

Наблюдение СВЧ излучения, генерируемого электронами одностороннего мультипакторного разряда

© Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, В.Е. Нечаев, А.С. Шевченко

ilyakov@appl.sci-nnov.ru

Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН, 603950, ГСП-120, ул. Ульянова, 46

Мультипакторный разряд, возникающий в мощной вакуумной СВЧ аппаратуре, способен, как нелинейное явление, генерировать гармоники излучения в пассивных волноводных системах. В статье приводятся результаты измерения спектра излучения разряда в скрещенных сверхвысокочастотном электрическом и статическом магнитном полях, который может развиваться в мощных СВЧ приборах с магнитным сопровождением электронного пучка.

Observation of microwave radiation generated by the electrons of one-sided multipactor discharge. E.V. Ilyakov, I.S. Kulagin, V.E. Nechaev, A.S. Shevchenko. *Multipactor discharge, when arising in powerful vacuum microwave equipment, as a nonlinear phenomenon, can generate radiation harmonics at passive waveguide systems. The report presents the measurement results of radiation spectrum of the discharge in crossed RF electric and static magnetic fields. This type of discharge can arise in powerful microwave devices with magnetic guiding of an electron beam.*

1. Введение

В мощных СВЧ приборах, в которых для формирования и транспортировки интенсивных электронных потоков используется внешнее магнитостатическое поле, могут создаваться условия для развития одностороннего мультипакторного разряда в скрещенных сверхвысокочастотном электрическом и статическом магнитном полях [1]. Например, при работе гиротрона на второй циклотронной гармонике условие циклотронного резонанса совпадает с резонансным условием развития основной моды мультипакторного разряда на поверхности резонатора (в скрещенных радиальном СВЧ электрическом и продольном магнитном полях), а именно – $\omega \approx 2 \cdot \omega_H$, где ω – частота СВЧ колебаний, ω_H – циклотронная частота [2]. В этом случае при определенной структуре рабочей волны и величине электрического поля на стенке резонатора возможно развитие разряда.

В отличие от двухстороннего разряда такой разряд практически не зависит от расположения других поверхностей, поэтому не носит локального характера и может охватить значительную часть поверхности прибора. В теоретических [1, 3] и недавних экспериментальных исследованиях [4] было показано, что в 3-см диапазоне длин волн разряд такого типа развивается за 10-15 нс. За это время ток разряда достигает насыщения, а концентрация электронов в облаке разряда становится близкой к критической для данной частоты излучения. При этом максимальная удельная поглощённая разрядом мощность (в конечном итоге рассеиваемая в стенке волновода)

в условиях эксперимента составляла более 4 кВт/см² и была ограничена мощностью входного СВЧ источника, а соответствующая плотность тока насыщенного разряда достигала 10 А/см². При транспортировке еще бóльших мощностей, как показывают оценки, уровень поглощаемой разрядом мощности может достигать до десятков и даже сотен киловатт на квадратный сантиметр [1, 3].

В результате такой разряд может нарушать работу мощных вакуумных СВЧ приборов за счет поглощения большой доли мощности выходного излучения, инициирования СВЧ пробоев, связанных как с локальным перегревом поверхности, так и с десорбцией остаточного газа при бомбардировке стенок прибора электронами разряда с последующей ионизацией [1, 3]. Также высокая концентрация электронов разряда может вносить дополнительную реактивную составляющую в свойства прибора и приводить к изменению расчетных параметров взаимодействия, в частности, к падению КПД [5]. Кроме того мультипактор - нелинейное резонансное явление и токи разряда могут возбуждать в приборе излучение на гармониках (это явление наблюдалось в двустороннем мультипакторе [6]). К настоящему времени данные о влиянии мультипактора в скрещенных полях на спектральный состав излучения приборов по нашим сведениям отсутствуют. В то же время большой разрыв в скоростях сгустков электронов разряда при бомбардировке (прилете) поверхности и вылета с нее предполагает появление гармонических составляющих (гармоник) в выходном излучении см. рис. 1. В докладе приводятся результаты оценок и измерений спектрального состава излучения при возникновении мультипактора в скрещенных полях в прямоугольном волноводе 3-см диапазона длин волн.

2. Оценочные расчеты

Нелинейные колебания насыщенного сгустка электронов перпендикулярно поверхности создают ток $j_x(t)$, возбуждающий волны поля $E, H \propto j_x$, спектральный состав которых определяется скоростью электронов, $v_x(t)$.

Уравнение движения и его решение в разумных идеализациях выглядит следующим образом [3]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_H^2 x = \frac{eE}{m} \sin(\omega t) \quad \Rightarrow \quad \ddot{x} + \Omega^2 x = \frac{eE}{m\omega^2} \sin(T); \quad \Omega = \frac{\omega_H}{\omega}$$

$$x = \frac{eE}{m\omega^2(1-\Omega^2)} \left(\cos T_0 \frac{\sin \Omega(T-T_0)}{\Omega} + \sin T_0 \cos \Omega(T-T_0) - \sin T \right)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{eE}{m\omega(1-\Omega^2)} (\cos T_0 \cos \Omega(T-T_0) - \Omega \sin T_0 \sin \Omega(T-T_0) - \cos T)$$

Здесь $T = \omega t$ - фаза.

Ограничимся рассмотрением варианта резонансного разряда в основной зоне, где он наиболее интенсивен [3]. Резонанс реализуется вблизи $\Omega = 0,5$. Для самой устойчивой начальной фазы $T_0 = 0$:

$$x(T) = \frac{\sin \Omega T}{\Omega} - \sin T; \quad v(T) = \cos \Omega T - \cos T$$

Скорость движения является суперпозицией собственного и вынужденного колебания, на старте они гасят друг друга, а при ударе – наоборот. При $T = 2\pi$ скорость $v(T)$ имеет разрыв, что приводит к медленному спаду членов разложения $v(T)$ в ряд Фурье по мере роста номера гармоники. На рис. 1 приведены расчетные графики ко-

ординаты перемещения электронов разряда перпендикулярно поверхности и соответствующая скорость от момента вылета с поверхности и до прилета.

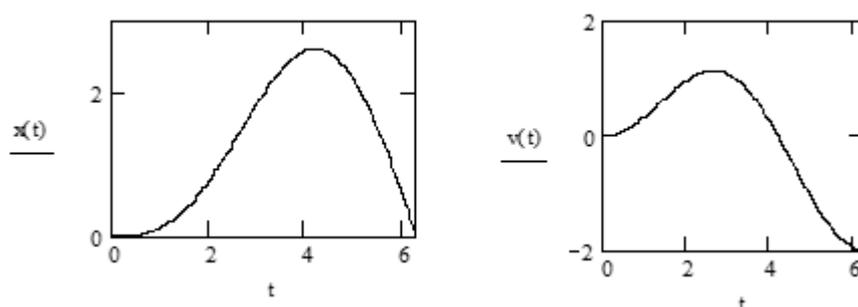


Рис. 1. Расчетные зависимости координаты перемещения электронов разряда перпендикулярно поверхности и соответствующая скорость от момента вылета с поверхности и до прилета.

3. Схема эксперимента и условия его проведения

Эксперименты по исследованию спектрального состава излучения мультипакторного разряда проводились на том же стенде, что и в предыдущем исследовании [4], в котором был зарегистрирован разряд на основной моде и измерены его основные характеристики. Схема эксперимента приведена на рис. 2. Излучение от магнетрона мощностью до 200 кВт с частотой излучения 9.1 ГГц, подавалось в СВЧ тракт прямоугольного волновода стандартного сечения $23 \times 5 \text{ мм}^2$ со свернутым в незамкнутое кольцо рабочим участком. Разряд возникал в кольцевой части волновода, находящегося в зоне перпендикулярного к плоскости кольца однородного магнитного поля, создаваемого импульсным соленоидом. В этих условиях электроны разряда дрейфовали поперек силовых линий магнитного поля и могли совершать большое число последовательных циклов соударения с поверхностью, двигаясь по достаточно протяженным (примерно 24 см) в азимутальном направлении широким стенкам волновода, что обеспечивало размножение электронов и достижение режима насыщения разряда. При этом кривизна цилиндрической поверхности (радиус 40-45 мм) практически не должна была влиять на движение электронов ввиду малости масштаба траекторий – не более 0.5 мм для основной моды разряда. В узких стенках подводящих прямоугольных волноводах были сделаны отверстия, не искажавшие транспортировку волны и обеспечивавшие откачку вакуумного объема волноводного тракта.

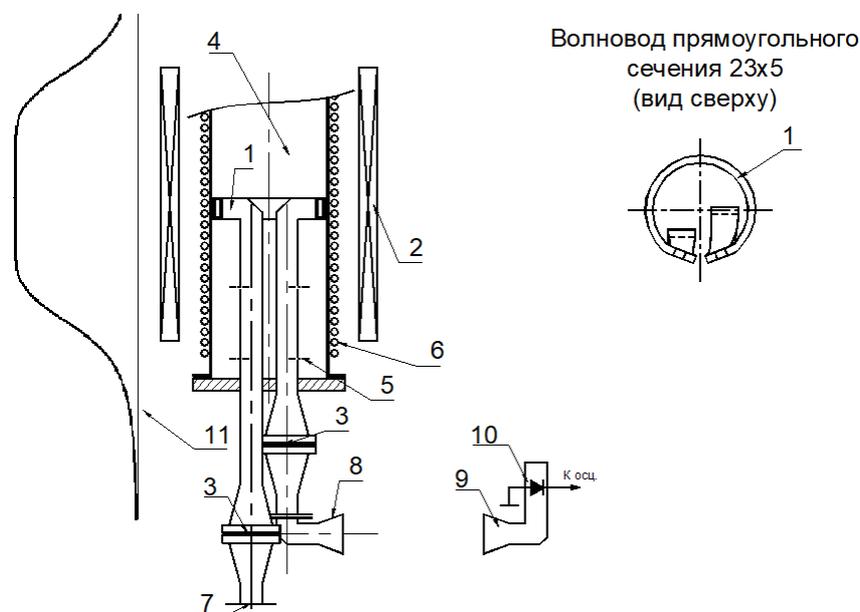


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – свернутый в кольцо волновод; 2 – импульсный соленоид; 3 – СВЧ окно; 4 – вакуумная камера; 5 – отверстия для откачки волновода; 6 – нагреватель; 7 – фланец входного волновода; 8 – выходной рупор; 9 – приемный рупор; 10 – детектор; 11 – распределение магнитного поля

Разрядная поверхность волновода представляла собой сплав Л96, из которого делают стандартные волноводные трубы с внутренним сечением $23 \times 5 \text{ мм}^2$. Магнетрон с помощью циркулятора был защищен от отраженной волны в случае возникновения пробоев в испытуемом волноводном тракте. Мощность магнетрона регулировалась напряжением источника питания. В качестве измерителя мощности служил импульсный твердотельный калориметр [7]. Для контроля падающей, отраженной и прошедшей через волновод волн в тракте прямоугольного сечения были установлены направленные волноводные ответвители. Для регистрации огибающих использовались детекторы с выходным сигналом, пропорциональным мощности СВЧ импульса. Излучение, прошедшее через испытуемый волновод, с помощью плавного рупора излучалось в безэховую камеру. Его часть попадала в приемный рупор прямоугольного волновода, расположенный вблизи оси излучающего рупора (см. рис. 2). В предположении, что разрядный ток будет, в основном, возбуждать в волноводе волны гармоник основной моды, можно было ожидать, что примерно в том же соотношении по интенсивности, излучение гармоник будет и в приемном волноводе. Для анализа спектра излучения использовались запердельные волноводы и гетеродинный метод.

Эксперимент проводился в режиме однократных импульсов при нагревании стенок вакуумной камеры и волнопроводов с целью удаления адсорбированных молекул с их поверхностей; с помощью специального нагревателя температура волновода или резонатора могла быть доведена до 400°C ; вакуум 5×10^{-7} мм рт. ст. создавался с помощью криосорбционного насоса. Известно, что при изучении процессов, связанных с вторичной эмиссией, решающими условиями достоверности получаемых данных являются чистота исследуемой поверхности и степень вакуума. Один из способов получения чистой поверхности, заключается в том, что исследуемый материал прокаливается при высокой температуре в вакууме. При этом с его

поверхности (и также, частично, из приповерхностного объема) удаляются молекулы загрязняющих веществ [8], что предотвращает трансформацию вакуумного разряда в СВЧ пробой [9]. Важно, что коэффициент вторичной эмиссии чистых металлов совсем или почти совсем не зависит от температуры [10], поэтому исследования целесообразно проводить непосредственно на нагретом материале, очищенном от загрязнений.

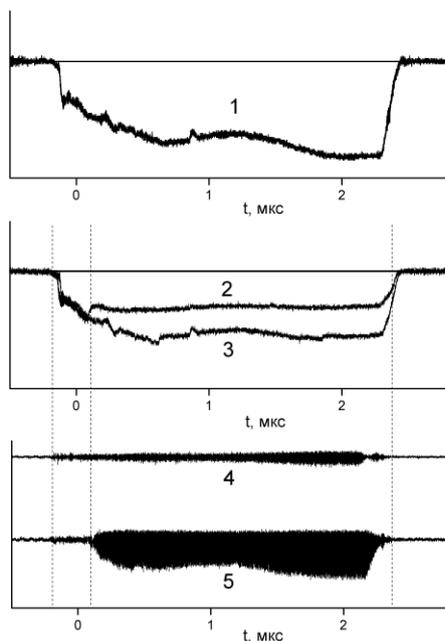


Рис. 3. Осциллограммы сигналов: огибающих входного (1) и выходного СВЧ излучения при нулевом (3) и резонансном (2) магнитном поле; на промежуточной частоте при нулевом (4) и резонансном (5) магнитном поле на частоте второй гармоники 18,2 ГГц.

4. Экспериментальные исследования

Исследования проводились при входной мощности излучения в волноводный тракт около 100 кВт, значительная часть которой (около половины) поглощалась и рассеивалась в стенках волновода электронами первой моды разряда (см. рис. 3). На начальном этапе для оперативной проверки наличия излучения на высоких гармониках использовались запердельные волноводы со следующими критическими частотами: 13,15; 20,0; 25,0 и 30,0 ГГц. Измерения с помощью волновода с критической частотой 13,15 ГГц показали, что небольшая часть сигнала проходит даже в отсутствие разряда, при выключенном магнитном поле (см. рис. 3). Оказалось, что это связано с наличием второй гармоники в излучении самого магнетрона. Отметим, что уровень всех сигналов, прошедших через запердельные волноводы, был более чем на шесть порядков слабее по сравнению с сигналом магнетрона. В то же время в момент появления разряда уровень прошедшего через запердельный волновод сигнала многократно увеличивался (см. рис. 3). Измерения со следующими двумя запердельными волноводами (20 и 25 ГГц) показали, что сигнал продолжает проходить, хотя и с меньшей амплитудой. На выходе волновода с критической частотой 30,0 ГГц сигнал зарегистрировать не удалось, что возможно было связано с ограниченной чувствительностью системы регистрации.

Для уточнения характерных частот спектр излучения измерялся с использованием гетеродинного метода. При этом анализировалось излучение, прошедшее через волновод с критической частотой 13,15 ГГц, чтобы устранить мощное излучение магнетрона. Было установлено, что в спектре прошедшего излучения присутствуют пики на частотах 14,1; 18,2 и 27,4 ГГц, из которых два последние можно интерпретировать как вторую и третью гармоники частоты СВЧ излучения. Более высоких гармоник зарегистрировать не удалось. Точность измерения частоты составляла $\pm 0,5\%$.

Пик на частоте 14.1 ГГц (наименее интенсивный из всех), как следует из эксперимента, также связан с разрядом. Его наличие (на частоте, приблизительно равной 1,5 от частоты магнетрона) можно объяснить тем, что зависимость $\nu(t)$, о разложении которой в ряд Фурье говорилось выше, выражает суперпозицию собственного (циклотронное вращение с частотой $\omega_H = \omega/2$) и вынужденного (под действием СВЧ поля с частотой ω) колебания электрона. По-видимому, этот пик отмечает комбинационную частоту этих двух колебаний.

Таким образом, исследования показали, что мультипактор в скрещенных полях способен возбуждать излучение на гармониках в широком диапазоне частот, и по характеру спектра излучения, в принципе, можно судить о наличии данного типа разряда в приборе и в случае необходимости предпринимать меры для его подавления.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-02-00890.

Работа также поддержана в рамках выполнения государственного задания ИПФ РАН на проведение научных исследований по теме №0035-2014-0012 и Программы фундаментальных исследований президиума РАН «Мощные ультракороткие электромагнитные импульсы, а также их взаимодействие с объектами и средами».

Литература

1. Александров А.Ф., Бляхман Л.Г., Галузо С.Ю., Нечаев В.Е. // Релятивистская высокочастотная электроника: Горький, ИПФ АН СССР, 1983. Вып.3. С.219-240.
2. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т.61, № 1. С.44-53.
3. Бляхман Л.Г., Горшкова М.А., Нечаев В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т.43, №11. С.1004-1015.
4. Иляков Е.В., Кулагин И.С., Нечаев В.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т.52, № 12. С.979-986.
5. Вихарев А.А., Иляков Е.В., Кузиков С.В., Кулагин И.С. // Изв. вузов. Радиофизика, 2011, т.54, №12, с.908-916.
6. Jimenez M., Gimeno B., Miquel-Espanya C. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 43 (2010) 395501 (7pp).
7. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Ковнеристый Ю.К. и др. // ПТЭ, 1992. №2. С.153.
8. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. М.: изд. «Наука», 1969. – 408 с.
9. Pyakov E.V., Korablyov G.S., Kulagin I.S., Zaitsev N.I. // IEEE Trans. on Plasma Science. 1998. V.26, No.3. P.332.

10. Брюнинг Г. Физика и применение вторичной электронной эмиссии. М.: Сов. Радио. 1958. 192 с.