

УДК 537.5

МУЛЬТИПАКТОРНЫЙ РАЗРЯД В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ ТРЁХСАНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Е. В. Иляков, И. С. Кулагин

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты экспериментального исследования одностороннего мультипакторного разряда в скрещенных полях в прямоугольном волноводе трёхсантиметрового диапазона длин волн. Исследован разряд с дрейфом электронов по широкой стенке волновода вдоль и поперёк оси волновода в стоячей и бегущей волнах. Установлено, что мультипакторный разряд способен развиваться и интенсивно поглощать излучение в условиях, когда сверхвысокочастотное (СВЧ) поле неоднородно и на участках поверхности между узлами поля электроны при размножении могут совершать лишь ограниченное число (20–30) последовательных соударений. Удельная мощность, поглощаемая разрядом, при напряжённости СВЧ поля порядка 30 кВ/см составляла несколько киловатт на квадратный сантиметр. Полученные данные позволяют прогнозировать существование разряда в волноводах и резонаторах приборов, в которых для транспортировки излучения повышенной мощности используются объёмные пространственно развитые моды, в т. ч. и со сложной структурой СВЧ поля, где азимутальное расстояние между узлами поля сравнимо с длиной, на которой разряд становится насыщенным. Проведённые оценки показывают, что концентрация электронов в разряде оказывается порядка критической для использованной частоты излучения. Продемонстрированные свойства мультипакторного разряда могут быть использованы для создания поглощающих устройств и управления свойствами резонаторов.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из разновидностей вторично-эмиссионного резонансного разряда, т. е. мультипакторного разряда [1–3], является односторонний разряд, развивающийся на поверхности волновода в скрещенных сверхвысокочастотном (СВЧ) электрическом и статическом магнитном полях. Он представляет особый интерес для СВЧ электроники больших мощностей, т. к. магнитное поле часто используется для формирования и транспортировки интенсивных электронных потоков в мощных СВЧ приборах. В рабочем пространстве последних напряжённость магнитного поля равняется, как правило, нескольким десяткам килоэрсед, однако в области выхода СВЧ излучения её значение уменьшается. В зоне, где циклотронная частота электронов может оказаться примерно равной половине частоты выходного излучения, создаются условия для развития мультипакторного разряда, который может охватить значительную часть поверхности выходного устройства. Как показали теоретические [4] и последние экспериментальные исследования [5], мощность, поглощаемая разрядом, может достигать в этих условиях десятков и даже сотен киловатт на квадратный сантиметр. Поэтому даже чисто электронный разряд, ток в котором переносят исключительно электроны, может нарушить нормальную работу СВЧ прибора. Положение усугубляется в условиях технического вакуума, когда на поверхности последнего присутствует большое количество адсорбированных молекул; в этом случае развитие мультипакторного разряда может привести к образованию плазменной среды и к СВЧ пробоем [6].

Ниже приведены результаты исследований, начатых в работе [5] и посвящённых измерению характеристик мультипакторного разряда на рабочей волне TE_{10} стандартного прямоугольного волновода, помещённого в статическое магнитное поле. Исследован разряд в скрещенных полях с дрейфом электронов по широкой стенке волновода вдоль и поперёк его оси в стоячей и бегущей

волнах. Знание свойств разряда в таких условиях особенно важно, поскольку он развивается не только во времени, но и в пространстве. Для того, чтобы ток разряда за счёт размножения электронов достиг своего насыщенного значения, величина которого ограничивается объёмным зарядом электронов, необходимы несколько десятков последовательных циклов соударения электронов с поверхностью, для чего требуется обеспечение некоторой длины разрядной поверхности [4]. Кроме того, на величину разрядного тока мультипакторного разряда может влиять пондеромоторная сила, действующая на электрон в неоднородном СВЧ поле, т. е. высокочастотный потенциал [7, 8]. Полученные данные позволяют прогнозировать существование разряда в волноводах и резонаторах приборов, в которых для транспортировки излучения повышенной мощности используются объёмные пространственно развитые моды, в т. ч. и со сложными структурами СВЧ полей, в которых азимутальное расстояние между узлами поля сравнимо с длиной, на которой разряд становится насыщенным. Развивающиеся в таких условиях разряды можно использовать для создания поглощающих устройств и управления свойствами резонаторов [9].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах [5] мультипакторный разряд исследовался в режиме бегущей волны при дрейфе электронов вдоль оси прямоугольного волновода. В этих экспериментах моделировались условия реальных приборов — структура и величина электрических СВЧ полей, наличие магнитного поля, вакуумные условия, материалы и т. д. В результате было установлено, что односторонний мультипакторный разряд способен развиваться за 15 нс и в режиме насыщения, даже при умеренной напряжённости СВЧ полей порядка 20 кВ/см, поглощать до нескольких киловатт мощности СВЧ излучения на квадратный сантиметр. В итоге в целом разряд поглощал более половины от подводимой к волноводу мощности СВЧ излучения, что соответствовало теоретическим предсказаниям [4]. Как известно, механизм энергообмена между электромагнитным излучением и электронами в мультипакторном разряде заключается в том, что под действием электрического СВЧ поля электроны набирают кинетическую энергию, а затем практически полностью отдают её при бомбардировке стенке волновода. Режим насыщения разряда достигается, когда электроны испытывают большое число соударений со стенкой при дрейфе вдоль оси волновода в однородном по этому направлению СВЧ поле бегущей волны. На рис. 1а приведена соответствующая схема эксперимента. Волновод 1 своей рабочей изогнутой в виде кольца частью помещался в зону однородного магнитного поля, направленного вдоль продольной оси z и характеризующегося профилем $H(z)$. Электрическая компонента СВЧ поля в волноводу была направлена по радиусу. Вдоль изогнутой части волновода 1 по азимуту укладывалось до нескольких сотен циклов размножения электронов. Волновод был изготовлен из стандартной прямоугольной трубы из сплава Л-96.

Следует напомнить, что для развития разряда требуется определённая энергия бомбардировки, лежащая в диапазоне между первым и вторым критическими потенциалами [4, 10]. В этом диапазоне коэффициент вторичной эмиссии σ больше единицы, так что число электронов при взаимодействии с поверхностью нарастает. Требуется также, чтобы величина магнитного поля лежала вблизи определённых значений — в пределах так называемых зон разряда [4, 6]. Например, вблизи магнитного поля H_0 , при котором циклотронная частота электронов ω_c вдвое меньше частоты СВЧ поля ω ($\omega_c = eH_0/(mc) \approx \omega/2$), электроны с небольшими начальными фазами совершают резонансное движение от поверхности и обратно за один период СВЧ колебаний, набирая до удара наибольшую энергию в заданном СВЧ поле. Этому режиму соответствует основная зона, или первая мода разряда. В области меньших магнитных полей, где циклотронная частота электронов в четыре, шесть и т. д. раз меньше частоты излучения, могут существовать

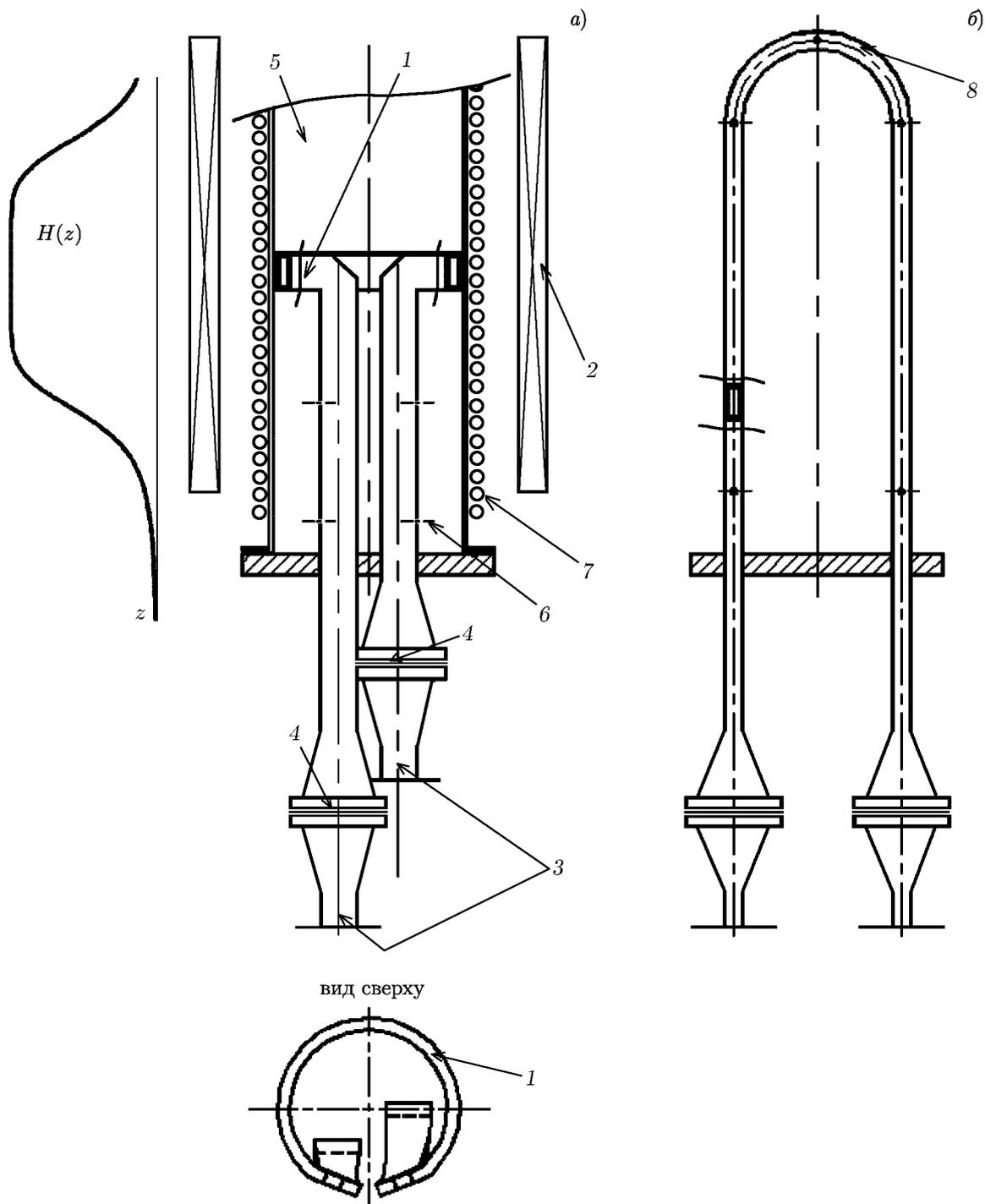


Рис. 1. Схемы экспериментов: 1 — изогнутый в виде кольца прямоугольный волновод с размерами поперечного сечения 23×5 мм, выполненный из стандартной волноводной трубы из сплава Л-96; 2 — соленоид; 3 — фланцы; 4 — вакуумные окна; 5 — область вакуума; 6 — отверстия для откачки; 7 — подогреватель; 8 — прямоугольный волновод для эксперимента с поперечным дрейфом разрядных электронов

более высокие моды разряда. В этих режимах электроны совершают более сложное движение от поверхности и обратно за два, три и т. д. периодов СВЧ колебаний. Однако с ростом номера

моды энергия электронов, падающих на поверхность, и величина токов разряда существенно уменьшаются. Кроме того, как показывает анализ [4, 6], с увеличением номера моды происходит сужение зоны устойчивости разряда по магнитному полю и разряд становится более чувствительным к начальному разбросу электронов по скоростям, так что в итоге разрядные токи и поглощаемая мощность быстро уменьшаются с ростом номера моды. В эксперименте [5] положение и ширина кривой поглощения $P(\gamma)$, где $\gamma = \omega_c/\omega$, соответствовали теоретическим предсказаниям для основной моды разряда в скрещенных полях, см. рис. 2. Более высокие моды разряда не наблюдались. Проведённая с помощью полученных в работе [4] формул оценка показала, что наблюдаемая поглощённая мощность, определяющая ток разряда и концентрацию электронов в режиме насыщения, в диапазоне энергий бомбардировки $0,5 \div 0,7$ кэВ соответствует коэффициенту вторичной эмиссии $\sigma \approx 1,6$, что, при существующем в различных справочных данных разбросе этой величины, не выходит за пределы ожидаемого.

Эксперимент [5] показал, см. рис. 2, что при магнитных полях, больших, чем магнитное поле, соответствующее основной моде разряда, зависимость $P(\gamma)$ выходит на плато, которое можно интерпретировать как поглощение излучения разрядом в тех областях подводящих волноводов, где спадающее магнитное поле соленоида близко к значению, при котором выполняются условия существования первой моды разряда. Небольшой наклон силовой линии магнитного поля к поверхности волновода в этих областях приводит лишь к малому отклонению траектории падения электрона от нормали. Таким образом, поглощение излучения разрядом в указанных областях заметно, несмотря на ограниченное число ($20 \div 30$) циклов размножения и неоднородность СВЧ поля волны TE_{10} в направлении дрейфа электронов поперёк оси волновода.

Для уточнения и подтверждения способности разряда эффективно поглощать СВЧ излучение в подводящих волноводах разработана схема эксперимента, использующая конструкцию, показанную на рис. 1б. Как и в предыдущей схеме, через фланец в область вакуума вводились два прямоугольных прямолинейных волновода δ с размерами поперечных сечений 23×5 мм из сплава Л-96, которые располагались параллельно оси системы и друг другу и соединялись между собой таким же волноводом в виде полукольца с радиусом 45 мм. Данная конструкция устанавливалась вместо волноводного кольца с подводящими волноводами в область вакуума 5. Длина прямолинейных участков волноводов была выбрана так, чтобы их большая часть находилась в однородном магнитном поле соленоида, т. е. в области, предназначенной для развития мультипакторного разряда, электроны в котором будут двигаться поперёк оси волновода по поверхности его широких стенок. Для того, чтобы исключить возникновение разряда в области полукольца волноводного тракта и его влияние на результаты измерения, эта часть волновода располагалась за пределами области однородного магнитного поля. Предварительные измерения исследуемого СВЧ тракта без магнитного поля и вакуума, проведённые на измерителе коэффициента стоячей

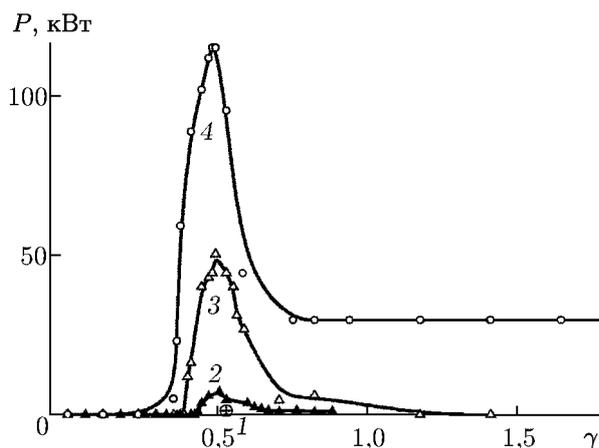


Рис. 2. Зависимость мощности СВЧ излучения P , поглощённой разрядом в бегущей волне в эксперименте по схеме рис. 1а, от нормированного магнитного поля $\gamma = \omega_c/\omega$ при различных мощностях входного СВЧ излучения (величина соответствующей максимальной напряжённости электрического СВЧ поля указана ниже в скобках): точка 1 — 37 кВт (8 кВ/см); кривая 2 — 44 кВт (9 кВ/см); 3 — 130 кВт (15 кВ/см); 4 — 220 кВт (20 кВ/см)

волны напряжения, показали, что ослабление сигнала на частоте излучения магнетрона от входного до выходного фланцев составляет 0,35 дБ, а коэффициент стоячей волны напряжения — около 1,3. Для схемы с волноводным кольцом эти показатели были примерно теми же: ослабление 0,4 дБ, а коэффициент стоячей волны напряжения — около 1,2. Результаты этих измерений в дальнейшем позволили уточнить мощность СВЧ излучения и эффективность его поглощения разрядом.

Остальные условия эксперимента были следующими:

1) в качестве источника излучения использовался магнетрон с выходной мощностью до 250 кВт, частотой излучения 9,13 ГГц, что соответствует длине волны 3,3 см, длительностями импульсов до 10 мкс и частотой следования импульсов до 1 Гц;

2) магнитное поле создавалось соленоидом, работающим в режиме однократных импульсов;

3) поперечные размеры волновода значительно превышали максимальную величину смещения электрона за период СВЧ поля, которое равнялось примерно 1 мм, что, в свою очередь, соответствовало нескольким сотым долям длины волны в волноводе;

4) для откачки волновода, помещённого в вакуумную камеру 5, в его узких стенках были просверлены отверстия 6 с диаметром 2 мм;

5) эксперимент проводился в условиях термического нагрева стенок вакуумной камеры 5 и волноводов с целью удаления адсорбированных молекул с их поверхностей; с помощью специального нагревателя 7 температура волновода могла быть доведена до 600 °С; вакуум с остаточным давлением $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. создавался с помощью криосорбционного насоса.

Уровень выходной мощности излучения магнетрона регулировался путём изменения питающего напряжения. Частота выходного излучения при этом менялась несущественно. В качестве измерителя мощности служил импульсный твёрдотельный калориметр [11]. Регистрация возникновения разряда проводилась с помощью волноводных направленных ответвителей и СВЧ детекторов по поглощаемой мощности методом сравнения мощности СВЧ излучения на выходе волновода при нулевом и благоприятном для разряда магнитном поле.

Обе схемы эксперимента на рис. 1 могли быть модифицированы для исследования разряда в стоячей волне. Для этого на выходном фланце волновода после измерительного направленного ответвителя вместо согласованной волноводной нагрузки или калориметра устанавливалась заглушка.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах с прямоугольным волноводом в схеме, когда электроны движутся вдоль оси волновода, см. рис. 1а, в режиме стоячей волны, было продемонстрировано возникновение разряда, хотя и менее интенсивного, чем в эксперименте с бегущей волной [5]. На рис. 3а приведены характерные осциллограммы напряжения U и сигналов с СВЧ детекторов волноводных направленных ответвителей, которые регистрировали излучение, однократно (P_1) и двукратно (P_2) прошедшее через волновод. Мощность входного излучения была равна 85 кВт. Осциллограммы для режима бегущей волны примерно с той же входной мощностью, см. рис. 3б, приведены для сравнения. Из осциллограмм рис. 3а видно, что при благоприятном для основной моды разряда магнитном поле в системе возникает мультипакторный разряд, приводящий к быстрому одновременному падению обоих сигналов. При этом мощность сигнала, дважды прошедшего через волновод уменьшалась на примерно вдвое большее значение, чем мощность однократно прошедшего сигнала. Такое соотношение наблюдалось для всех значений мощностей входного излучения, использованных в эксперименте, что представляется естественным в условиях, когда

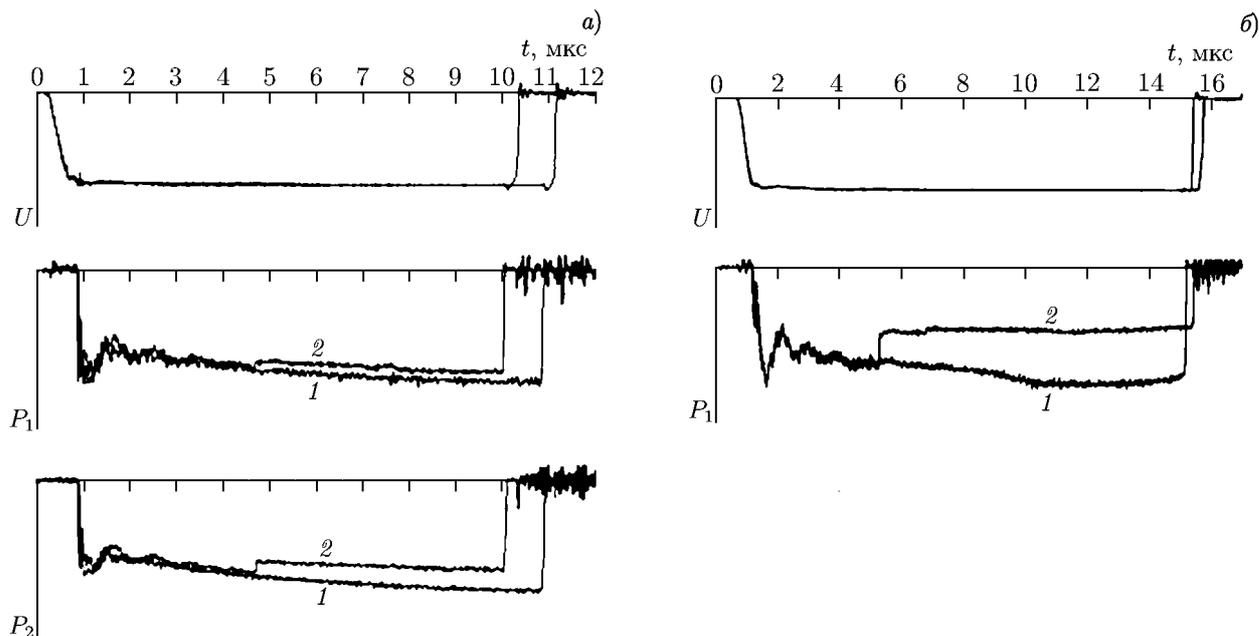


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на магнетроне U и сигналов с детектора мощности СВЧ излучения, прошедшего через зону разряда однократно (P_1) и двукратно (P_2) после отражения от заглушки в эксперименте по схеме рис. 1а: (а) — режим стоячей волны из-за отражения от заглушки; (б) — режим бегущей волны. Мощность входного излучения 85 кВт. Кривая 1 — магнитное поле отсутствует; 2 — магнитное поле настроено на максимум поглощения проходящего через разряд излучения

поглощённая при каждом проходе мощность много меньше мощности излучения, прошедшего через зону мультипакторного разряда.

Измерения показали, что в режиме стоячей волны порог возникновения мультипакторного разряда по уровню мощности СВЧ излучения понизился примерно вдвое по отношению к режиму бегущей волны, а не вчетверо. Последнее было бы естественно с учётом неизменности порога возникновения мультипакторного разряда по физически значимой величине — электрическому СВЧ полю, которое при создании стоячей волны увеличивается в 2 раза, что соответствует четырёхкратному увеличению мощности. Наблюдаемое несоответствие можно объяснить тем, что в используемой схеме эксперимента проявление мультипакторного разряда регистрируется по поглощению СВЧ излучения, для чего необходимо не просто рождение, а относительная «развитость» разряда, т. е. близость его к насыщению. Соответственно, требуется и наличие определённой пространственной протяжённости вдоль циклической траектории электронов в разряде зоны со значением СВЧ поля, превышающем его пороговую величину. В то время, как в бегущей волне требуемые условия возникают сразу во всём исследуемом пространстве, в стоячей волне это происходит только в окрестностях пучностей СВЧ поля, и лишь при достаточно большой его величине набирается необходимая для насыщения протяжённость благоприятной зоны.

На рис. 4 приведены зависимости мощности $P(\gamma)$, поглощенной разрядом на широких стенках кольцевого волновода с длиной 24 см при двойном прохождении волны и при различных уровнях входной мощности. Из него видно, что эта зависимость при низком уровне поглощения примерно повторяет ту, что была получена в режиме бегущей волны, см. рис. 2: имеется граница возникновения разряда со стороны малых магнитных полей, расположение которой означает видимое отсутствие более высоких мод разряда, связанное, как было указано выше, с разбросом электронов по скоростям; выраженный максимум поглощения; низкое плато со стороны больших

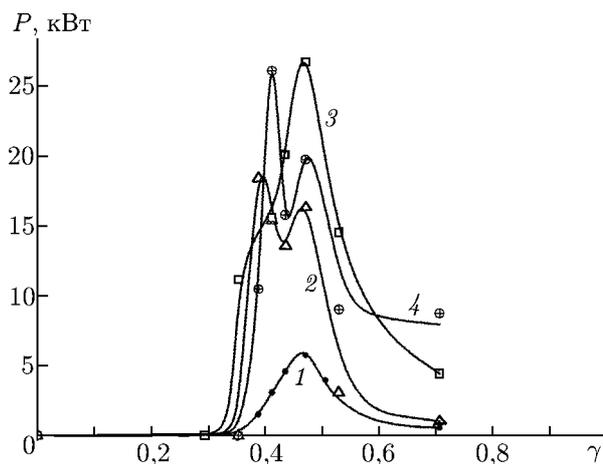


Рис. 4. Зависимость мощности СВЧ излучения P , поглощённой разрядом в стоячей волне в эксперементе по схеме рис. 1а, от нормированного магнитного поля $\gamma = \omega_c/\omega$ при различной мощности входного СВЧ излучения (величина соответствующей максимальной напряжённости электрического СВЧ поля указана ниже в скобках): кривая 1 — 50 кВт (20 кВ/см); 2 — 110 кВт (28 кВ/см); 3 — 130 кВт (30 кВ/см); 4 — 150 кВт (33 кВ/см). Регистрация поглощения производилась после двух проходов входной волны по кольцу

Хотя из предыдущего эксперимента со стоячей волной стало понятно, что достаточно интенсивный для регистрации поглощения проходящего через него излучения разряд может развиваться в неоднородных полях и на ограниченной поверхности, обеспечивающей 20÷30 циклов размножения, были проведены исследования мультипакторного разряда в режиме бегущей и стоячей волны с использованием второй экспериментальной схемы, см. рис. 1б, где распространение электронной лавины возможно лишь в направлении поперёк оси волновода. Этот эксперимент полностью моделирует ситуацию в подводящих волноводах на схеме рис. 1а и позволяет количественно оценить долю мощности СВЧ излучения, поглощённую в подводящих волноводах в эксперименте [5] и учесть эту погрешность при анализе его результатов. Эксперименты с использованием схемы рис. 1б подтвердили возможность возникновения мультипакторного разряда в подводящих волноводах схемы рис. 1а, т. е. в условиях ограниченной протяжённости зоны разряда. Сравнение поглощения излучения в режиме бегущей волны в схемах, изображённых на рис. 1а и рис. 1б, показало, что в последнем случае доля поглощённой мощности весьма низка, несмотря на вдвое большую площадь разряда, определяемую длиной волновода, так что средняя удельная мощность, поглощённая разрядом, примерно в пять раз ниже. С учётом соотношения длин рабочей части волноводного кольца и попадающих в однородное магнитное поле участков подводящих волноводов, средняя доля мощности СВЧ излучения, поглощённой разрядом вне волноводного кольца, составляла примерно 20%.

На рис. 5 приведено семейство кривых $P(\gamma)$ для мощности СВЧ излучения, поглощённой разрядом на широких стенках волновода в режиме стоячей волны, при различных уровнях входной мощности. Для режима бегущей волны характер зависимостей был тот же самый. Меньший уровень поглощения по сравнению со случаем, проиллюстрированным на рис. 2, объясняется отсутствием на значительной части разрядной поверхности режима насыщения.

магнитных полей, предположительно соответствующее резонансному поглощению в подводящих волноводах. В этом режиме наблюдалось примерное равенство доли поглощённой мощности при разных уровнях входной мощности, тогда как в режиме бегущей волны поглощённая мощность росла с увеличением мощности входного излучения пропорционально входному электрическому полю в третьей степени [12]. Наблюдаемое отличие можно объяснить действием уже упомянутых выше факторов, определяющих неполное развитие разряда в стоячей волне, а также, возможно, высокочастотного потенциала, выталкивающего электроны из областей с благоприятной для их размножения фазы СВЧ поля.

Таким образом, в режиме стоячей волны также возможно развитие мультипакторного разряда в скрещенных полях. Мощность, поглощаемая им, составляет величину 1÷2 кВт/см² при СВЧ поле около 30 кВ/см. Исходя из этого расчётная концентрация электронов в разряде примерно равна 10^{11} см⁻³, т. е. близка к критической для используемой частоты СВЧ излучения.

Хотя из предыдущего эксперимента со стоячей волной стало понятно, что достаточно интенсивный для регистрации поглощения проходящего через него излучения разряд может развиваться в неоднородных полях и на ограниченной поверхности, обеспечивающей 20÷30 циклов размножения, были проведены исследования мультипакторного разряда в режиме бегущей и стоячей волны с использованием второй экспериментальной схемы, см. рис. 1б, где распространение электронной лавины возможно лишь в направлении поперёк оси волновода. Этот эксперимент полностью моделирует ситуацию в подводящих волноводах на схеме рис. 1а и позволяет количественно оценить долю мощности СВЧ излучения, поглощённую в подводящих волноводах в эксперименте [5] и учесть эту погрешность при анализе его результатов. Эксперименты с использованием схемы рис. 1б подтвердили возможность возникновения мультипакторного разряда в подводящих волноводах схемы рис. 1а, т. е. в условиях ограниченной протяжённости зоны разряда. Сравнение поглощения излучения в режиме бегущей волны в схемах, изображённых на рис. 1а и рис. 1б, показало, что в последнем случае доля поглощённой мощности весьма низка, несмотря на вдвое большую площадь разряда, определяемую длиной волновода, так что средняя удельная мощность, поглощённая разрядом, примерно в пять раз ниже. С учётом соотношения длин рабочей части волноводного кольца и попадающих в однородное магнитное поле участков подводящих волноводов, средняя доля мощности СВЧ излучения, поглощённой разрядом вне волноводного кольца, составляла примерно 20%.

Как видно из рис. 4 и 5, максимумы кривых $P(\gamma)$ представляют собой совокупность из 2÷3 близко расположенных максимумов, в то время как на рис. 2, характеризующем насыщенный разряд, резонанс проявлялся в виде одного максимума. Наблюдаемое отличие объясняется, по видимому, ограниченностью числа циклов соударений электронов со стенкой в пределах пространства в окрестности середины широкой стенки прямоугольного волновода, где передача энергии стенке происходит наиболее эффективно. При определённом увеличении магнитного поля происходит возрастание на единицу количества циклов эффективных соударений, соответствующее переходу к следующему максимуму кривой $P(\gamma)$.

Увеличение доли поглощённой мощности при повышенных магнитных полях, объясняется, очевидно, появлением дополнительных мест в области полукольца, соединяющего волновода, где спадающее магнитное поле соленоида близко к резонансному. Окончательно убедиться в действительном отсутствии разряда при повышенных магнитных полях удалось в эксперименте с цилиндрическим резонатором с рабочей волной TM_{01} , результаты которого готовятся к публикации. В этом эксперименте величина напряжённости электрического СВЧ поля превышала пороговый уровень только на стенке резонатора и мультипакторный разряд возникал лишь в области резонансного магнитного поля, соответствующего первой моде разряда.

ВЫВОДЫ

Экспериментально установлена возможность развития мультипакторного разряда в прямоугольном волноводе в скрещенных СВЧ электрическом и статическом магнитном полях в режимах бегущей и стоячей волн, когда СВЧ поля неоднородны и на участках поверхности между узлами поля электроны при размножении могут совершать лишь ограниченное число (20÷30) последовательных циклов соударения. Удельная мощность, поглощённая СВЧ разрядом, при напряжённости СВЧ поля порядка 30 кВ/см составляла величину в несколько киловатт на квадратный сантиметр.

Оценки показывают, что концентрация электронов в разряде примерно равнялась 10^{11} см^{-3} и была сравнимой с критической для использованной частоты СВЧ излучения.

Данные свойства разряда могут быть использованы для создания поглощающих устройств и управления свойствами резонаторов, в т. ч. и со сложными структурами СВЧ полей.

Работа выполнена при частичной поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (госконтракт П584).

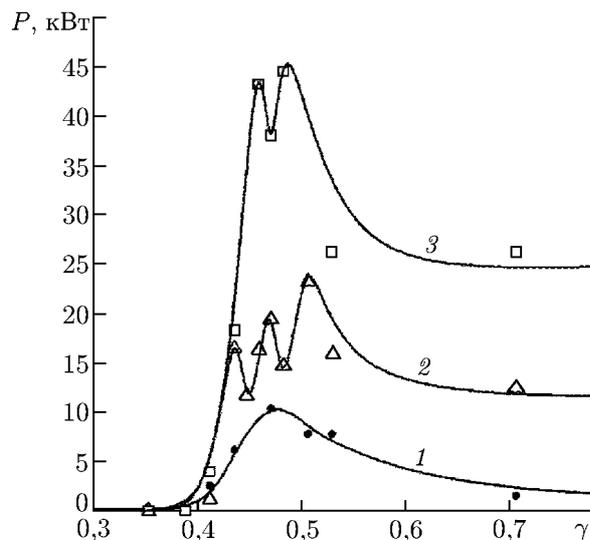


Рис. 5. Зависимость мощности СВЧ излучения P , поглощённой разрядом в стоячей волне в эксперименте по схеме рис. 1б, от нормированного магнитного поля $\gamma = \omega_c/\omega$ при различной мощности входного СВЧ излучения (величина соответствующей максимальной напряжённости электрического СВЧ поля указана ниже в скобках): кривая 1 — 30 кВт (15 кВ/см); 2 — 45 кВт (18 кВ/см); 3 — 75 кВт (23 кВ/см). Регистрация поглощения проводилась после двух проходов входной волны по волноводу

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М.: Госатомиздат, 1961.
2. Ганичев Д. А., Филатов В. А., Фридрихов С. А. // Радиотехника и электроника. 1972. Т. 17, № 8. С. 1639.
3. Бляхман Л. Г., Нечаев В. Е. // ЖТФ. 1980. Т. 50, № 4. С. 720.
4. Бляхман Л. Г., Горшкова М. А., Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 11. С. 1004.
5. Иляков Е. В., Кулагин И. С., Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 12. С. 979.
6. Александров А. Ф., Бляхман Л. Г., Галузо С. Ю., Нечаев В. Е. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1983. Вып. 3. С. 219.
7. Chojnacki E. // Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams. 2000. V. 3, No. 3. Art. no. 032001.
8. Semenov V. E., Zharova N. A., Anderson D., et al. // Phys. Plasmas. 2010. V. 17, No. 12. Art. no. 123503.
9. Forrer M., Milazzo C. // Proc. IRE. 1962. No. 4. P. 442.
10. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.
11. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Ковнеристый Ю. К. и др. // Приборы и техн. экспер. 1992. № 2. С. 153.
12. Иляков Е. В., Кулагин И. С., Нечаев В. Е. // Вакуумная наука и техника. Материалы XVI научно-техн. конф. М.: МИЭМ, 2009. С. 139.

Поступила в редакцию 1 июля 2011 г.; принята в печать 28 октября 2011 г.

**THE MULTIPACTOR DISCHARGE IN CROSSED FIELDS
IN A RECTANGULAR WAVEGUIDE OF THE 3-CM WAVELENGTH BAND**

E. V. Ilyakov and I. S. Kulagin

We present the results of an experimental study of a single-sided multipactor discharge in crossed fields in a rectangular waveguide of the 3-cm wavelength band. The discharge with the electron drift on the wide wall of the waveguide along and across the waveguide axis in a standing wave and a traveling wave are studied. It is found that the multipactor discharge is capable of developing and absorbing radiation intensively, if the microwave field is not uniform, and multiplying electrons can have only a limited number (20–30) of sequential collisions on the surface intervals between the field nodes. The specific power absorbed in the discharge amounted to several kilowatts per square centimeter for a microwave field of about 30 kV/cm. The obtained data allow one to predict the existence of the discharge in the waveguides and cavities of the devices, in which spatially developed volume modes are deployed to transport higher-power radiation including modes with complicated structures of the microwave field, where the azimuthal distance between the field nodes is comparable with the length, at which the discharge becomes saturated. The evaluations made show that the density of electrons in the discharge turns to be approximately equal to the critical value for the used radiation frequency. The demonstrated properties of the multipactor discharge can be used to develop absorbing devices and control cavity properties.