

УДК 537.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОММУТАЦИИ ВОЛНЫ TE_{01} КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА В СКРЕЩЁННЫХ ПОЛЯХ

*А. А. Вихарев, Е. В. Иляков, С. В. Кузиков, И. С. Кулагин**

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Экспериментально показана возможность управления симметричной волной TE_{01} круглого волновода (электрическое сверхвысокочастотное (СВЧ) поле которой на стенке равно нулю) с помощью мультипакторного разряда в скрещённых электрическом и магнитном полях, возбуждаемого в цилиндрическом резонаторе волной типа TM_{01} . Характерное время переключения резонатора определяется его добротностью и составляет $150 \div 200$ нс. Как показали эксперименты, предложенная схема позволяет практически полностью отражать поток энергии коммутируемого излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Мультипакторный, или вторично-эмиссионный резонансный, разряд [1–5] — давно описанное и достаточно хорошо известное явление. Мультипакторный разряд в настоящее время, в связи с продолжающимся развитием вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники, ускорительной и космической техники и т. д., представляет значительный интерес (см., например, [6–8] и содержащиеся там ссылки). С одной стороны, большая концентрация частиц в электронном облаке, значительные разрядные токи и мощности, рассеиваемые таким разрядом, его быстрое развитие и угасание, наряду с многообразием его форм, делают перспективным его использование в различных СВЧ устройствах, например, в быстрых СВЧ коммутаторах [9], динамических фотоэлектронных умножителях [4] и т. д. С другой стороны, мультипакторный разряд, благодаря этим же свойствам, часто проявляет себя как сопутствующий паразитный эффект, нарушающий нормальную работу различных устройств. Например, он ограничивает длительность импульса мощных релятивистских СВЧ приборов, вызывая пробой электродинамической системы или СВЧ окна [10–12], нарушает работу ускорителей [13] и т. д. В результате требуется принимать определённые меры для его подавления.

В теоретических [10, 14] и недавних экспериментальных [15–17] исследованиях, посвящённых одностороннему мультипакторному разряду в скрещённых СВЧ электрическом и статическом магнитном полях, было показано, что в трёхсантиметровом 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. Некритичность одностороннего разряда к величине зазора, в отличие от двустороннего разряда, позволяет ему существовать в широком диапазоне СВЧ полей. Это облегчает выполнение условий его возникновения и даёт ему возможность охватывать поверхности большой площади. Разряд такого типа, созданный в цилиндрическом СВЧ резонаторе, способен, как показал эксперимент, смещать его резонансную частоту [16]. Электронный слой мультипакторного разряда, охватывающий большую часть цилиндрической поверхности резонатора (концентрация электронов в котором близка к критической для данной частоты излучения

* ikulagin@appl.sci-nnov.ru

и составляет $10^{11} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$), вытесняет из своего объёма СВЧ поле, так что эффективные размеры резонатора изменяются. В результате соответствующего изменения резонансной частоты резонатора излучение, первоначально практически полностью проходившее через него, в основном, от него отражается¹.

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 при 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 др.

В работах [15, 16] управление мультипакторным разрядом осуществлялось между СВЧ импульсами путём включения и выключения магнитного поля с требуемой величиной. При таком способе управления индуктивность соленоида и экранировка импульсного магнитного поля не позволяют включать и выключать разряд за время, меньшее примерно 1 мс, что неприемлемо для ряда приложений.

В работе [17] исследовалась возможность управления разрядом путём подключения к резонатору второго СВЧ источника на близкой частоте, так что биения двухчастотного поля (на одной моде) периодически включали (в моменты превышения электрическим полем порогового уровня) и выключали разряд. Было показано, что время включения разряда может быть сокращено до 100 нс. К недостаткам данного метода можно отнести то, что для его реализации требуется достаточно большой уровень управляющего сигнала, не удаётся прервать прохождение излучения в моменты срыва разряда между биениями, а также наблюдается заметное поглощение разрядом управляемого излучения и недостаточно полное его отражение.

В данной работе приводятся результаты исследований новой схемы переключателя, которая открывает возможность в значительной степени устранить эти недостатки.

1. ОБСУЖДЕНИЕ СХЕМЫ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Предлагается схема (см. рис. 1), в которой управление потоком СВЧ излучения на симметричной волне TE_{01} круглого волновода осуществляется с помощью мультипакторного разряда в скрещённых полях, возбуждаемого в цилиндрическом резонаторе волной TM_{01} . Поперечные структуры полей управляемой и управляющей мод показаны на рис. 1.

Предполагалось, что для эффективной работы переключателя эти обе волны в отсутствие разряда возбуждают в резонаторе соответствующие колебания на своих резонансных частотах. Тогда, в общем случае, управляемая волна будет без отражений проходить через переключатель, а управляющая создаст в резонаторе необходимое для возникновения разряда электрическое поле. Естественно, что попутной задачей эксперимента является ответ на вопрос: будет ли электронный слой, созданный СВЧ разрядом на одной частоте, эффективно уменьшать радиус резонатора для моды на другой частоте.

В нашем случае, чтобы одновременно возбудить обе моды двумя одинаковыми магнетронами с фиксированными диапазонами частотной перестройки, были выбраны мода TE_{011} с одним экстремумом по продольной координате (частота 9,1 ГГц) и мода TM_{012} с двумя экстремумами по продольной координате (частота 10,1 ГГц).

¹ На этом же принципе смещения резонансной частоты работает СВЧ коммутатор с двухсторонним разрядом, описанный в [9].

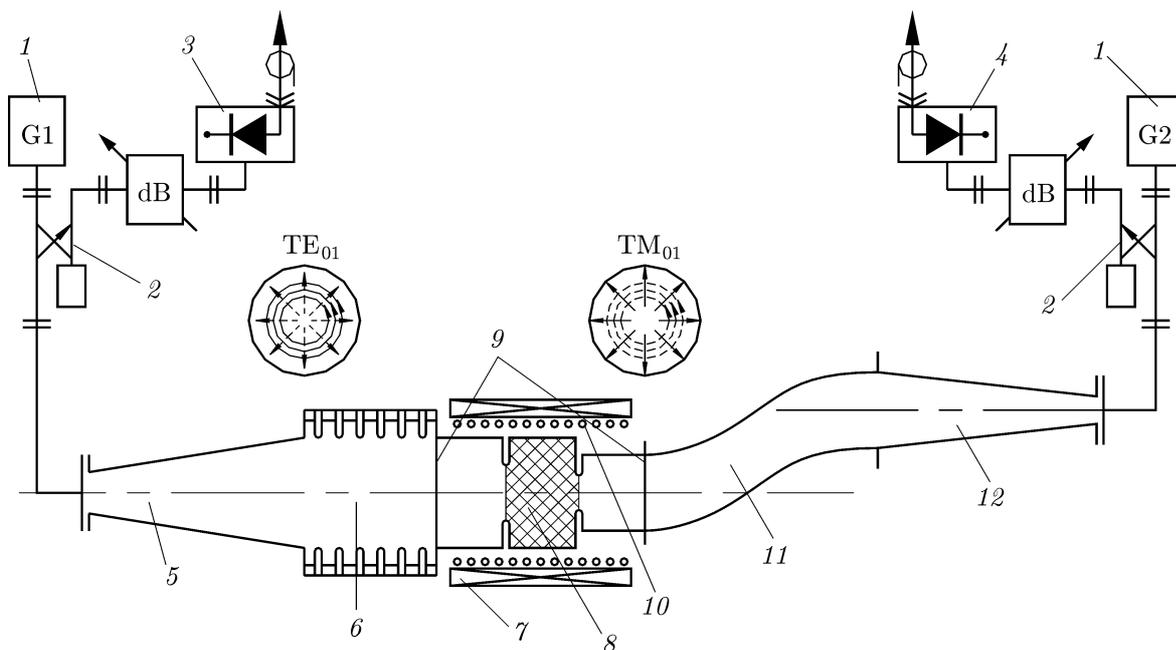


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — магнетроны, 2 — направленные ответвители, 3 — канал детектирования отражённой волны TE_{01} , 4 — канал детектирования отражённой волны TM_{01} , 5 — преобразователь Марье (преобразователь стандартной моды прямоугольного волновода в моду TE_{01}), 6 — волновой фильтр, 7 — соленоид, 8 — резонатор, 9 — окна, 10 — нагреватель, 11, 12 — двухсекционный преобразователь стандартной моды прямоугольного волновода в моду TM_{01}

У моды TE_{01} круглого волновода, как известно, электрическое СВЧ поле на стенке равно нулю. Это позволяет транспортировать с помощью неё через коммутатор излучение с большой мощностью. Это свойство, на первый взгляд, не способствует управлению волной с помощью разряда, локализованного как раз на цилиндрической стенке, т. е. вне зоны заметного электрического СВЧ поля. Однако из эксперимента, представленного ниже, будет видно, что это противоречие удалось разрешить с помощью резонатора с высокой добротностью (т. е. с повышенной чувствительностью к появлению электронного слоя на стенке), которую можно обеспечить при малых потерях в стенке, свойственных этой моде.

Как и в работе [16], для возбуждения мультипакторного разряда к резонатору подводилась волна TM_{01} , возбуждающая в резонаторе моду TM_{012} с достаточно большими аксиально-симметричными электрическими полями на цилиндрической поверхности. В её окрестности, в скрещённых СВЧ электрическом и продольном магнитостатическом полях, происходило каскадное размножение электронов при их циклическом движении по азимуту и насыщение разряда. В результате обеспечивалась площадь покрытия цилиндрической поверхности электронным слоем, достаточная для такого изменения резонансной частоты резонатора, которое необходимо для эффективного управления волной TE_{01} . Одновременно резонатор перестраивался и по отношению к управляющей волне (такая реакция резонатора на возникновение мультипакторного разряда была подробно изучена в работе [16]). Однако в силу существенно меньшей добротности по управляющей волне, амплитуда поля и интенсивность разряда оставались на необходимом для управления уровне.

Исходным требованием при конструировании резонатора, как было сказано выше, была достаточно высокая добротность для моды TE_{011} , чтобы слой электронов разряда мог перестроить резонатор из режима пропускания в режим отражения или наоборот. Расчёты показали, что при

добротности резонатора для моды TE_{011} около 10 000 уменьшение радиуса резонатора на 0,1 мм, имитирующее появление слоя электронов разряда, приводит к перестройке резонансной частоты резонатора примерно на 20 МГц, что в несколько раз больше полосы пропускания резонатора. Отметим, что расчётная высота подъёма траекторий электронов разряда над поверхностью (т. е. толщина слоя) при напряжённости электрического поля на стенке резонатора 20 кВ/см составляет около 0,5 мм, что позволяет надеяться на эффективное управление. Добротность резонатора для управляющей моды TM_{012} , примерно равная 500, осталась близкой к найденной в [16] величине. Измерения резонансных частот и добротностей на измерителе КСВН типа Р2-61 показали хорошее их совпадение с расчётными значениями.

Для максимального сходства условий существования разряда с созданными в предыдущих исследованиях [15–17] боковая поверхность резонатора изготавливалась из материала стандартной волноводной трубы с прямоугольным сечением — сплава Л96. Остальная часть резонатора и подводящие волноводы изготавливались из бескислородной меди.

Исследования проводились на том же стенде, что и в работах [15–17]; см. рис. 1. От магнетрона G1 (снабжённого развязывающим циркулятором) СВЧ излучение по прямоугольному тракту подаётся на преобразователь Марье 5, трансформирующий стандартную моду прямоугольного волновода в волну круглого волновода TE_{01} . Далее волна TE_{01} проходит через волновой фильтр 6, в котором она практически не ослабляется и не искажается, и возбуждает резонатор 8, ограниченный двумя диафрагмами. Дальнейшему прохождению волны препятствует волновод с критическим диаметром справа от резонатора. Резонатор рассчитан так, что на резонансной частоте волна из-за высокой добротности и омических потерь без отражения полностью поглощается в резонаторе. В эксперименте регистрировалось отражение этой волны в измерительном канале 3 как реакция переключателя на возникновение мультипакторного разряда.

Со стороны другой диафрагмы резонатор возбуждался на моде TM_{012} , которая получалась в результате последовательной трансформации излучения от магнетрона G2 специальными преобразователями 12 и 11 сначала в волну TE_{11} , а затем в волну TM_{01} круглого волновода. Далее волна, пройдя резонатор, поступала в волновой фильтр 6, рассчитанный на более чем десятикратное ослабление волны этого типа (излучение поглощалось в поглотителях, расположенных на дне канавок диафрагмированного волновода), и служащий для неё хорошей согласованной нагрузкой. Для контроля возникновения разряда и перестройки резонатора в тракте источника волны TM_{01} также был установлен направленный ответвитель на отражённую волну (измерительный канал 4).

Описанная схема хотя и не предусматривает явного прохождения управляемого излучения через резонатор (ради простоты схемы этим пришлось пожертвовать), однако демонстрирует возможности мультипакторного разряда управлять мощным излучением на симметричной TE -моды. В принципе, управляющую волну можно возбудить в резонаторе через отверстия связи в его цилиндрической стенке. Увеличив диаметр волновода с правой стороны резонатора и симметрично установив второй волновой фильтр, можно обеспечить развязку волн и дальнейшую транспортировку волны TE_{01} .

Цилиндрический резонатор 8 (см. рис. 1) помещался в однородное магнитное поле импульсного соленоида 7, так что силовые линии магнитного поля были направлены вдоль оси резонатора, а силовые линии СВЧ электрического поля моды TM_{012} — по радиусу. В процессе развития мультипакторного разряда кривизна цилиндрической поверхности с радиусом 20 мм практически не влияла на движение электронов ввиду малости пространственного масштаба их траекторий, равному расстоянию между их двумя последовательными соударениями с поверхностью и составляющему примерно $0,5 \div 0,7$ мм.

Для откачки резонатора, помещённого в вакуумную камеру из нержавеющей стали, в круг-

лом волноводе со стороны источника волны TM_{01} были прорезаны продольные щели, слабо возмущающие эту моду. На входе и выходе из круглых волноводов располагались окна для СВЧ излучения 9 из тонкой слюды. Эксперимент проводился при постоянной термической десорбции газа из стенок волновода для поддержки вакуума и обеспечения высокой электропрочности путём непрерывного нагрева камеры с помощью специального нагревателя 10, поддерживающего температуру волновода 400°C . Эта температура ограничивалась температурой плавления припоя, которым были спаяны элементы резонатора и подводных волноводов. Неполный вакуум с давлением $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. создавался с помощью криосорбционного насоса.

В качестве источников излучения использовались два магнетрона с отдельными источниками питания, выходной мощностью до 250 кВт, перестройкой частоты излучения при длительности импульса до 20 мкс и частоте следования импульсов до 1 Гц.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После нагревания резонатора до 400°C резонансные частоты понизились: для моды TE_{011} — на 90 МГц, а для моды TM_{012} — на 110 МГц, что хорошо соответствовало расчётам. Из-за снижения проводимости стенок резонатора при нагреве его добротность для моды TE_{011} снизилась до 7000. Частоты магнетронов были настроены на резонанс нагретого резонатора. Осциллограммы отражённых сигналов приведены на рис. 2. О возникновении разряда свидетельствовало резкое увеличение амплитуды отражённого сигнала в канале волны TM_{01} из-за перестройки резонатора мультипакторным разрядом (см. рис. 2а, осциллограмма 1 по сравнению с осциллограммой 2). Такая реакция резонатора на возникновение мультипакторного разряда была подробно изучена в работе [16]. В отсутствие разряда (достигаемого выключением магнитного поля) в случае точного резонанса амплитуда отражённого сигнала на этой моде была незначительна (см. рис. 2а, осциллограмма 2).

Осциллограмма отражённого сигнала в канале волны TE_{01} в отсутствие разряда приведена на рис. 2а (осциллограмма 4). Ввиду того, что из-за высокой добротности резонатора для моды TE_{011} ширина резонансной кривой составляет около 1,4 МГц, а частота выходного излучения магнетрона отслеживает напряжение на вершине его высоковольтного питающего импульса (кривая 5), точный резонанс выполняется лишь на ограниченном участке импульса — в данном случае в его центральной части, где отражения минимальны. Осциллограмма отражённого сигнала на моде TE_{01} при возникновении разряда приведена на рис. 2а (осциллограмма 3). Видно, что в момент появления волны TM_{01} и возникновения разряда (см. рис. 2а, осциллограмма 1) амплитуда отражённого сигнала на волне TE_{01} начинает быстро расти и достигает амплитуды при полном отражении. Измерения частоты показали, что разряд смещает резонансную частоту для моды TE_{01} на $3 \div 5$ МГц. Характерное время нарастания сигнала определяется добротностью резонатора и составляет около $150 \div 200$ нс. На вершине отражённого импульса излучения видны затухающие колебания, соответствующие переходному процессу. При выключении разряда отражённый сигнал также быстро падает и резонатор возвращается в исходное состояние. Таким образом, эксперимент показал, что с помощью мультипакторного разряда можно переключать резонатор из режима полного поглощения в режим отражения волны TE_{01} .

В эксперименте была исследована возможность проводить с помощью разряда обратные действия — переводить резонатор из режима отражения в режим полного поглощения излучения. Для этого частота волны TE_{01} устанавливалась немного выше полосы пропускания резонатора с расчётом, что возникновение разряда сместит полосу пропускания резонатора в сторону более высоких частот и подстроит его под частоту волны TE_{01} . Возможность реализации такого процесса демонстрируют осциллограммы на рис. 2б, кривые 2 и 4.

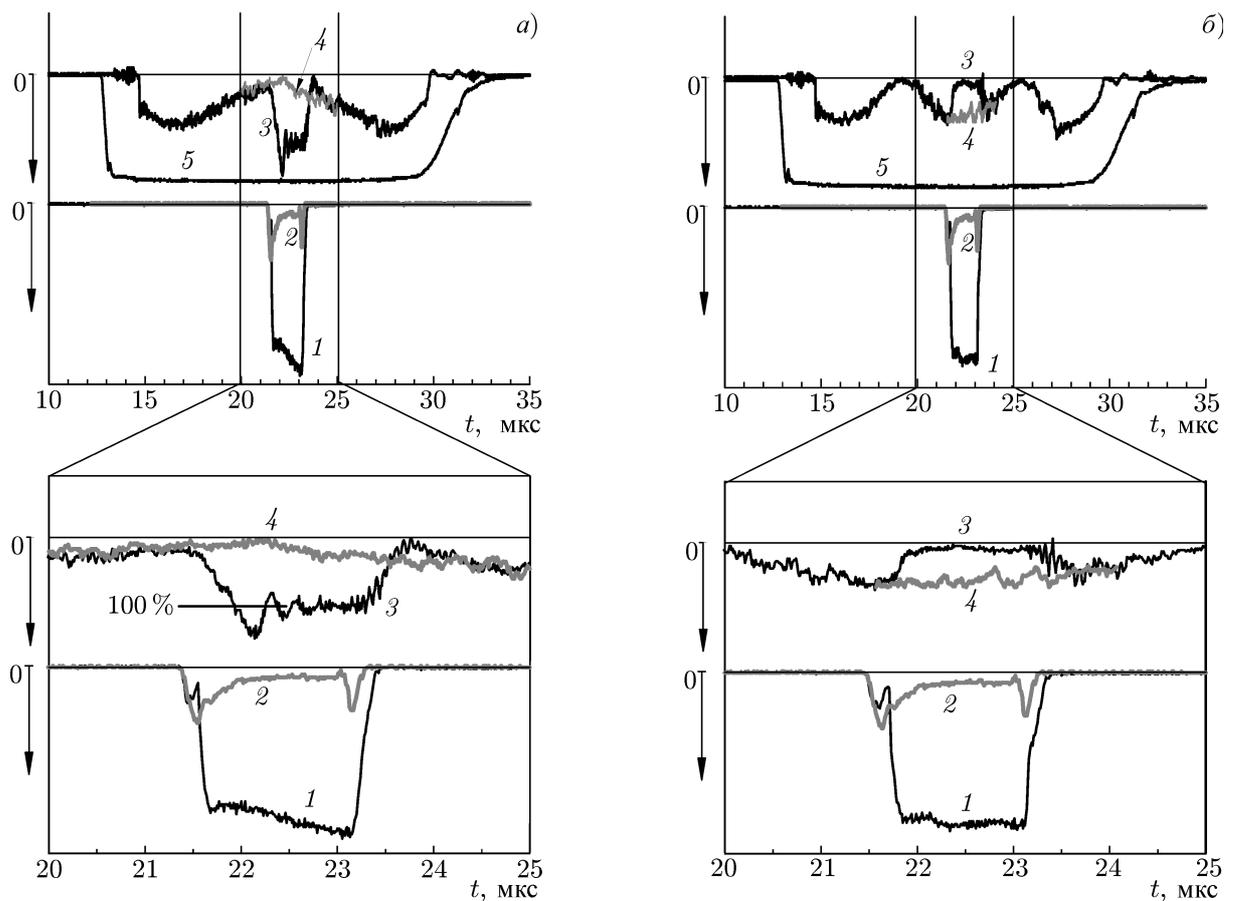


Рис. 2. Осциллограммы огибающих функций сигналов, отражённых от резонатора: 1 — волна на моде TM_{01} (создаёт мультипакторный разряд), 2 — то же в отсутствие разряда, 3 — волна на моде TE_{01} (управляется мультипакторным разрядом и тестирует состояние резонатора), 4 — то же в отсутствие разряда, 5 — напряжение магнетрона — источника волны TE_{01} . Панель (а) — разряд выводит предварительно настроенный резонатор из резонанса (для кривой 3 указан уровень 100 % отражения); панель (б) — разряд вводит в состояние резонанса предварительно отстроенный резонатор. Поток энергии, вводимой в резонатор от каждого источника, равняется 70 кВт

Из-за того, что напряжение возрастает к середине импульса, а затем медленно спадает, при превышении максимальным напряжением значения, соответствующего точному резонансу, последний возникает и на нарастающей, и на спадающей частях вершины импульса напряжения, в то время как в центре импульса излучение в значительной степени отражается (см. верхний рис. 2б, кривая 4). В момент включения разряда (отслеживаемый по кривой 1 на рис. 2б) уровень отражённого сигнала резко понижается, а при выключении — вновь восстанавливается (см. кривую 3 на рис. 2б), демонстрируя в эти моменты времени входение предварительно отстроенного резонатора в состояние резонанса и выход из него. Эти измерения дополнительно подтверждают тот факт, что электроны разряда, покрывая плотным слоем стенку резонатора, повышают его резонансную частоту.

Исследования также показали, что при понижении мощности разряда или большей отстройке частоты волны TE_{01} от полосы пропускания резонатора с помощью разряда можно обеспечивать частичное пропускание или отражение излучения, т. е. модулировать поток управляемой энергии.

Отметим, что на рис. 2 приведены осциллограммы для случая, когда мощности излучения на

обеих модах были примерно равными и составляли около 70 кВт. Для волны TM_{01} , возбуждающей разряд, это была минимальная мощность, достаточная для практически полного отражения управляемой моды TE_{01} как при малых, так и на предельных уровнях её мощности порядка 70 кВт. Последние ограничивались пробоем преобразователя Марье.

Следует отметить, что для увеличения быстроты переключения коммутатора при сохранении его эффективности потребуется снижать добротность резонатора (при этом увеличивается полосу пропускания) и наращивать интенсивность (концентрацию электронов) разряда. Для этого при изготовлении разрядной поверхности можно использовать другие, более подходящие, материалы. Например, золото и платина, обладая хорошей электрической проводимостью, имеют значительно более высокий коэффициент вторичной эмиссии σ , чем медь [18], что уже само по себе должно повысить концентрацию электронов разряда [14]. Кроме того, у этих материалов второй критический потенциал (т.е. энергия падающих на поверхность электронов, при превышении которой коэффициент σ становится меньше единицы) почти вдвое выше, чем у меди. Это даёт возможность повысить СВЧ поле управляющей волны с целью увеличения концентрации электронов в разряде и высоты их подъёма над поверхностью, т.е. повысить толщину и плотность слоя электронов, смещающего резонансную частоту резонатора [14].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе экспериментально показана возможность управления волной TE_{01} круглого волновода с помощью мультипакторного разряда в скрещённых полях в цилиндрическом резонаторе. Характерное время переключения резонатора составляет $150 \div 200$ нс и определяется его добротностью. Как показали первые эксперименты, исследованная схема позволяет практически полностью отражать поток энергии падающего излучения.

В дальнейшем планируется исследовать работоспособность переключателя при более высокой переключаемой мощности и повысить скорость управления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-02-00330).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farnsworth P. T. // J. Franklin Inst. 1934. V. 218, No. 4. P. 411.
2. Сливков И. Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
3. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М.: Госатомиздат, 1961.
4. Gaddy O. L., Holshoser D. F. // Proc. IEEE. 1963. V. 51, No. 1. P. 153.
5. Ганичев Д. А., Филатов В. А., Фридрихов С. А. // Радиотехника и электроника. 1972. Т. 17, № 8. С. 1639.
6. Semenov V., Nechaev V., Rakova E. // Proc. Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas. V. 2. Inst. Appl. Phys. RAS, 2006. P. 635.
7. Fuks R. // Microwave J. 2011. V. 54, No. 5. P. 206.
8. Ming Yu. // IEEE Microwave Mag. 2007. V. 8, No. 5. P. 88.
9. Forrer M., Milazzo C. // Proc. IRE. 1962. V. 50, No. 4. P. 442.
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. Pyakov E. V., Korablyov G. S., Kulagin I. S., Zaitsev N. I. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26, No. 3. P. 332.

12. Sazontov A. G., Nechaev V. E., Vdovicheva N. K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. V. 40, No. 2. P. 451.
13. Gusarova M. A., Kaminsky V. I., Kravchuk L. V., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 599, No. 1. P. 100.
14. Бляхман Л. Г., Горшкова М. А., Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 11. С. 1004.
15. Иляков Е. В., Кулагин И. С., Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 12. С. 979.
16. Вихарев А. А., Иляков Е. В., Кузиков С. В., Кулагин И. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 12, С. 908.
17. Иляков Е. В., Кулагин И. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 4. С. 254.
18. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.

Поступила в редакцию 27 февраля 2014 г.; принята в печать 14 августа 2014 г.

STUDY OF THE POSSIBILITY TO SWITCH THE TE_{01} MODE OF A CIRCULAR WAVEGUIDE USING THE MULTIPACTOR DISCHARGE IN CROSSED FIELDS

A. A. Vikharev, E. V. Ilyakov, S. V. Kuzikov, and I. S. Kulagin

We demonstrate experimentally that it is possible to control the symmetric TE_{01} mode of the circular waveguide, whose electric microwave field at the wall is equal to zero, using the multipactor discharge in crossed electric and magnetic fields, which is excited by the TM_{01} mode in a cylindrical cavity. The characteristic time of cavity switching is determined by the cavity Q-factor and is equal to 150–200 ns. The experiments showed that the proposed scheme allowed reflecting the energy flow of the switched radiation almost completely.