

ПЕРЕСТРОЙКА ОТКРЫТЫХ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ПЛАЗМОЙ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Открытые предельные резонаторы (ОПР) уже почти 30 лет привлекают к себе внимание ученых и конструкторов, работающих в области сверхвысокочастотной техники. В сравнении с обычными резонаторами, представляющими собой короткозамкнутые отрезки волноводов, открытые предельные резонаторы обладают важными преимуществами. В их числе — более высокая добротность, разреженный спектр частот собственных колебаний, наличие неизлучающих отверстий, открывающих доступ в полость резонаторов. Все это расширяет возможности практических применений ОПР — в качестве колебательных контуров, элементов СВЧ-трактов со специфическими дисперсионными свойствами (например, фильтров), датчиков устройств для контроля и измерения параметров веществ в СВЧ-диапазоне, реакторов установок, использующих энергию СВЧ в технологических целях, колебательных систем электронных и квантовых приборов СВЧ.

Для многих из перечисленных областей применения ОПР немаловажное значение имеет перестройка частоты. Предложена механическая перестройка биконического ОПР со средней регулярной частью введением в запредельные участки двух металлических стержней [1]. Стержни при приближении к предельному сечению воздействуют на поле в резонаторе и изменяют частоту последнего. Диапазон перестройки — 50...60 МГц, но в связи с необходимостью механического перемещения перестраиваемого элемента процесс осуществляется медленно.

Известен способ перестройки ОПР посредством управления свойствами кольцеобразной полоски магнитного материала, нанесенного на внутреннюю поверхность ОПР в области критического сечения, под действием подмагничивающего поля [2]. Изменяя последнее, можно вызвать смещение критического сечения, что обусловит изменение резонирующего объема, а следовательно, и резонансной частоты ОПР. Данный способ является малоинерционным, однако диапазон перестройки невелик — порядка 3,5 МГц на частоте 10428 МГц при изменении тока электромагнита от 0 до 15 А [3].

Согласно работам, в которых рассмотрено применение ОПР для измерения электрических параметров веществ, полностью или частично заполняющих объем резонатора, можно предположить возможность перестройки резонатора путем изменения параметров заполняющей его среды. Если такая среда — твердое вещество, управление его свойствами осуществимо для веществ типа сег-

нетоэлектриков или ферритов, но при этом возникают конструктивные затруднения в связи с необходимостью создания регулируемого электрического или магнитного поля. Кроме того, произойдет нежелательное снижение добротности ОПР из-за потерь в заполняющей среде.

Сведений о перестройке ОПР путем изменения параметров введенной в полость резонатора среды, находящейся в жидкой или газообразной фазе, в литературе пока нет, что, вероятно, обусловлено сложностью управления параметрами заполняющей среды. Итак, остается еще одна возможность, которая, как известно, до настоящего времени не изучена — использование для перестройки ОПР плазмы газового разряда.

В работе [4] кратко изложены результаты экспериментального исследования электронной перестройки ОПР трапецеидальной формы.

Этот резонатор был выполнен в виде сужающегося отрезка прямоугольного волновода. Размер его широкой стенки на длине 120 мм менялся от 26,0 до 12,0 мм, а высота, равная 10,0 мм, оставалась неизменной. Торец малого сечения открыт, большого — закрыт диафрагмой с отверстием для связи с измерительным трактом. В критическом сечении резонатора через отверстия в боковых стенках пропущен вольфрамовый прямонакальный катод. Резонатор находился в вакуумном объеме (давление около 10^{-5} мм рт. ст.), для герметизации которого в волноводном тракте измерительной установки имелось слюдяное окно. Резонансная длина волны колебаний вида H_{101} была 3,55 см (частота 8450 МГц). Перестройка производилась изменением тока накала катода и напряжения между катодом и корпусом резонатора.

При изменении тока в цепи катод—резонатор от нуля до 570 мА резонансная длина волны увеличивалась примерно по линейному закону на 2 % (изменение частоты на 169 МГц). Для сравнения указано, что в закрытых резонаторах прямоугольного и H -образного сечения, перестраиваемых аналогичным образом, изменение резонансной частоты, равной 8500 МГц, составляло 15 МГц (0,18 %) и 25 МГц (0,29 %) соответственно. На основании полученных результатов сделан вывод об эффективности перестройки открытых предельных в сравнении с закрытыми регулярными объемными резонаторами. Высказано предложение о возможности увеличения диапазона перестройки путем применения фокусирующего магнитного поля или газового заполнения резонатора. Обращено внимание также на необходимость исследования зависимости перестройки от расположения катода.

Полезные сведения по вопросу перестройки ОПР плазмой газового разряда содержатся в работе [5], где рассмотрено применение ОПР для изучения плазмы газового разряда. Поскольку способ исследования основан на зависимости частоты резонатора от параметров частично заполняющей его объем среды (плазмы), полученные данные можно трактовать и с точки зрения перестрой-

ки частоты. В данной работе использован цилиндрический резонаторный ОПР — отрезок круглого волновода со вставками в виде коаксиальных цилиндров на концах. Стеклопая трубка, заполненная неон (лампа-генератор шумов ГШ-2), введена через отверстия резонатора вдоль его оси. В резонаторе возбуждались колебания вида H_{011} на частоте 10422 МГц ($\lambda = 2,88$ см). Точность измерений частоты была порядка 10^{-5} . Приведены графики зависимости концентрации электронов плазмы n и частоты их столкновений с тяжелыми частицами ν от тока в разрядной трубке I . Из них следует, что при изменении тока от нуля до 30 мА происходил линейный рост n от 0 до $30 \cdot 10^{11}$ 1/см³, а ν — от 2,5 до $5,5 \cdot 10^9$ Гц. Этот участок, видимо, и следует использовать для перестройки частоты. Отмечено, что ОПР обеспечивает более высокую чувствительность, чем закрытый резонатор.

Согласно этой работе, изменением тока разряда в газоразрядной трубке, помещенной в ОПР, можно влиять на частоту резонатора. Сравнительно небольшое изменение частоты объясняется малым диаметром плазменного столба, заполняющего примерно 1,5 % объема резонатора, хотя и в области наибольшей концентрации электрического поля, и использованием ОПР регулярного типа. В нем изменение частоты происходит только за счет изменения параметров частично заполняющего резонатор вещества (плазмы).

Есть основания полагать, что лучшие результаты будут получены в нерегулярном ОПР, где на изменение частоты повлияет также смещение критического сечения, т. е. изменение резонансного объема резонатора.

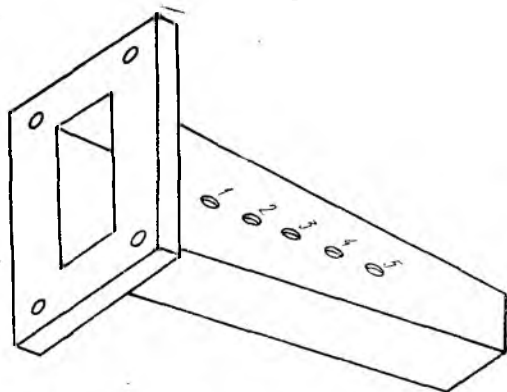


Рис. 1

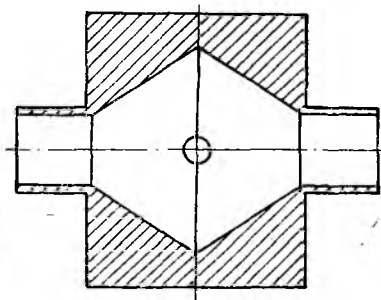


Рис. 2

Для проверки такого предположения и с целью изучения общих вопросов перестройки ОПР нами была исследована перестройка ОПР пирамидальной (секториальной) конструкции, показанной на рис. 1. Резонатор имел длину 220 мм, на которой его сечение уменьшалось с 72×34 мм до 20×34 мм. По средней линии широких стенок было сделано по 5 отверстий на расстояниях 28, 45,

100, 125 и 150 мм от большого торца. Через пару отверстий вводилась разрядная трубка лампы ГШ-2 параллельно силовым линиям электрического поля, остальные отверстия закрывались пробками. Резонатор соединялся с измерительным трактом через диафрагму 58×20 мм на большом торце.

Расчет резонатора производился по формулам работы [6]. Эксперимент показал, что резонансная частота колебаний H_{101} — 3890 МГц, колебаний H_{102} — 3370 МГц; нагруженная добротность соответственно 6000 и 800. Первое и третье отверстия сделаны примерно в максимумах электрического поля колебаний H_{102} , второе — в максимуме для колебаний H_{101} . Третье отверстие находилось вблизи предельного сечения для колебаний H_{101} , четвертое — для H_{102} , пятое — в закритической области.

Введение разрядной трубки сдвигало частоты резонатора примерно на 200 МГц. Изменение тока разряда в пределах 50...200 мА увеличивало частоту при помещении трубки в отверстие 2 на 72,5 МГц (2,35 %), в отверстие 3 — на 37,0 МГц (1,04 %), в отверстие 4, — на 68,6 МГц (2,22 %), для остальных отверстий перестройка частоты незначительная.

Исследовалась также перестройка биконического резонатора, сечение которого вдоль оси показано на рис. 2. Он рассчитывался по формулам работы [7] для колебаний вида H_{011} с резонансной длиной волны 3,2 см (частота 9375 МГц). Радиус нерегулярной части резонатора уменьшался в обе стороны от 30 до 13 мм, в этом сечении конусы переходили в круглые трубки длиной 30 мм; длина биконической части равнялась 50 мм. В сечении максимального радиуса имелись круглые диаметрально противоположные отверстия радиусом 3 мм для включения резонатора на прохождение в измерительный тракт.

Собственная частота резонатора была 7880 МГц, нагруженная добротность — 2600. С помощью лампы ГШ-2, ток разряда которой менялся от 50 до 200 мА, удалось перестроить частоту всего на 7 МГц, что не представило практического интереса.

Значительно лучшие результаты получились при использовании бактерицидной лампы БУВ-15, представляющей собой кварцевую трубку диаметром 25 мм, заполненную смесью аргона и паров ртути. Введение ее в биконический резонатор привело к увеличению частоты до 8360 МГц и к уменьшению добротности до 1700. Изменение тока разряда от 0,1 до 1,0 А обусловило увеличение частоты на 420 МГц (5 %), которое сопровождалось падением добротности до 200. Нарастание частоты происходило примерно по параболическому закону.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об эффективности перестройки частоты открытых предельных резонаторов путем изменения параметров плазмы газового разряда, частично заполняющей резонансный объем. Наибольшая перестройка может быть получена в случае биконического резонатора при

максимальном заполнении его объема плазмой. Создание перестраиваемого элемента, основанного на данном принципе, потребует более детальных исследований и оптимизации конструкций.

Список литературы: 1. А. с. 598162 СССР. Перестраиваемый предельный резонатор//Ю. Г. Зелинский, В. В. Попов//Открытия. Изобретения. 1978. № 10. С. 30. 2. А. с. 405151 СССР. Перестраиваемый предельный резонатор//Д. П. Буртовой, А. И. Терещенко//Открытия. Изобретения. 1982. № 44. С. 42. 3. Буртовой Д. П., Терещенко А. И. Магнитная перестройка открытых предельных резонаторов//Радиотехника. 1974. Вып. 30. С. 155—158. 4. Экспериментальное исследование электронной перестройки нерегулярного предельного резонатора//В. М. Дмитриев, Н. В. Ляпунов, А. И. Терещенко, А. Я. Чабань//Науч. зап. Харьк. ун-та. 1962. Т. 7. С. 75—77. 5. Буртовой Д. П., Мироненко В. Л., Терещенко А. И. Применение открытого предельного резонатора для исследования свойств плазмы//Журн. техн. физики. 1970. Т. 40, № 7. С. 1378—1381. 6. Приближенный метод расчета собственных частот нерегулярных предельных резонаторов//В. М. Дмитриев, А. Ф. Зоркин, Н. В. Ляпунов, В. М. Седых//Журн. техн. физики. 1961. Т. 31, № 6. С. 710—716. 7. Кравченко В. Ф., Каретников С. Н., Бобрышев В. Д. К расчету предельных резонаторов//Радиотехника. 1972. Вып 21. С. 107—113.

Поступила в редколлегию 16.01.87

УДК 621.373

М. А. КРАСНОГОЛОВЕЦ, А. Г. ШЕИН

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ РАСЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Потоки высокоэнергетических электронов находят широкое применение в современной технике в качестве активных средств мощных СВЧ-приборов, источников ионизации лазеров, технологических процессов обработки материалов. В большинстве случаев пучки электронов выводятся из формирующих систем в среды с параметрами, существенно отличающимися по давлению остаточного газа и его состава. Это приводит к необходимости разделения вакуумного пространства, где происходит формирование электронного пучка, от его входной среды вакуумноплотными окнами, представляющими собой слой материала достаточно малой толщины. В качестве разделительных окон обычно используются фольги из алюминия или титана.

Параметры электронного пучка на выходе из фольги можно вычислить исходя из анализа процессов взаимодействия ускоренных электронов с материалом фольги. В результате их взаимодействия происходит упругое и неупругое рассеяние электронов. При упругом рассеянии происходят столкновения электронов с ядрами атомов и из-за большого различия в массах электроны меняют свое направление без изменения кинетической энергии. Неупругое рассеяние, происходящее в результате столкновения ускоренных