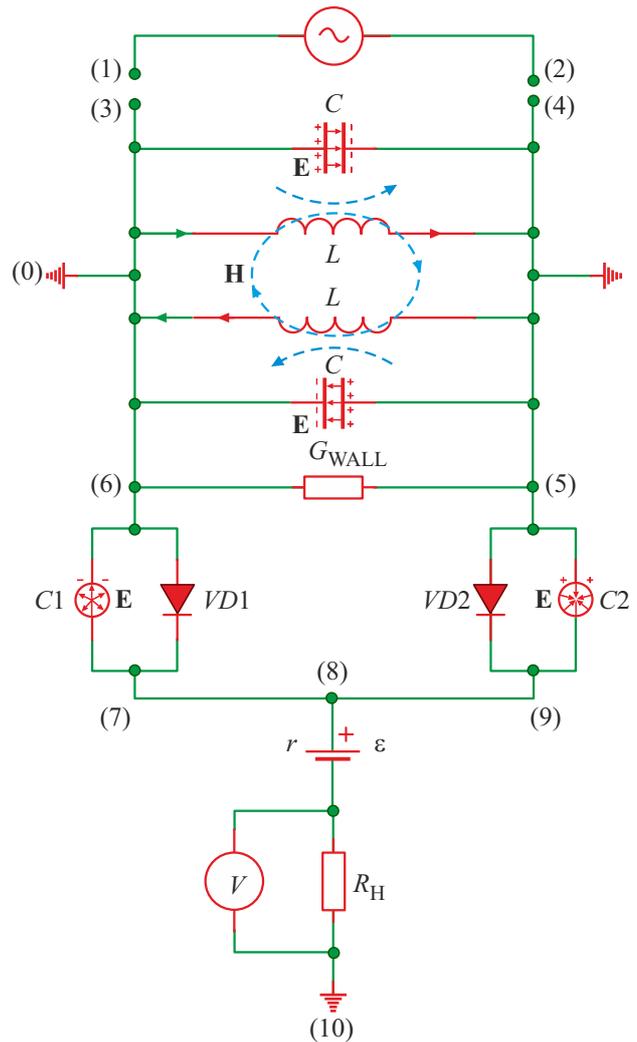


Рис. 2. Эквивалентная схема технологической установки.

изделие постоянного потенциала смещения ε_0 . Если $\varepsilon_0 > 0$, то через 0–6–7–8–10 протекает постоянный ток $I = \varepsilon / (R_{back} + R_L + r)$. Потенциал смещения $\varepsilon_0 = IR_{back} = \varepsilon R_{back} / (R_{back} + R_L + r)$. Если выполняется условие $R_{back} \gg R_L + r$, то $\varphi_0 \approx \varepsilon$.

Оценим эквивалентную емкость резонатора по формуле для емкости плоского конденсатора $C = \varepsilon_0 S / l$. При $l = 0.3 \text{ м}$, $S = 0.5\pi r_{wall}^2 = 8.84 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ находим $C = 2.61 \cdot 10^{-13} \text{ Ф}$, емкостное сопротивление данного конденсатора $X_{0C} = 1 / (\omega C) = 249 \Omega$.

Эквивалентная индуктивность резонатора $L = 1 / (\omega^2 C) = 1.62 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$, индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 249 \Omega$.

Взаимные емкости изделия, имеющего форму шарика радиуса $R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, и стенок камеры заменяем емкостями сферических конденсаторов $C_1 = C_2 = 8\pi\varepsilon_0 R = 8.9 \cdot 10^{-13} \text{ Ф}$. Таким образом, при последовательном соединении их суммарная емкость $C_{sum} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2) = 4\pi\varepsilon_0 R$ равняется емкости шарика радиуса $R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Значения

Таблица 1. Параметры разряда, определенные в [29], с использованием соотношений, полученных в [32,33]

СВЧ мощность P_0 (W)	Плавающий потенциал $-U_f$ (V)	Температура электронов T_e (K)	Концентрация ионов n_i (m^{-3})	Энергия электронов $\bar{\epsilon}_e^*$ (eV)
32	-130	$6.85 \cdot 10^5$	$1.44 \cdot 10^{15}$	89
119	-140	$1.24 \cdot 10^6$	$1.21 \cdot 10^{16}$	160
172	-130	$1.52 \cdot 10^6$	$1.84 \cdot 10^{16}$	197
225	-118	$1.29 \cdot 10^6$	$2.41 \cdot 10^{16}$	167
275	-85	$7.41 \cdot 10^5$	$2.64 \cdot 10^{16}$	96
300	-35	$4.06 \cdot 10^5$	$6.39 \cdot 10^{16}$	53

соответствующих емкостных сопротивлений $X_C = 1/(\omega C) = 75 \Omega$.

1.3. Вольт-амперные характеристики установки и параметры зоны ускорения разряда

Исследования, результаты которых изложены в настоящей работе, являются продолжением исследований, начатых в [29]. Ранее в [29] на основе анализа вольт-амперных характеристик, изображающих зависимость силы постоянного тока, протекающего через установку, от ЭДС источника постоянного напряжения $i(\epsilon)$, были с использованием соотношений, найденных в [32,33], получены оценки для целого ряда физических параметров, характеризующих газовый разряд. Значения данных параметров: плавающего потенциала U_f , температуры электронов T_e , концентрации ионов n_i , средней кинетической энергии электронов в зоне ускорения $\bar{\epsilon}_e^*$ приводятся в виде табл. 1 [29].

2. Результаты

2.1. Физические процессы, протекающие в установке

Воспользуемся эквивалентной схемой, приведенной на рис. 2, а также вольт-амперными характеристиками установки [29] для анализа протекающих в ней физических процессов.

Своего максимального значения электронный ток на вольт-амперных характеристиках достигает при уровне СВЧ мощности $P_0 = 300$ W, ЭДС источника $\epsilon \approx +200$ V и составляет $I_{e0} = 0.02$ A, а ионный ток насыщения при том же значении мощности $I_{i0} = 0.01$ A. Таким образом, отношение $I_{e0}/I_{i0} = 2$. Воспользуемся далее известными выражениями для электронного тока насыщения:

$$I_{e0}^* = \frac{1}{4} n_e e S \sqrt{\frac{3k_B T_e}{m_e}}, \tag{2}$$

и формулой Бома для ионного тока насыщения:

$$I_{i0} = 0.4 n_i e S \sqrt{\frac{2k_B T_e}{m_i}}. \tag{3}$$

Здесь n_e и n_i — концентрации электронов и ионов соответственно, T_e — электронная температура, m_e и m_i — массы электрона и иона, S — площадь поверхности обрабатываемого изделия, k_B — постоянная Больцмана.

Из (2) и (3) находим

$$\frac{I_{e0}^*}{I_{i0}} = 0.77 \sqrt{\frac{m_i}{m_e}}. \tag{4}$$

Подставляя в (4) значения массы электрона и массы иона аргона $m_i = 6.63 \cdot 10^{-26}$ kg при $n_e = n_i$, находим $I_{e0}^*/I_{i0} = k = 210$, что более чем в 100 раз превосходит значение $I_{e0}/I_{i0} = 2$, найденное по вольт-амперным характеристикам. Таким образом, на поверхность изделия попадает лишь один электрон из ста, рождающихся в зоне ускорения разряда, остальные поступают в зону замедления, а после ее прохождения диффундируют вместе с ионами амбиполярно к стенкам резонаторной камеры. Из зоны ускорения через зону замедления протекает электронный диффузионный ток $I_{e0}^* = 105I_{e0} = 210I_{i0}$. Ускоренные СВЧ полем вблизи поверхности образца в зоне ускорения высокоэнергичные электроны с удалением от нее будут тормозиться вследствие неупругих столкновений с атомами Ar, переводя их из нормального в возбужденное электронное состояние дискретного или непрерывного спектра [27].

СВЧ энергия, поступающая в резонаторную камеру от магнетрона, в зоне ускорения передается электронам, при дальнейшем движении которых через зону замедления происходит ее диссипация. На эквивалентной схеме (рис. 2) заменим диффузионный ток I_{e0}^* на действующее значение активной составляющей $I_R = I_{e0}^*$ некоторого тока проводимости I , протекающего через сопротивление R_{forw} диода VD так, чтобы выделяемая на R_{forw} активная мощность Q_R совпадала с интенсивностью потери энергии электронами в зоне замедления $Q_R = P_e$.

Воспользуемся данными табл. 1 для оценки мощности электронных потерь энергии P_e . Будем предполагать, что при движении электрона через зону торможения теряется вся его энергия $\bar{\varepsilon}_e^*$, тогда при протекании тока I_{e0}^* выделяется мощность

$$P_e = \bar{\varepsilon}_e^* I_{e0}^* / e. \quad (5)$$

Из (5) для $P_0=300$ W находим $P_e=53 \cdot 2.1=111.3$ W. Активная мощность, выделяемая на R_{forw} :

$$Q_R = P_e = I_R^2 R_{\text{forw}}, \quad (6)$$

где $I_R = I_{e0}^* = 2.1$ A. Отсюда сопротивление диода VD на рис. 2 в открытом режиме $R_{\text{forw}} = P_e / I_R^2 = 111.3 / 2.1^2 = 25.24$ Ω .

Используем для участков 6–7 и 5–9 известное соотношение, связывающее полную, активную и реактивную мощности при параллельном соединении:

$$P_0^2 = Q_R^2 + Q_C^2. \quad (7)$$

Отсюда реактивная емкостная мощность

$$Q_C = \sqrt{P_0^2 - Q_R^2} = \sqrt{300^2 - 111.3^2} = 278.6$$
 J,

реактивный ток $I_C = \sqrt{Q_C / X_C} = \sqrt{278.6 / 75} = 1.93$ A. Из вольт-амперной характеристики установки [29] по наклону кривой к оси U находим сопротивление участка цепи 0–6–7–10 $R_{\text{circuit}} = 2.7$ k Ω . Таким образом, сопротивление диода в закрытом режиме $R_{\text{back}} = R_{\text{circuit}} - r = 2.7 - 1 = 1.7$ k Ω . Действующее и амплитудное значения падения напряжения на двойном слое составляют $U = I_R R_{\text{forw}} = 2.1 \cdot 25.24 = 53$ V и $U_0 = 75$ V соответственно. В основном оно происходит в зоне ускорения разряда имеющей ширину $d = 1.5$ mm. Амплитуда напряженности СВЧ поля в этой зоне достигает $E_0 = U_0 / d = 5 \cdot 10^4$ V/m.

Воспользовавшись известной формулой [27,34] для оценки энергии, приобретаемой электроном в СВЧ поле, получаем

$$\bar{\varepsilon}_e^* = \frac{e^2 E_0^2}{2m_e \delta_e (v_0^2 + \omega^2)}, \quad (8)$$

где $\delta_e = 0.02$ — средняя относительная доля энергии, передаваемая электроном атому или молекуле в процессе упругих и неупругих столкновений с ними, v_0 — частота столкновений электрона с атомами газа ($v_0 \ll \omega$), m_e — масса электрона, ω — частота магнетрона, находим $\bar{\varepsilon}_e^* \approx 50$ eV что хорошо согласуется с данными табл. 1.

Заметим, что двойной слой является однополупериодным выпрямителем. В эквивалентной схеме содержится два диода VD , работающих в противофазе. Поэтому половина активной мощности $Q_R = P_e = 111.3$ J выделяется на участке 6–7, а половина — на участке 5–9.

Произведем теперь аналогичные вычисления для мощности $P_0 = 172$ W. Из вольт-амперной характеристики находим $I_{i0} = 6.3$ mA, соответствующее значение

$I_{e0}^* = 210 I_{i0} = 1.32$ A. Оценим электронные потери, используя данные табл. 1: $P_e = \bar{\varepsilon}_e^* I_{e0}^* / e = 260$ W, что превосходит $P_0 = 172$ W. Аналогичная ситуация имеет место для $P_0 = 119$ и 225 W. Это возможно, если разряд возникает только между изделием и одним из торцов резонаторной камеры. Обрабатываемое изделие обычно размещают на расстоянии 10 cm от одного и соответственно 20 cm от другого торца резонатора. Это означает, что сопротивления R_{forw} и R_{back} одного из диодов, например, на участке 5–8, следует считать бесконечными, и выделение энергии происходит только на участке 6–7. Соответственно в формуле для выделяемой электронной мощности появляется коэффициент 0.5:

$$P_e = Q_R = \bar{\varepsilon}_e^* I_{e0}^* / 2e = 130$$
 W.

Сопротивление диода в открытом режиме

$$P_{\text{forw}} = P_e / I_R^2 = 130 / 1.32^2 = 74.61$$
 Ω ,

реактивная мощность $Q_C = \sqrt{172^2 - 130^2} = 112.6$ J, емкостный ток $I_C = \sqrt{Q_C / X_C} = \sqrt{112.6 / 75} = 1.23$ A. Сопротивление диода в закрытом режиме находим по вольт-амперной характеристике

$$R_{\text{back}} = R_{\text{circuit}} - r = 66.66 - 1 \approx 65.66$$
 k Ω .

Действующее значение падения напряжения на двойном слое $U = 1.23 \cdot 74.61 = 91.77$ V, амплитудное — $U_0 \approx 130$ V. Амплитуда напряженности СВЧ поля в этой зоне при $d = 1.3$ mm достигает $E_0 = U_0 / d = 10^5$ V/m. По формуле (8) находим $\bar{\varepsilon}_e^* = 185$ eV, что хорошо согласуется с данными табл. 1.

В табл. 2 собраны основные параметры, характеризующие эквивалентную схему и ее работу при различных уровнях подводимой СВЧ мощности: Q_R — активная мощность, Q_C — реактивная емкостная мощность, I_R — действующее значение активной составляющей тока, I_C — действующее значение реактивной составляющей тока, R_{forw} — сопротивление диода в открытом режиме, R_{back} — сопротивление диода в закрытом режиме, E_0 — амплитуда напряженности СВЧ поля вблизи поверхности изделия.

Для полноты картины оценим потери в стенках резонаторной камеры. Из эквивалентной схемы (рис. 2) видно, что разность СВЧ потенциалов $U_{56} = 2U$, где U — действующее значение падения напряжения на двойном слое. Для $P_0 = 172$ W, значение $U = 91.77$ V, а $U_{56} = 2U = 183.54$ V. Характерное значение активной проводимости полых резонаторов, зависящее от удельной проводимости материала стенок и глубины проникновения в нее СВЧ поля, находится в диапазоне $G = 10^{-4} - 10^{-5}$ Ω^{-1} . Мощность тепловых потерь в стенках $P_{\text{wall}} = GU_{56}^2 = 0.34 - 3.4$ W мала по сравнению с мощностью, выделяемой электронами в зоне торможения разряда: $P_{\text{wall}} \ll P_e$.

Таблица 2. Параметры разряда, определенные на основе анализа эквивалентной схемы технологической установки (рис. 2)

СВЧ мощность P_0 (W)	Активная мощность $Q_R = P_e$ (W)	Реактивная мощность Q_C (W)	Активный ток $I_R = I_{e0}^*$ (A)	Реактивный ток I_C (A)	Сопротивление диода в открытом режиме R_{forw} (Ω)	Сопротивление диода в закрытом режиме R_{back} (k Ω)	Напряженность СВЧ поля E_0 (V/cm)
32	6.5	31.3	0.0735	0.65	1203.20	131.33	$6.9 \cdot 10^4$
119	63.2	100.83	0.79	1.16	101.27	81.06	$9.4 \cdot 10^4$
172	130	112.6	1.32	1.23	74.61	65.66	10^5
225	133.6	181.0	1.6	1.55	52.19	58.30	$9.4 \cdot 10^4$
275	124.8	245.1	1.3	1.80	73.84	19.99	$7.1 \cdot 10^4$
300	111.3	278.6	2.1	1.93	25.24	1.70	$5 \cdot 10^4$

2.2. Дипольный газовый разряд в резонаторной камере

Характер СВЧ разряда, возникающего в резонаторной камере, существенно зависит от размеров изделия и его положения внутри камеры, определяющих значения электрических емкостей C_1 и C_2 на эквивалентной схеме (рис. 2), а также длин разрядных промежутков между изделием и ее торцами. Обычно при обработке положение изделия смещено от оси резонатора к его боковой поверхности таким образом, чтобы оно находилось в электрическом поле только одного из двух одинаковых эквивалентных конденсаторов C .

Если изделие в виде шарика расположено в осциллирующем с амплитудой E_0 и частотой ω электрическом поле, примерно на одинаковых расстояниях от торцов, то оно приобретает осциллирующий с частотой ω дипольный момент $p(t)$:

$$p = 4\pi\epsilon_0 E_0 R^3 \cos(\omega t + \alpha). \quad (9)$$

При этом заряды полушарий меняются в противофазе с амплитудой $q_0 = C_1 U_0$.

Для $P_0 = 275$ W величина $U_0 \approx 136$ V, откуда находим

$$q_0 = 8.9 \cdot 10^{-13} \cdot 136 = 1.21 \cdot 10^{-10} \text{ C}.$$

Амплитуда колебаний дипольного момента шарика составляет $p_0 = 4/3 q_0 R = 6.45 \cdot 10^{-13} \text{ C} \cdot \text{m}$. В закрытом режиме через диод протекает ток

$$I_{back} = U/R_{back} = 96/18.29 \cdot 10^3 = 5.24 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$(U = U_0/\sqrt{2})$$

и выделяется мощность

$$Q_{back} = I_{back}^2 R_{back} = (5.24 \cdot 10^{-3})^2 19.99 \cdot 10^3 \approx 0.55 \text{ W}.$$

При подаче на изделие потенциала смещения $\phi_0 > 0$ происходит уменьшение высоты потенциального барьера для электронов, существующего вблизи его поверх-

ности. Она становится равной $(U_f - \phi_0)e$. Сопротивление диода R_{back} уменьшается, а проводимость диода в закрытом режиме возрастает. Связь потенциала ϕ_0 с ЭДС источника определяется законом Ома $\phi_0 = \epsilon / (1 + (R_L + r)/R_{back})$. Полагая $R_L = 0$, $r = 1 \text{ k}\Omega$ и определяя по вольт-амперной характеристике установки для $\epsilon \approx 65$ V значение $R_{circuit} \approx 5.49 \text{ k}\Omega$, находим $R_{back} \approx 5.49 - 1 = 4.49 \text{ k}\Omega$, $\phi_0 = 53.16$ V. Высота барьера составляет $(U_f - \phi_0)e = 31.84 \text{ eV}$.

Для данного значения R_{back} находим $I_{back} = U/R_{back} = 96/4.49 \cdot 10^3 = 2.14 \cdot 10^{-2} \text{ A}$ и выделяемую мощность $Q_{back} \approx 2 \text{ W}$. При $\epsilon \approx 65$ V, как видно из вольт-амперной характеристики установки, через изделие также протекает постоянный электронный ток $I_e \approx 10 \text{ mA}$, и на поверхности выделяется мощность $P_e^* = \bar{\epsilon}_e^* I_e / e \approx 1 \text{ W}$. Таким образом, полезная мощность $P_{useful} = Q_{back} + P_e = 2 + 1 = 3 \text{ W}$.

Очевидно, что максимальной передачи энергии электронов изделию $P_{useful} = I_{e0}^* \bar{\epsilon}_e^* / 2e \approx 62.4 \text{ W}$ можно добиться, подавая на изделие потенциал смещения $\epsilon_0 = U_f$, при этом $R_{back} \approx R_{forw} \approx 74 \Omega$, однако для этого необходим источник постоянного напряжения с $\epsilon = U_f (1 + r/R_{back}) \approx 85(1 + 10^3/74) \approx 1.2 \text{ kV}$.

Различные варианты дипольного разряда удобно наблюдать на изделии в виде металлического стержня (рис. 3). При приближении изделия к одному из торцов резонаторной камеры возможно возникновение ситуации, когда разряд возникает только вблизи одного из полюсов диполя (рис. 3, 4).

2.3. Структура и параметры диодного слоя

Отличительной особенностью СВЧ разряда является существование в приэлектродном слое больших стационарных электрических полей [35].

Для оценки величины положительного заряда зоны ускорения и величины напряженности электрического поля в ней воспользуемся далее уравнением Максвелла

$$\text{div } \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (10)$$

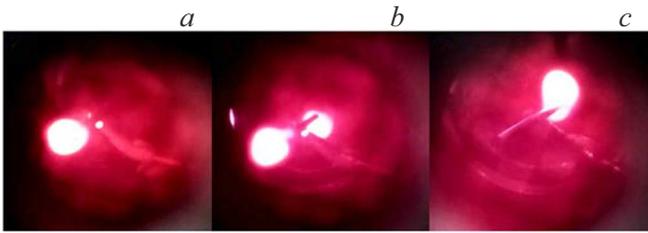


Рис. 3. Дипольный разряд на металлическом стержне диаметром 6 мм и длиной 95 мм, расположенном под небольшим углом к оси резонаторной камеры в различных местах по отношению к ее торцам: *a* — разряд локализован только на конце стержня более близком к наблюдателю; *b* — разряд локализован на обоих концах стержня; *c* — разряд локализован только на конце стержня, более удаленном от наблюдателя. Переход от *a* к *b* и далее к *c* происходил по мере осуществления параллельного переноса стержня от ближнего к наблюдателю торца камеры (ее двери) к дальнему торцу.

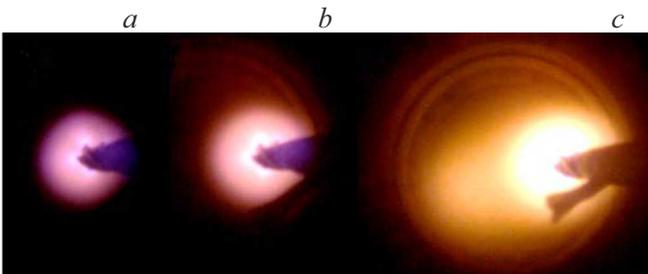


Рис. 4. Электрический разряд, локализованный на изделии вблизи одного из полюсов диполя, при различных уровнях подводимой СВЧ мощности, P_0 : *a* — 119, *b* — 225, *c* — 300 W.

и результатами, полученными ранее в [29]. По табл. 1 находим, что при уровне подводимой СВЧ мощности $P_0 = 172 \text{ W}$, что соответствует амплитуде напряженности СВЧ поля $E_0 = 10^5 \text{ V/m}$ (табл. 2), средняя концентрация ионов в зоне ускорения составляет $n_i = 1.84 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Обладая существенно большей, чем у ионов, подвижностью $b_e \gg b_i$, электроны, замедляясь, двигаются к стенкам резонаторной камеры быстрее, чем ионы в том же направлении в процессе диффузии [36].

По указанной причине концентрация ионов в зоне ускорения превосходит концентрацию электронов $n_i > n_e$, и зона заряжается положительно. Предполагая, что плазма остается квазинейтральной, т.е. разность $\Delta n = |n_i - n_e|$ мала по сравнению с самими n_e и n_i , для дальнейших оценок положим $\Delta n \approx 0.1n_i \approx 1.84 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$.

Определим из (10) среднюю напряженность электрического поля в зоне ускорения, связанную с ее

положительным зарядом

$$E \approx \frac{e\Delta nx}{\epsilon_0} \approx \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1.84 \cdot 10^{15} \cdot 1.3 \cdot 10^{-3}}{8.85 \cdot 10^{-12}} = 0.43 \cdot 10^5 \text{ V/m.} \tag{11}$$

Здесь $x = 1.3 \text{ mm}$ — ширина зоны ускорения электронов, определяемая по размерам области сиреневого свечения вблизи поверхности обрабатываемого объекта.

Оценим далее положительный заряд, локализованный в зоне ускорения

$$Q_0 = \frac{4}{3} \pi (R_1^3 - R^3) \Delta n e \approx \frac{4}{3} \pi (5.3^3 - 4^3) \cdot 10^{-9} \times 1.84 \cdot 10^{15} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} = 1.04 \cdot 10^{-10} \text{ C,} \tag{12}$$

где $R_1 = 5.3 \text{ mm}$ — радиус внешней границы зоны ускорения, $R = 4 \text{ mm}$ — радиус обрабатываемого изделия.

Заряд двойного слоя, находящийся от центра шара на расстояниях $R \leq \rho \leq r$

$$Q(r) = \int_R^r 4\pi\rho^2 w(\rho) d\rho. \tag{13}$$

Здесь $w(\rho)$ — модельная функция для плотности электрического заряда

$$w(\rho) = \begin{cases} A Q_0 (\rho - R)(R_1 - \rho) & \text{on the assumption of } R \leq \rho \leq R_1, \\ -B Q_0 (\rho - R_2)(R_1 - \rho) & \text{on the assumption of } R_1 < \rho \leq R_2, \\ 0 & \text{on the assumption of } R_2 < \rho, \end{cases} \tag{14}$$

где A, B — нормировочные множители, которые выбираются, таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\int_R^{R_1} 4\pi\rho^2 w(\rho) d\rho = Q_0, \quad \int_{R_1}^{R_2} 4\pi\rho^2 w(\rho) d\rho = -Q_0. \tag{15}$$

Здесь R_1 — радиус внешней границы зоны ускорения, R_2 — радиус внешней границы зоны замедления.

Для мощности $P_0 = 172 \text{ W}$ находим значение $A \approx 9200 \text{ m}^{-5}$, $B \approx 2350 \text{ m}^{-5}$ график функции $w(\rho)/Q_0$ изображен на рис. 5, *a*. Зависимость $h(r) = Q(r)/Q_0$ представлена на рис. 5, *b*.

Эффективная (средняя за период) потенциальная энергия электрона в электрическом поле анодной зоны разряда может быть записана в виде

$$W_{\text{eff}}(r) = -\frac{eC\Delta\varphi}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{R-r}{r_D}\right) - \frac{eQ_0}{4\pi\epsilon_0 r} \int_R^r 4\pi\rho^2 w(\rho) \exp\left(\frac{\rho-r}{r_D}\right) d\rho. \tag{16}$$

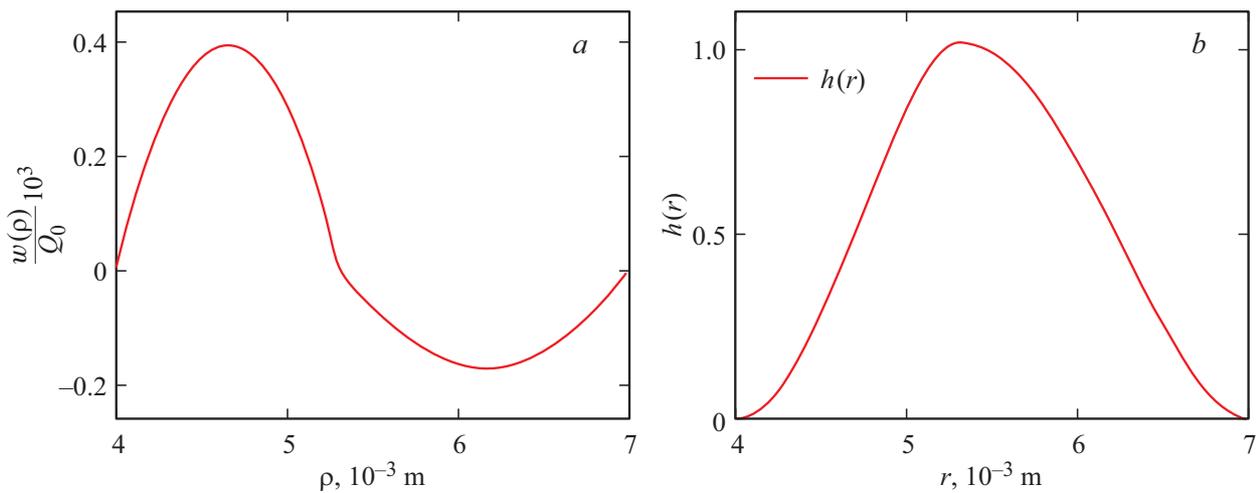


Рис. 5. Распределение электрического заряда в приэлектродной области разряда: $4 \cdot 10^{-3} \text{ m} < \rho < 5.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ — положительно заряженная зона ускорения, $5.3 \cdot 10^{-3} \text{ m} < \rho < 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ — отрицательно заряженная зона замедления.

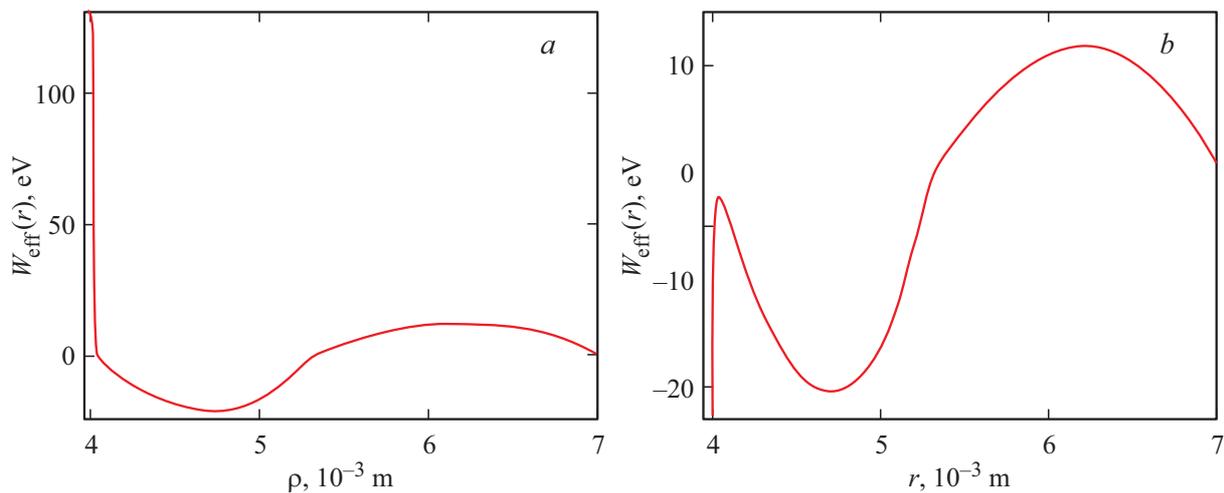


Рис. 6. Зависимость $U_{\text{eff}}(r)$ при уровне СВЧ мощности $P_0 = 172 \text{ W}$: a — $\Delta\varphi = -U_f = -130 \text{ V}$, $\varphi_0 = 0$; b — $\Delta\varphi = -U_f + \varphi_0 = -130 \text{ V} + 153 \text{ V} = 23 \text{ V}$, $\varphi_0 = 153 \text{ V}$.

Первое слагаемое в (16) определяет потенциальную энергию взаимодействия электрона с зарядом на поверхности изделия, второе представляет собой потенциальную энергию взаимодействия электрона с положительным зарядом, распределенным с объемной плотностью $w(\rho)$ в зонах ускорения и замедления комбинированного газового разряда. В (16) $C = 4\pi\epsilon_0 R$ — емкость шара, $\Delta\varphi = -U_f + \varphi_0$ — усредненный по времени потенциал изделия относительно плазмы, U_f — значение плавающего потенциала, $r_D = 10^{-5} \text{ m}$ — радиус Дебая, $\omega = 1.54 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$, $R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $m_e \approx 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Очевидно, что среднее за период значение СВЧ потенциала $\langle \varphi_{\text{УНГ}} \rangle = 0$. Зависимость $W_{\text{eff}}(r)$, построенная в MATHCAD, представлена на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что при подаче на изделие положительного потенциала смещения φ_0 уменьшается высота

существующего вблизи поверхности изделия потенциального барьера для электронов, что приводит к уменьшению сопротивления диодного слоя VD в закрытом режиме R_{back} .

3. Обсуждение

Для оценки значения напряженности E_0 поля в резонаторной камере воспользуемся соотношениями

$$W = \frac{\epsilon_0 E_0^2}{2} V = \frac{P_0 Q_0}{\omega}, \quad E_0 = \left(\frac{2P_0 Q_0}{\epsilon_0 V \omega} \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Здесь W — среднее по времени значение запасенной в резонаторе электромагнитной энергии, Q_0 — добротность резонатора, V — объем резонатора, P_0 — мощность, отдаваемая магнетроном, ω — циклическая

частота. Из (17) для значений параметров $P_0 = 28 \text{ W}$, $V = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, $Q_0 = 1.2 \cdot 10^5$, $\omega = 1.54 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ находим. Таким образом, величина E_0 достигает порога СВЧ пробоя $E_0 = E_{\text{Cr}} = 10^5 \text{ V/m}$ аргона, который зависит от давления, частоты и разрядного объема, после чего возникает темный разряд с небольшим током до 10^{-5} A . Для газа пробой означает переход в ионизированное состояние. При возрастании уровня подводимой СВЧ мощности до $P_0 = 32 \text{ W}$ вблизи поверхности изделия возникает свечение. Ток, протекающий через разрядную плазму, концентрация ионов и электронов и проводимость возрастают, а напряженность электрического поля, требуемого для поддержания данного тока, $E_0 = 6.9 \cdot 10^4 \text{ V/m} < E_{\text{Cr}}$. После зажигания СВЧ разряда энергия, запасенная в резонаторе, уменьшается. Поле E_0 обычно меньше чем E_{Cr} (табл. 2), что связано с рядом причин, среди которых наличие в плазме сформировавшегося разряда значительной концентрации возбужденных атомов, в результате чего в процессе поддержания разряда существенной становится роль ступенчатой ионизации и разогрева электронов за счет энергии метастабильных атомов.

Заметим, что самое большое значение активной составляющей тока, протекающего через установку $I_R = 2.1 \text{ A}$, согласно данным табл. 2, достигается при самом большом значении уровня подводимой СВЧ мощности $P_0 = 300 \text{ W}$, чему соответствует самое малое значение амплитуды напряженности СВЧ поля $E_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ V/m}$ вблизи поверхности изделия. Из табл. 1 видно, что данному уровню СВЧ мощности соответствует самая высокая концентрация заряженных частиц в плазме разряда $n_i = 6.39 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ и самая низкая энергия электронов $\bar{\epsilon}_e^* = 53 \text{ eV}$.

С ростом P_0 существенно меняется внешний вид разряда. При малом уровне СВЧ мощности видно четкое отличие между зоной ускорения и зоной замедления электронов (рис. 4, *a, b*). Зона замедления имеет лиловый цвет. С увеличением P_0 увеличивается радиус плазменного облака, стирается визуальное различие между зонами ускорения и замедления, цвет облака становится красно-оранжевым. Все это свидетельствует как о росте концентрации электронов, так и об уменьшении их энергии (рис. 4, *c*).

Оптимальный для обработки изделия уровень подводимой СВЧ мощности, очевидно, зависит от материала изделия и его геометрических размеров и, как видно из табл. 1 и 2, лежит в диапазоне $P_0 \sim 100\text{--}250 \text{ W}$. При малых мощностях $P_0 < 100 \text{ W}$ в камере выделяется слишком малая активная мощность Q_R , а при больших мощностях $P_0 > 250 \text{ W}$ с ростом P_0 уменьшается доля активной мощности Q_R/P_0 и увеличивается доля реактивной Q_C/P_0 , что приводит к неустойчивости работы магнетрона и уменьшению КПД установки. Также с ростом значения P_0 происходит уменьшение средней кинетической энергии ускоряемых СВЧ полем электронов, поступающих на поверхность обрабатываемого изделия.

Диодные свойства двойного слоя существенно зависят от подаваемого на него потенциала смещения φ_0 . С ростом величины положительного значения φ_0 происходит уменьшение высоты потенциального барьера для электронов eU_f , существующего вблизи поверхности изделия и соответственно уменьшение сопротивления R_{back} диода в закрытом режиме работы. При полном исчезновении барьера, для чего необходимо подать на изделие потенциал $\varphi_0 = U_f$, на нем возможна диссипация до 10–20% активной мощности, выделяющейся в установке, что способствует разогреву поверхности вплоть до температуры плавления. Попадающие на поверхность ионы диффундируют внутрь объема, образуя упрочненный поверхностный слой.

Параметры используемых для обработки изделий в установке электронных токов: $j_e \sim 5\text{--}40 \text{ mA/cm}^2$, $\bar{\epsilon}_e^* \sim 50\text{--}200 \text{ eV}$ при плотности потока энергии $\sim 1\text{--}4 \text{ W/cm}^2$ и ионных токов $j_i \sim 2\text{--}5 \text{ mA/cm}^2$, $\bar{\epsilon}_i^* \sim 50\text{--}100 \text{ eV}$. Данные значения очень близки по значению к параметрам электронных и ионных пучков: $j_e \sim 10\text{--}30 \text{ mA/cm}^2$, $\bar{\epsilon}_e^* \sim 50\text{--}100 \text{ eV}$ при плотности потока энергии $\sim 3\text{--}5 \text{ W/cm}^2$, $j_i \sim 1\text{--}7 \text{ mA/cm}^2$, $\bar{\epsilon}_i^* \sim 100\text{--}300 \text{ eV}$, используемых в установке, описанной в [37]. Отличие состоит в характерных размерах обрабатываемых изделий. Установка, изображенная на рис. 2, создана для обработки мелких изделий с площадью поверхности до 20 cm^2 при потребляемой мощности до 1 kW , а в установке, разработанной авторами [37], целесообразно обрабатывать крупные изделия с площадью поверхности до 2000 cm^2 , так как для создания электронного пучка потребляется мощность в десятки kW .

Свечение плазмы дипольного разряда неравномерно распределено вдоль поверхности изделия. Вблизи полюсов диполя плотность энергии СВЧ разряда достигает своих максимальных значений, и плазма оказывает наибольшее воздействие на поверхность изделия. Посередине стержня, где интенсивность свечения плазмы мала, или свечение вовсе отсутствует, поверхность изделия обрабатывается в меньшей степени.

Если в области полюса дипольного разряда поверхность изделия имеет сложный рельеф, то линии напряженности СВЧ поля сгущаются вблизи участков с наибольшей положительной кривизной (выпуклостей), где максимальна поверхностная плотность электрического заряда σ , а, следовательно, $E_0 = \sigma/\epsilon_0$, энергия $\bar{\epsilon}_e^* \sim E_0^2$, приобретаемая электроном в СВЧ поле (8), а также интенсивность свечения плазмы достигают своих максимальных значений. Именно в этих областях на единицу площади поверхности обрабатываемого изделия за единицу времени попадает наибольшее количество ускоряемых СВЧ полем высокоэнергичных электронов, в результате чего происходит ее более интенсивный разогрев, что приводит к наиболее активному протеканию процесса термодиффузии положительных ионов технологического газа внутрь образца. Так, например,

при обработке металлорежущих инструментов максимальное упрочнение поверхности происходит вблизи их режущих кромок. Благодаря повышенной плотности энергии СВЧ поля $w \sim E_0^2$ вблизи таких участков поверхности при мощности СВЧ разряда, составляющей всего 0.03–0.3 kW, достигается высокая скорость роста толщины упрочненного слоя 0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$. Обычное время обработки изделия не превышает 10–12 min.

Для сравнения заметим, что в установке ARDIS-100, разработанной в ИОФ РАН, возможно осаждение упрочняющих алмазных покрытий только на плоские или цилиндрические подложки. Основным элементом установки является СВЧ резонатор. Резонатор изготовлен таким образом, чтобы максимум энерговыделения в СВЧ разряде достигался вблизи подложки. Скорость роста толщины алмазного слоя составляет 1.75 $\mu\text{m}/\text{min}$ при мощности СВЧ разряда 3 kW [14,38,39], давлении плазмообразующего газа (20% Ar, 15% CH₄, 65% H₂) 13 000–27 000 Pa. Сходный способ генерации СВЧ разряда для осаждения алмазных пленок представлен также в ряде других работ, однако скорость роста алмазного покрытия в них гораздо ниже — < 0.2 $\mu\text{m}/\text{min}$, а мощность СВЧ разряда достигает 8 kW, что существенно выше, чем в ARDIS-100 [40–42]. Для алмазной обработки изделий, имеющих малые размеры, может быть использован метод осаждения алмазной пленки из плазмы СВЧ факела при атмосферном давлении. Факельный метод [14] позволяет наносить алмазное покрытие на поверхность объектов произвольной формы благодаря применению устройств сканирования объектов над факелом. Температура изделия поддерживается дополнительным источником тепла.

Заключение

Таким образом, в работе были получены следующие результаты:

1. Показано, что вблизи поверхности обрабатываемого изделия возникает двойной слой, образованный зонами ускорения и замедления газового разряда, обладающий диодными свойствами. В открытом режиме, когда потенциал изделия ниже, чем плавающий, „диод“ пропускает быстрые электроны из зоны ускорения в зону замедления и обладает относительно малым сопротивлением. Убывание быстрых электронов в этой области постоянно пополняется за счет ускорения медленных электронов в высокочастотном электрическом поле СВЧ разряда. Низкая пропускная способность „диода“ в закрытом режиме связана с наличием на изделии отрицательного плавающего потенциала, что приводит к существованию в приповерхностном слое разряда потенциального барьера высотой 35–140 eV, не подпускающего электроны с меньшей энергией к поверхности, в то время как электроны с большей энергией создают отрицательный ток, компенсирующий ток положительных ионов. Когда потенциал изделия

выше плавающего, сопротивление „диода“ велико и через „диод“ протекает небольшой электронный ток, несколько превышающий ионный ток насыщения.

2. Высоту потенциального барьера можно регулировать, подавая на изделие постоянный потенциал смещения. При подаче положительного потенциала смещения высота барьера уменьшается, что приводит к уменьшению сопротивления диодного слоя в закрытом режиме и соответственно к увеличению притока быстрых электронов на поверхность изделия, разогревающих ее до высокой температуры от 500°C вплоть до температуры плавления, делающей возможной термодиффузию ионов внутрь объема изделия. Таким образом, имеется существенная аналогия между воздействием на поверхность изделия плазмой комбинированного газового разряда и воздействием проходящего через плазму электронного пучка — в обоих случаях разогрев изделия происходит преимущественно за счет передаваемой ему энергии электронов.

3. С ростом подводимой от магнетрона в резонаторную камеру СВЧ мощности происходит увеличение действующих значений активной и реактивной составляющих токов, протекающих через установку, реактивной емкостной мощности, а также концентраций электронов и ионов в плазме газового разряда. Значения сопротивлений диодного слоя в открытом и закрытом режимах уменьшаются. Такие параметры, как активная мощность, выделяемая в зоне замедления разряда, средняя кинетическая энергия электронов в зоне ускорения разряда, амплитуда напряженности электрического поля вблизи поверхности изделия достигают своих максимальных значений в диапазоне мощностей $P_0 \sim 100\text{--}250\text{ W}$, который и является наиболее приемлемым для обработки изделий. Конкретное значение оптимальной для обработки мощности, конечно, зависит от материала, размеров и формы обрабатываемого изделия.

4. Находящееся в СВЧ поле изделие приобретает осциллирующий с частотой поля дипольный момент. От положения внутри резонаторной камеры, размеров и формы обрабатываемого изделия зависят значения его взаимных емкостей с торцами камеры, что, в свою очередь, определяет характер возникающего дипольного разряда. При одинаковом или близком значении емкостей, что соответствует расположению вблизи центра камеры, свечение плазмы локализовано вблизи обоих полюсов диполя. Если перемещать изделие по направлению к одному из торцов, то свечение локализуется лишь на одном из его полюсов.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00101.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.К. Шелег, А.Н. Жигалов, Д.Д. Богдан. Наука и техника, **19** (4), 271, (2020).
- [2] S. Hussain, X. Yang, M.K. Aslam, A. Shaheen, M.S. Javed, N. Aslam, B. Aslam, G. Liu, G. Qiao. Chem. Engineer. J., **391**, 123595 (2020).
- [3] L. Luis, J. Andrade, C.M. Pesqueira, I. Siqueira, G.B. Sucharski, M.J. de Sousa. J. Thermal Spray Technol., **30**, 205 (2021). DOI: 10.1007/s11666-021-01152-8
- [4] A. Mosavi, F. Salehi, L. Nadai, S. Karoly, N.E. Gorji. Results in Physics, **16**, 102883 (2020). DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102883
- [5] В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, Ю. Фенг, Д.А. Косинов. Вестник МГТУ им. ГИ. Носова, **14** (2), 69 (2016).
- [6] S.N. Grigoriev, A.S. Metel, T.V. Tarasova, A.A. Filatova, S.K. Sundukov, M.A. Volosova, A.A. Okunkova, Yu.A. Melnik, P.A. Podrabinnik. Metals, **10** (11), 1540 (2020).
- [7] V.A. Aleksandrov, L.G. Petrova, A.S. Sergeeva, V.D. Aleksandrov, E.U. Akhmetzhanova. Russ. Engineer. Res., **39** (8), 693 (2019).
- [8] Н.В. Гаврилов, А.С. Мамаев, А.В. Чукин. Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования, **11**, 61 (2017).
- [9] S. Grigoriev, A. Metel, M. Volosova, Y. Melnik, H.A. Ney, E. Mustafaev. Technologies, **7** (3), 62 (2019). DOI: 10.3390/technologies7030062
- [10] M. Ueda, C. Silva, B. Gelson, L. Pichon, H. Reuther. J. Vacuum Sci. Technol. B, **37**, 042902 (2019). DOI: 10.1116/1.5092435
- [11] L. Luiz, B.C.E.S. Kurelo, G.B. de Souza, J. de Andrade, C.E.B. Marino. Mater. Today Commun., **28**, 102655 (2021). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102655
- [12] B. Yang, Q. Shen, Z. Gan, S. Liu. Cryst. Eng. Comm., **21**, 6574 (2019).
- [13] К.Ф. Сергейчев, Н.А.Лукина, Н.Р. Арутюнян. Физика плазмы, **45** (6), 513 (2019).
- [14] К.Ф. Сергейчев. Успехи прикладной физики, **3** (4), 342 (2015).
- [15] N.V. Gavrilov, A.S. Mamaev, A.V. Chukin, J. Surf. Invest., **11**, 1167 (2017).
- [16] В.А. Шабашов, Н.В. Гаврилов, К.А. Козлов, А.В. Макарова, С.Г. Титова, В.И. Воронин. Физика металлов и металловедение, **119** (8), 802 (2018).
- [17] V.A. Burdovitsin, D.A. Golosov, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Y.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin, S.M. Zavadsky, Surf. Coat. Technol., **358**, 726 (2019).
- [18] N.N. Koval, A.I. Ryabchikov, D.O. Sivin, I.V. Lopatin, O.V. Krysina, Y.H. Akhmadeev, D.Y. Ignatov, Surf. Coat. Technol., **340**, 152 (2018).
- [19] T. Moskaliuviene, A. Galdikas. Surf. Coatings Technol., **366**, 277 (2019).
- [20] A.S. Metel, S.N. Grigoriev, M.A. Volosova, Yu.A. Melnik, E.S. Mustafaev. Instruments and Experimental Techniques, **65** (6), 910 (2022).
- [21] W. De Oliveira, B. Kurelo, D. Ditzel, F. Serbena, C. Foerster, G. de Souza. Appl. Surf. Sci., **434**, 1161 (2018).
- [22] K. Norrman, Y. Wang, E. Stamate, W. Zhang. Heliyon, **5**, e01943 (2019).
- [23] W.R. de Oliveira, A.R. Mayer, G.B. de Sousa, H.D. Carvajal Fals, A.G.M. Pukaszewicz. J. Thermal Spray Technol., **32**, 737 (2023).
- [24] V.P. Budaev, S.D. Fedorovich, A.V. Lubchenko, A.V. Karpov, N.E. Belova, M.K. Gubkin. Heliyon, **6**, e05510 (2020).
- [25] M.S. Stechyshyn, A.V. Martynyuk, Y.M. Bilyk, V.P. Oleksandrenko, N.M. Stechyshyna. Mater. Sci., **53**, 343 (2017).
- [26] B. Brzhozovskii, M. Brovkova, S. Gestrin, V. Martynov, E. Zinina. J. Phys. D: Appl. Phys., **51**, 145204 (2018).
- [27] B. Brzhozovskii, M. Brovkova, S. Gestrin, V. Martynov, E. Zinina. J. Phys. D: Appl. Phys., **52**, 485202 (2019)
- [28] Б.М. Бржозовский, С.Г. Гестрин, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов. ЖТФ, **87** (12), 1857 (2017).
- [29] B. Brzhozovskii, M. Brovkova, S. Gestrin, E. Zinina, V. Martynov. Heliyon, **7**, e07006 (2021).
- [30] X. Deng, Y. Takaoka, H. Kousaka, N. Umehara. Surf. Coating. Technol., **238**, 80 (2014).
- [31] L.J. Zhu, Z.Q. Chen, Z.X. Yin, G.D. Wang, G.Q. Xia, Y.L. Hu, X.L. Zheng, M.R. Zhou, M. Chen, M.H. Liu. Chinese Phys. Lett., **31**, 035203 (2014).
- [32] Ya.I. Londer, K.N. Ulyanov. High Temp., **51** (1), 7 (2013).
- [33] Ya.I. Londer, K.N. Ulyanov. High Temp., **52** (6), 787 (2014).
- [34] Ю.П. Райзер. УФН, **132** (3), 549 (1980).
- [35] V.I. Farenik. Phys. Surf. Eng., **2** (1), 117 (2004).
- [36] Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Теоретическая физика. X. Физическая кинетика (Наука, М., 1979)
- [37] Н.В. Гаврилов, А.И. Меньшаков. Приборы и техника эксперимента, **5**, 140 (2011).
- [38] А.К. Ребров, М.В. Исупов, А.Ю. Литвинцев, В.Ф. Буров. Прикладная механика и техническая физика, **59** (5), 5 (2018).
- [39] A. Popovich, M. Shevchenko, S. Savin, E. Zavedeev, M. Zनावeskin, A. Sinogeykin, V. Ralchenko, V. Konov. Coatings, **10** (10), 939 (2020). DOI: 10.3390/coatings10100939
- [40] K. An, S.W. Yu, X.J. Li, Y.Y. Shen, B. Zhou, G.J. Zhang, X.P. Liu. Vacuum, **117**, 112 (2015). DOI: 10.1063/6.0000846
- [41] C.J. Widmann, W. Muller-Sebert, N. Lang, C.E. Nebel. Diamond Related Mater., **64**, 1 (2016).
- [42] J. Weng, F. Liu, L.W. Xiong, J.H. Wang, Q. Sun. Vacuum, **147**, 134 (2018).