

УДК 537.528; 537.525.99

Тонкая наноструктурированная углеродная плёнка на поверхности металла как способ предотвращения мультипакторного разряда

*А. М. Анпилов, Э. М. Бархударов, И. А. Косый, Г. С. Лукьянчиков,
М. А. Мисакян, И. В. Моряков*

Нанесённая на поверхность металла тонкая наноуглеродная плёнка способна уменьшить коэффициент вторичной электронной эмиссии до величины менее или равной единице. Тем самым устранить возможность развития мультипакторного разряда. В работе описан метод получения коллоидного раствора углерода, способ создания на его основе наноструктурированной плёнки на поверхности металла, а также результаты измерения коэффициента вторичной электронной эмиссии, полученного образца.

PACS 52.80.Vp; 52.80.Wq

Ключевые слова: мультипакторный разряд, наноуглеродная плёнка, коэффициент, вторичная электронная эмиссия.

Введение

В течении последних 20—30 лет явление лавинного эффекта, возникающего в результате вторичной эмиссии электронов, в значительной степени изучалось из-за негативного влияния, которое оно может оказывать на микроволновые системы, работающие в вакууме. Вторичная эмиссия электронов может нарушать работу СВЧ-генераторов высокой мощности, ускорителей электронов, но, прежде всего, приводит к серьёзной деградации систем связи спутника и даже выходу их из строя. Этот эффект возникает при превышении пороговой плотности мощности внутри металлических волноводов и других элементов высокочастотного тракта.

Разработка технологий, посвящённых подавлению эффекта возбуждения мультипакторного разряда, является в наше время одной из наиболее актуальных проблем при создании спутников. Одним из решений данной проблемы является изменение поверхностных свойств металлических компонент приборов с целью значительного

уменьшения эффекта лавинообразного размножения вторичных электронов. При этом не должно допускаться значительного изменения радиофизических свойств обработанных деталей и узлов.

В данной работе приводятся результаты исследований, в которых решение указанных проблем осуществляется в результате покрытия поверхности металла плёнкой наноструктурированного углерода.

Эксперименты и анализ результатов

При получении наноструктурированных углеродных покрытий на металлической поверхности, использовался коллоидный раствор углерода в спирте (C_2H_5OH , 95 %), который был получен с помощью — высоковольтного импульсно-периодического многоэлектродного разряда [1, 2].

Наноструктуры углерода, как известно, представляют собой метастабильные состояния конденсированного углерода. Их получение возможно только в условиях отклонения от термодинамического равновесия. Поэтому большой интерес представляет появившийся в последнее время цикл работ [3—5], в которых для синтеза наночастиц углерода, металлов и различных их композиций используется импульсный электрический разряд в органических жидкостях. Короткий импульсный разряд способствует созданию метастабильных фаз углерода. Это происходит в результате атомизации молекул спирта в высокотемпературном канале разряда с последующим его быстрым охлаждением (т. н. «закалка»).

Анпилов Андрей Митрофанович, научный сотрудник.
Бархударов Эдуард Михайлович, вед. научный сотрудник.
Косый Игорь Антонович, зав. лабораторией.
Лукьянчиков Геннадий Семенович, ст. научный сотрудник.
Мисакян Мамикон Арамович, ст. научный сотрудник.
Моряков Игорь Витальевич, мл. научный сотрудник.
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38
E-mail: kossyi@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 21 июля 2014 г.

© Анпилов А. М., Бархударов Э. М., Косый И. А.,
Лукьянчиков Г. С., Мисакян М. А., Моряков И. В., 2014

Экспериментальная установка по получению коллоида схематически представлена на рис. 1.

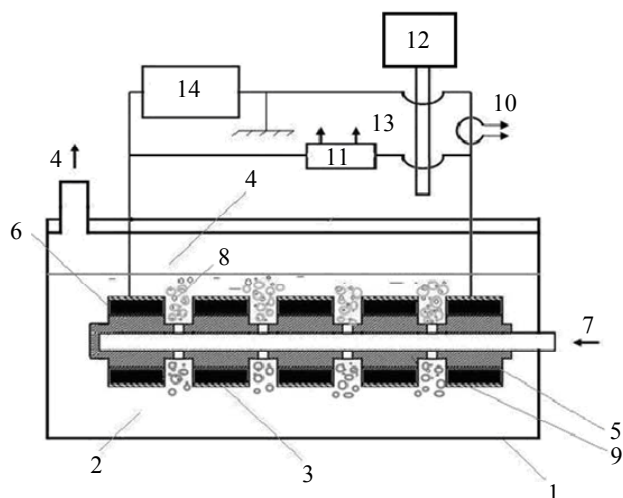


Рис. 1. Схема установки для получения коллоида на основе этанола: 1 — камера из оргстекла; 2 — этанол; 3 — разрядник; 4 — газ Ar; 5 — полая трубка из диэлектрика; 6 — электрод; 7 — канал для инъекции газа; 8 — пузырьки газа; 9 — слой изоляции; 10 — пояс Роговского; 11 — делитель напряжения; 12 — спектрограф; 13 — световод; 14 — источник питания

Камера из оргстекла (1) заполнена 95%-этанолом (2), в который погружено многоэлектродное разрядное устройство. Подробное описание разрядного устройства и его основные характеристики приводятся в [6, 7]. На диэлектрической трубке (5), расположены трубчатые электроды (6), боковая поверхность которых покрыта слоем диэлектрика (9). Рабочим газом являлся Ar (4). Крайний электрод подключён к высоковольтному импульсно-периодическому источнику питания (10). Один из электродов заземлён. Разряд возникает в пузырьках газа, насыщенных парами этанола.

Типичные параметры установки: напряжение $U = 20$ кВ, частота $f \leq 50$ Гц, энергия накопительного конденсатора $C \leq 1,6$ Дж, скорость прокачки газа $V \approx 1\text{--}2$ л/мин.

Регистрировались ток, напряжение разряда и интегральный спектр излучения.

Под воздействием разряда образуется устойчивый коллоидный раствор наночастиц углерода тёмного цвета.

Параметры наночастиц углерода исследовались различными методами: комбинационное рассеяние света (КРС), динамическое рассеяние света (ДРС), рентгеновская дифрактометрия, рассеяние электронного пучка, электронная микроскопия. В результате проведенных исследований удалось

сформулировать следующие особенности коллоидного раствора.

1. Существует определенное пороговое значение удельного энерговклада, выше которого коллоидный раствор устойчив, свойства раствора не меняются в течении года (время наблюдения). При более низких удельных энерговкладах с течением времени происходит выпадение осадка и просветление жидкости. На рис. 2 представлены образцы спиртовых коллоидов, полученных при различных временах экспозиции. На сосудах указано время экспозиции в минутах. Время с момента получения образцов до их фотографирования — 1 месяц. Пороговое значение удельного энерговклада зависит от материала электрода.

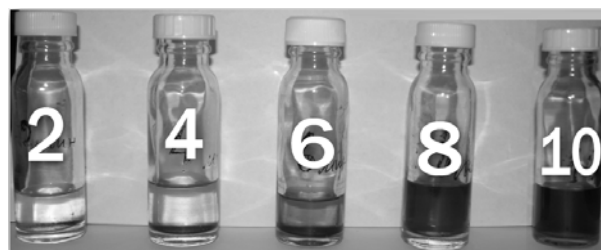


Рис. 2. Образцы коллоида, полученные при различных экспозициях (время указано цифрами в минутах). Параметры источника питания $U = 20$ кВ; $f = 50$ Гц; $W = 1,6$ Дж

2. При нагреве раствора до температуры, близкой температуре кипения, и последующего охлаждения свойства коллоида не меняются.

3. Проводимость устойчивого коллоидного раствора превышает проводимость исходного этилового спирта в 2 раза.

4. Наночастицы обладают отрицательным зарядом; при прохождении тока на положительном электроде образуется углеродная пленка и происходит быстрое выпадение осадка, а также просветление жидкости [8]. Аналогичный эффект, а именно, нарушение устойчивости коллоидного раствора наблюдается и при прохождении через него достаточно интенсивного лазерного излучения.

5. Размеры наночастиц и их структура зависят от удельного энерговклада. Существует определенная величина энерговклада, при котором частицы обладают наименьшим разбросом по размерам. Эти размеры лежат в диапазоне 5—10 нм и представляют собой разупорядоченный углерод с присутствием частиц карбина. Рамановские спектры (КРС), соответствующие различным временам экспозиции, приведены на рис. 3.

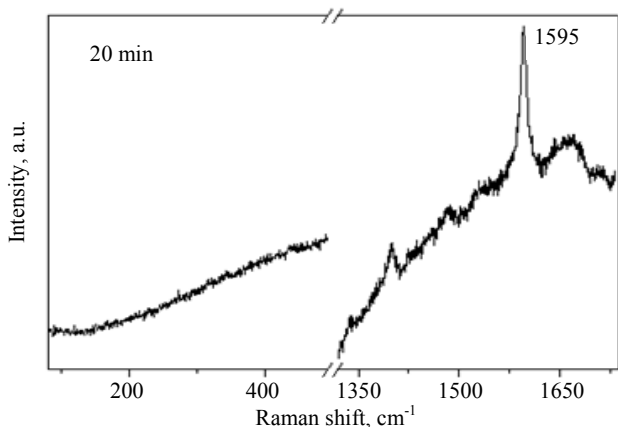
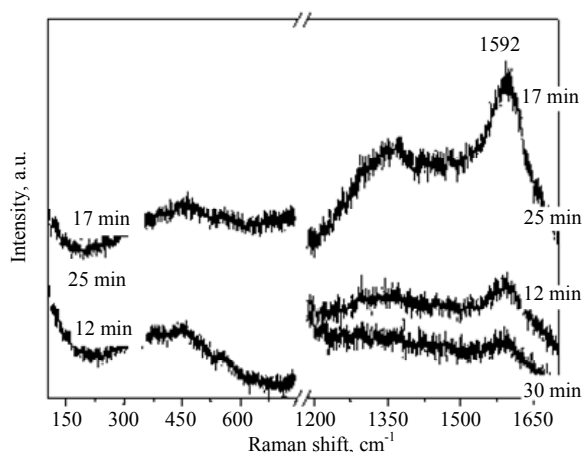
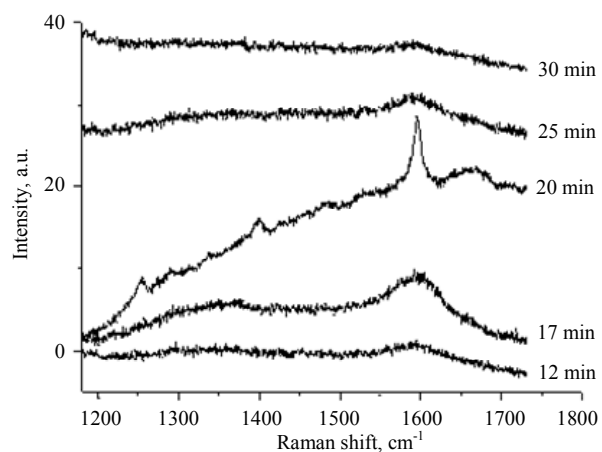


Рис. 3. Рамановские спектры наноуглерода, полученные при разных временах обработки спирта

Схема эксперимента по получению тонкой наноструктурированной углеродной плёнки приведена на рис. 4. Фотографии пленки представлены на рис. 5 и 6.

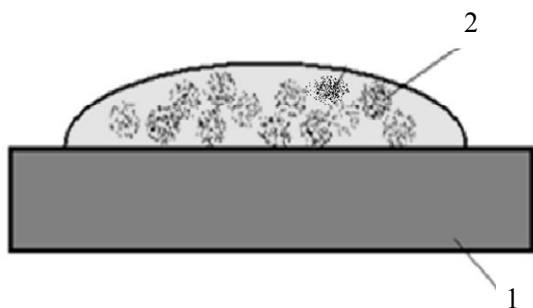


Рис. 4. Схема получения тонкой наноуглеродной плёнки путём испарения коллоида: 1 — подложка из Al; 2 — капля спиртового коллоида

Методика эксперимента заключается в следующем: на металлическую Al-пластину равномерно наносится спиртовой коллоид, сама пластина находится при температуре $t = 45\text{—}50\text{ }^\circ\text{C}$. В результате испарения коллоидного раствора образуется наноуглеродная плёнка, толщина которой легко регулируется. Максимальная толщина плёнки не превышала 1—2 мкм.

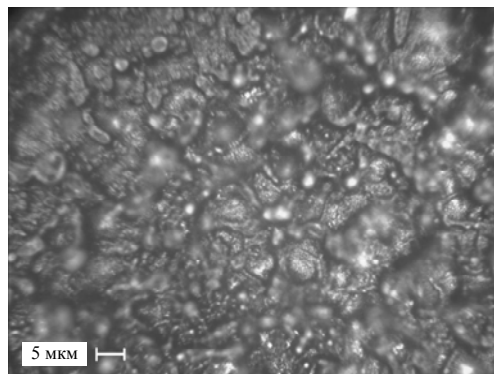


Рис. 5. Фотография наноуглеродной плёнки полученная с помощью оптического микроскопа ПМТ-3М

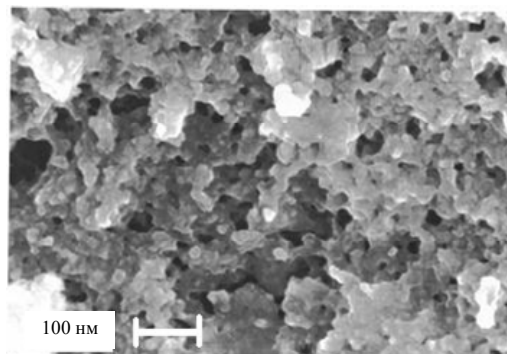


Рис. 6. Фотография наноуглеродной плёнки полученная с помощью электронного микроскопа

Основные требования для антимультипакторных покрытий можно сформулировать следующим образом [9].

1) Низкая вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) (первый критический потенциал $E_1 > 75$ В, максимальный коэффициент ВЭЭ — $\sigma_{\max} < 1,5$),

2) Низкое радиочастотное поверхностное сопротивление (не превышающее сопротивление Ag более чем в 3 раза),

3) Устойчивость параметров при хранении в контакте с атмосферой (в течение более 10 месяцев).

Была создана установка по измерению коэффициента ВЭЭ, который определяется как отношение тока вторичных электронов I_2 к току пучка электронов бомбардирующих поверхность пленки I_1 .

$$\sigma = I_2/I_1.$$

Отметим, что ток первичных электронов не превышал 10^{-8} А. Полученные результаты представлены на рис. 7.

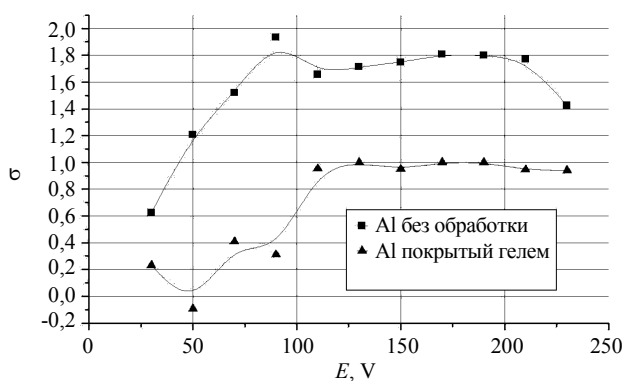


Рис. 7. Коэффициент вторичной эмиссии в зависимости от энергии первичного пучка электронов: ■ — чистая пластина из Al, ▲ — пластина из Al, на которую нанесена тонкая нанокремниевая плёнка

Из рис. 7 видно, что нанокремниевая плёнка значительно снижает величину коэффициента вторичной электронной эмиссии по сравнению с непокрытой поверхностью алюминия, и при этом его величина не превосходит единицу. Из послед-

него следует, что плёнка препятствует развитию мультипакторного разряда. Тем самым, устраняется один из основных факторов, ограничивающих уровень передаваемой мощности в системе спутниковой связи.

Следует отметить, что плёнка обладает хорошими адгезионными свойствами и длительное время сохраняет свои характеристики. Измерения коэффициента вторичной эмиссии, проведенные с интервалом в один год, дали аналогичный результат. При этом между измерениями плёнка большую часть времени находилась в контакте с атмосферой.

Заключение

Нанесённая на поверхность металла тонкая нанокремниевая плёнка способна уменьшить коэффициент вторичной электронной эмиссии до величины равной или даже меньшей единицы. Тем самым, появляется возможность эффективного устранения возникновения и развития мультипакторного разряда.

Литература

1. Анпилов А. М., Бархударов Э. М., Косый И. А., Мисакян М. А. // Тезисы докладов XL Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2013. С. 241.
2. Косый И. А., Бархударов Э. М. и др. Патент РФ № 97100541/09.
3. Noriaki Sano // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. P. L17.
4. Parkansky N., Altercop B., Boxman R.L., et al. // Powder Technology. 2005. V. 150. No. 1. P. 36.
5. Mariotti D. and Sankaran R. M. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2010. V. 43. No. 32. P. 323001.
6. Anpilov A. M., Barkhudarov E. M., Bark Y. B., et al. // J. Phys. D: Appl Phys. 2001. V. 34. P. 993.
7. Анпилов А. М., Бархударов Э. М., Воронов В. В. и др. // Тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2010. С. 245.
8. Анпилов А. М., Бархударов Э. М., Косый И. А. и др. // Тезисы докладов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 2012. С. 245.
9. Nistor V. C., Aguilera L., Montero I., et al. Strategies for Anti-Multipactor Coatings of Suppressed Secondary Emission and Low Insertion Losses for High Power RF Components of Satellite Systems. MULCOPIM'08, Valencia, Spain.

Thin film of nano-dimensional carbon deposition on the metallic samples as a multipactor prevention method

A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, I. A. Kossyi, G. S. Luk'yanchikov,
M. A. Misakyan and I. V. Moryakov

Prokhorov General Physics Institute, RAS
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: kossyi@fpl.gpi.ru

Received July 21, 2014

Thin nano-carbon film deposition on the metallic surface is capable of a secondary electron emission suppression to a value equal or smaller than 1, eliminating by such a means possibility of multipactor discharge excitation. In a submitted paper the scheme of nano-carbon film deposition and necessary for this scheme realization alcohol colloid production technology as well as results of secondary electron yield measurement of nontreated and coated samples are presented.

PACS 52.80.Vp; 52.80.Wq

Keywords: multipactor discharge, nanocarbon film, secondary electron emission, suppression.

References

1. A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, I. A. Kossyi, et al., in *Proc. XL Intern. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Thermonucl. Synthes.* (Zvenigorod, Russia, 2013), p. 241.
2. I. A. Kossyi, E. M. Barkhudarov, et al., RF Patent, No. 97100541/09.
3. Sano Noriaki, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37**, L17 (2004).
4. N. Parkansky, B. Altercop, R. L. Boxman, et al., *Powder Technology* **150**, 36 (2005).
5. D. Mariotti and R. M. Sankaran, *Journal of Physics D: Applied Phys.* **43**, 323001 (2010).
6. A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, Y. B. Bark, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34**, 993 (2001).
7. A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, V. V. Voronov, et al., in *Proc. XXXVII Intern. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Thermonucl. Synthes.* (Zvenigorod, Russia, 2010), p. 245.
8. A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, I. A. Kossyi, et al., in *Proc. XXXPX Intern. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Thermonucl. Synthes.* (Zvenigorod, Russia, 2012), p. 245.
9. V. C. Nistor, L. Aguilera, I. Montero, et al., *Strategies for Anti-Multipactor Coatings of Suppressed Secondary Emission and Low Insertion Losses for High Power RF Components of Satellite Systems* (MULCOPIM'08, Valencia, Spain).