

4. Абубакиров ЭБ., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г и др. // Изв. вузов. «ПНД», 2015. Т.23. №2. С.94-107.
5. Bratman V.L., Botvinik I.E., Grom Yu.D., et al. // Proc. SPIE of 16th Int. Symposium on discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Moscow - St. Petersburg, Russia, 1994, pp. 538-541.
6. «Гиротрон». Сборник научных трудов. Горький: ИПФ АН СССР, 1981.
7. Запевалов В.Е., Малыгин С.А., Цимринг Ш.Е. // Изв. вузов. Радиофизика, 1993. Т.36. №6. С.543-552.
8. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кораблев Г.С. и др. // ПТЭ, 1995, вып.3, с.138-145.
9. Puyakov E.V., Korablyov G.S., Kulagin I.S., Zaitsev N.I. // IEEE Trans. on Plasma Science, 1998, v.26, No.3, p.332-335.
10. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Кулагин И.С. // XV Научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника». Материалы конференции. Октябрь 2008. С.96-99.
11. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Ковнеристый Ю.К. и др. // ПТЭ, 1992. №2. С.153.

Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование второй моды одностороннего мультипакторного разряда

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

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

Выполнены экспериментальное исследование и компьютерное моделирование второй моды мультипактора в прямоугольном волноводе, показавшие близкие результаты. Выявление при моделировании так называемых долгоживущих электронов позволило продвинуться в объяснении некоторых экспериментальных эффектов, как например, слабая зависимость перестройки резонатора от значения коэффициента вторичной эмиссии материала разрядной поверхности или от того, первая или вторая мода разряда перестраивает резонатор.

Experimental study and computer simulation of the second-mode one-sided multi-ductor discharge. E.V. Puyakov, I.S. Kulagin, A.S. Shevchenko. Experimental study and computer simulation of the second mode of multipactor discharge in a rectangular waveguide are performed showing similar results. Detection of the so-called long-lived electrons has makes it easier to explain some experimental effects. For example, it concerns weak dependence of the cavity tuning on the secondary-emission coefficient of discharge surface material.

Введение

Вторично-эмиссионный резонансный разряд (мультипактор) в скрещенных СВЧ электрическом и статическом магнитном полях [1-3] – давно известное явление. Концентрация электронов в насыщенном разряде, как показано в результате теоретических [4] и экспериментальных [5] исследований может достигать значений, близких к критическому для частоты электромагнитного излучения, в котором разряд развивается. Ведутся исследования, направленные на использование этого разряда для изменения резонансной частоты резонатора и управления потоками СВЧ излучения [6]. В ходе этих исследований в цилиндрическом резонаторе впервые была обнаружена вторая мода мультипакторного разряда в скрещенных полях [7].

Можно ожидать, что, как и разряд на первой моде [5], вторая мода разряда создает электронное облако высокой (близкой к критической) концентрации, которое может нарушать работу СВЧ приборов и волноводных трактов. Возникновение второй моды разряда, развивающейся при вдвое меньшем магнитном поле, расширяет (наряду с основной модой)

область влияния мультипакторного разряда в целом, как с точки зрения затравки СВЧ пробоя, так и по использованию разряда, например, для управления параметрами резонатора.

Следует отметить, что, несмотря на определенные экспериментальные усилия, вторая мода разряда в прямоугольном волноводе, в отличие от первой [8], себя до последнего времени не проявляла. В настоящем докладе представлены результаты исследования, направленного на объяснение этого отличия. Также, с помощью компьютерного моделирования обоснована возможность появления в разряде так называемых «долгоживущих» электронов, повышающих равновесную концентрацию электронного облака, и на этой основе объяснены некоторые явления, наблюдавшиеся ранее.

1. Компьютерное моделирование

Как показывают теоретические исследования [4] с ростом номера зоны разряда (номера моды) разрядные токи быстро убывают, и, соответственно, падает роль разрядов с большими пролетными временами. У второй моды разряда величина заряда сгустков по оценкам будет примерно в пять раз меньше, чем у первой моды [4]. Учитывая результаты эксперимента по исследованию мультипактора в прямоугольном волноводе, в котором разряд на основной моде поглощал до половины от подводимой к волноводу мощности [9], можно, в принципе, ожидать заметное поглощение и на второй моде. При этом необходимо учитывать, что зона существования (по магнитному полю) этой моды разряда примерно в четыре раза уже, чем у основной моды. Для получения дополнительных сведений о разряде было проведено компьютерное моделирование.

Компьютерное моделирование выполнялось с помощью программы KAPAT [10]. Моделировалось пространство между двумя плоскостями $x=0$ и $x=0.08$ см, между которыми в направлении оси z распространяется волна типа ТЕМ с частотой 9.1 ГГц и мощностью 32 кВт, что приблизительно соответствует структуре волны и мощности 180 кВт (близкой к предельно достижимой) в прямоугольном волноводе шириной 5 мм, применявшемся в эксперименте. На плоскости $x=0$ располагается зона вторичной эмиссии с максимальным коэффициентом $\sigma=1.6$ и близкой к реальной зависимости σ от энергии падающего электрона. Затравкой вторичной эмиссии является первичный ток, равномерно распределенный по поверхности $x=0$. Магнитное поле направлено вдоль оси y и равно 1485 кЭ и 745 кЭ при моделировании первой и второй моды разряда соответственно. При таком выборе направления магнитного поля дрейф размножающихся электронов происходит в направлении $-x$, то есть навстречу волне. Расположение электронов для развитой фазы разряда показано на рис. 1. Первая мода (рис. 1,а) характеризуется большей величиной поглощения волны, что выражается в уменьшении высоты подъема траектории с ростом z , в то время как для второй моды (рис. 1,б) поглощение существенно меньше. Это соответствует экспериментальной зависимости рис. 4, кривая 1. Электроны второй моды разряда имеют два максимума траектории на циклотронном периоде и поэтому видимый разброс (рис. 1,б) в этом случае заметно больше. Малый уровень поглощения волны объясняется более узким диапазоном благоприятных фаз для размножения падающих электронов и низким током разряда.

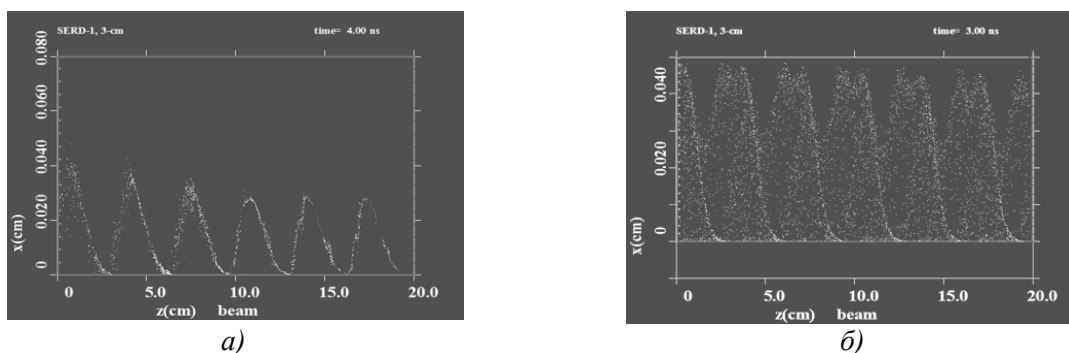


Рис. 1. Расположение электронов в развитой фазе разряда на первой (а) и на второй (б) моде.

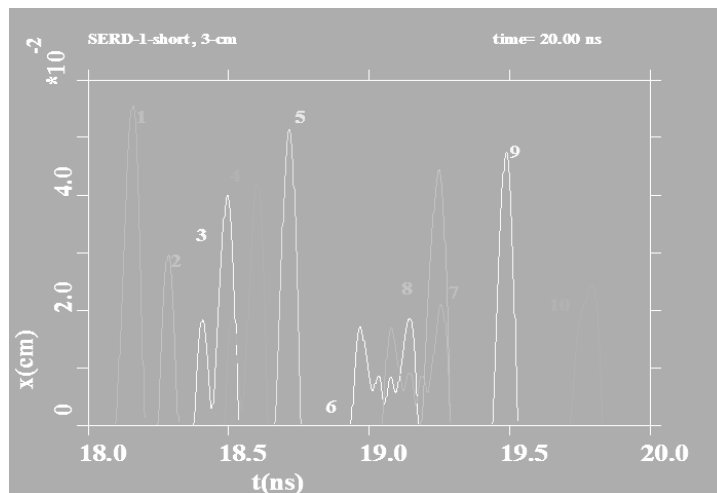


Рис. 2. Траектории пробных электронов, эмитированных в различных фазах первой моды разряда.

Траектории электронов первой моды разряда, испытывающие значительный разброс, наблюдающийся на входном для СВЧ волны конце волновода $z=0.5$ см (см. рис. 1,а), были проанализированы с помощью пробных электронов, эмитированных в различных фазах разряда. Моделирование показало, что, по-видимому, вследствие разброса и выталкивания части электронов из благоприятной фазы разряда, появляются электроны, «живущие» несколько циклотронных периодов между соударениями с поверхностью (рис. 2, траектории 3, 4, 6, 7). Очевидно, такие электроны могут накапливаться вблизи поверхности в виде облака дополнительного пространственного заряда. Следует подчеркнуть: дополнительного не только по сравнению с линейной, лавинной фазой, но и по сравнению с принятым теоретическим описанием насыщенного разряда [4], где вытесненные из благоприятной фазы электроны считаются ушедшими из рассмотрения.

Такие долгоживущие электроны могут существенно повлиять на процесс разряда, как в волноводе, так и в резонаторе, следующим образом: увеличить экранировку СВЧ поля у разрядной поверхности и диэлектрическую проницаемость электронного облака; создать квазистатическое нерезонансное электрическое поле, способное повлиять на область резонансных фаз.

2. Схема и условия измерений

Результаты численного моделирования показали, что разряд на второй моде поглощает примерно в десять раз меньшую мощность излучения, чем разряд на основной моде. В принципе, и разряд с такой интенсивностью может быть зарегистрирован в экспериментальной схеме, в которой была исследован разряд на первой моде.

Эксперименты по исследованию мультипакторного разряда проводились на том же стенде с использованием того же волновода, что и в предыдущих исследованиях [5, 8], когда основное внимание уделялось первой моде разряда (рис. 3). Условия для развития насыщенного разряда создавались в прямоугольном волноводе сечением 23×5 мм² из латуни Л96, свернутом в незамкнутое кольцо 7 диаметром около 100 мм. Однородное магнитное поле соленоида b было наложено перпендикулярно плоскости волноводного кольца. Через разрыв в кольце был выполнен подвод и отвод СВЧ излучения с помощью волноводов и уголков. Разряд возникает на обеих широких стенках кольцевого волновода, охватывая поверхность площадью около 50 см². Масштаб осцилляций электронов, согласно [2], не превышает 0.5 мм, так что кривизна волновода не влияет на развитие разряда. По мере дрейфа электронов в скрещенных полях вдоль кольца осуществлялось до нескольких сотен циклов соударения электронов с поверхностью. Предполагалось, что в подводящих волноводах интенсивность поглощения будет несущественна из-за малого числа циклов размножения электронов и неоднородности СВЧ поля в направлении поперек волновода.

Для откачки волновода, помещенного в вакуумную камеру, в его узких стенках по всей длине были просверлены отверстия диаметром 1,5 мм. С целью обезгаживания на трубе был намотан нагреватель, способный обеспечить нагрев до 600°C. Вакуум в объеме 5·10⁻⁷ мм рт. ст. создавался с помощью криосорбционного насоса.

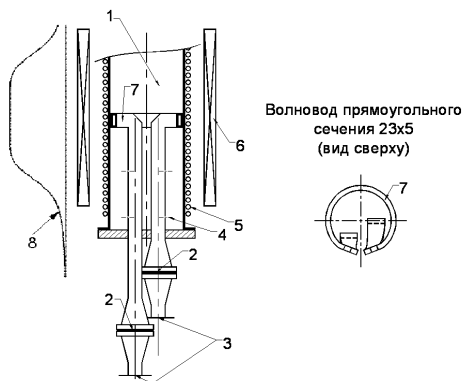


Рис. 3

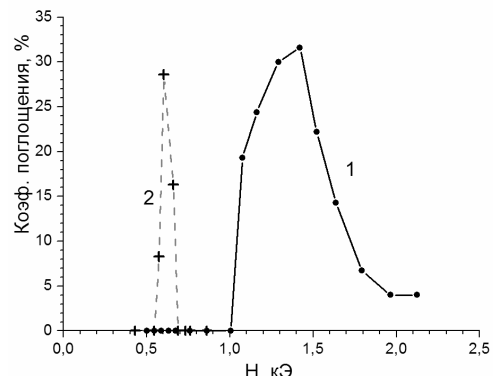


Рис. 4

Рис. 3. Схема эксперимента: 1 – вакуумная камера; 2 – СВЧ окно; 3 – входной и выходной волноводные фланцы; 4 – отверстия для откачки волновода; 5 – нагреватель; 6 – импульсный соленоид; 7 – свернутый в кольцо волновод; 8 – распределение магнитного поля
Рис. 4. Коэффициент поглощения волны в волноводе в зависимости от магнитного поля H: 1 – разрядная поверхность очищена от адсорбированных молекул; 2 – зона второй моды в условиях, когда разрядная поверхность покрыта адсорбированными молекулами.

3. Экспериментальное исследование разряда в прямоугольном волноводе

Исследование разряда в волноводе проводилось при мощности СВЧ источника в диапазоне 80-160 кВт на частоте 9.13 ГГц. По оценкам, сделанным на основании результатов предыдущих экспериментов [8], максимальный коэффициент вторичной эмиссии σ равен 1.6 для используемого материала разрядной поверхности. Исследования проводились при температуре 400°C. Была получена зависимость коэффициента поглощения волны от магнитного поля (рис. 4, кривая 1), не отличающаяся от итогов предыдущих экспериментов [8] и демонстрирующая зону первой моды мультипактора в скрещенных полях (соответствующая осциллограмма – на рис. 6,а). Как и ранее, поглощения излучения в зоне действия более высоких мод разряда не было обнаружено.

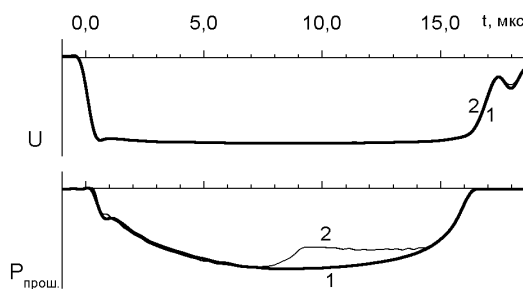


Рис. 5

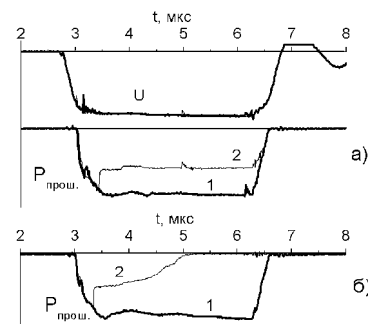


Рис. 6

Рис. 5. Типичные осциллограммы при наблюдении второй моды разряда в волноводе при комнатной температуре. U – напряжение питания магнетрона; P_{прош.} – мощность прошедшей волны. 1 – осциллограмма в отсутствие разряда (P_{прош.} равна падающей мощности); 2 – осциллограмма с разрядом.

Рис. 6. Типичные осциллограммы при наблюдении первой моды разряда в нагретом волноводе (а) и при комнатной температуре (б). U – напряжение питания магнетрона; P_{прош.} – мощность прошедшей волны. 1 – осциллограмма в отсутствие разряда; 2 – осциллограмма с разрядом.

Для повышения чувствительности методики обнаружения разряда предполагалось использовать тот факт, что небольшие по величине разрядные токи второй моды способны десорбировать с поверхности стенки волновода молекулы присутствующих при комнатной температуре адсорбированных слоев, ионизовать эти молекулы и, в конечном итоге, привести к образованию поглощающей СВЧ излучение плазменной среды [1, 9, 11]. Параметры, при которых это явление должно наблюдаться, свидетельствовали бы о том, что оно вызвано именно второй модой мультипактора.

В процессе исследований, выполненных при комнатной температуре, было установлено, что в области значений магнитных полей, соответствующих условиям развития второй моды разряда, происходит заметное ухудшение прохождения излучения (рис. 4, кривая 2 и рис. 5). Одновременно возникал сигнал в канале отраженной волны, что говорит о появлении сильно ионизированной плазмы, отражающей СВЧ излучение. Для сравнения, в условиях нагретого волновода на первой моде разряда, когда создается весьма интенсивный, но чисто электронный разряд, никакого отраженного сигнала не отмечалось. При комнатной температуре (рис. 6,б), как и в более раннем эксперименте [9], этот разряд вначале вызывал быстрое поглощение излучения, действуя как чисто электронный разряд, а затем благодаря десорбции и ионизации молекул со стенки волновода постепенно трансформировался в плазменный разряд. В процессе своего развития этот разряд полностью перекрывал сечение волновода, в результате чего практически 100% мощности отражалось. В то же время разряд на второй моде, по-видимому, вследствие меньшей интенсивности не был способен перекрыть сечение волновода полностью. Результаты проведенного эксперимента, по-видимому, подтверждают описанный выше сценарий возникновения плазмы и указывают на ее роль в выявлении второй моды мультипакторного разряда.

Непосредственно зарегистрировать чисто электронный разряд на второй моде можно, по-видимому, с помощью более чувствительной методики измерений, применяющей, например, гальванически изолированные электроды в стенке волновода [3].

4. Обсуждение

Результаты эксперимента и численного моделирования, в принципе, подтверждают возможность существования второй моды мультипактора в волноводе с плотностью тока разряда существенно ниже, чем у первой моды. В то же время в резонаторе [7] и первая, и вторая мода разряда проявляют себя приблизительно одинаково: разряд перестраивает резонатор, и происходит отражение примерно половины падающей мощности излучения. То есть, разряд на второй моде в волноводе проявляет себя значительно слабее, чем в резонаторе. Отличие этих двух случаев в следующем. В волноводе регистрация излучения ведется по поглощенной мощности излучения (активные потери, заключающиеся в поглощении энергии бомбардирующих электронов в стенке волновода), которая, как было показано, невелика. Тогда как в резонаторе объемный заряд мультипактора, проявляя реактивные свойства, осуществляет перестройку резонатора. Поскольку сдвиг резонансной частоты посредством второй моды разряда сравним со сдвигом для первой моды, можно предположить, что реактивное воздействие пространственного заряда в этих двух случаях также сравнимо, несмотря на то, что поверхностная плотность тока разряда на второй моде меньше, чем у первой моды. Можно перечислить факторы, по-видимому, способные выровнять эту разницу. Во-первых, электроны второй моды разряда находятся над поверхностью вдвое дольше (два циклотронных периода, так что их объемный заряд вдвое больше при заданном токе) и их подъем над поверхностью выше, что по-другому распределяет объемный заряд в резонаторе. Во-вторых, как показало численное моделирование, в разряде существуют и могут накапливаться так называемые долгоживущие электроны, являющиеся продуктом вытеснения участвующих в разряде электронов из благоприятной для размножения резонансной фазы. В-третьих, существуют и другие нерезонансные электроны (возникающие при бомбардировке поверхности упруго и неупруго отраженные электроны), которые также могут накапливаться в зоне разряда со своим, дополнительным, пространственным зарядом. Перечисленные факторы могут объяснить выравнивание реакции резонаторов с разрядом на первой и на второй моде мультипактора, а также резонаторов, изготовленных из материалов с существенно различными коэффициентами вторичной эмиссии [7].

Работа поддержана грантами РФФИ №№ 15-02-08016 и 15-02-09130.

Литература

1. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
2. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М.: Госатомиздат, 1961.
3. Ганичев Д.А. и др. // ЖТФ. 1965. Т.35, №5. С.813.
4. Бляхман Л.Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т.43, №11. С.1004.
5. Вихарев А.А. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т.54, №12. С.908.
6. Вихарев А.А. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т.57, №7. С.580.
7. Иляков Е.В. и др. // «Вакуумная наука и техника». Материалы XXII научно-технической конференции, 26 сентября – 4 октября 2015 г., Феодосия. С.41.
8. Иляков Е.В., Кулагин И.С. // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т.54, №10. С.758.
9. Иляков Е.В. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т.52, №12. С.979.
10. Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkeley Res. Assoc., 1992.
11. Александров А.Ф. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника: Сб. научн. тр. Горький: ИПФ АН СССР, 1983. Вып. 3. С. 219.

Определение степени проникновения фонового газа в сильнонедорасширенную сверхзвуковую струю методом электронно-пучковой спектроскопии

К.А.Дубровин, А.Е.Зарвин, В.В.Каляда, А.С.Яскин
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, ул.Пирогова, 2
e-mail: akdubr@gmail.com

В процессе изучения струй аргона за сверхзвуковыми соплами при истечении в разреженное пространство в условиях развитой конденсации было обнаружено резкое изменение структуры, формы и состава струи. В данной работе получены и проанализированы спектры излучения аргона в кластированных сверхзвуковых струях, а также определена степень проникновения фонового газа с помощью спектрального анализа излучения частиц потока.

Degree determination of the background gas penetration into a highly imperfectly expanded supersonic jet by electron-beam spectroscopy. K.A.Dubrovin, A.E.Zarvin, V.V.Kalyada, A.S.Yaskin. In the process of studying argon jets behind supersonic nozzles after expiration into a rarefied space under conditions of developed condensation, a sharp change in the structure, shape, and composition of the jet was observed. The emission spectra of argon in clusters of supersonic jets were obtained and analyzed. The degree of background gas penetration by spectral analysis of the radiation of stream particles was determined.

1. Введение

Образующиеся в процессе конденсации газа в условиях адиабатической изоляции ассоциаты получили название «кластеры» [1]. Газы обладают разной степенью конденсации в сверхзвуковых струях. Кластеры, в свою очередь, обладают разными физическими и химическими свойствами, вследствие чего кластированный поток также обладает уникальными свойствами, собственным составом и структурой.

Вопрос проникновения фонового газа внутрь сформированной сверхзвуковой струи исследуется уже давно [2,3], в том числе с помощью молекулярно-пучковой масс-спектрометрии [4]. Учитывая тот факт, что процесс конденсации вносит значительные