

УДК 537.525.6:621.372.824

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В КООКСИАЛЬНЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯХ

© 2023 г. А. А. Довгань¹, И. Ш. Бахтеев², С. Ю. Молчанов², *, С. И. Кузюткин¹

¹Акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Алмаз”, Саратов, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: canishe@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Представлены результаты исследования условий возникновения мультипакторного разряда в коаксиальных переключателях. Получена модель мощного коаксиального СВЧ переключателя типа SPDT, работающая в частотном диапазоне ниже 1.7 ГГц. Приведены расчетные значения электрических параметров и показана возможность изготовления коаксиального переключателя для космических аппаратов с запасом по уровню рабочей мощности. Изготовленный образец СВЧ переключателя способен выдерживать не менее 400 Вт непрерывной мощности на частоте 1 ГГц, что подтверждается проведенным экспериментом.

DOI: 10.31857/S0367676522700417, EDN: ANYIGS

ВВЕДЕНИЕ

Мультипакторный пробой возникает при работе СВЧ устройств в условиях вакуума. На свободные электроны (которые всегда в том или ином количестве присутствуют в волноводном канале) со стороны распространяющейся в канале электромагнитной волны действует сила Лоренца. Под действием этой силы электроны меняют свою кинетическую энергию и направление движения. В итоге это приводит к их разгону с последующим соударением о стенки канала.

При ударе электрона о поверхность материала может наблюдаться явление вторичной электронной эмиссии – испускание вторичных электронов с поверхности материала. Количество вторичных электронов зависит от энергии первичного электрона, материала и состояния поверхности на микроуровне.

Вторичные электроны, попав в волноводный канал, точно так же оказываются в зоне распространения электромагнитной волны, и, при совпадении многих факторов (геометрия СВЧ канала, распределение и мощность электромагнитного поля), процесс бомбардировки стенок канала с образованием вторичных электронов начинает лавинообразно нарастать во времени и приводит к возникновению мультипакторного пробоя [1]. В ходе пробоя нарушается нормальное распространение электромагнитной волны по каналу (волна отражается от электронного облака), а

также возможно разрушение поверхности материалов в зоне пробоя с полным выходом из строя всего узла.

Отдельно стоит отметить характерную особенность мультипакторного пробоя – весь процесс происходит в вакууме, где свободному движению электронов в пространстве не препятствуют молекулы газа. При повышении давления газа электроны, разогнанные электромагнитной волной, начинают все чаще соударяться с молекулами газа (выше давление – больше молекул газа на единицу объема) и терять накопленную за время свободного пробега кинетическую энергию [2]. При превышении давления выше определенного порога условия для возникновения мультипакторного пробоя полностью утрачиваются. При этом, возможно появление уже новых видов пробоя, например, коронного разряда при пониженном давлении.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА СВЧ УСТРОЙСТВ НА МУЛЬТИПАКТОРНЫЙ ПРОБОЙ

До появления современных пакетов программ по расчету мультипакторного пробоя пороговая мощность образования мультипактора рассчитывалась приближенными методами. Например, для анализа прямоугольного волновода задача упрощалась: вместо волновода рассматривались две металлические пластины с расстоянием меж-

ду ними, равному размерам волновода, и требовалось найти тот диапазон мощностей электрического поля, в котором электроны при движении от одной пластины до другой разгоняются до энергий, ведущих к образованию вторичных электронов [3, 4].

Естественно, этот подход дает весьма приближенные результаты, которые не учитывают реальную геометрию волноводного канала и распределение волны в нем. В любых структурах, с геометрией более сложной, чем прямоугольный волновод, вполне могут быть такие “узкие места”, в которых условия для возникновения мультипакторного пробоя складываются при значительно меньших мощностях.

В настоящее время разработаны программные пакеты, в которых мультипакторный пробой рассчитывается в реальной геометрии путем анализа движения вторичных электронов. Исходной точкой для анализа является электродинамическая модель с уже полученным распределением электрического и магнитного полей в узлах сетки. Далее, в свободные области пространства модели добавляются тестовые электроны со случайным расположением, и запускается итеративный процесс определения траектории движения электронов под действием поля. При столкновении электрона со стенкой канала по модели вторичной электронной эмиссии Вагхана [5] определяется вероятность возникновения вторичных электронов на основе энергии падения первичного электрона. При следующих итерациях количество электронов в модели будет либо убывать (электроны преимущественно поглощаются на стенках без образования вторичной эмиссии), либо расти (в каком-либо месте возникли условия, при которых соударения электронов в большинстве случаев приводят к образованию вторичных электронов).

До недавнего времени основным (и практически единственным) пакетом для мультипакторного анализа был Spark3D (входит в CST Studio) [6–10]. Пакет используется европейским космическим агентством, так же есть публикации, в которых теоретический расчет сравнивается с экспериментальными данными по мультипакторному пробоя, демонстрируя хорошее согласование расчета с практикой. При этом, к сожалению, пакет имеет недостаток – в нем нельзя учесть диэлектрики, расположенные внутри канала. Так как исходными данными для пакета является распределение поля, а поле в электродинамическом анализе рассчитывается и внутри диэлектриков тоже, у пакета нет способа отличить какая точка пространства – это вакуум, а какая находится внутри диэлектрика, т. к. отсутствует информация об их границах. Мультипактор в диэлектриках имеет особенность в том, что поверхность диэлектрика приобретает электрический заряд при

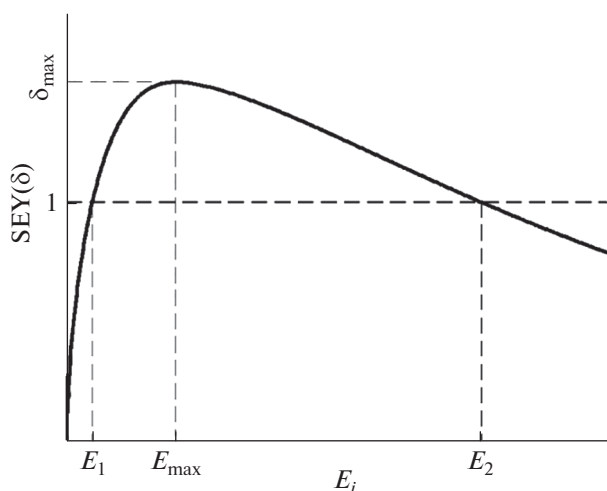


Рис. 1. Зависимость выхода вторичных электронов δ от воздействия энергии E_i .

высвобождению электронов, создавая поле постоянного тока, которое притягивает электроны обратно к поверхности эмиссии [11–13]. В случае, когда высокочастотное поле параллельно поверхности, например, в диэлектрических окнах, оно ускоряет электроны, параллельные поверхности, в то время как поле постоянного тока притягивает к ней электроны. В результате этого электроны воздействуют на поверхность с высокой скоростью и большим углом падения, освобождая тем самым дополнительные электроны под действием вторичной эмиссии и создавая одноповерхностный пробой.

С недавнего времени у Spark3D появилась альтернатива, в Ansys HFSS был добавлен аналогичный модуль по расчету мультипактора. Так как модуль довольно новый, на данный момент данные по точности его расчета представлены не полностью. Так же расчеты требуют больших ресурсов и выполняются дольше по сравнению со Spark3D. Но, сейчас в HFSS доступен учет диэлектриков при моделировании, причем не просто их наличие, а также заявлено, что берется в расчет накопление поверхностного заряда на их поверхности.

В итоге, основные моменты, которые влияют на расчет мультипакторного пробоя следующие. Первое – это данные по вторичной эмиссии материалов. Как уже было сказано, в программных пакетах в качестве модели вторичной эмиссии используется модель Вагхана [5]. В этой модели для каждого материала требуется задать кривую зависимости количества вторичных электронов от энергии падения первичного электрона. Кривая задается несколькими числами (рис. 1):

– E_1, E_2 – диапазон энергий, в пределах которого количество вторичных электронов больше 1;

Таблица 1. Параметры вторичной электронной эмиссии для золота из различных источников

Параметр	Источник						
	[20]	[21]	[22]	[18]	Spark3D	[20]	[23]
δ_{max}	1.67	1.39	1.81	1.79	2	1.94	1.92
E_1	180	186	170	150	30	150	100
E_2	2000	3190	1500	4000	2000	2000	2400
E_{max}	900	800	700	1000	165	900	500

– E_{max} – энергия, при которой наблюдается максимальное количество вторичных электронов (равное δ_{max}).

И если данные по таким популярным материалам как медь, золото и алюминий представлены в относительно большом количестве, то данные по диэлектрикам и керамике в гораздо меньшем.

Вторая проблема является продолжением первой. Вторичная эмиссия материалов сильно зависит от состояния поверхности. Чистота обработки, степень шероховатости, наличие оксидных пленок – все это может существенно сказаться на параметрах кривой вторичной эмиссии. Это хорошо видно по представленным в статьях экспериментальным данным, где вид кривой может отличаться от статьи к статье, и даже в пределах одной работы в зависимости от конкретного образца [2, 14–17]. Сами методики определения вторичной эмиссии материалов отличаются, как и применяемые экспериментальные установки. Это также вносит большой разброс в полученные значения. В табл. 1 представлены параметры вторичной электронной эмиссии для золота.

Соответственно, так как нет данных по точному химическому составу и состоянию поверхности у реальных материалов, применяемых в коаксиальных переключателях, то возникает вопрос какие данные закладывать в модель. Наиболее ра-

зумный выход из этой ситуации – использование типовых наихудших значений, но нужно понимать в таком случае мы потенциально можем получить модель, лишь приблизительно отражающую анализируемое СВЧ устройство. Экспериментальные измерения показывают, что загрязняющие вещества, такие как отпечатки пальцев, пыль, адгезивы и смазки, снижают пороговое значение для воздействия мультипактора в среднем примерно на 3 дБ. По этим всем причинам спецификация ESA для мультипактора [18] рекомендуют устройствам работать как минимум на 6 дБ ниже испытанных в лаборатории.

Третья специфическая проблема – это учет наложенных внешних полей. Любое внешнее поле, будь то электрическое или магнитное, изменяет характер движения электронов, что может ухудшить либо наоборот улучшить условия, ведущие к возникновению мультипакторного пробоя [19].

АНАЛИЗ КОАКСИАЛЬНОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА МУЛЬТИПАКТОРНЫЙ ПРОБОЙ

На первом этапе моделирования коаксиальных переключателей была поставлена задача получения электрических характеристик в соответствии с ТЗ. В качестве переключающего элемента, показанного на рис. 2а, используется коаксиальная линия с прямоугольным сечением внешнего экрана и внутреннего проводника с волновым сопротивлением 50 Ом (Rectax).

В среде Ansys HFSS полученная геометрия коаксиального переключателя SPDT типа имела следующие электрические параметры в частотном диапазоне 1–1.7 ГГц: КСВн не более 1.05; вносимые потери не более 0.1 дБ; изоляция между каналами не менее 70 дБ. Далее было проведено моделирование мультипакторного пробоя. К сожалению, полученная модель с покрытием из золота показала не работоспособность на высоких

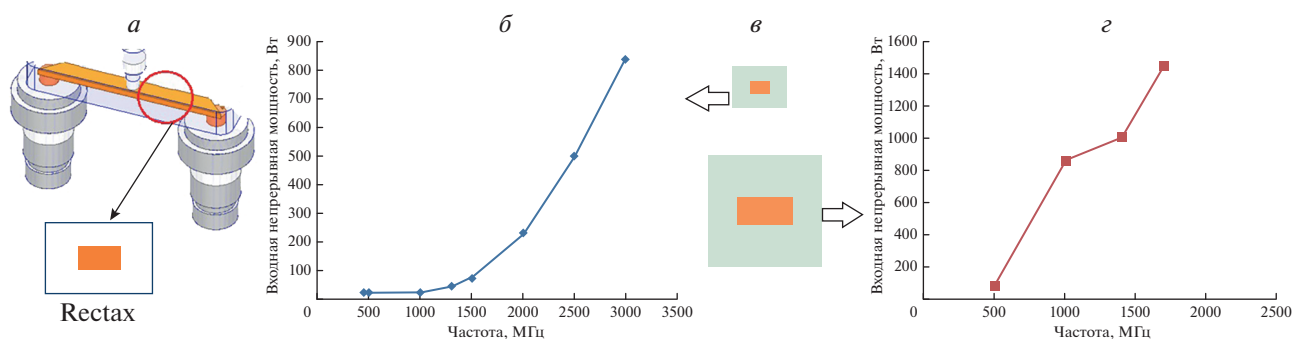


Рис. 2. Коаксиальный канал между входом и выходом коаксиального переключателя (а); частотная зависимость возникновения мультипактора у первой (начальной) модели переключателя (б); относительные размеры коаксиального канала у первой и второй модели коаксиального переключателя (в); частотная зависимость возникновения мультипакторного разряда у второй модели переключателя (г).

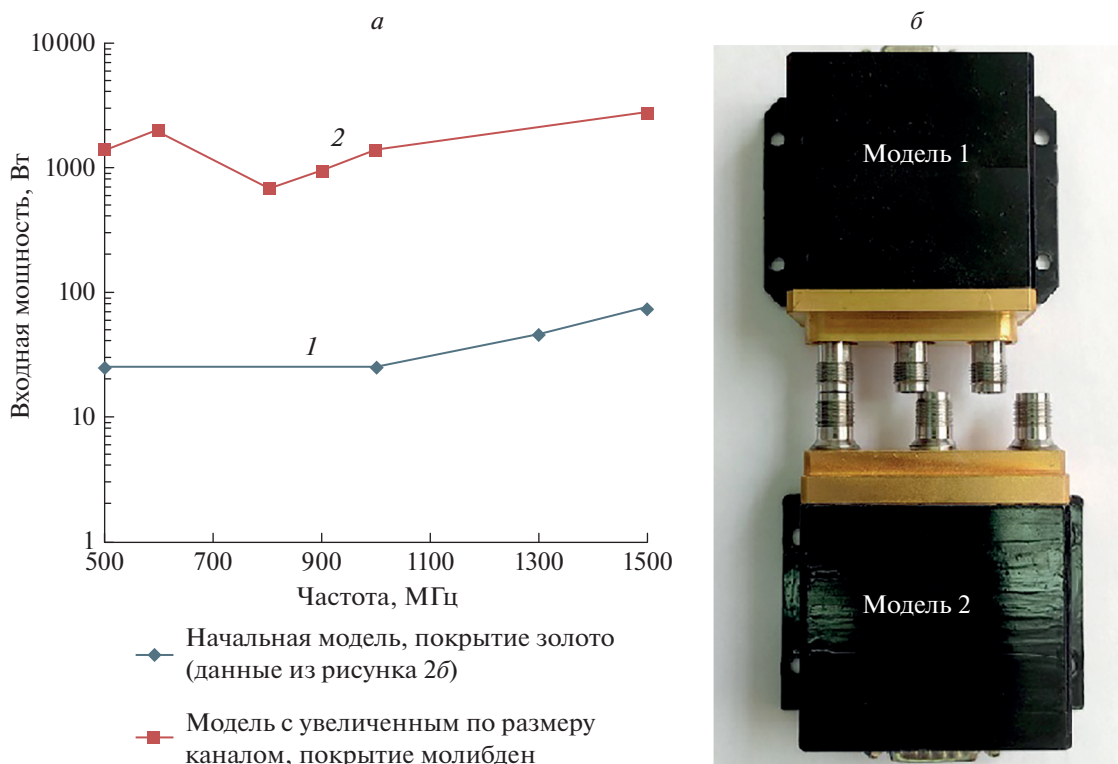


Рис. 3. Сравнение частотных зависимостей возникновения мультипакторного разряда в начальной модели и в модели с увеличенным размером коаксиального канала с молибденовым покрытием (а); изготовленные СВЧ-переключатели (б).

уровнях мощности в условиях вакуума. Зависимость возникновения мультипакторного пробоя от частоты для этой модели представлена на рис. 2б.

Снижение мультипакторного пробоя преимущественно осуществляется двумя путями. Первый — выход из зоны мультипакторного пробоя, который определяется произведением частоты на расстояние между ближайшими поверхностями ($f \times d$, ГГц · мм) [24]. Поэтому была произведена оптимизация канала переключателя с целью его увеличения при сохранении высоких требований к электрическим параметрам. Зависимость входной мощности, при которой возникает мультипакторный пробой, от частоты представлена на рис. 2г. Также для сравнения представлены размеры коаксиальной линии (Rectax) внутри переключателя первой и второй моделей (с сопротивлением 50 Ом в обоих случаях). Относительные размеры представлены на рис. 2в.

Зарубежные аналоги такого типа переключателя стабильно работают на уровнях 200–250 Вт [25]. Учитывая требуемый теоретический запас в 6 дБ, необходимо получить уровень возникновения мультипакторного разряда около 1000 Вт расчетной мощности. Для этого было принято решение попробовать нанести покрытие внутри коаксиального канала материалом с низким ко-

эффициентом вторичной эмиссии (SEY). Свойства SEY для каждого материала различны. Поэтому, чтобы уменьшить SEY, можно покрыть поверхность материалом с известным более низким коэффициентом вторичной эмиссии, таким как Ti, TiN, Mo и др. Учитывая технические возможности и опыт предприятия АО “НПП Алмаз”, в качестве дополнительного покрытия был выбран материал молибден. Анализ показал, что достаточно нанести слой толщиной 0.3 мкм, для получения требуемой SEY поверхности. Причем на данных частотах скин-слой СВЧ волны будет около 4 мкм. Поэтому ухудшение электрических характеристик из-за низкой электропроводности молибдена будет несущественно. Зависимость мощности возникновения мультипакторного пробоя от частоты для модели с молибденовым покрытием увеличенного канала коаксиального переключателя приведена на рис. 3а. Полученные расчетные значения показали значительный запас по входной мощности.

Итоговая конструкция для проверки электрических параметров и максимальной входной мощности была изготовлена на АО “НПП “Алмаз” [26]. Экспериментально измеренные электрические параметры полностью удовлетворили ТЗ [27]: в диапазоне 1–1.7 ГГц КСВн менее 1.15; вносимые потери, не более 0.15 дБ; изоляция

между каналами не менее 70 дБ. Подтвержденная мощность работы переключателя в вакууме составила 400 Вт непрерывной мощности длительного воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования причин возникновения мультипакторного пробоя в коаксиальных и волноводных СВЧ трактах большой мощности. Поэтапно введенные решения в виде увеличения размеров коаксиального канала и использование металла с низким коэффициентом вторичной эмиссии позволили на порядок увеличить входную мощность в условиях вакуума. Эффективность программного комплекса для численного моделирования возникновения мультипакторного пробоя оказалась на высоком уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vaughan J.R.M.* // IEEE Trans. Electron Devices. 1988. V. 35. No. 7. P. 1172.
2. *Anza Hormigo S.* Multipactor in multicarrier systems theory and prediction. PhD dissertation: Universitat Politècnica de València, 2014. 248 p.
3. *Hatch A.J., Williams H.B.* // Phys. Rev. 1958. V. 112. No. 3. P. 681.
4. *Chojnacki E.* // Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams. 2000. V. 3. No. 3. Art. No. 032001.
5. *Vaughan J.R.M.* // IEEE Trans. Electron Devices. 1989. V. 36. No. 9. P. 1963.
6. *Sugai T., Shaw Z., Dickens J., Neuber A.* // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. No. 11. Art. No. 112108.
7. *Vague J., Melgarejo J.C., Guglielmi M. et al.* // IEEE Trans. Microwave. Theory Tech. 2018. V. 66. No. 8. P. 3644.
8. *Martin-Iglesias P., Teberio F., Laso M.A.G.* // Proc. 2018 IEEE MTT-S Int. Conf. NEMO. (Reykjavic, 2018). P. 1.
9. *Vague J., Melgarejo J.C., Boria V.E et al.* // IEEE Trans. Microwave. Theory Tech. 2019. V. 67. No. 6. P. 2151.
10. *Langellotti S.V., Jordan N.M., Lau Y.Y., Gilgenbach R.M.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. V. 48. No. 6. P. 1942.
11. *Torregrosa G., Coves A., San Blas A.A. et al.* // Proc. MULCOPIM 2005 (Noordwijk, 2005).
12. *Torregrosa G., Coves A., Vicente C.P. et al.* // IEEE Electron Device Lett. 2006. V. 27. No. 7. P. 619.
13. *Kishek R.A., Lau Y.Y., Ang L.K. et al.* // Phys. Plasmas. 1998. V. 5. No. 5. P. 2120.
14. *Balcon N., Payan D., Belhaj M. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 40. No. 2. P. 282.
15. *Nistor V., González L.A., Aguilera L. et al.* // Appl. Surf. Sci. 2014. V. 315. P. 445.
16. *Bojko I., Hilleret N., Scheuerlein C.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 2000. V. 18. No. 3. P. 972.
17. *Aguilera L., Montero I., Dávila M.E. et al.* // J. Phys. D. 2013. V. 46. No. 16. Art. No. 165104.
18. Space engineering: multipacting design and test. V. ECSS-20-01A Rev. 1. ESA Publication Division, 2013.
19. *Valfells A., Ang L.K., Lau Y.Y., Gilgenbach R.M.* // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. No. 2. P. 750.
20. *Azzolini M., Angelucci M., Cimino R. et al.* // J. Phys. Cond. Matter. 2018. V. 31. No. 5. Art. No. 055901.
21. *Бронштейн И.М., Фрайман Б.С.* Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 407 с.
22. *Insepev Z., Ivanov V., Jokela S.J. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2011. V. 639. No. 1. P. 155.
23. *Walker C.G.H., El-Gomati M.M., Assa'd A.M.D., Zadražil M.* // Scanning. 2008. V. 30. No. 5. P. 365.
24. *Geissler K.H., Wolk D.* // Proc. IEEE 25th European Microw. Conf. V. 1. (Bologna, 1995). P. 194.
25. <https://www.radiall.com/products/space-qualified-components/space-coaxial-switches/high-power-spdt.html>.
26. *Кузюткин С.И., Дмитричкова Н.В., Колесников Д.С. и др.* Коаксиальный СВЧ-переключатель, выдерживающий высокий уровень мощности. Пат. РФ № 210089, кл. H01P 1/10. 2022.
27. <https://almaz-rpe.ru/products/svch-pereklyuchateli/i15-t>.

Numerical investigation of multipactor discharge in coaxial switches

A. A. Dovgan^a, I. Sh. Bahteev^b, S. Yu. Molchanov^b*, S. I. Kuzyutkin^a

^a Stock Company "Research-and-Production Enterprise "Almaz", Saratov, 410033 Russia

^b Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

*e-mail: canishe@yandex.ru

Findings in the research on conditions for occurrence of a multipactor discharge in coaxial switches have been presented. A model of a powerful coaxial microwave SPDT switch operating in the frequency range below 1.7 GHz has been obtained. Calculated values of the electrical parameters have been given and the possibility of manufacturing a coaxial switch for spacecraft with an operating power margin has been shown. The manufactured prototype of the microwave switch can withstand at least 400 W of RF power at a frequency of 1 GHz, which has been confirmed by the experiment.