

Наблюдение СВЧ излучения, генерируемого электронами одностороннего мультипакторного разряда

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

*Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН, 603950, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
E-mail: ilyakov@appl.sci-nnov.ru*

Мультипакторный разряд, возникающий в мощной вакуумной СВЧ аппаратуре, способен как нелинейное явление генерировать гармоники излучения в пассивных волноводных системах. В докладе 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. Multi-pactor 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 больших 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 исходном 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 координаты перемещения электронов разряда перпендикулярно поверхности и соответствующая скорость от момента вылета с поверхности и до прилета.

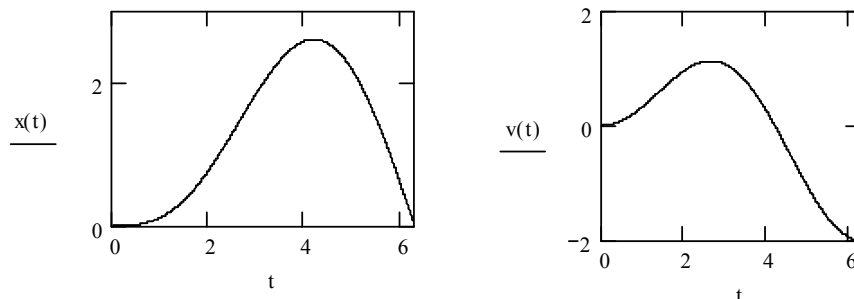


Рис. 1. Расчетные зависимости координаты перемещения электронов разряда перпендикулярно поверхности и соответствующая скорость от момента вылета с поверхности и до прилета.

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 23×5 мм² 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.

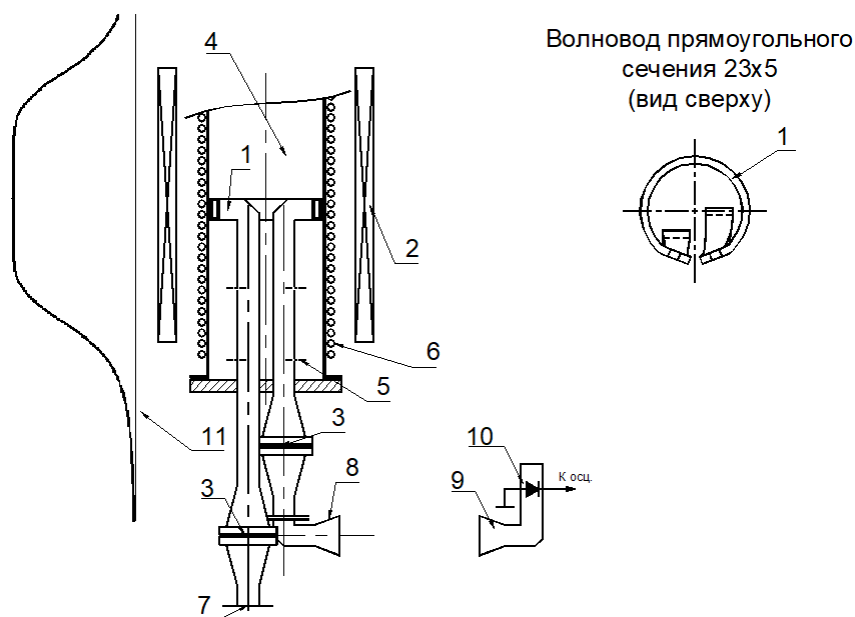


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – свернутый в кольцо волновод; 2 – импульсный соленоид; 3 – СВЧ окно; 4 – вакуумная камера; 5 – отверстия для откачки волновода; 6 – нагреватель; 7 – фланец входного волновода; 8 – выходной рупор; 9 – приемный рупор; 10 – детектор; 11 – распределение магнитного поля.

Разрядная поверхность волновода представляла собой сплав Л96, из которого делают стандартные волноводные трубы с внутренним сечением 23×5 мм². Магнетрон с помощью циркулятора был защищен от отражённой 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, отражённой 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, часть которого

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 запредельные волноводы и гетеродинный метод.

Эксперимент проводился при нагревании стенок вакуумной камеры и волноводов 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 и таким образом с его поверхности (и также, частично, из приповерхностного объема) удаляются молекулы загрязняющих веществ [8]. В то же время коэффициент вторичной эмиссии чистых металлов совсем или почти совсем не зависит от температуры [9]. Кроме того, устранение адсорбированных молекул с поверхности волновода предотвращает трансформацию вакуумного разряда в СВЧ пробой [10].

Исследование проводилось в режиме однократных импульсов.

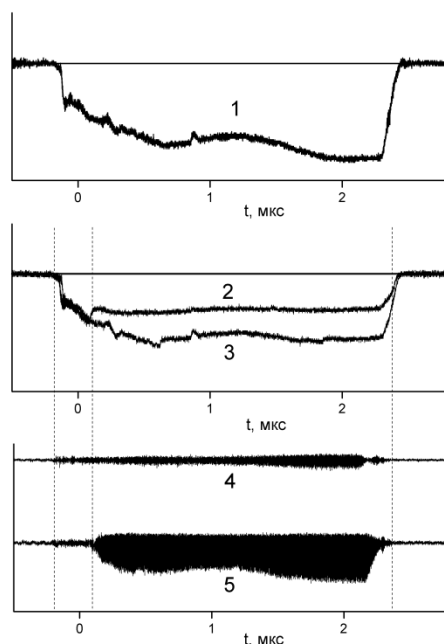


Рис. 3. Осциллограммы сигналов: огибающих входного (1) и выходного СВЧ излучения при нулевом (3) и резонансном (2) магнитном поле; на промежуточной частоте при нулевом (4) и резонансном (5) магнитном поле на частоте четвертой гармоники 18,2 ГГц.

4. Экспериментальные исследования

Исследования проводились при входной мощности излучения в волноводный тракт около 100 кВт значительная часть (около половины), которой 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 запредельные волноводы со следующими критическими частотами: 13,15; 20,0; 25,0 и 30,0 ГГц. Отметим, что сам испытуемый волновод является запредельным для излучения на гармонике циклотронной частоты (4,6 ГГц) и, о ее присутствии можно будет судить только по появлению кратных более высоких частот в излучении. Измерения с помощью волновода с критической

частотой 13,15 ГГц показали, что небольшое прохождение сигнала происходит и в отсутствие разряда (выключено магнитное поле) (см. рис. 3). Как выяснилось позже, это связано с наличием второй гармоники в излучении самого магнетрона. Отметим, что уровень данного сигнала и остальных сигналов, прошедших через запердельные волноводы, был более чем на шесть порядков слабее по сравнению с сигналом магнетрона на основной частоте без запердельного волновода. В тоже время в момент появления разряда уровень прошедшего через запердельный волновод сигнала многократно увеличивался см. рис. 3. Измерения с последующими двумя запердельными волноводами показали, что сигнал продолжает проходить, хотя и уменьшаясь по амплитуде. С волноводом с критической частотой 30,0 ГГц сигнал зарегистрировать не удалось, что возможно было связано с ограниченной чувствительностью детектора и системы регистрации.

На следующем этапе для получения более точной информации спектр излучения измерялся с использованием гетеродинного метода. Для ослабления влияния на измерения мощного излучения на основной гармонике анализировалось излучение, прошедшее через волновод с критической частотой 13,15 ГГц. Было установлено, что в спектре прошедшего излучения присутствуют гармоники на частотах: 14,1 ГГц (третья гармоника); 18,2 ГГц (четвертая); 27,55 ГГц (шестая). Более высоких гармоник зарегистрировать не удалось.

Отметим, что регистрация третьей гармоники является показателем возбуждения гармоники на половинной частоте излучения магнетрона (определяется циклотронной частотой), которая не может распространяться в данном волноводе. В тоже время наличие этой гармоники характеризует механизм разряда.

Также отметим, что не удалось зарегистрировать пятую гармонику, хотя по оценкам ее интенсивность должна быть не ниже шестой гармоники. Возможно, это связано с тем, что разряд развивается на обеих широких стенках волновода, но вылет и прилет сгустков электронов разряда во времени сдвинут на полпериода и, как показывают оценки, это может приводить к взаимной компенсации излучения на нечетных гармониках. В пользу этого говорит и более низкая интенсивность излучения (в два-три раза) на третьей гармонике по отношению к излучению на четвертой и шестой гармониках, хотя по оценкам ее интенсивность должна быть выше.

Таким образом, исследования показали, что мультипактор в скрещенных полях способен возбуждать излучение на гармониках в широком диапазоне частот, в т. ч. и на частотах ниже частоты излучения, включающего разряд (вблизи циклотронной частоты), и тем самым разряд может увеличивать уровень шумов в выходном излучении приборов. 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. Jim'enez 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. Брюнинг Г. Физика и применение вторичной электронной эмиссии. М.: Сов. Радио. 1958. 192 с.
10. Plyakov E.V., Korablyov G.S., Kulagin I.S., Zaitsev N.I. // IEEE Trans. on Plasma Science. 1998. V.26, No.3. P.332.

Формирование и распад вихревой системы в сверхтекучем гелии

В.Б.Ефимов

Черноголовка, Московской обл., Институт физики твердого тела РАН
efimov@issp.ac.ru

Сверхтекучий гелий остается жидким до абсолютного нуля температуры. При этом при понижении температуры количество возбуждений в гелии вымерзает (экспоненциально для ротонов и степенным образом для фононов). Таким образом, гелий является модельной средой, имеющей свойства физического вакуума. В таком физическом вакууме возможно контролируемым образом вводить такие возбуждения, как квантовые вихри, изучать процессы формирования вихревой системы, условия ее существования и характеристики распада.

Formation and decay of vortex system in superfluid helium. V.B. Yefimov. *Superfluid helium remains liquid up to absolute zero temperature. Cooling of helium leads to reduction of the amount of excitation, which freezes exponentially for rotons and in a power-law dependence for phonons. So, liquid helium is a model medium having the properties of physical vacuum. In such physical vacuum it is possible to introduce excitations such as quantum vortices in a controlled manner and to study the process of formation of a vortex system, the conditions of its existence, and the characteristics of decay of a vortex tangle.*

Под вакуумом традиционно понимается пространство свободное от вещества. В технике и прикладной физике под вакуумом понимают среду, состоящую из газа при давлении значительно ниже атмосферного. При этом вакуум характеризуется соотношением между длиной свободного пробега молекул газа λ характерным размером сосуда d . При этом различают низкий вакуум, когда $\lambda \ll d$ и высокий вакуум $\lambda \gg d$. В микропорах высокий вакуум может достигнут при существенно более высокой остаточной концентрации молекул газа.

Важным свойством абсолютного вакуума является отсутствие сопротивления движению тел из-за отсутствия частиц, увеличивающих свой импульс и энергию при взаимодействии. Уменьшение количества частиц газа при высоком вакууме так же уменьшает теплоперенос через среду.

Под физическим вакуумом (вакуумное состояние) в квантовой физике понимают низшее (основное) энергетическое состояние квантованного поля, обладающее нулевым импульсом, моментом импульса и других квантовых чисел. При этом такое состояние не обязательно соответствует пустоте: поле в низшем состоянии может быть, например, полем квазичастиц в твердом теле. В этом смысле сверхтекучий гелий-4 является физическим вакуумом, в котором переход к сверхтекучести связан с образованием конденсата Бозе-Эйнштейна. При этом большое число атомов оказываются в своих минимально возможных