

УДК 537.528; 537.525.99

## Микроволновый капиллярный факел как средство воздействия на электрофизические характеристики металлической поверхности

К. В. Артемьев, А. М. Давыдов, В. А. Иванов, И. А. Косый, Г. С. Лукьянчиков, И. В. Моряков

*Фундаментальная задача, поставленная в настоящей работе, заключалась в исследовании возможности реализации в условиях свободного пространства в воздушной среде атмосферного давления взрывного образования металлической микроплазмы, обнаруженного и изученного ранее при контактах металлической поверхности с бесстолкновительной плотной и относительно горячей плазмой, получаемой в разрядах низкого давления.*

*Прикладная задача, стимулировавшая постановку экспериментов, заключалась в использовании поверхностных микровзрывов для создания поверхностной «шероховатости», способной существенно уменьшить вторично-эмиссионную способность металла и, таким образом, уменьшить вероятность или полностью исключить возможность возбуждения вторично-эмиссионных электронных микроволновых разрядов, ограничивающих уровень микроволновой мощности, принимаемой или передаваемой космическими спутниками связи.*

*Основные результаты, полученные в ходе выполнения исследований, состоят в следующем:*

*- впервые в условиях открытого пространства при атмосферном давлении воздушной среды реализована основанная на применении импульсного капиллярного микроволнового факела схема эксперимента, позволяющая осуществить возбуждение взрывоэмиссионное образование микроплазмы на поверхности металла;*

*- проведена обработка поверхности алюминиевой пластины многократным облучением плазменной струей капиллярного микроволнового разряда и показано, что в результате взрывоэмиссионных микроискрений происходит трансформация исходно гладкой поверхности в поверхность «шероховатую», представляющую из себя множество микронных размеров выступов и впадин («микрократеров»);*

*- максимальный коэффициент вторичной электронной эмиссии  $\sigma_{\max}$  «шероховатой» («рифлённой») поверхности снижается от  $\approx 2$  для необработанного образца до  $\approx 0,4$  для обработанного образца, и остаётся стабильно низким в течение длительного пребывания образца в атмосфере.*

*Последний результат позволяет рассматривать предложенный и исследованный метод воздействия на металлическую поверхность, как способ обработки элементов бортовой спутниковой радио-электронной системы с целью подавления вторично-эмиссионных электронных разрядов («мультипакторов»), приводящих к временному нарушению работы или к невозможности восстановления разрушению компонентов аппаратуры.*

PACS: 52.80.Vp; 52.80.Wq

*Ключевые слова:* микроволновый факел, облучение металлической поверхности, рифление поверхности, снижение коэффициента вторичной электронной эмиссии.

### Введение

При создании и эксплуатации спутников связи одним из ключевых моментов, определяющих технические и эксплуатационные характеристики

E-mail: kossyi@fpl.gpi.ru

Лукьянчиков Геннадий Семенович, ст. научный сотрудник<sup>1</sup>.

E-mail: genluk1@rumbler.ru

Моряков Игорь Витальевич, магистрант<sup>2</sup>.

E-mail: igor\_miw@mail.ru

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

<sup>2</sup>Московский институт радиоэлектроники и автоматики (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 2 октября 2014 г.

© Артемьев К. В., Давыдов А. М., Иванов В. А.,

Косый И. А., Лукьянчиков Г. С., Моряков И. В., 2014

Артемьев Константин Викторович, научный сотрудник<sup>1</sup>.

E-mail: artemievkv@mail.ru

Давыдов Алексей Михайлович, научный сотрудник<sup>1</sup>.

E-mail: freaman@mail.ru

Иванов Вячеслав Алексеевич, зав. отделом<sup>1</sup>.

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Косый Игорь Антонович, зав. лабораторией<sup>1</sup>.

(число рабочих каналов, максимальную мощность передающего тракта, время работы без сбоев, общий срок эксплуатации), является процесс возникновения сверхвысокочастотного вторично-эмиссионного электронного разряда (СВЧ-ВЭР или термин «мультипактор», вошедший в российскую научную литературу из английской литературы *multipactor*) в прёмно-передающих трактах спутника. СВЧ-ВЭР развивается в вакууме на поверхностях, взаимодействующих с СВЧ-излучением элементов, например, на металлических стенках волноводов, резонаторов, фильтров, на диэлектрических окнах. Явление СВЧ-ВЭР заключается в лавинообразном росте концентрации электронов вблизи одиночной поверхности (односторонний разряд) или между двумя поверхностями (двусторонний разряд). СВЧ-ВЭР быстро развивается, начиная с одного или нескольких случайно возникших электронов в фоновом газе, а также на поверхности металлических или диэлектрических элементов СВЧ-тракта в результате воздействия космического излучения. При наличии нормальной компоненты электрического СВЧ-поля выше порогового значения вблизи поверхности металла за счёт явления вторичной электронной эмиссии с поверхности происходит лавинообразное увеличение концентрации электронов на много порядков по сравнению с изначальной величиной.

СВЧ-ВЭР подразделяются на два вида — резонансные разряды и разряды нерезонансные (или «полифазные»). Порог возбуждения по СВЧ-мощности для резонансных СВЧ-ВЭР ниже, чем для полифазных. Однако для возбуждения и поддержания «полифазной» формы не требуется выполнения «жёстких» резонансных условий.

Первые теоретические разработки, относящиеся к полифазному ВЭР, и первые эксперименты, продемонстрировавшие его существование, были осуществлены коллективом лаборатории «Газодинамические явления в СВЧ-разрядах» ещё в 70–80-х годах прошлого столетия. Возможность возбуждения нерезонансного ВЭР определяется довольно простым условием: амплитуда осцилляторной энергии электронов, находящихся в СВЧ-поле, должна быть больше первого критического потенциала поверхности устройства (волновода, резонатора, фильтра и т. п.). (Первый критический потенциал — энергия электронов, при которой коэффициент вторичной электронной эмиссии с поверхности  $\sigma = 1$ ). Отсюда вытекают условия подавления СВЧ-ВЭР: величина первого критического потенциала материала СВЧ-тракта должна быть как можно выше, а максимальное значение коэффициента вторичной электронной эмиссии —

как можно ниже. Чем выше значение первого критического потенциала, тем больше предельная величина СВЧ-мощности, которая будет проходить через устройство без возбуждения разрядов. В то же время — чем ниже значение максимума коэффициента вторичной электронной эмиссии, тем больше время, требуемое для развития разряда при превышении порога его возбуждения.

Исходя из приведённых выше принципов, формулировка основной задачи настоящего исследования выглядит следующим образом: разработать способ плазменного воздействия на поверхности наиболее напряжённых СВЧ-устройств, обеспечивающий максимальное значение величины первого критического потенциала и минимальное значение величины максимума коэффициента вторичной электронной эмиссии.

Одним из перспективных способов решения задачи защиты бортовой аппаратуры от разрушающего действия СВЧ-ВЭР является способ, предложенный и развиваемый в [1, 2]. Существенное увеличение значения первого критического потенциала и уменьшение величины коэффициента вторичной электронной эмиссии металлической поверхности достигается за счёт покрытия её тонкой плёнкой получаемого по оригинальной технологии наноструктурированного углерода. Плёнка эта сохраняет свои свойства в течение длительного времени и обладает хорошими адгезионными свойствами. Работы в этом направлении, поддерживаемые «Фондом развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий» (Сколково) [2], представляют несомненный интерес. Однако они не решают полностью стоящих перед современной космической техникой задач, и это определяет целесообразность продолжения поисков дополнительных способов воздействия на поверхность металлических элементов бортовой аппаратуры с целью повышения их стойкости по отношению к СВЧ-ВЭР.

Одно из направлений такого рода поисков в исследованиях, проводимых в настоящее время, заключается в использовании плазменного воздействия на металлические образцы, приводящего к изменению исходно гладкой структуры поверхности, проявляющегося в покрытии её множеством микронных размеров «острий» и микронных же «кратеров». «Шероховатая» поверхность такого типа может обладать пониженным коэффициентом вторичной эмиссии и повышенным значением первого критического потенциала. Первые результаты поисков в этом направлении представлены в работе [3].

Следует заметить, что плазма, вводимая в контакт с металлом в [3], создавалась разрядами низкого давления в вакуумируемых реакционных

камерах. Это, в определённой мере, усложняет технологию обработки деталей реальных радиоэлектронных бортовых устройств.

В настоящей работе предполагалось проведение поиска возможностей обработки поверхностей металлических образцов плазмой разрядов атмосферного давления в открытом пространстве. Имея в виду такую задачу в качестве одной из основных целей работы, сформулированы требования, предъявляемые к источнику плазмы:

– источник должен быть способен создавать плазменную струю в воздушной среде атмосферного давления;

– генерируемая источником плазма должна быть способной возбуждать микроискровые разряды на поверхности любого металла.

Исходя из сформулированных выше требований, нами в качестве плазменного источника выбран предложенный и исследованный в ИОФ РАН плазмотрон, основанный на импульсном микроволновом капиллярном разряде [4].

Результаты представленных в [4] исследований позволяют предполагать, что именно капиллярный микроволновый разряд может удовлетворить двум, казалось бы, противоречивым требованиям, а именно: возбудить плазму в газе атмосферного давления и при этом обеспечить столь высокую концентрацию электронов и их температуру, что контакт этой плазмы с металлической поверхностью может стимулировать взрывоэмиссионные явления, приводящие к возникновению множества микроострий и микропадин, снижающих вторично-эмиссионный коэффициент обработанного плазмой образца и его отражающие по отношению к ИК-излучению свойства.

Практически во всех ранее опубликованных работах источником микроискрений являлась бесстолкновительная плазма, возбуждаемая в газах низкого давления (см., например, [3, 5–7]).

В основе физики микроволнового капиллярного плазмотрона лежит предсказанная, обнаруженная и исследованная в работах ИОФ РАН и ИПФ РАН (см. [8–12]) особенность ионизационно-перегревной неустойчивости, присущая лишь микроволновому диапазону и заключающаяся в выходе на сильно нелинейную стадию, на которой разряд представляет собой вытянутые вдоль вектора микроволнового электрического поля «нити» («каналы»), отличающиеся чрезвычайно высокими газовой температурой, концентрацией электронов, электронной температурой и плотностью энерговыделения. По последнему параметру даже при относительно малых энергиях микроволнового импульса достигаются значения, рекордные для газоразрядной физики в целом.

Потенциально область возможного использования такого рода разрядов весьма широка, вклю-

чая в себя плазмохимию, газоразрядные источники света, ракетную технику, инициацию воспламенения топливно-воздушного потока в аэродвигателях и т. д. Однако реализация различных приложений ограничивается, по крайней мере, двумя обстоятельствами: трудностью фиксации в пространстве места возникновения «нити» и относительно малыми временами вклада микроволновой энергии в каждую «нить». Как первое, так и второе обстоятельство могут быть связаны с тем, что практически все исследования проводились с микроволновыми пучками, сфокусированными на газовую мишень.

Таким образом, постановка настоящих исследований заключается в следующих основных задачах.

1. Исследование возможности использования микроволнового капиллярного факела для возбуждения в свободном пространстве в воздушной среде атмосферного давления взрывоэмиссионных явлений на металлических поверхностях.

2. При успешном решении первой задачи — исследование возможности обработки среднеразмерных образцов с целью трансформации исходно «гладкой» поверхности в поверхность «шероховатую», представляющую собой множество острых выступов и впадин («кратеров»).

3. Наконец, при успешном решении двух предыдущих задач — определение вторичноэмиссионных характеристик «шероховатых» поверхностей с поиском режимов обработки, приводящих к существенному снижению коэффициента вторичной электронной эмиссии до уровня, заметно превышающего порог мультипактора или полностью исключающего вероятность его возбуждения.

### **Микроволновый капиллярный факел как возбудитель микровзрывов на облучённой при атмосферном давлении металлической поверхности**

На рис. 1 приведено схематическое изображение конструкции капиллярного микроволнового факела, предназначенного для создания горячей и плотной плазмы в газе атмосферного давления. Использован вариант коаксиального волновода с укороченным центральным электродом (3) (внутренний электрод короче внешнего электрода (2)). Внешний электрод (2) — сетка с ячейками, размер которых обеспечивает практически полную экранировку микроволнового излучения и позволяет осуществлять мониторинг разряда (5) и измерение его параметров. Разряд возбуждается в кварцевом капилляре (4), плотно насаженном на внутренний электрод. Внутренний диаметр капилляра  $d_c \approx 1,5$  мм.

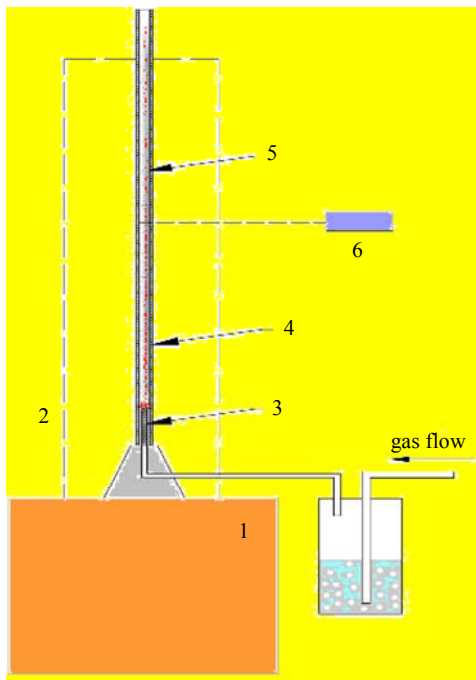


Рис. 1. Схема микроволнового капиллярного факела:  
 1 — магнетрон; 2 — внешний электрод (сетка);  
 3 — внутренний электрод; 4 — кварцевый капилляр;  
 5 — плазма факела; 6 — оптический спектрограф

Внутренний электрод (3) выполнен полым и служит одновременно газопроводом, обеспечивающим аксиальную подачу струи рабочего газа к срезу. В качестве рабочего газа в экспериментах использовался аргон атмосферного давления, в который в ряде исследований через барбатёр вводились пары воды или спирта при комнатной температуре. Расход рабочего газа атмосферного давления менялся в пределах 0,1—0,2 л/мин.

В качестве источника микроволнового излучения использовался «бытовой» (применяемый в технике бытовых микроволновых печей) магнетрон (1), генерирующий микроволны на частоте  $f = 2,45$  ГГц. Импульс микроволнового излучения имел форму, близкую к прямоугольной (рис. 2). Средняя мощность в импульсе составляла  $P_i \approx 2$  кВт. Энергия в импульсе —  $Q_i \approx 0,1$  Дж.

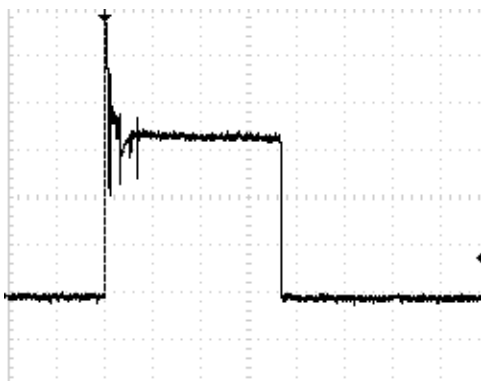


Рис. 2. Характерный вид импульса анодного тока (начальный выброс — наводка)

Согласно приведённым в [9] результатам, в каждом импульсе плазматрон генерировал протяжённый (до 14—15 см) контрагированный (поперечный размер  $\sim 200$  мкм) плазмод («нить»). Плазма «нити» отличается высокой концентрацией ( $n_e \approx 10^{16}—10^{17}$  см<sup>-3</sup>). Температура электронов  $T_e \approx 2$  эВ. Температура газа в «нити»  $T_g \approx 5000—7000$  К. Скорость аксиального развития «нити»  $V \approx 10^6$  см/с. Характерная фотография нитевидного плазменного образования приведена на рис. 3.



Рис. 3. Характерная фотография плазменной «нити» микроволнового факела

Схема эксперимента по исследованию взаимодействия плазменной «нити», генерируемой капиллярным разрядом, с поверхностью изолированного металлического образца (Al-пластина) и фотография экспериментального устройства приведены на рис. 4. Отличие от исследованного в [9] варианта (см. рис. 2) заключается в том, что кварцевая капиллярная трубка (2) укорочена с тем, чтобы вывести плазмод в свободное пространство и ввести его в контакт с металлической поверхностью. Длина «нити», внедрённой в атмосферу, составляет  $\sim 2—3$  см. Примерно на этом же расстоянии находилась и плоскость подвергающегося воздействию плазмы образца. Поперечный размер «нити» составлял  $\sim 200$  мкм.

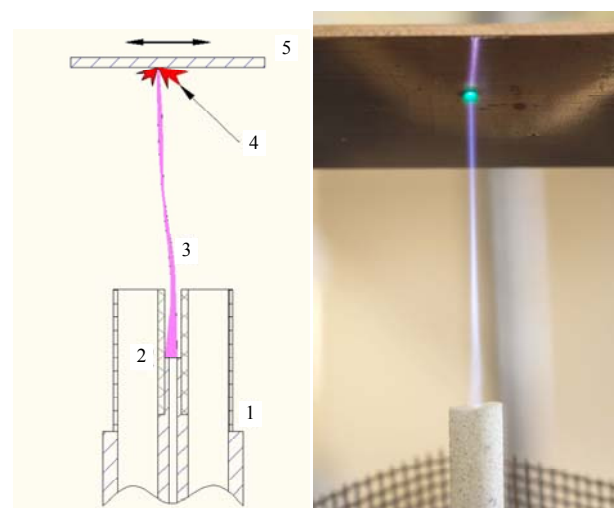


Рис. 4. Схема и фотография лабораторной установки по нанесению микрорельефа и интегральная по времени фотография разряда:

1 — внешний электрод (сетка); 2 — диэлектрический капилляр (в эксперименте керамика); 3 — капиллярный разряд; 4 — микроскребок на контакте металл-плазма; 5 — металлический образец

При контакте плазмы капиллярного микроволнового факела с металлической поверхностью на ней в каждом микроволновом импульсе возникают ярко светящиеся точки, вид которых идентичен виду искрений, наблюдавшихся в работах [13—15] при взаимодействии с металлическими образцами бесстолкновительной плазмы разрядов низкого давления.

Свойства локализованных на поверхности «вспышек» исследовались с помощью оптической спектроскопии и скоростной видеосъёмки.

На рис. 5 приведён характерный спектр приповерхностной вспышки, полученный с помощью спектрографа Avantes AvaSpec 2048. Спектр состоит из линий возбуждённого алюминия и полос его оксидов. В спектре также были зарегистрированы линии однократно и двукратно ионизованного алюминия.

Скоростная видеосъёмка проводилась с помощью видеокамеры Photron Fastcam BC-2HD

(скорость съёмки  $\sim 10^5$  кадров в секунду). Характерная последовательность кадров в микроволновом импульсе длительностью порядка 40 мкс приведена на рис. 6. Размер областей микровспышек составляет, согласно фотографиям, порядка 20 мкм. В течение длительности микроволнового импульса локализованные на поверхности искрения последовательно появляются в определённом месте, «живут» в нём в течение  $\sim 10$  мкс, «перескакивая» затем в другую «точку» облучаемой поверхности.

Фотография облучённой плазмой капиллярного факела поверхности, полученная на электронном микроскопе (СЭМ) и морфология участка поверхности мишени, прописанная с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ), приведены на рис. 7. Видно, что облучение микроволновым капиллярным факелом приводит к тому, что изначально гладкая алюминиевая поверхность становится покрытой множеством выступов и впадин.

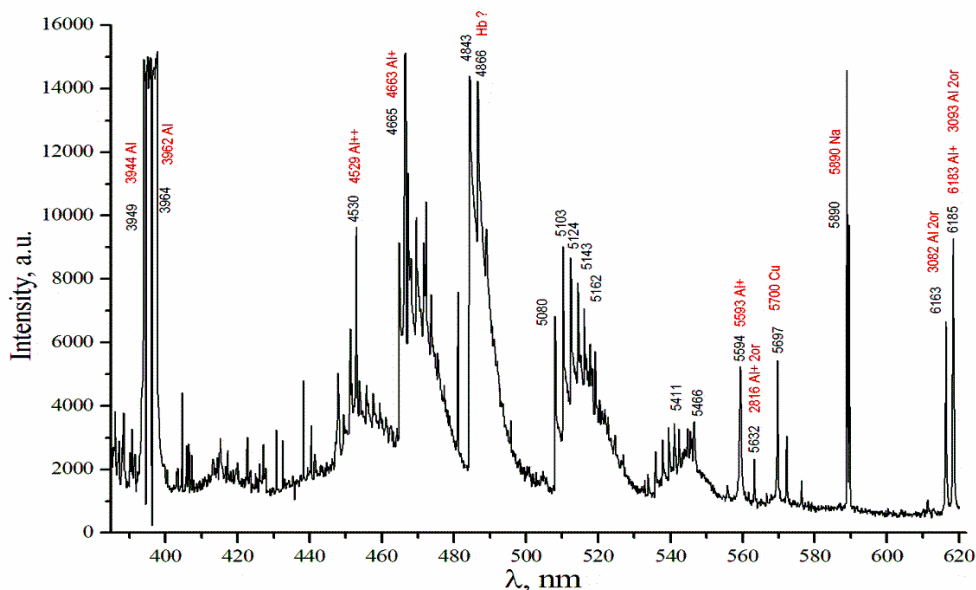


Рис. 5. Характерный оптический спектр из области микроискрений. Металл — алюминий

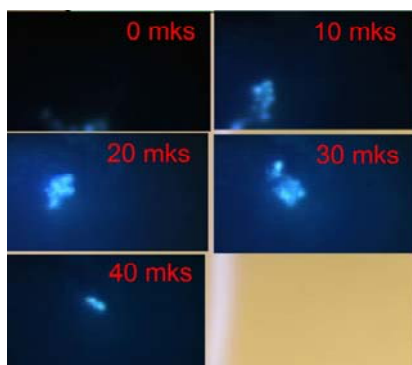


Рис. 6. Скоростная фотография области микроискрений

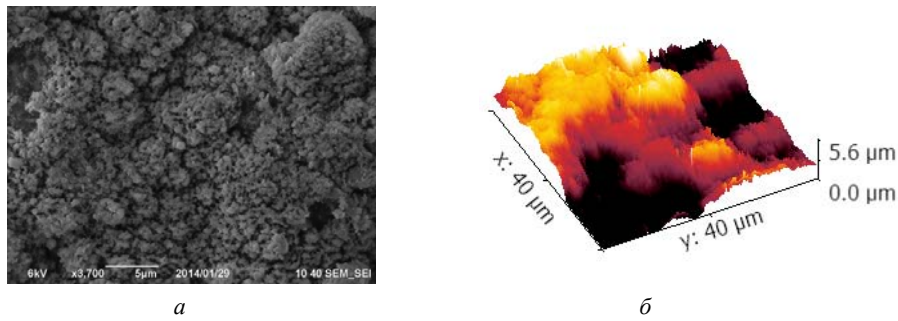


Рис. 7. Характерный рельеф металлической поверхности обработанной разрядом:

*a* — фотография полученная с растрового электронного микроскопа (РЭМ); *б* — морфология поверхности, исследованная с помощью атомносилового микроскопа (АСМ). Черные участки — места с глубиной больше амплитуды хода зонда (~10 мкм)

Спектр оптического излучения микроэкранный близок к исследованному ранее при взаимодействии бесстолкновительной плазмы разрядов низкого давления с металлическими преградами [13, 14].

Физика формирования микровзрывных явлений на металлической поверхности может быть объяснена в рамках следующей упрощенной модели. При погружении в относительную плотную и горячую плазму электрода (металлического образца) у поверхности его образуется экранирующий ленгмюровский слой, играющий роль межэлектродного промежутка в вакуумном диоде (см. рис. 8). Функция катода на контакте металлического образца с плазмой принадлежит образцу. Функция анода — невозмущенной плазменной среде. Толщина ленгмюровского слоя [16]:

$$L_S \approx \alpha r_{De}, \tag{1}$$

где  $r_{De}$  — дебаевский радиус:

$$r_{De} \approx v_{Te} / \omega_{pe}, \tag{2}$$

$\alpha$  — const ( $\alpha \approx 5-10$ ),  $v_{Te}$  — тепловая скорость электрона, а  $\omega_{pe} = (4\pi n_e e^2 / m_e)^{1/2}$  — плазменная электронная ленгмюровская частота.

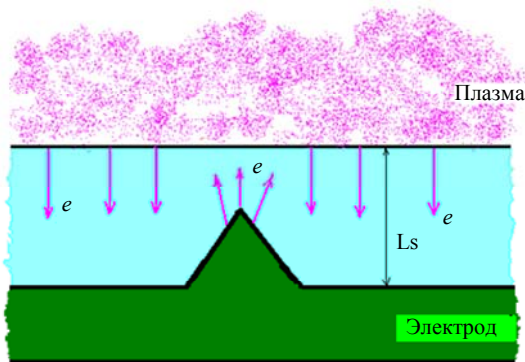


Рис. 8. Схема формирования авто-термоэмиссионного микровыступа на металлической поверхности, контактирующей с плазмой

Электрическое поле, которое возникает у поверхности соприкасающегося с плазмой металлического образца, по порядку величины может быть оценено из соотношения:

$$E \approx (\phi_p - \phi_m) / \alpha r_{De}, \tag{3}$$

где  $\phi_p$  — потенциал невозмущенной плазмы, а  $\phi_m$  — потенциал введенного в неё электрода.

При контакте с максвелловской плазмой изолированной металлической преграды разность потенциалов в (3) пропорциональна  $kT_e$  и, следовательно, можно сделать вывод:

$$E \sim (n_e T_e)^{1/2}, \tag{4}$$

т. е. тем выше, чем больше концентрация и температура электронного компонента. Следует иметь в виду, что погружение в высокопотенциальную плазму, характеризующую наличием нелинейных процессов, приводящих к формированию надтеплого «хвоста» в электронном энергетическом распределении, может существенно увеличить приповерхностное электрическое поле по сравнению с вариантом взаимодействия с термодинамической по электронному компоненту ионизованной средой.

Усиленное на микроострие электрическое поле  $E$  может достигнуть и превысить величину  $\sim 10^7$  В/см, что достаточно для начала автоэлектронной эмиссии с «кончика» заострения. Перегрузка микровыступа автоэмиссионными токами приводит к разогреву острия до температур, обеспечивающих термоэлектронную эмиссию. Таким образом, эмиссия, начавшаяся как автоэлектронная, затем поддерживается относительно малыми разностями потенциалов электрод-плазма и протекает как автотермоэлектронная. В варианте, изображенном на рис. 8, величина эмитируемого острием тока  $J$ , ограничивается электронными токами из плазмы на поверхность электрода. Токи эти существенным образом могут превосходить взрывоэмиссионный ток в вакуумном диоде.

При взрывной эмиссии микровыступ трансформируется в «микровпадину» (кратер) и приле-



гающие к нему новые острия. Характерный поперечный размер кратера:

$$a \approx (\chi_T \tau_g)^{1/2}, \quad (5)$$

где  $\chi_T$  — коэффициент температуропроводности металла, а  $\tau_g$  — длительность горения дуги в промежутке острий-плазма. Плотность энерговыделения на автотермоэмиссионной стадии на микровыступе:

$$w \approx j_g^2 \tau_g / \sigma, \quad (6)$$

где  $j_g$  — плотность тока в области эмитирующего острия,  $\sigma$  — проводимость материала электрода.

Именно взрывоэмиссионный механизм, по сложившимся представлениям, является определяющим при возникновении так называемых «униполярных» дуг на контактирующих с плотной и горячей плазмой лимитерах в замкнутых магнитных ловушках [17]. Экспериментальные данные, полученные на токамаках и стеллараторах, показали, что униполярные дуги являются местом микровзрывов, приводящих к прямой трансформации кончика металлического острия в плазму, к расплавлению поверхности, прилегающей к острию и к образованию новых микрократеров и микроострий.

Процессам микровзрывов на контакте плазма-электрод посвящён цикл работ, в которых взрывоэмиссионные явления были обнаружены и исследованы при взаимодействии бесстолкновительной плазмы микроволновых разрядов и скользящих поверхностных разрядов низкого давления с погруженными в неё электродами [4—7]. В экспериментах было установлено, что характерное время возникавших на контактах плазма-электрод микровзрывов  $\tau_g$  составляло 1—10 мкс. Размеры локального поражения, определённые из соотношения (5), оказались при этом порядка 10—30 мкм, что близко к значениям, определённым экспериментально. По измеренным эмиссионным токам  $J_g$  при размерах, определённых из (5), оценена плотность тока, проходящего через микроострие на автотермоэмиссионной стадии:

$$j_g \approx J_g / a^2 \sim 10^7—10^8 \text{ А/см}^2. \quad (7)$$

При плотности тока  $j_g \approx 10^8 \text{ А/см}^2$ , приняв проводимость  $\sigma \approx 10^{17} \text{ с}^{-1}$  (проводимость твёрдого железа), из (6) получаем плотность энерговыделения  $w \approx 10^5 \text{ Дж см}^{-3}$ , что много больше энергии плавления ( $Q_{пл} \approx 5 \cdot 10^3 \text{ Дж см}^{-3}$ ). Более того, как легко видеть, энергия, приходящаяся на один атом, составляет несколько электрон-вольт:

$$\varepsilon_0 = w / n_a \approx j_g^2 \tau_g / \sigma n_a \approx 4 \text{ эВ}, \quad (8)$$

где  $n_a$  — концентрация атомов в твёрдом теле ( $\sim 10^{23} \text{ см}^{-3}$ ). Столь значительная величина  $\varepsilon_0$  озна-

чает, что вещество взрыва выделяется в виде плазмы, причем практически полностью ионизованной.

Обращаясь к исследованиям предшествующих, следует также отметить работы [3, 18, 19], в которых бесстолкновительная электроразрядная плазма использовалась для возбуждения взрывоэмиссионных явлений на металлических поверхностях, покрытых диэлектрической плёнкой. Наличие такого рода плёнки приводит, как показано в указанных работах, к существенному снижению порогов формирования микровзрывов по величине электронной температуры и концентрации плазмы, в которую погружаются исследуемые электроды. Эксперименты, проведённые в [3, 18, 19], продемонстрировали, что после взаимодействия с бесстолкновительной плазмой, создаваемой коаксиальным плазмотроном, поверхность металлического образца оказывается испещрённой множеством микрократеров и микроострий. Модифицированная таким образом поверхность обладает повышенной твёрдостью.

Анализируя множество работ, посвящённых проблеме взрывоэмиссионного плазмообразования на контакте плазма-металл, отметим, что практически все они выполнены с использованием в качестве форплазмы газовых разрядов низкого давления, в которых при относительно несложных ухищрениях достижима «высокопотенциальность» плазмы, необходимая для возбуждения микровзрывов.

Получение условий, обеспечивающих развитие микровзрывов на металлической поверхности, при использовании газовых разрядов высокого (вплоть до атмосферного) давления — задача весьма сложная из-за проблем с генерацией в этих условиях высокотемпературной плотной плазмы, а также развития нелинейных процессов, приводящих к появлению надтепловых «хвостов» энергичных электронов. Именно в связи с этим в литературе затруднительно найти публикации, которые можно было бы рассматривать как демонстрацию возможностей использования сильно столкновительной газоразрядной плазмы атмосферного давления для возбуждения взрывоэмиссионных центров («искрений») на поверхности металлических образцов.

Исходя из предположения о том, что параметры капиллярного факела в месте соприкосновения с металлической преградой соответствуют измеренным в [4] ( $n_e \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e \approx 2 \text{ эВ}$ ), получаем квазистационарное поле у поверхности (из соотношения (3))  $E \approx 10^5 \text{ В/см}$ . Это в несколько раз меньше пороговых по отношению к взрывной эмиссии для вакуумного диода значений. Однако учёт наличия изначально плазменной среды, снимающей ограничения по эмиссионным токам, свя-

занные с объёмным зарядом, может приводить к заметному снижению порога автотермоэлектронной взрывной эмиссии. Ток, который может протекать через микроострие, входящее в контакт с плазмой, можно оценить из соотношения:

$$J_{\text{max}} \approx n_e e (kT_e/m_e)^{1/2} S_p, \quad (9)$$

где  $n_e$  — концентрация электронов в капиллярном факеле, а  $S_p$  — площадь поперечного сечения факела. При  $S_p \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ ,  $n_e \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $T_e \approx 2 \text{ эВ}$  получаем  $J_{\text{max}} \approx 1 \text{ кА}$ . Столь высокие значения токов более чем достаточны для обеспечения взрыва микроострия.

Таким образом, использование капиллярного микроволнового плазмотрона, генерирующего разрядную «нить» с чрезвычайно плотной плазмой, позволило реализовать условия, приводящие к развитию автотермоэлектронной взрывной эмиссии на входящей в контакт с «нитью» металлической поверхностью. Описанный в статье эксперимент можно рассматривать, как одну из первых реализаций взрывоэмиссионных явлений на контакте плазма-металл, возникающих в воздушной среде атмосферного давления.

Подвергнутая облучению микроволновым капиллярным плазмотроном исходно гладкая металлическая поверхность характеризуется образованием микрорельефа, представляющего собой чередование микровыступов и «микрократеров» с характерными размерами порядка десятков микрон. Возможность создания такого рода шероховатости практически на всех металлических поверхностях в условиях свободного пространства (в естественных воздушных атмосферных условиях), не требующих специальных вакуумируемых камер, может оказаться чрезвычайно полезной и востребованной для ряда технологий, направленных, в частности, на повышение прочностных характеристик металлических деталей, изменения их вторичноэмиссионных и оптических свойств и т. д.

**Обработка при атмосферном давлении  
металлической поверхности микроволновым  
факелом как способ предотвращения  
вторичноэмиссионного электронного разряда  
на элементах бортовой радиоэлектронной  
аппаратуры**

Теоретическая основа проблемы влияния микрорельефа металлической поверхности на её вторично-эмиссионные характеристики заложена в работе [20]. Расчёты коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) проводились для плоской поверхности и поверхности, покрытой регулярными неоднородностями в виде «треугольных» или «прямоугольных» пазов так, как это показано на рис. 9. В работе представлены ре-

зультаты компьютерного счёта, показавшие, что, используя регулярную неоднородность, можно заметным образом уменьшить величину КВЭЭ (обозначаемую в дальнейшем, как  $\sigma$ ). Степень снижения  $\sigma$  зависит только от параметров, характеризующих рельеф облучаемой электронами поверхности. При «треугольной» геометрии пазов этим параметром является угол  $\alpha$  (см. рис. 9, а). Для «прямоугольных» пазов определяющее значение имеют два параметра: аспектное соотношение  $h/a$  и соотношение  $a/t$ , характеризующее часть площади поверхности металлического образца, занятую пазами (см. рис. 9, б).

Авторами работы [20] проведён эксперимент, результаты которого оказались близкими к расчёту. В эксперименте неоднородная поверхность облучаемой электронами мишени формировалась с помощью регулярно располагаемых на поверхности плоского образца пластин. Фотография варианта конструкции облучаемой электронным пучком мишени с искусственной «шероховатостью» приведена на рис. 10.

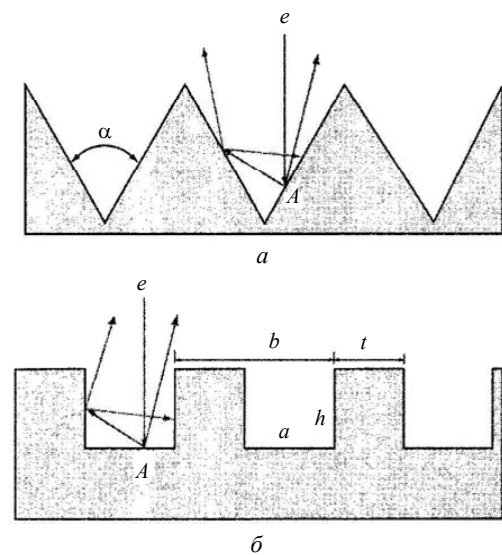


Рис. 9. а — треугольные и б — прямоугольные желобки на поверхности. Треугольные желобки характеризуются углом  $\alpha$ . Прямоугольные желобки имеют период  $b$ , ширину  $a$ , глубину  $h$  и толщину  $t$

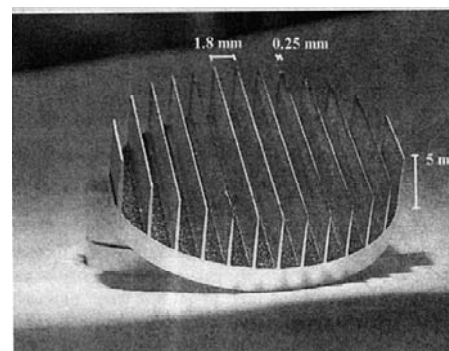


Рис. 10. Медный образец с желобками на поверхности



Характерные зависимости КВЭЭ для «гладкой» алюминиевой пластины и пластины с «треугольными» неоднородностями на поверхности, полученные в эксперименте, показаны на рис. 11.

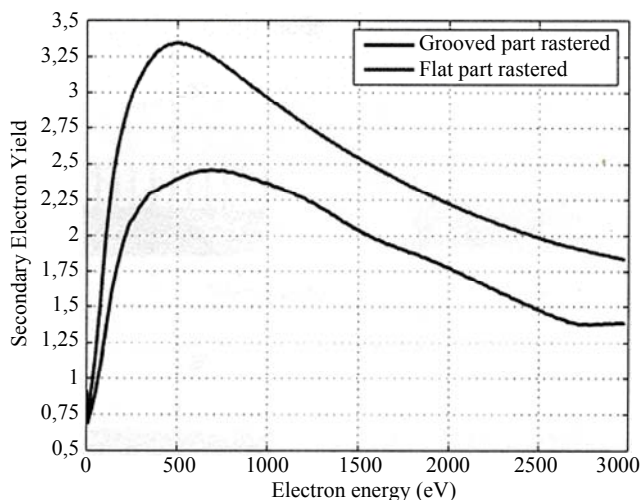


Рис. 11. Al образец с треугольными желобками.  $\alpha \sim 40^\circ$  и глубина = 0,2 мм

Из экспериментальных работ, посвящённых исследованию роли геометрической неоднородности металлической поверхности в формировании вторичноэмиссионного электронного потока, следует отметить публикации [21, 22], в которых основными способами создания искусственной «шероховатости» были химическое и ионное травление. Применение такого рода технологий осложняется необходимостью помещения обрабатываемых деталей в вакуумируемые или заполняемые химически активной средой камеры. Достижимые значения относительно низкого КВЭЭ, как показали исследования, имеют тенденцию возврата со временем к исходно высокой величине.

В относительно недавних работах [19, 23] впервые для формирования микрорельефа на изначально гладкой металлической поверхности использовалась входящая в контакт с обрабатываемой деталью плазма. Схема эксперимента изображена на рис. 12. Взаимодействие плазма-металл приводит к тому, что поверхность образца становится покрытой множеством «микроострий» и микронных же «кратеров». «Шероховатая» поверхность такого типа может обладать низким коэффициентом вторичной электронной эмиссии и повышенным значением первого критического потенциала. Представлены первые результаты поисков в этом направлении.

Следует заметить, однако, что плазма, вводимая в контакт с металлом в [19, 23], создавалась разрядом в газах низкого давления в вакуумируемых реакционных камерах. Это, в определённой мере, усложняет технологию обработки деталей реальных радиоэлектронных бортовых устройств.

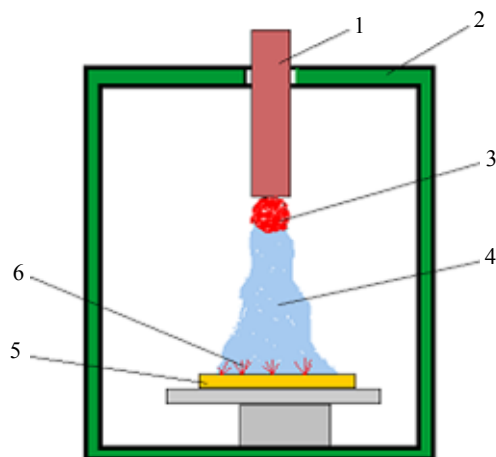


Рис. 12. Схема эксперимента по обработке металлической поверхности бесстолкновительной плазменной струей: 1 — источник плазмы; 2 — вакуумная камера; 3 — горячая бесстолкновительная плазма, генерируемая источником; 4 — плазменная струя; 5 — металлический образец; 6 — взрывоэмиссионная микроплазма (поверхностные искрения)

Проведённые в рамках настоящего исследования эксперименты, впервые реализовавшие возможность возбуждения взрывоэмиссионных центров на металлической поверхности, облучаемой микроволновой плазмой высокого (атмосферного) давления, продемонстрировали появление вызванной микровзрывами искусственной «шероховатости» изначально гладкой поверхности. Одним из возможных следствий этой «шероховатости» может стать, как показано выше, снижение вторичноэмиссионной способности образца, что может послужить средством подавления мультипактора, приводящего к нарушению работы или к невозможности восстановления элементов передающей микроволновое излучение бортовой системы спутников связи.

Для исследования характера влияния приобретённого микрорельефа на величину КВЭЭ в ИОФ РАНе введена в действие установка ВЭРА-1, схематически изображённая на рис. 13. Установка включает в себя вакуумную камеру, систему откачки, систему ввода в камеру набора подвергающихся тестированию образцов, электронную пушку, формирующую электронный пучок, облучающий образцы.

На рис. 14 приведена электрическая схема расположенной перед образцами электродной системы, подводящей к образцу электронный пучок, которая меняет энергию внедряющихся в металлическую поверхность электронов и позволяет определять как суммарную величину токов первичных и вторичных электронов, так и величину только первичного тока.

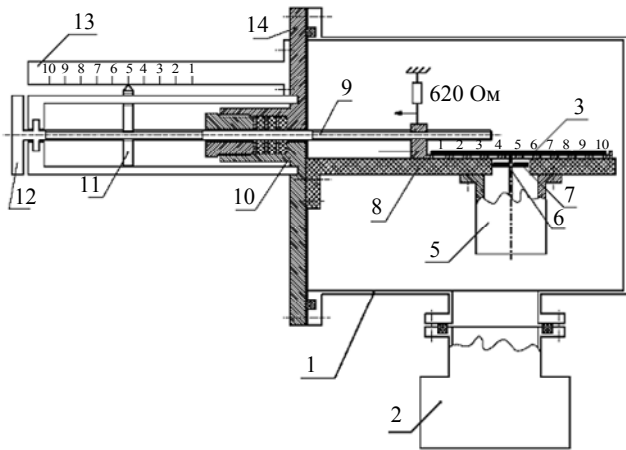


Рис. 13. Схема установки, предназначенной для измерения КВЭЭ образцов:

- 1 — вакуумная камера; 2 — система откачки; 3 — образцы;
- 4 — каретка; 5 — электронная пушка; 6 — электронный пучок;
- 7 — контроллер; 8 — держатель каретки;
- 9 — система перемещения; 10 — ввод системы перемещения в вакуум;
- 11 — шнек индикатора; 12 — ; 13 — шкала;
- 14 — фланец

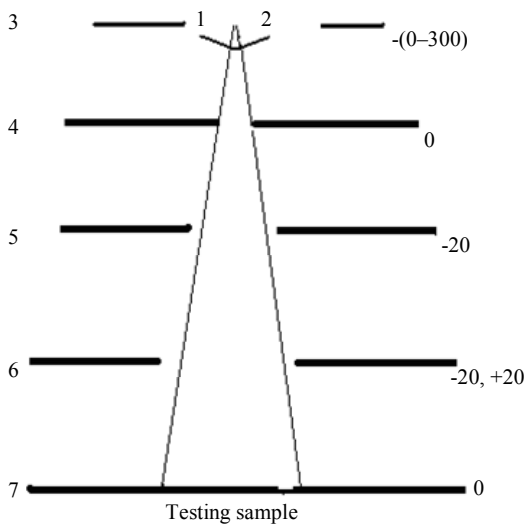


Рис. 14. Схема измерения КВЭЭ образцов:  
1—2 — катод

По схеме рис. 14 на стенде ВЭРА-1 проведены измерения КВЭЭ необработанного алюминиевого образца с исходно гладкой поверхностью и образца, обработанного капиллярным микроволновым факелом. Результаты измерений приведены на рис. 15. Как следует из графика, КВЭЭ обработанного образца во всём интервале электронной энергии меньше, чем 1. Это означает, что возбуждение мультипактора на обработанном образце полностью исключено.

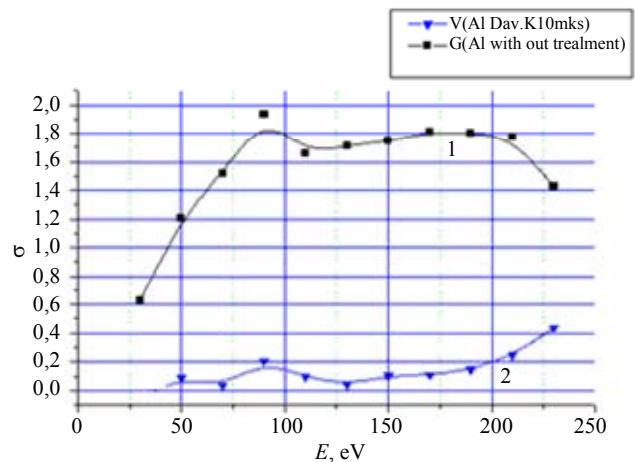


Рис. 15. Зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии электронов:

- 1 — необработанная (гладкая) алюминиевая пластина;
- 2 — алюминиевая пластина, обработанная микроволновой плазмой

### Заключение

Основные результаты, полученные в настоящем исследовании, заключаются в следующих основных положениях.

- Впервые в условиях открытого пространства при атмосферном давлении воздушной среды реализована основанная на применении импульсного капиллярного микроволнового факела схема эксперимента, позволяющая осуществить возбуждение взрывоэмиссионное образование микроплазмы на поверхности металла.

- Проведена обработка поверхности алюминиевой пластины многократным облучением плазменной струей капиллярного микроволнового разряда и показано, что в результате взрывоэмиссионных микроискрений происходит трансформация исходно гладкой поверхности в поверхность «шероховатую», представляющую из себя множество микронных размеров выступов и впадин («кратеров»).

- Максимальный коэффициент вторичной электронной эмиссии  $\sigma_{max}$  «шероховатой» («рифлённой») поверхности снижается от  $\approx 2$  для необработанного образца до  $\approx 0,4$  и остаётся стабильно низким в течение длительного пребывания образца в атмосфере.

Последний результат позволяет рассматривать предложенный и исследованный метод воздействия на металлическую поверхность как способ обработки элементов бортовой спутниковой радио-электронной системы с целью подавления вторичноэмиссионных электронных разрядов («мультипакторов»), приводящих к временному нарушению работы или к невозможности восстановления компонентов аппаратуры.

Работа выполнена при частичной поддержке «Регионального фонда содействия отечественной науки» О. В. Дерипаски и А. Л. Мамут, частично в рамках предоставленного Давыдову А. М. гранта «Стипендия Президента РФ», частично в рамках проекта РФФИ 13-08-01174.

#### Литература

1. Kossyi I. A., Anpilov A. M., Barkhudarov E. M., et al. // Proc. 7<sup>th</sup> International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware. 21–23 September 2011, Valencia, Spain, El. Proceedings, Report S101.
2. Косский И. А. Проект «Наноструктурированное покрытие для подавления эффекта эмиссии вторичных электронов на металлических поверхностях в спутниках связи», поддержанный «Некоммерческой организацией Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий» (Сколково).
3. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Куksenova Л. И. и др. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 57.
4. Грицинин С. И., Гуцин П. А., Давыдов А. М. и др. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 8. С. 725.
5. Бережецкая Н. К., Копьев В. А., Косский И. А. и др. // ЖТФ. 1991. № 2. С. 179.
6. Anpilov A. M., Barkhudarov E. M., Berezhetskaya N. K., et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. V. 7. P. 141.
7. Анпилов А. М., Бережецкая Н. К., Копьев В. А. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 5. С. 454.
8. Ким А. В., Фрайман Г. М. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. № 3. С. 613.
9. Аветисов В. Г., Грицинин С. И., Ким А. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. № 6. С. 306.
10. Batanov G. M., Gritsinin S. I., Kossyi I. A., et al. / in Book “Plasma Physics and Plasma Electronics”, Ed. By L.M.Kovrizhnykh, Nova Science Publishers, Commack, 1989. pp. 241–282.
11. Kossyi I. A. / 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2006, Report AIAA-2006-1457.
12. Kovalev N. F., Nechaev V. E., Petelin M. I., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. pp. 246-251.
13. Anpilov A. M., Berezhetskaya N. K., Kop'ev V. A., et al. // Plasma Physics Reports. 1997. V. 23. No. 5. P. 412.
14. Бережецкая Н. К., Копьев В. А., Косский И. А. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 2. С. 179.
15. Копьев В. А. Диссертация. — Москва: ИОФ РАН, 1997.
16. Huddleston R and Leonard S. L. (ed) Plasma Diagnostic Techniques (New York: Academic, 1965).
17. Robson A. E., Toneman P. S. // Proc. Phys. Soc. 1959. V. 73. No. 471. P. 598.
18. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Kuksenova L. I., et al. // Plasma Physics Reports. 2011. V. 37. No. 13. P. 1230.
19. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Kuksenova L. I., et al. // Plasma Physics Reports. 2012. V. 38. No. 13. P. 1105.
20. Pivi M., King F. K., Kirby R. E., et al. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 104904.
21. Montero I., Aguilera L., Davila M. E., et al. Novel types of anti-eclod surfaces.
22. Galan L., Nistor V., Montero I., et al. / Proceedings of MULCOPIM'2008. ESTEC-ESA, Noordwijk, The Netherlands, 2008.
23. Иванов В. А., Кобышев М. Е., Сатунин С. И., и др. // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 62.

## Microwave capillary torch as a means for action on electrophysical characteristics of metallic surface

K. V. Artem'ev<sup>1</sup>, A. M. Davydov<sup>1</sup>, V. A. Ivanov<sup>1</sup>, I. A. Kossyi<sup>1</sup>,  
G. S. Luk'yanchikov<sup>1</sup>, and I. V. Moryakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of RAS  
38 vavilov str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: kossyi@fpl.gpi.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Radio Electronics and Automatics (MIREA)  
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia  
E-mail: igor\_miw@mail.ru

Received October 2, 2014

**Assigned fundamental problem of this work is investigation possibility under conditions of open space in an atmospheric pressure air realization of explosive generation microplasma observed and examined previously in case of interaction of metallic surface with the collisionless relatively hot and dense plasma produced by low pressure gas discharge.**

**Applied problem stimulated of performed experimental research was surface microexplosions utilization for surface roughness creation that is capable to reduce secondary electron emission yield of metal and by such a means cut the likelihood (or exclude) excitation of multipactor which limits value of microwave power received or transmitted by communication satellite.**

**The main results obtained as a part of an exploration program of this research consist in following:**

- For the first time the microexplosive sparks on the metallic surface have been excited under the open space atmospheric air conditions in experiments based on the pulse microwave capillary torch application;

- Metallic (Al) surface treatment has been actualized by means of manifold irradiation with the plasma stream of capillary microwave discharge in atmospheric air. It has been shown that as a result of explosive-emissive microsparks excitation initially smooth surface transforms into the "rough" one involving multitude of micron sizes "hills" and "pits" ("craters");

- Maximal value of secondary electron emission yield  $\sigma_{max}$  of the "rough" ("corrugated") surface comes down from  $\approx 2$  for nontreated sample to  $\approx 0.4$  and remains almost unchanged during long time stay in air atmosphere.

The last result permits us to consider proposed and investigated method of action on the metallic surface as a way of born satellite radio-electronic system treatment for the purpose to suppress multipactor leading to the temporal dysfunction or to the irreparable damage of hardware components.

PACS: 52.80.Vp; 52.80.Wq

**Keywords:** microwave torch, metallic surface irradiation, corrugation of metallic surface, electron secondary emission mitigation.

## References

1. I. A. Kossyi, A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, et al. in *Proc. 7<sup>th</sup> International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware*. (21—23 September 2011, Valencia, Spain, El. Proceedings), Report S101.
2. I. A. Kossyi, *Project "Nanostructured coating for suppression of the secondary electron emission...."* (Scolcovo Center, Russia) [in Russian].
3. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 57 (2010).
4. S. I. Gritsinin, P. A. Gushchin, A. M. Davydov, et al., *Plasma Physics Reports* **39**, 725 (2013).
5. N. K. Berezhetskaya, V. A. Kop'ev, I. A. Kossyi, et al., *Tech. Phys.* No. 2, 179 (1991).
6. A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, N. K. Berezhetskaya, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 141 (1998).
7. A. M. Anpilov, N. K. Berezhetskaya, V. A. Kop'ev, et al., *Plasma Physics Reports* **23**, 454 (1997).
8. A. V. Kim and G. M. Fraiman, *Plasma Physics Reports* **9**, 613 (1983).
9. V. G. Avetisov, S. I. Gritsinin, A. V. Kim, et al., *Tech. Phys. Lett.* **51**, 306 (1990).
10. G. M. Batanov, S. I. Gritsinin, I. A. Kossyi, et al., in *Book "Plasma Physics and Plasma Electronics"*, Ed. By L.M.Kovrizhnykh (Nova Science Publishers, Commack, 1989), pp. 241—282.
11. Kossyi I. A. in *Proc. 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (Reno, Nevada, 2006), Report AIAA-2006-1457.
12. N. F. Kovalev, V. E. Nechaev, M. I. Petelin and N. I. Zaitsev, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26**, 246 (1998).
13. A. M. Anpilov, N. K. Berezhetskaya, V. A. Kop'ev, et al., *Plasma Physics Reports* **23**, 412 (1997).
14. N. K. Berezhetskaya, V. A. Kop'ev, I. A. Kossyi, et al., *Tech. Phys.* **61**, 179 (1991).
15. V. A. Kop'ev, Candidate's Dissertation (IOF RAN, Moscow, 1997).
16. R. Huddlestone and S. L. Leonard, (ed), *Plasma Diagnostic Techniques* (New York: Academic, 1965).
17. A. E. Robson and P. S. Toneman, *Proc. Phys. Soc.* **73**, 598 (1959).
18. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, et al., *Plasma Physics Reports* **37**, 1230 (2011).
19. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, et al., *Plasma Physics Reports* **38**, 1105 (2012).
20. M. Pivi, F. K. King, R. E. Kirby, et al., *J. Appl. Phys.* **104**, 104904 (2008).
21. I. Montero, L. Aguilera, M. E. Davila, et al. *Novel types of anti-ecloud surfaces*.
22. L. Galan, V. Nistor, I. Montero, et al., in *Proceedings of MULCOPIM'2008. ESTEC-ESA* (Nordwijk, The Netherlands, 2008).
23. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, S. I. Satunin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 62 (2008).