

УДК 537.5

МУЛЬТИПАКТОРНЫЙ РАЗРЯД В СКРЕЩЁННЫХ ПОЛЯХ В УСЛОВИЯХ КОМБИНАЦИИ ДВУХ ВОЛН С БЛИЗКИМИ ЧАСТОТАМИ

Е. В. Иляков, И. С. Кулагин

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Исследован мультипакторный разряд в скрещённых сверхвысокочастотном (СВЧ) электрическом и квазистатическом магнитном полях, возникающий в условиях суперпозиции двух СВЧ импульсов с близкими частотами, соответствующими трёхсантиметровому диапазону длин волн. Эксперименты в прямоугольном волноводе продемонстрировали, что разряд развивается и существует в широком диапазоне разности частот сигналов, простирающемся до 700 МГц. Удельная мощность, поглощаемая разрядом, составляет несколько киловатт на квадратный сантиметр, причём эффективно поглощается излучение на обеих частотах. При мощности сигнала, исходно недостаточной для развития мультипактора, дополнительный сигнал на близкой частоте позволяет включать и выключать разряд, эффективно поглощающий сверхвысокочастотное излучение. При разности частот до 40 МГц достигается время включения около 100 нс. Включение второго сигнала в тракте с резонатором (с частотой, лежащей в полосе резонатора) также приводит к развитию разряда и переводит резонатор из режима прохождения в режим отражения.

ВВЕДЕНИЕ

Мультипактор, или вторично-эмиссионный резонансный разряд [1, 2], — хорошо известное явление в вакуумной высокочастотной электронике. Исследованию свойств разряда в различных устройствах, в том числе и в условиях, когда он может нарушать нормальную работу сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов, посвящено немало работ (см., например, [3–5] и содержащиеся там ссылки), относящихся в основном к двустороннему разряду и разряду на диэлектрике. Для электроники больших мощностей актуален также односторонний СВЧ разряд во внешнем статическом магнитном поле, которое используется для формирования и транспортировки интенсивных электронных потоков, — так называемый разряд в скрещённых полях [1, 6–8]. В отличие от двухстороннего разряда, такой разряд практически не зависит от расположения поверхностей в системе и может охватить значительную часть поверхности прибора.

Согласно исследованиям [9], выполненным в трёхсантиметровом диапазоне длин волн, время развития мультипактора в скрещённых полях до насыщения составляло $10 \div 15$ нс, а поглощаемая разрядом удельная мощность (эта мощность в конечном итоге рассеивалась в металлической стенке) превышала в эксперименте 4 кВт/см^2 и ограничивалась лишь мощностью входного СВЧ источника. Установлено также, что благодаря большим разрядным токам и высокой концентрации электронов порядка $10^{11} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$, близкой к критической для данной частоты излучения, мультипактор способен перестраивать резонатор и переводить его из режима пропускания сигнала в режим отражения [10].

Эти свойства одностороннего мультипакторного разряда делают привлекательным его применение в волноводах и резонаторах с объёмными пространственно-развитыми модами с целью создания электрически управляемых поглощающих устройств и быстрых переключателей излучения, работающих при мощностях в десятки и сотни мегаватт. Подобные приборы востребованы для обеспечения решения широкого круга научных и технических задач, например нагрева и стабилизации плазмы в токамаках, компрессии электромагнитных импульсов, создания ускорителей

элементарных частиц нового поколения — суперколлайдеров, радиолокации, борьбе с раковыми клетками на основе локальной СВЧ гипертермии и др.

В предыдущей серии экспериментов [9–11] управление мультипактором, т. е. его включение и выключение, выполнялось путём включения и выключения магнитного поля требуемой напряжённости между СВЧ импульсами. При таком способе управления разрядом трудно обеспечить характерное время переключения менее 1 мс: этому препятствует индуктивность соленоида и экранировка импульсного магнитного поля. Однако для ряда приложений требуется ещё более короткое время переключения.

В связи с этим представляется перспективным исследование поведения разряда в условиях сложения двух волн с отличающимися частотами. Интересен случай, когда амплитуда первого по времени сигнала недостаточна для развития разряда и только при включении второго близкого по частоте сигнала за счёт возникновения биений суммарная амплитуда сигналов периодически становится больше порогового уровня, т. е. создаются условия, благоприятные для развития разряда. В этом случае на интенсивность разряда и коэффициент поглощения первого сигнала можно влиять амплитудой второго (управляющего) сигнала, т. к. поглощаемая мощность СВЧ излучения пропорциональна третьей степени электрического поля [2, 8]. Ещё одна возможность влияния — изменение периода биений сигналов — основана на том, что для получения наиболее интенсивного, т. е. насыщенного, разряда, когда его ток ограничен пространственным зарядом электронов, требуется несколько десятков циклов последовательных соударений электронов разряда с поверхностью. Если частоты СВЧ сигналов разнести на достаточно большую величину, то за период биений разряд не будет развиваться. В последнем случае включение второго сигнала можно использовать для подавления ранее возникшего мультипакторного разряда.

Постановка соответствующего эксперимента может представлять интерес с точки зрения уточнения скорости развития разряда и возможности его существования в быстро нарастающем и спадающем СВЧ поле. Надежда на то, что разряд будет существовать и в таких условиях, связана с его нечувствительностью по отношению к напряжёностям магнитного и СВЧ электрического полей.

Ниже приводятся результаты экспериментального исследования мультипакторного разряда в трёхсантиметровом диапазоне длин инициирующих его волн в прямоугольном волноводе и цилиндрическом резонаторе в условиях сложения двух волн с отличающимися частотами.

1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты по исследованию мультипакторного разряда проводились на том же стенде и с использованием того же волновода и резонатора, что и в опытах с единственным СВЧ источником [9–11]. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Выходное излучение от двух СВЧ источников (мощных магнетронов 1 и 2, частота каждого из которых могла перестраиваться в диапазоне 9,1÷9,8 ГГц) вводилось в один СВЧ тракт с помощью двойного волноводного тройника 3, неиспользуемый симметричный выход которого заканчивался согласованной нагрузкой 5. СВЧ тракт суммарного излучения мог быть подключён для исследования как волновода 11 со стандартным сечением 23 × 5 мм со свёрнутым в кольцо рабочим участком (вариант (а), схема взята из [11]), так и цилиндрического резонатора 12 с модой TM_{011} и добротностью 420 (вариант (б) — эта часть схемы описана в [10]). В обоих вариантах разряд возникал в зоне продольного однородного магнитного поля, создаваемого импульсным соленоидом 16, при наличии перпендикулярного к нему радиального СВЧ электрического поля. В этих условиях электроны разряда дрейфовали поперёк силовых линий магнитного поля и могли совершать большое число последовательных циклов соударения с поверхностью, двигаясь по кругу, что обеспечивало их размножение и достижение

жённые от исследуемых устройств 11 и 12, благодаря мостовым свойствам волноводного тройника 3 проходили в СВЧ тракты магнетронов и полностью поглощались с помощью циркуляторов, которыми магнетроны были защищены от отражённой волны. Мощность магнетронов регулировалась напряжением источников питания, частоты — перемещением специальных плунжеров, а длительность и момент начала СВЧ импульсов — с помощью генератора задержанных импульсов, управлявшего стартом и срывом высоковольтного питающего импульса независимо для каждого магнетрона. В качестве измерителя мощности использовался импульсный твёрдотельный калориметр [12]. Для контроля падающей, отражённой и прошедших через волновод или резонатор волн в тракте прямоугольного сечения были установлены направленные волноводные ответвители. Для регистрации огибающих импульсов использовались детекторы с выходным сигналом, пропорциональным мощности СВЧ импульса.

Эксперимент проводился в условиях термического нагрева стенок вакуумной камеры 5 и волноводов с целью удаления с их поверхностей адсорбированных молекул; с помощью специального нагревателя 7 температура волновода или резонатора могла быть доведена до 450 °С; вакуум с остаточным давлением $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. создавался с помощью криосорбционного насоса.

Исследование проводилось в режиме однократных импульсов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Исследование мультипакторного разряда в стандартном волноводе (рис. 1а)

На вход исследуемого прямоугольного волновода подавалось излучение от двух магнетронов с разными частотами двумя последовательными импульсами или с их наложением друг на друга. Мощности сигналов на каждой из частот были выбраны примерно одинаковыми (см. рис. 2а) и на десять процентов ниже порогового уровня, так что при подаче сигналов по отдельности разряд в волноводе не возникал. Частота первого (опорного) сигнала сохранялась неизменной и равнялась 9,1 ГГц, а частота второго сигнала могла изменяться относительно первого от 0 до 700 МГц в сторону повышения. Напряжённость магнитного поля составляла 1,5 кЭ и соответствовала середине зоны, в которой реализуются условия для развития основной (см. [6, 7]) моды разряда в СВЧ поле опорного сигнала [9]. Второй сигнал с отличающейся частотой также находился в пределах этой зоны.

Эксперимент показал, что включение второго сигнала во время прохождения импульса первого сигнала через волновод приводит к возникновению разряда с пульсирующей интенсивностью: он возникает в те моменты времени, когда суммарное поле выше критического значения, а в остальное время угасает. Выключение второго сигнала приводило к полному исчезновению разряда (см. рис. 2б и в). Описанная картина наблюдалась во всём диапазоне Δf разности частот сигналов. При разности частот 1 и 30 МГц разряд быстро развивался (примерно за 100 нс), и мощность, поглощаемая им, достигала 30÷50 % от суммарной мощности двух сигналов (см. рис. 3а и б). Измерения интенсивности отдельных спектральных линий, выполненные с помощью гетеродинного метода, показали, что поглощение сигналов на обеих частотах происходит примерно одинаково. Такой характер поглощения был подтверждён и измерением мощности отдельных сигналов, выделенных полосовым фильтром.

С увеличением разности частот время установления разряда росло и могло достигать единиц микросекунд. Более детальное рассмотрение выявило следующую картину (см. рис. 3). При разности частот 1 МГц осциллограммы демонстрировали возникновение разряда на первом же периоде биений, что проявлялось в резком падении мощности прошедшего сигнала при достижении СВЧ излучением мощности определённого уровня (уровня А на рис. 3а). Видимое исчезновение

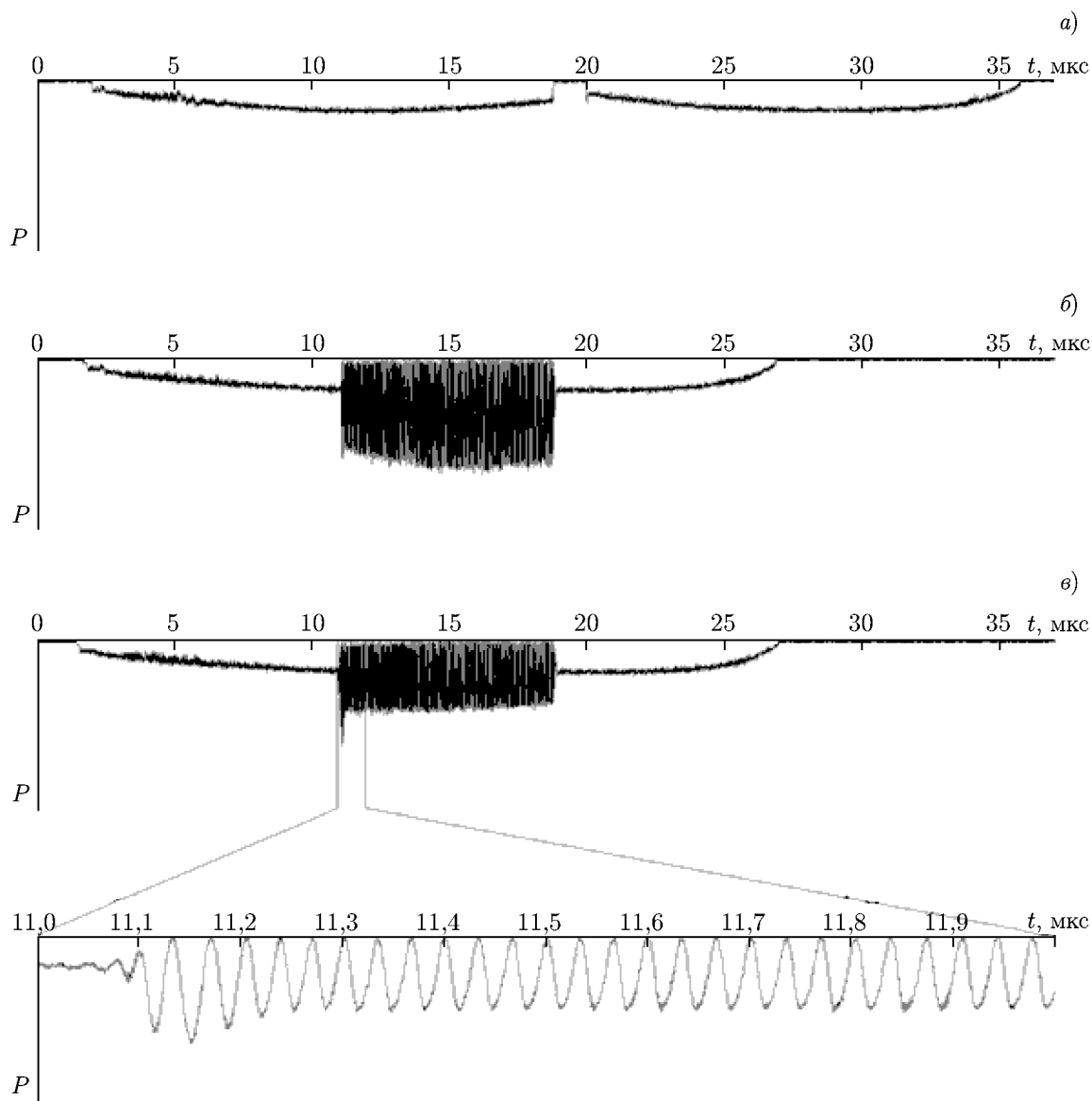


Рис. 2. Осциллограммы огибающих $P(t)$ для СВЧ импульсов с мощностью ниже порога возникновения разряда: панель (а) — исходные импульсы от двух магнетронов с различными частотами, панель (б) — импульсы частично наложены друг на друга при выключенном магнитном поле, панель (в) — включено оптимальное для разряда магнитное поле (на врезке показано наложение сигналов при большем временном разрешении). Разность частот равна 30 МГц

разряда, т. е. исчезновение поглощения СВЧ сигнала, происходило начиная с заметно меньшего уровня (уровень В). Этот гистерезис, который наблюдался и в прежних экспериментах [9], скорее всего, отражает тот факт, что возникновение разряда происходит в отсутствие, а исчезновение — при наличии существенного влияния на фазировку электронов их пространственного заряда. Повторное возникновение разряда происходило при уровне С, который заметно ниже уровня А, что свидетельствует о том, что за время между максимумами, когда СВЧ поле недостаточно для размножения электронов, первоначальные условия полностью не восстанавливаются. Эти особенности разряда, очевидно, препятствуют подавлению разряда путём уменьшения периода биений.

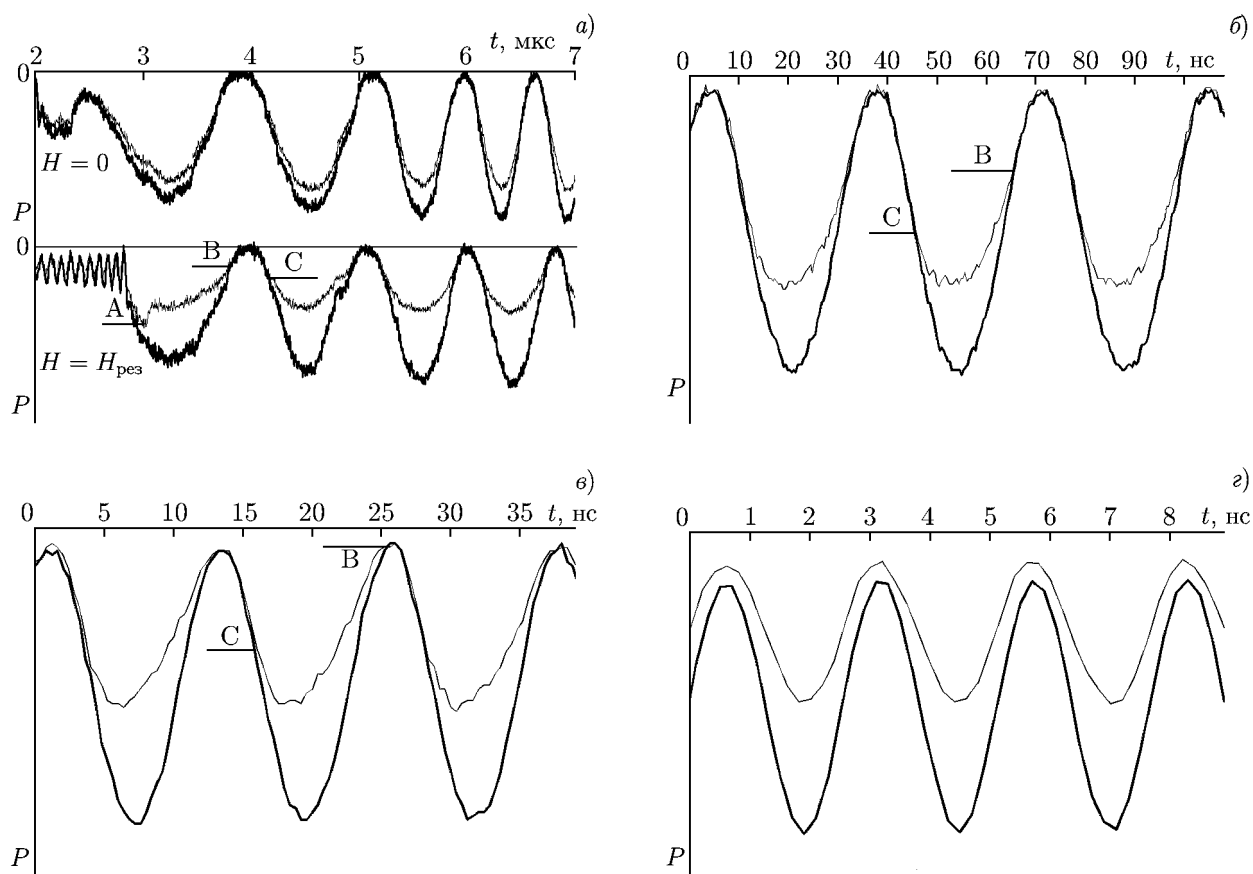


Рис. 3. Осциллограммы биений $P(t)$ двух волн при различных разностях частот: панель (а) — 1 МГц (вверху при отключенном, а внизу при наиболее благоприятном для разряда магнитном поле, входной волне отвечает толстая линия, выходной — тонкая линия); (б) — 30 МГц; (в) — 82 МГц; (з) — 390 МГц (в трёх последних случаях показаны биения только выходной волны при наличии магнитного поля (тонкие линии) и без него (толстые линии))

Для определения характерного времени восстановления условий разряда был проведён эксперимент, в котором регистрировались пороги возникновения разрядов, инициируемых двумя последовательными достаточно мощными импульсами, промежуток времени между которыми мог изменяться. Длительность каждого из этих СВЧ импульсов составляла около 15 мкс. Вначале, вплоть до задержки 3 мс, изменения пороговых уровней были незаметны, а затем постепенно, по мере достижения задержкой $6 \div 9$ мс, порог возникновения разряда во втором по времени импульсе возрастал, приближаясь к порогу возникновения разряда в первом импульсе, и при дальнейшем увеличении задержки уже не менялся. Таким образом, в этом эксперименте первоначальные условия восстанавливались за время $6 \div 9$ мс. Отметим, что напряжённость импульсного магнитного поля во всём этом временном промежутке соответствовала резонансному значению для основной моды разряда.

Наблюдаемое довольно продолжительное время восстановления, по-видимому, можно объяснить тем, что по окончании СВЧ импульса остаются свободные или слабо связанные электроны, которые понижают пороговое значение СВЧ поля, при котором возникает разряд. Такие «долгоживущие» электроны могут появиться, например, в результате зарядки диэлектрических плёнок, трудно удаляемых термическим путём. Ещё одной причиной может стать образование плазмы в результате десорбции и последующей ионизации электронами разряда молекул, адсорбирован-

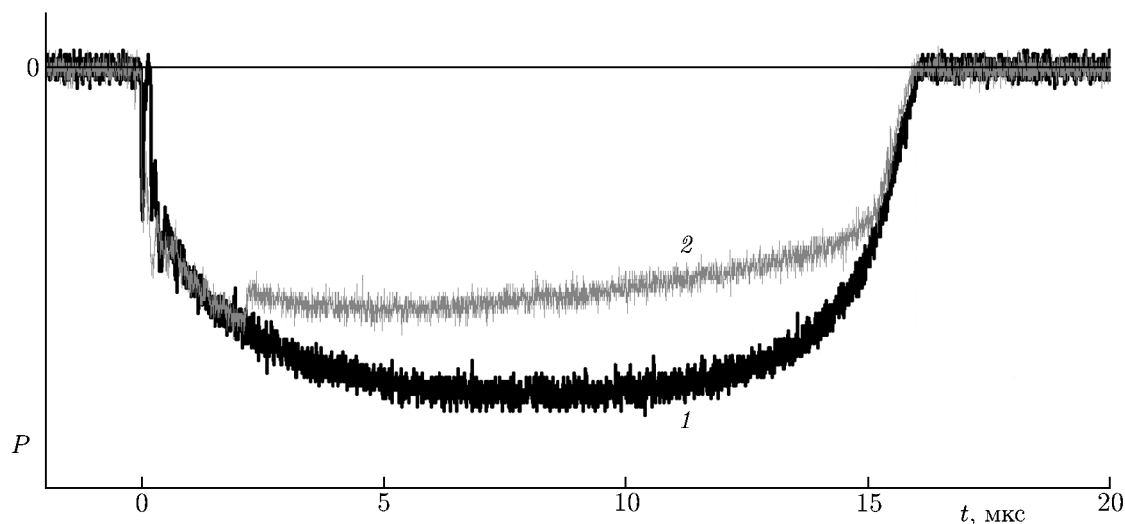


Рис. 4. Мощность СВЧ волны, прошедшей через область разряда в волноводе (кривая 2), в сравнении со случаем волновода без разряда (кривая 1). Виден результат накопления положительных ионов, компенсирующих пространственный заряд электронов в разряде

ных на поверхности вакуумного объёма [1]. После окончания СВЧ импульса плазма медленно распадается.

Следует отметить, что характерное время этого распада совпадает с временем порядка 10 мс релаксации в магнитном поле плазмы, возникающей при осаждении на коллекторе электронного пучка в СВЧ приборах большой мощности [13, 14]. Релаксация этой замагниченной плазмы происходит путём движения вдоль магнитной силовой линии к стенке камеры хорошо удерживаемых магнитным полем электронов в паре с компенсирующими их заряд ионами. Опираясь на сходство экспериментальных условий, можно предположить, что механизм релаксации разряда в данном случае тот же: после окончания СВЧ импульса «долгоживущие» электроны оседают на стенке за то же характерное время, что и компенсирующие ионы, накопленные во время СВЧ импульса.

Возможным экспериментальным подтверждением этого механизма релаксации является тот факт, что сокращение длительности разряда (в данном случае — времени воздействия десорбирующего и ионизирующего факторов) в первом СВЧ импульсе до 0,2 мкс привело к восстановлению первоначального уровня А во втором импульсе уже через 3÷4 мс вместо указанных выше 6÷9 мс.

Ещё одним подтверждением накопления ионов в разряде может служить постепенное увеличение со временем доли поглощённой разрядом мощности одночастотного СВЧ импульса (см. осциллограмму на рис. 4). Таким образом, скорее всего, проявляется компенсация объёмного заряда мультипакторных электронов ионами, что, в свою очередь, создаёт условия для увеличения тока насыщенного разряда и увеличивает поглощение им СВЧ излучения.

Детальное рассмотрение разряда при большей разности частот в 30 МГц и выше показало, что токи разряда не успевают достичь насыщения в течение одного периода биений. Однако наличие «долгоживущих» электронов позволяет достичь насыщения за несколько периодов (см. рис. 2в). По-видимому, по этой же причине с увеличением разности частот снижается уровень СВЧ поля, при котором происходит исчезновение разряда (уровень В, см. рис. 3а–в). Далее при ещё большей разности частот (см. рис. 3г, $\Delta f \approx 390$ МГц) поглощение излучения наблюдается, но начало и конец фазы разряда отсутствуют, т. е. поглощение не прерывается. Однако в последнем случае на профиль осциллограммы также оказывает влияние инерционность детектирующих цепей.

Высокий вакуум при безмасляной откачке и нагревание стенок вакуумной камеры до 400÷260

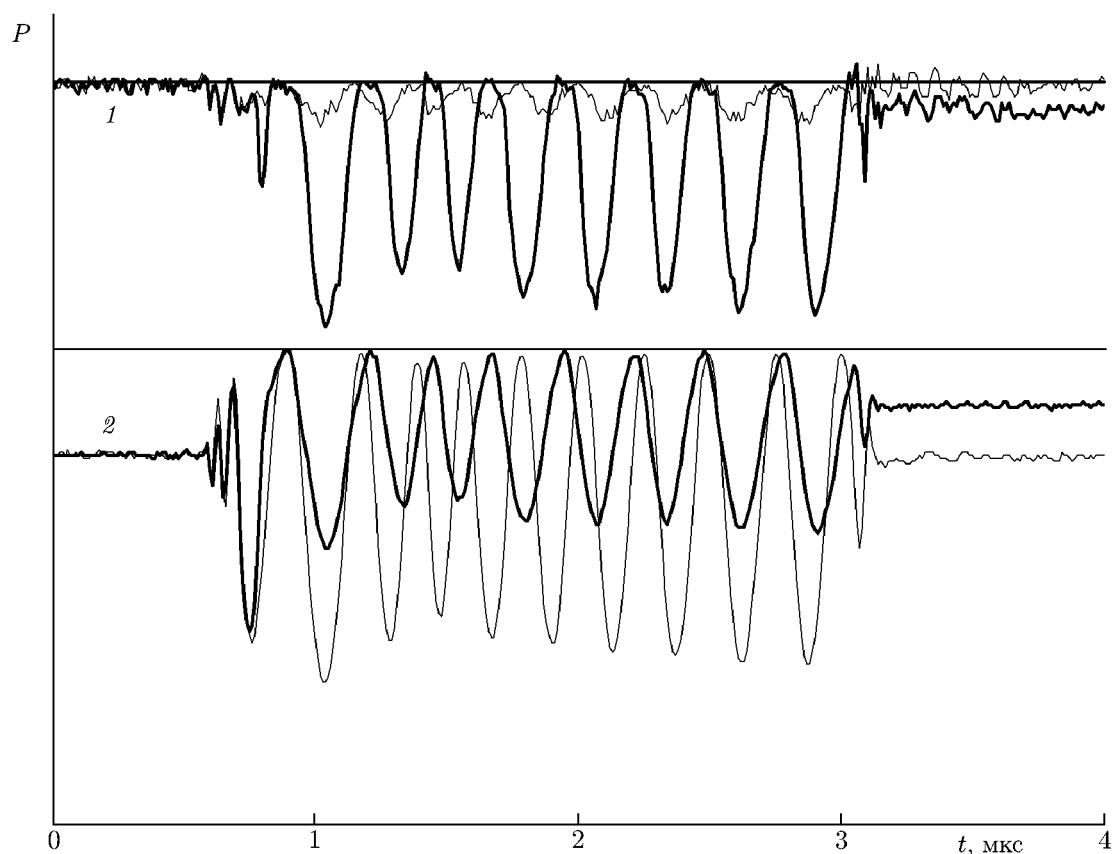


Рис. 5. Огибающие P сигналов отражённой волны (кривая 1) и прошедшей волны (кривая 2) при наблюдении возникновения и исчезновения разряда в резонаторе: тонкая линия — магнитное поле выключено; толстая линия — магнитное поле наиболее благоприятно для развития разряда

$\div 500$ °C — обычно достаточные меры для удаления адсорбированных молекул с поверхности. Однако на поверхности из сплава Л96, по-видимому, остаётся большое количество поверхностных неоднородностей, удерживающих адсорбированные молекулы, и она оказывается недостаточно чистой.

По-видимому, за счёт подбора специальных высоковакуумных материалов и более тщательной тренировки поверхности (например, в режиме с периодическим повторением импульсов) можно в какой-то мере изменить наблюдаемые свойства разряда, т. е. уменьшить время восстановления исходных условий после окончания СВЧ импульса или даже сделать его короче периода биений и, может быть, подавить развитие разряда путём применения больших разностей частот.

В эксперименте, результат которого показан на рис. 2, мощность двух СВЧ источников устанавливалась примерно одинаковой. Однако и в том случае, когда один из сигналов (управляющий) по мощности в 3–4 раза меньше опорного, существует возможность аналогичного управления разрядом, что и было продемонстрировано.

Одной из особенностей разряда стало появление спектральных гармоник на комбинационных частотах в СВЧ сигнале, прошедшем через разряд, мощности которых составляли единицы процентов от мощности исходного сигнала. Это указывает на нелинейный характер взаимодействия излучения и электронов разряда и подтверждает наличие высокой концентрации пространственного заряда.

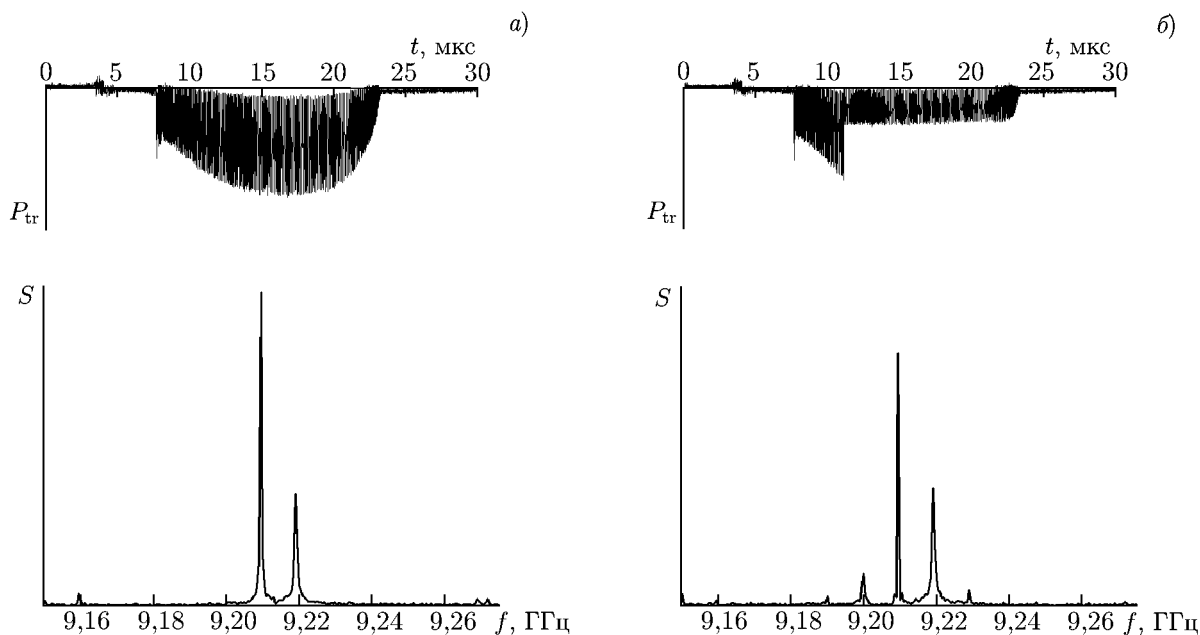


Рис. 6. Огибающая S и спектр P_{tr} сигнала прошедшей волны: панель (а) — магнитное поле выключено; панель (б) — магнитное поле наиболее благоприятно для развития разряда

2.2. Мультипакторный разряд в цилиндрическом резонаторе (рис. 1б)

В эксперименте с разрядом в резонаторе частоты обоих сигналов располагались в полосе пропускания резонатора $\Delta f \approx 22$ МГц. Частота первого (управляемого) сигнала настраивалась на центральную частоту резонатора, а второго — на несколько мегагерц ниже центральной частоты. Уровень мощности каждого из сигналов был на десять процентов ниже порогового уровня возникновения разряда, и при подаче сигналов по отдельности разряд в резонаторе, как и в волноводe, не инициировался.

При сложении двух сигналов возникали биения с большим превышением порогового уровня для возникновения разряда (см. рис. 5). Как правило, разряд возникал и полностью развивался в течение первого же периода биений. При этом разряд расстраивал резонатор и переводил его из режима полного прохождения сигналов в режим частичного отражения, что проявлялось в росте амплитуды огибающей отражённого сигнала. С окончанием периода биения разряд угасал и во втором периоде инициировался при более низком уровне СВЧ поля, что, как и для разряда в волноводe, свидетельствует о влиянии тех же факторов на порог его возникновения.

С ростом в максимумах биений СВЧ поля в резонаторе интенсивность разряда сначала нарастала, а расстройка резонатора увеличивалась, что, как и в прежних экспериментах [10], приводило к уменьшению проходящего и увеличению отражённого сигнала. Однако при дальнейшем увеличении мощности сигналов разряд начинал ослабевать и полностью разрушался, о чём можно судить по отсутствию ослабления прошедшего сигнала и исчезновению отражений. Как и в [10], это можно объяснить влиянием высокочастотного потенциала (силы Миллера) на электроны разряда и вытеснением этих электронов в зону более слабого СВЧ поля (см. также [15]).

Следует отметить, что спектр выходного излучения, как и в волноводe, обогащался спектральными гармониками на комбинационных частотах, но их интенсивность была в несколько раз больше. По-видимому, это объясняется тем, что излучение удерживалось резонатором в зоне разряда и поэтому его взаимодействие с разрядом оказывалось более интенсивным (см. рис. 6).

ВЫВОДЫ

Исследован мультипакторный разряд в скрещённых СВЧ электрическом и квазистатическом магнитном полях, возникающий в условиях биений при наложении двух волн с близкими частотами. Эксперименты с разрядом в прямоугольном волноводе в трёхсантиметровом диапазоне длин волн продемонстрировали, что разряд развивается и существует в широком диапазоне разности частот сигналов, простирающемся до 700 МГц. При мощности, исходно недостаточной для развития мультипактора в волноводе, дополнительный сигнал на близкой частоте позволяет включать и выключать разряд, эффективно поглощающий СВЧ излучение. При разности частот до 40 МГц достигается время включения около 100 нс. Включение второго сигнала в тракте с резонатором (с частотой в полосе резонатора) также приводит к развитию разряда и переводит резонатор из режима прохождения в режим отражения. Обнаружено нелинейное рассеяние излучения на электронном облаке разряда, приводящее к появлению в выходном спектре комбинационных частот.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и РФФИ (грант 12–02–00330).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сливков И. Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
2. Александров А. Ф., Бляхман Л. Г., Галузо С. Ю., Нечаев В. Е. // Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 3. Горький: ИПФ АН СССР, 1983. С. 219.
3. Semenov V., Nechaev V., Rakova E. // Proc. Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas. V. 2. Inst. Appl. Phys. RAS, 2006. P. 635.
4. Fuks R. // Microwave J. 2011. V. 54, No. 5. P. 206.
5. Ming Yu. // IEEE Microwave Magazine. 2007. V. 8, No. 5. P. 88.
6. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М.: Госатомиздат, 1961.
7. Бляхман Л. Г., Нечаев В. Е. // Журн. тех. физ. 1980. Т. 50, № 4. С. 720.
8. Бляхман Л. Г., Горшкова М. А., Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 11. С. 1004.
9. Иляков Е. В., Кулагин И. С., Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 12. С. 979.
10. Вихарев А. А., Иляков Е. В., Кузиков С. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 12. С. 908.
11. Иляков Е. В., Кулагин И. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 10. С. 758.
12. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Ковнеристый Ю. К. и др. // Приборы техн. экспер. 1992. № 2. С. 153.
13. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кораблёв Г. С. и др. // Тез. докл. 7 Всесоюз. симпоз. по сильно-точной электронике. Ч. 1. Томск, 1988. С. 176.
14. Pyakov E. V., Korablyov G. S., Kulagin I. S., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26, No. 3. P. 332.
15. Semenov V. E., Zharova N. A., Anderson D., et al. // Phys. Plasmas. 2010. V. 17, No. 12. Art. no. 123503.

Поступила в редакцию 19 апреля 2013 г.; принята в печать 15 мая 2013 г.

A MULTIPACTOR DISCHARGE IN CROSSED FIELDS UNDER THE CONDITIONS OF A COMBINATION OF TWO WAVES WITH CLOSE FREQUENCIES

E. V. Ilyakov and I. S. Kulagin

We study the multipactor discharge in crossed fields, specifically, a microwave electric field and a quasistatic magnetic field. The multipactor occurs under the conditions of superposition of two microwave pulses with close frequencies, which correspond to the three-centimeter wavelength range. Experiments in the rectangular waveguide demonstrates that the multipactor evolves and exists in a wide range of differences in the signal frequencies, which covers the interval up to 700 MHz. The specific power absorbed in the discharge is equal to several kW/cm², and the radiation is absorbed efficiently at the both frequencies. When the signal power is initially insufficient to ensure the multipactor development, an additional signal at a close frequency allows one to switch the discharge, which absorbs microwave efficiently, on and off. At the frequency difference up to 40 MHz, the achieved switch-on time is about 100 ns. Switching-on of the second signal in the line with a resonator cavity, which has a frequency belonging to the cavity frequency band, also results in the discharge development and switches the cavity from the transition regime to the reflection regime.