

УДК 537.5

НАБЛЮДЕНИЕ ВТОРОЙ МОДЫ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В СКРЕЩЁННЫХ ПОЛЯХ

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

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В ходе экспериментальных исследований одностороннего мультипакторного разряда в скрещённых полях — сверхвысокочастотном (СВЧ) электрическом и магнитостатическом — в 3-сантиметровом диапазоне длин волн в прямоугольном волноводе и цилиндрическом резонаторе обнаружена вторая мода разряда. Интенсивность разряда на второй моде в соответствии с теорией была несколько ниже, чем на основной моде, но тем не менее достаточна для стимулирования СВЧ пробоев, поглощения заметной доли мощности излучения и изменения резонансной частоты резонатора.

ВВЕДЕНИЕ

Односторонний разряд, развивающийся на поверхности волновода в скрещённых сверхвысокочастотном (СВЧ) электрическом и статическом магнитном полях, является одной из разновидностей вторично-эмиссионного резонансного разряда (мультипактора) [1–4] и реализуется при определённом соотношении между циклотронной частотой электронов ω_c (величиной магнитного поля) и частотой излучения ω . Теория мультипакторного разряда предсказывает существование нескольких мод разряда, для которых циклотронная частота ω_c равна $\omega/(2n)$, где $n \geq 1$ — номер моды разряда (т. е. для n -ой моды проходит n периодов СВЧ поля между вылетом разрядного электрона с поверхности и возвращением на неё) [2, 3]. К настоящему времени наблюдалась и была изучена лишь низшая мода разряда, $n = 1$ [5–7]. В экспериментальных исследованиях [8, 9] было показано, что в 3-сантиметровом диапазоне длин волн разряд такого типа развивается за $10 \div 15$ 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 поглощаемая разрядом мощность (в конечном итоге рассеиваемая в стенке волновода) в условиях эксперимента составляла более 4 кВт/см^2 и была ограничена мощностью входного СВЧ источника, а соответствующая плотность тока насыщенного разряда достигала 10 А/см^2 . При транспортировке ещё больших мощностей, как показывают оценки, уровень поглощаемой разрядом мощности может достигать до десятков и даже сотен киловатт на квадратный сантиметр [3, 10].

В отличие от двухстороннего разряда, возможности развития которого сужает резонансный характер связи между СВЧ полем и размером зазора между поверхностями, односторонний разряд может существовать в широком диапазоне СВЧ полей, что позволяет ему охватывать поверхности большой площади. Эти свойства одностороннего мультипакторного разряда делают привлекательным его применение в волноводах и резонаторах с большим (в масштабе длины волны) поперечным сечением с целью создания электрически управляемых поглощающих устройств и быстрых переключателей излучения, работающих на мощностях в десятки мегаватт. Подобные устройства востребованы для решения широкого круга научных и технических задач — таких, например, как нагрев и стабилизация плазмы в токамаках, компрессия электромагнитных импульсов, создание ускорителей элементарных частиц нового поколения — суперколлайдеров, радиолокация, борьба с раковыми клетками на основе локальной СВЧ гипертермии и другие.

* ilyakov@appl.sci-nnov.ru

Согласно работам [2, 3], более высокие моды разряда, в отличие от первой, развиваются при меньшем магнитном поле и в большей степени подвержены влиянию пространственного заряда и начального разброса скоростей электронов. В результате зона устойчивости разряда по магнитному полю существенно сужается и величины разрядного тока уменьшаются в несколько раз. Тем не менее значения этих токов могут быть существенными, и разряд на высоких модах может представлять собой не только чисто академический, но и практический интерес. В частности, разряд, возникающий на второй моде, когда циклотронная частота вчетверо меньше частоты СВЧ излучения, реализуется при вдвое меньшем, чем для основной моды, магнитном поле, что, с одной стороны, может быть удобно при полезном использовании мультипактора, а с другой стороны следует принимать во внимание как фактор, стимулирующий СВЧ пробой в приборе.

Статья посвящена наблюдению и исследованию второй моды мультипактора (первые результаты по этим исследованиям были опубликованы в работе [11]).

1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И УСЛОВИЯ ЕГО ПРОВЕДЕНИЯ

Исследования мультипакторного разряда были проведены в прямоугольном волноводе и двух цилиндрических резонаторах, изготовленных с двумя типами разрядной поверхности: из бескислородной меди марки МБ и сплава палладия (98 %) и бария (2 %) с повышенным коэффициентом вторичной эмиссии σ [12]. В этих электродинамических системах создавались условия для развития разряда на поверхности большой площади и с большой интенсивностью благодаря многократному размножению электронов и достижению насыщения. Это позволило повысить способность разряда поглощать СВЧ излучение и тем самым обеспечить возможность его регистрации и изучения путём исследования свойств излучения, прошедшего через зону разряда.

Использование резонаторов потребовалось для повышения электрических полей на разрядной поверхности с целью увеличения интенсивности разряда и его более надёжной регистрации. Согласно работам [3, 8], мощность рассеиваемого разрядом СВЧ излучения растёт пропорционально кубу напряжённости электрического поля ($P \propto \sigma E^3$). Её росту также способствует увеличение коэффициента вторичной эмиссии поверхности σ .

Эксперименты по исследованию мультипакторного разряда проводились на том же стенде, что и в предыдущих исследованиях [8, 9], когда основное внимание уделялось первой моде разряда. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Излучение от магнетрона с мощностью до 200 кВт, перестраиваемого в диапазоне частот $9,1 \div 9,8$ ГГц, подавалось в СВЧ тракт, который мог использоваться как для исследования волновода b стандартного сечения 23×5 мм со свёрнутым в незамкнутое кольцо рабочим участком (вариант на рис. 1а — схема из работы [8]), так и для исследования цилиндрического резонатора 12 с модой TM_{011} (вариант на рис. 1б — эта часть схемы была реализована и описана в работе [9]). В обоих вариантах разряд возникал в зоне продольного однородного магнитного поля, создаваемого импульсным соленоидом 9 , при наличии перпендикулярного к нему СВЧ электрического поля радиального направления. В этих условиях электроны разряда дрейфовали поперёк силовых линий магнитного поля и могли совершать большое число последовательных циклов соударения с поверхностью, двигаясь по замкнутому кругу (вариант на рис. 1б) или по достаточно протяжённым (примерно 24 см) в азимутальном направлении широким стенкам волновода (вариант на рис. 1а), что обеспечивало размножение электронов и достижение режима насыщения разряда. При этом кривизна цилиндрической поверхности (радиус 20 мм для резонатора и $40 \div 45$ мм для волновода) практически не должна была влиять на движение электронов ввиду малости масштаба траекторий — не более 0,5 мм на первой и не более 0,8 мм на второй моде разряда.

Разрядная поверхность волновода представляла собой сплав Л96 (содержащий 96 % меди), из

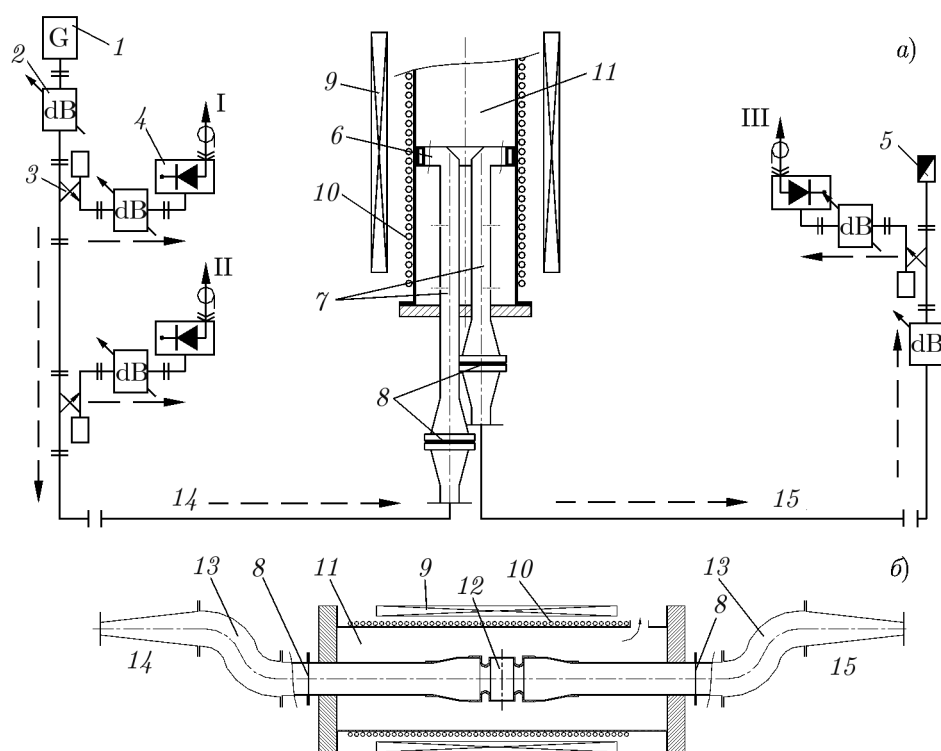


Рис. 1. Схема измерений при исследовании разряда в прямоугольном волноводе (а) и резонаторе (б): 1 — магнетрон с циркулятором излучения; 2 — аттенюаторы; 3 — направленные ответвители; 4 — СВЧ детекторы; 5 — согласованная нагрузка; 6 — исследуемый прямоугольный волновод, свёрнутый в незамкнутое кольцо; 7 — прямоугольные подводящие волноводы; 8 — вакуумные окна; 9 — соленоид; 10 — нагреватель для удаления адсорбированных молекул; 11 — откачиваемый объём; 12 — резонатор; 13 — подводящие волноводы с преобразователями типов волн; 14 — вход, 15 — выход. Измерительные каналы: I — падающая волна; II — отражённая волна; III — прошедшая волна

которого изготавливались стандартные волноводные трубы с внутренним сечением 23×5 мм. Резонатор оснащался двумя типами разрядной поверхности: из бескислородной меди марки МБ и сплава палладия (98%) и бария (2%) с повышенным коэффициентом вторичной эмиссии. Волна, отражённая от исследуемых устройств 6 и 12 (см. рис. 1), полностью поглощалась с помощью циркулятора, которым магнетрон был защищён от отражённой волны. Мощность магнетрона регулировалась напряжением источника питания. В качестве измерителя мощности служил импульсный твердотельный калориметр [13] (точность измерения $\pm 10\%$). Для контроля падающей, отражённой и прошедшей через волновод или резонатор волн в тракте прямоугольного сечения были установлены направленные волноводные ответвители 3. Для регистрации огибающих функций использовались детекторы 4 с выходным сигналом, пропорциональным мощности СВЧ импульса, что позволяло оценить характеристики мультипакторного разряда по изменению сигналов от прошедшей и отражённой волны¹. В узких стенках прямоугольных подводящих волно-

¹ Точность индикации осциллограмм на цифровом осциллографе составляла $\pm 3\%$ с учётом шумовой компоненты. Точность определения коэффициентов отражения и прохождения волны (см. раздел 5) составляла ± 6 относительных процентов. Коэффициент поглощения волны в волноводе (см. раздел 3) определялся из соотношения мощностей падающей и прошедшей волн с точностью ± 20 относительных процентов. Точность определения магнитного поля была не хуже $\pm 1\%$.

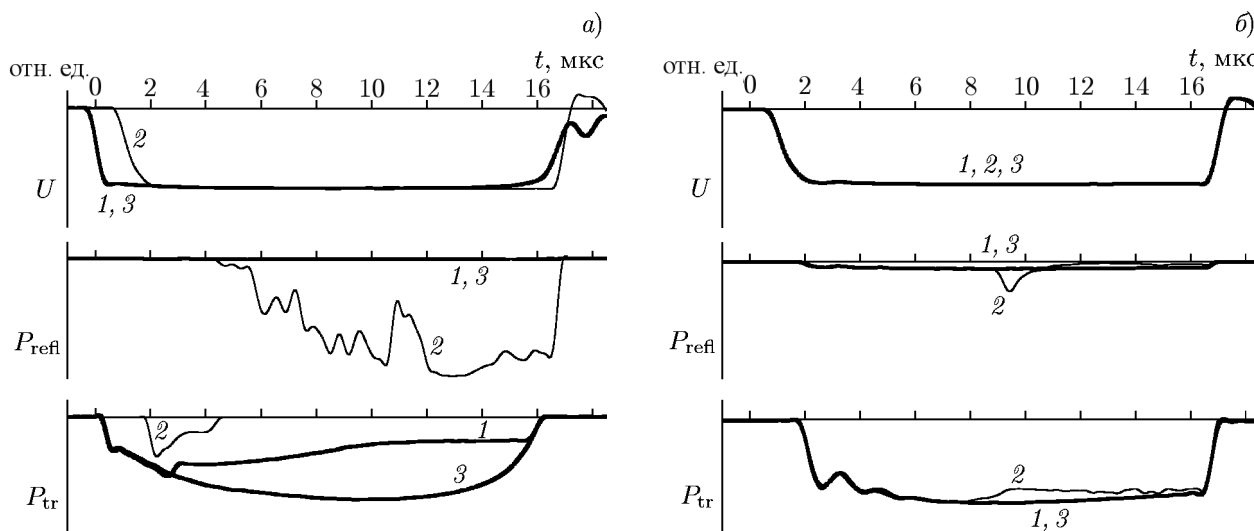


Рис. 2. Типичные осциллограммы при наблюдении первой (а) и второй (б) моды разряда в волноводе: U — напряжение питания магнетрона; P_{refl} и P_{tr} — мощность отражённой и прошедшей волн соответственно; 1 — осциллограммы с разрядом при температуре 400 °С; 2 — осциллограммы с разрядом при 20 °С; 3 — осциллограммы в отсутствие разряда. На панели б масштаб сигнала P_{refl} примерно в 10 раз крупнее масштаба сигнала P_{tr}

водов в схеме рис. 1а и в круглых подводящих волноводах в схеме рис. 1б были сделаны отверстия, не искажавшие транспортировку волны и обеспечивавшие откачку внутренних полостей вакуумного объёма.

Эксперимент проводился при нагревании стенок вакуумной камеры 11 и волноводов с целью удаления адсорбированных молекул с их поверхностей; с помощью специального нагревателя 10 температура волновода или резонатора могла быть доведена до 400 °С; вакуум с остаточным давлением $5 \cdot 10^{-7}$ 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 объёма) удаляются молекулы загрязняющих веществ [14]. В то же время коэффициент вторичной эмиссии чистых металлов очень слабо зависит от температуры [15].

Исследование проводилось в режиме однократных импульсов.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Исследование проводилось по схеме измерений на рис. 1а, где регистрировалась отражённая волна и волна, прошедшая по волноводу. Частота излучения составляла 9,13 ГГц. Мощность СВЧ источника в процессе измерений находилась в диапазоне 60÷160 кВт (регулировка мощности проводилась путём изменения амплитуды питающего импульса напряжения, вследствие чего генерируемый СВЧ импульс мог незначительно изменять свою форму (см. кривую 3 рис. 2а и кривые 1, 3 на рис. 2б).

Первый этап эксперимента был проведён в условиях термического удаления адсорбированных молекул при температуре 400 °С. При мощности СВЧ источника около 60 кВт была получена зависимость коэффициента поглощения волны от магнитного поля (см. рис. 3, кривая 1), не

отличавшаяся от итогов предыдущих экспериментов [8, 16] и демонстрирующая зону первой моды мультипактора в скрещённых полях. Как и ранее, поглощения излучения в зоне действия более высоких мод разряда не было обнаружено; также не было и отражения излучения во всём диапазоне магнитных полей [8]. Аналогичная картина наблюдалась и при больших СВЧ мощностях, вплоть до 160 кВт. Характерные осциллограммы для этого случая представлены на рис. 2 (кривые 1).

Как уже было сказано, высшие моды разряда чувствительнее к фазе электронного удара о разрядную поверхность, чем первая мода. По этой причине уравновешенная действием пространственного заряда насыщенная плотность электронов во второй моде разряда может быть настолько низка, что не вызывает видимого поглощения СВЧ излучения, проходящего по волноводу. Поэтому было предложено повысить чувствительность к появлению второй моды разряда в нашей схеме путём отказа от термической очистки разрядной поверхности, т. е. путём разрешения последней покрыться слоем адсорбированных молекул. При этом согласно [17, 18] при бомбардировке электронами разряда происходит десорбция молекул с поверхности и их ионизация, как самими электронами разряда, так и электронами, образовавшимися в результате ионизации, которые, в свою очередь, также могут бомбардировать поверхность. В результате происходит лавинное нарастание концентрации ионизированной среды у поверхности. Образовавшаяся плазма, расширяясь, может приводить к увеличению поглощения и отражения излучения в этой области.

В соответствии с этими соображениями второй этап эксперимента проводился при комнатной температуре. Типичные осциллограммы изображены на рис. 2 (кривые 2). Видно, что нарастание концентрации ионизированной среды, возникшей в условиях первой моды мультипактора (см. рис. 2а), приводит к полному прекращению прохождения волны по волноводу и появлению мощной отражённой волны, что свидетельствует о СВЧ пробое. В то же время в условиях реализации второй моды разряда отражённая волна гораздо слабее и прохождение по волноводу нарушается лишь частично (см. рис. 2б). По этим результатам была получена кривая 2 на рис. 3, которая впервые демонстрирует наблюдение второй моды разряда при магнитном поле около 0,6 кЭ, величина которого соответствует теоретическим выводам [3]. В зоне первой моды разряда кривая 2 не построена, т. к. в ней наличие адсорбированных молекул приводит к 100-процентному отражению падающего излучения и СВЧ пробую.

Для сравнения следует отметить результаты работы [6], где при $\omega_c = \omega/4$ в высоком вакууме также не наблюдалось разряда, измерявшегося по току на изолированный электрод. Однако при ухудшении вакуума до величины остаточного давления выше 10^{-2} мм рт. ст. в этом диапазоне магнитных полей появлялось свечение разряда. Авторы работы [6] не связали это явление с второй модой мультипактора в скрещённых полях.

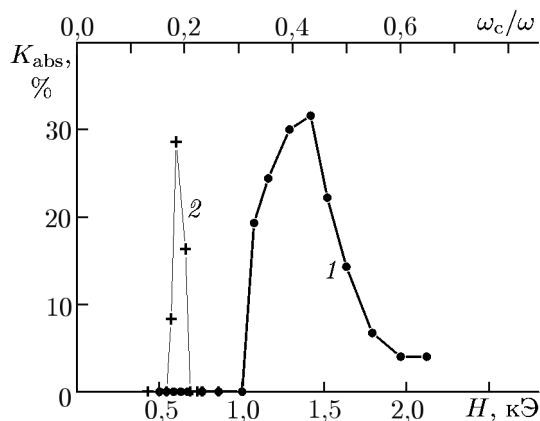


Рис. 3. Коэффициент поглощения волны в волновод в зависимости от напряжённости магнитного поля H : 1 — разрядная поверхность очищена от адсорбированных молекул; 2 — зона второй моды в условиях, когда разрядная поверхность покрыта адсорбированными молекулами

3. СВЧ РЕЗОНАТОР С РАЗРЯДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ИЗ БЕСКИСЛОРОДНОЙ МЕДИ

Исследование разряда в волноводе показало, что величина разрядного тока второй моды разряда и связанные с ней потери СВЧ излучения недостаточны для непосредственного наблюдения поглощения прошедшей волны. Согласно теоретическим выводам [3] рассеиваемая разрядом мощность быстро повышается с ростом амплитуды СВЧ поля (пропорционально его третьей степени) и с ростом коэффициента вторичной эмиссии. В эксперименте, описанном ниже, для увеличения амплитуды СВЧ поля был использован цилиндрический резонатор типа TM_{011} с добротностью 330. С помощью такого резонатора можно повысить СВЧ поле в $2\div 3$ раза по сравнению с волноводом размера 23×5 мм и ожидать увеличения рассеиваемой мощности в $20\div 30$ раз с учётом роста коэффициента вторичной эмиссии при больших энергиях бомбардировки. (По расчёту СВЧ поле в волноводе составляло 14 кВ/см при мощности 160 кВт, а в резонаторе на частоте точного резонанса — 36 кВ/см при той же мощности.) В резонаторе электроны СВЧ разряда дрейфовали вдоль цилиндрической стенки в азимутальном направлении в скрещённых СВЧ радиальном и продольном магнитном полях.

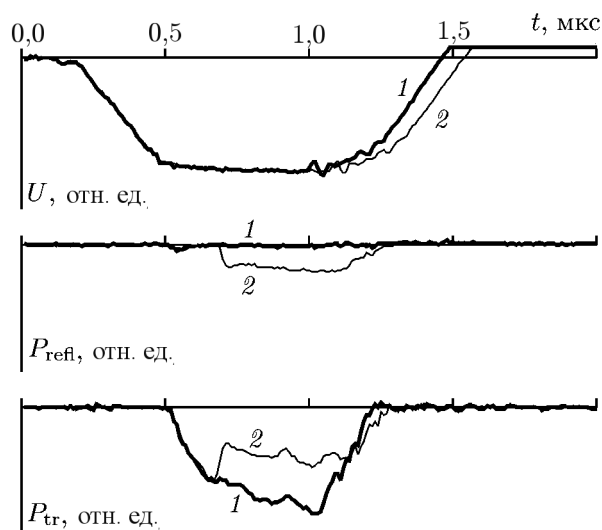


Рис. 4. Типичные осциллограммы при наблюдении второй моды разряда в резонаторе: U — напряжение питания магнетрона; P_{ref} , P_{tr} — мощность отражённой и прошедшей волн соответственно; 1 — осциллограмма в отсутствие разряда; 2 — осциллограмма с разрядом. Масштабы по вертикали у прошедшей и отражённой волн совпадают

мы прошедшего и отражённого сигнала, пропорционального СВЧ мощности, из которых определялись коэффициенты отражения и прохождения волны. Характерные осциллограммы для резонатора из бескислородной меди представлены на рис. 4.

Согласно [15] коэффициент вторичной эмиссии для чистой меди превышает единицу в диапазоне энергий бомбардировки $0,2\div 3,0$ кэВ, а в максимуме он равен 1,3. На рис. 5а показан коэффициент прохождения волны через резонатор T и отражения волны от резонатора R в зависимости от магнитного поля при различных мощностях падающей СВЧ волны.

При возникновении разряда в резонаторе ослабление прошедшего сигнала может происходить не только за счёт рассеяния энергии электронов разряда в стенке резонатора, но и из-за изменения резонансной частоты резонатора. Электронное облако разряда с концентрацией порядка $10^{11}\div 10^{12}$ см $^{-3}$, близкой к критической для данной частоты излучения, вытесняет из своего объёма СВЧ поле, вследствие чего эффективные размеры резонатора и его резонансная частота изменяются. В результате излучение, первоначально практически полностью проходившее через резонатор, будет от него отражаться [9]².

Исследование проводилось по схеме измерений на рис. 1б, где регистрировалась отражённая волна и волна, прошедшая через резонатор. Температура резонатора во время эксперимента поддерживалась на уровне 400 °С.

Частота входного излучения подбиралась совпадающей при отсутствии разряда с резонансной частотой резонатора, чтобы в зоне разряда достигалось максимальное СВЧ поле. По результатам измерений регистрировались осциллограммы

² На этом же принципе смещения резонансной частоты работает СВЧ коммутатор с двусторонним разрядом [19].

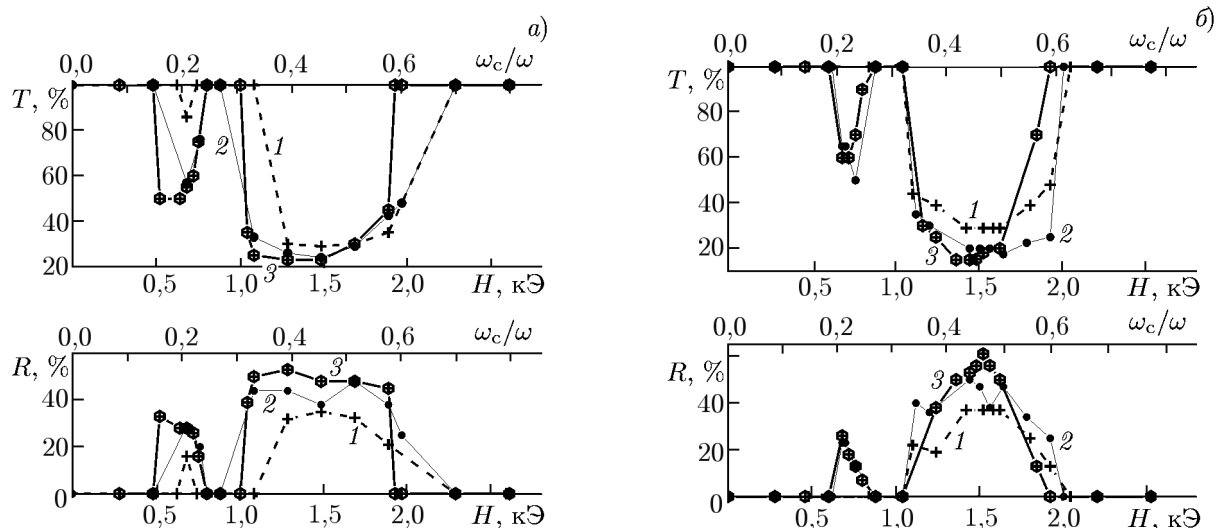


Рис. 5. Прохождение СВЧ волны через резонатор, предварительно настроенный в резонанс, в зависимости от магнитного поля H . Мощность волны 60 кВт (линии 1); 100 кВт (2); 160 кВт (3); а — разрядная поверхность из меди МБ; б — разрядная поверхность из сплава палладия и бария

Из рис. 5а видно, что при оптимальном для возникновения разряда магнитном поле резонатор перестраивается (перестройка резонатора разрядом подробно изучена в предыдущем эксперименте [9]) так, что коэффициент прохождения через резонатор, предварительно настроенный в резонанс, падает до 23 %, а коэффициент отражения достигает при этом 53 % (соответственно, остаток, 24 %, рассеивается в стенке разрядом). Оценки показывают, что учёт омических потерь практически не сказывается на коэффициентах отражения и прохождения волны через резонатор. Видно, что, кроме основной зоны разряда 1,0÷1,9 кЭ, где циклотронная частота примерно вдвое ниже частоты СВЧ поля, в эксперименте наблюдалась ещё одна зона разряда (при магнитном поле около 0,6 кЭ, соответствующем второй моде разряда, где циклотронная частота вчетверо ниже частоты СВЧ поля [3]). Легко найти, по аналогии с первой модой, что разряд в этом случае поглощает 17 % мощности. Более высокие моды разряда (при магнитных полях меньше 0,5 кЭ) не наблюдались.

4. СВЧ РЕЗОНАТОР С РАЗРЯДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ИЗ СПЛАВА ПАЛЛАДИЯ И БАРИЯ

Согласно [20] максимальный коэффициент вторичной эмиссии для сплава палладия и бария с весовым содержанием последнего 2 %, который применялся в эксперименте, достигает 2,6. Фольга с толщиной 0,1 мм из этого материала размещалась внутри цилиндрического резонатора вдоль его боковой поверхности. Кромки фольги впаивались припоем ПСр72 в стыки между образующей и медными торцами цилиндрического резонатора. Добротность получившегося резонатора, равная 280, несколько отличалась от таковой для резонатора, полностью изготовленного из меди. Эксперимент проводился при температуре резонатора 400 °С. На рис. 5б показан коэффициент прохождения волны через резонатор T и отражения её от него в зависимости от магнитного поля при различных мощностях падающей СВЧ волны.

Рисунок 5б, как и рис. 5а, демонстрирует наличие двух зон с различными модами разряда. Для этого материала коэффициент прохождения на первой моде падает до 15 %, а коэффициент отражения достигает при этом 61 %. Соответственно, 24 % мощности рассеиваются в стенке

разрядом. На второй моде разряд рассеивает 14 % мощности.

В этом эксперименте более высокие моды разряда также не наблюдались.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование разряда в волноводе, очищенном от адсорбированных молекул, подтвердило прежние результаты экспериментов [8, 16], показавшие, что вторая мода разряда не оказывает видимого влияния на прохождение излучения по волноводу. Однако исследования при комнатной температуре, когда разряд инициирует образование ионизированной среды, влияющей на прохождение излучения по волноводу, позволили зарегистрировать проявление второй моды разряда.

Исследования разряда в резонаторе подтвердили ранее полученные результаты [9]: способность одностороннего разряда переводить резонатор из режима полного прохождения сигнала в режим преимущественного отражения, а также то, что с ростом падающей мощности и, соответственно, интенсивности разряда доля мощности отражённого сигнала растёт. На рис. 5а и б показаны зависимости от магнитного поля коэффициентов отражения и прохождения волны через резонатор с различными материалами разрядной поверхности с коэффициентами вторичной эмиссии $\sigma = 1,3$ и $2,6$ соответственно. В них обращает на себя внимание следующее.

Зоны первой и второй мод мультипактора изолированы друг от друга. Максимумы (минимумы) этих зон стремятся к близким (в своей зоне) предельным значениям при повышении мощности волны, несмотря на различие коэффициентов σ : первая мода — примерно 57 % (отражённый сигнал), 19 % (прошедший сигнал) и 24 % (поглощение) демонстрирует существенное изменение свойств резонатора и его переключение; вторая мода — примерно 30 % (отражённый сигнал), 55 % (прошедший сигнал) и 15 % (поглощение) изменяет свойства резонатора в меньшей степени.

Эксперимент показал, что в резонаторе (где вследствие более высоких СВЧ полей, чем в прямоугольном волноводе, мощность волны, рассеиваемая разрядом, пропорциональна третьей степени СВЧ поля [10]) удалось уверенно зарегистрировать поглощение СВЧ излучения второй модой разряда. По-видимому, дополнительный вклад в увеличение интенсивности разряда даёт и рост коэффициента вторичной эмиссии при увеличении энергии бомбардирующих поверхность электронов в определённых пределах (при этом расширяется зона устойчивых фаз [3]).

В то же время в целом диапазон магнитных полей для второй моды разряда существенно уже, чем для первой, и ток разряда меньше, что следует из результатов эксперимента (см. рис. 5) и соответствует теоретическим представлениям. Перестройка резонансной частоты также повышает чувствительность резонатора к появлению разряда. Оценка порога возникновения разряда на второй моде, сделанная на основе экспериментальных данных о соответствующей мощности СВЧ волны, даёт примерно 20 кВ/см на частоте 9,3 ГГц.

Что касается зависимости разряда от коэффициента вторичной эмиссии σ материала поверхности, то, как и ожидалось, резонатор с поверхностью из сплава палладия и бария демонстрирует большее влияние разряда на прохождение волны, несмотря на меньшую добротность соответствующего резонатора.

В то же время предполагалось, что существенное увеличение плотности электронов разряда, которое должно наступить при удвоенном коэффициенте σ , приведёт к более контрастной разнице между характеристиками для резонаторов с различными материалами разрядных поверхностей и для различных мод разряда. То, что этого не наблюдалось, по-видимому, можно объяснить следующим. Регистрация разряда в резонаторе основана на реактивном влиянии разряда на резонансную частоту, величина которой зависит от общего заряда в объёме резонатора. Ясно, что такое влияние не может быть слишком большим: в противном случае коэффициент

отражения волны превысит величину, при которой СВЧ поле в резонаторе (теперь уже не настроенном точно на резонанс) будет ещё достаточным для поддержания разряда.

По-видимому, можно ожидать, что (по аналогии с результатами работы [19], где исследовались свойства резонатора с высоким коэффициентом вторичной эмиссии, переключаемого двусторонним мультипактором) и в данном эксперименте при дальнейшем повышении мощности волны более высокий коэффициент вторичной эмиссии проявит себя бóльшим ростом доли отражённого сигнала.

ВЫВОДЫ

В эксперименте впервые наблюдалась вторая мода мультипакторного разряда в скрещённых полях. Величина магнитного поля, при которой существовал такой разряд, соответствует теоретическим представлениям.

Разряд на второй моде, как и разряд на основной моде, способен быстро изменять свойства резонатора, переводить его из режима пропускания излучения на резонансной частоте в режим существенного отражения. Благодаря этим свойствам (дополнительным преимуществом является развитие второй моды при вдвое меньших магнитных полях, чем первой моды) этот режим может быть использован в быстрых переключателях потоков излучения, а его способность рассеивать достаточно большие мощности СВЧ излучения можно применить в поглощающих устройствах.

В соответствующих условиях можно ожидать развития такого разряда в мощных электронных СВЧ приборах с магнитной фокусировкой электронных пучков. Этот разряд, помимо поглощения части излучения или стимулирования СВЧ пробоя, может за счёт реактивной составляющей приводить к изменению в этих приборах расчётных параметров взаимодействия электронов и волн, в частности к падению их коэффициентов полезного действия.

Авторы выражают благодарность И. П. Ли (НПК «Плутон») за консультации и помощь в подготовке экспериментов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 15–02–08016, 15–02–09130 и 16–02–00890). Работа также выполнена в рамках 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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farnsworth P. T. // J. Franklin Inst. 1934. V. 218, No. 4. P. 411.
2. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М.: Госатомиздат, 1961. 321 с.
3. Бляхман Л. Г., Горшкова М. А., Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 11. С. 1004.
4. Сливков И. Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
5. Gaddy O. L., Holshoser D. F. // Proc. IEEE. 1963. V. 51, No. 1. P. 153.
6. Ганичев Д. А., Фридрихов С. А., Ашкинадзе Б. М., Солган А. Б. // Журн. техн. физ. 1965. Т. 35, № 5. С. 813.
7. Ганичев Д. А., Филатов В. А., Фридрихов С. А. // Радиотехника и электроника. 1972. Т. 17, № 8. С. 1639.
8. Иляков Е. В., Кулагин И. С., Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 12. С. 979.

9. Вихарев А. А., Иляков Е. В., Кузиков С. В., Кулагин И. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 12. С. 908.
10. Александров А. Ф., Бляхман Л. Г., Галузо С. Ю., Нечаев В. Е. // Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 3. Горький: ИПФ АН СССР, 1983. С. 219.
11. Иляков Е. В., Кулагин И. С., Шевченко А. С. // Вакуумная наука и техника. Материалы XXIV научно-техн. конф. 16–23 сентября 2017 года, г. Судак. С. 85.
12. Иляков Е. В., Кулагин И. С., Ли И. П. // Вакуумная наука и техника. Материалы XXII научно-техн. конф. 26 сентября–4 октября 2015 года, г. Феодосия. С. 41.
13. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Ковнеристый Ю. К. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 2. С. 153.
14. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.
15. Брюнинг Г. Физика и применение вторичной электронной эмиссии. М.: Сов. радио, 1958. 192 с.
16. Иляков Е. В., Кулагин И. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 10. С. 758.
17. Черепнин Н. В. Сорбционные явления в вакуумной технике. М.: Сов. радио, 1973. 384 с.
18. Kovalev N. F., Nechaev V. E., Petelin M. I., Zaitsev N. I. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26, No. 3. P. 246.
19. Forrer M., Milazzo C. // Proc. IRE. 1962. V. 50, No. 4. P. 442.
20. Поляков В. С., Ли И. П., Силаев А. Д., Харитоновна Н. Е. // Вакуумная наука и техника. Материалы XIX научно-техн. конф., 15–24 сентября 2012 года, г. Судак. С. 210.

Поступила в редакцию 2 ноября 2018 г.; принята в печать 28 февраля 2019 г.

OBSERVATION OF THE SECOND MODE OF THE MULTIPACTOR DISCHARGE IN CROSSED FIELDS

E. V. Ilyakov, I. S. Kulagin, and A. S. Shevchenko

We detect the second discharge mode in the process of experimental studies of a one-sided multipactor discharge in crossed fields (microwave electric field and magnetostatic field) in the three-centimeter wavelength band in a rectangular waveguide and a cylindrical resonator cavity. In accordance with the theory, the intensity of the discharge at the second mode was slightly lower than that at the fundamental mode. However, it is still sufficient for initiation of microwave breakdowns, absorption of a significant fraction of the radiation power, and modification of the resonance frequency of the cavity.