

© В.Г. КУРИН, Б.К. СКРЫННИК, академик АН УССР В.Л. ШЕСТОПАЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖДУТИПОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Фундаментальным результатом спектральной теории открытых электродинамических структур является введение понятия невырожденной (и вырожденной) морсовских критических точек дисперсионного уравнения, с помощью которых можно полностью объяснить явление междутиповых колебаний [1–3].

До настоящего времени целенаправленные эксперименты по изучению междутиповых колебаний в открытых резонаторах (ОР) не проводились, хотя сам факт их существования установлен еще в [4–6].

В настоящей статье представлены экспериментальные данные по исследованию междутиповых колебаний, которые возникают в сложных ОР-колебательных контурах генераторов дифракционного излучения (ГДИ).

Как известно [6], открытый резонатор ГДИ состоит из двух зеркал, на одном из которых в виде узкой полоски размещена отражательная дифракционная решетка (ОДР); вдоль нее движется электронный поток, порождающий дифракционное излучение, запитывающее ОР. Обычно в резонаторе ГДИ междутиповые колебания отсутствуют, поскольку возбуждаются колебания с малыми поперечными индексами, которые не перекрываются по диапазону собственных частот ОР. Наличие ОДР, кроме дополнительного разрежения спектра ОР [7], снимает вырождение по типам колебания с одинаковой суммой поперечных индексов ($m + n = \text{const}$).

Зеркало ОР, частично покрытое дифракционной решеткой, является двухуровневой отражающей поверхностью с высотой уровня, изменяющейся от длины волны и типа колебаний. В такой системе при одном и том же расстоянии могут возникать междутиповые колебания с различной суммой поперечных индексов (т.е. при $m + n \neq \text{const}$). Эти колебания в ГДИ могут быть связаны не только общим объемом ОР, но и посредством электронного потока, одновременно взаимодействующего с обоими типами колебаний. Здесь приведены исследования влияния междутиповой связи колебаний с различной суммой поперечных индексов на условия возбуждения и изменение характеристик электромагнитных колебаний ГДИ коротковолновой части миллиметрового диапазона.

1. Условием возбуждения одинаковых частот на различных типах колебаний ($m + n \neq \text{const}$) при неизменном расстоянии между зеркалами ОР, одно из которых имеет два уровня отражающих поверхностей, является компенсация разностного набега фаз при удлинении волны на различных колебаниях, набегом фаз за счет изменения интенсивности поля на этих уровнях отражающих поверхностей, т.е.

$$(1) \quad \alpha_{00}(m_2 + n_2 - m_1 - n_1)\lambda/2 \approx (\sigma_2 - \sigma_1)\gamma h,$$

где $\alpha_{00} = \frac{1}{2\pi} \arccos \left(1 - \frac{2D}{R} \right)$, D – расстояние между зеркалами полусимметричного ОР, R – радиус кривизны вогнутого зеркала; m, n – поперечные индексы возбужденных колебаний; λ – длина волны, σ – коэффициент, зависящий от соотношения энергии, падающей только на дифракционную решетку, ко всей энергии, падающей на составное зеркало, γ – коэффициент, зависящий от параметров решетки и длины волны (для $h \approx \lambda/4$, $\gamma = 1$), h – глубина дифракционной решетки, т.е. расстояние между двумя уровнями.

В случае междутиповых колебаний, например, TEM_{00q} - и TEM_{20q} -типов из условия (1) получим $h \approx \frac{\alpha_{00}\lambda}{(\sigma_1 - \sigma_2)\gamma}$, которое для типичных параметров ОР в

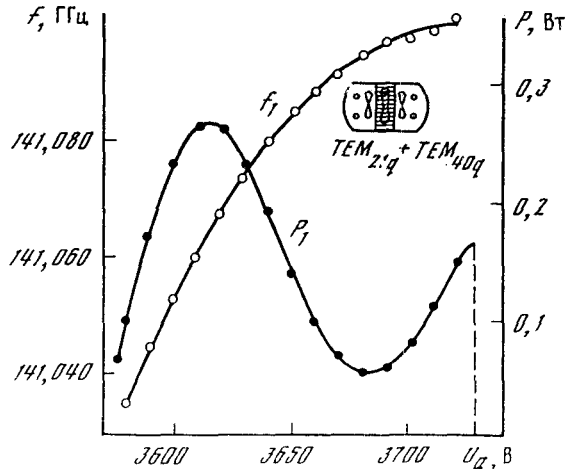
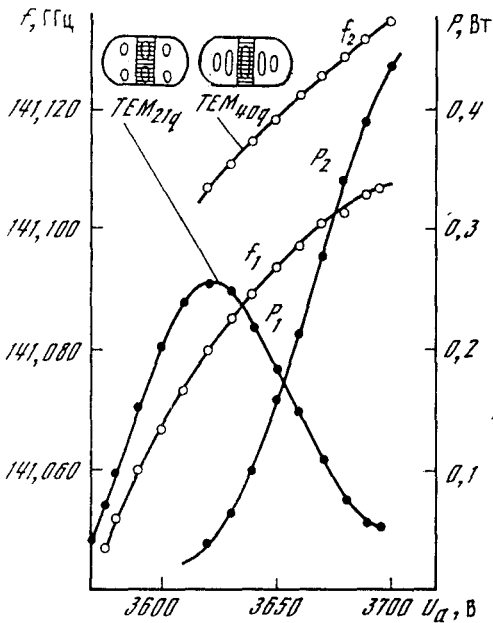


Рис. 1. Зависимость частоты и выходной мощности ГДИ в зонах электронных перестроек для двух типов колебаний, полученные при различных установках прибора в магнитном поле

Рис. 2. Электронная перестройка ГДИ в случае интенсивного междутипового взаимодействия (морсовская точка) двух колебаний вырожденных по расстоянию и напряжению

двухмиллиметровом диапазоне можно оценить значениями $h = (0,15 - 0,50)\lambda$. Следовательно, даже для типов колебаний, отстоящих по сумме индексов ($m + n$) на две единицы, оптимальная глубина решетки ($h \approx 0,2\lambda$) может попасть в зону морсовской критической точки.

Вероятность появления междутиповых колебаний увеличивается с укорочением длины волны. Даже при незначительных изменениях относительной интенсивности СВЧ поля в области ОДР ($\sigma_2 - \sigma_1 < 0,1$) для соседних типов колебаний (например, TEM_{21q} и TEM_{40q}) условие (1) выполняется в рабочей области расстояния между зеркалами ОР ($D \ll R$) и глубины решетки ($h = 0,2\lambda$). Это подтверждается экспериментом.

2. Для ГДИ коротковолновой части миллиметрового диапазона появление междутиповых колебаний не является редкостью. Однако их сложно выделить при раздельном исследовании для колебаний с одинаковой функцией распределения вдоль периодической структуры, например TEM_{00q} - и TEM_{20q} -типа. Более удобны для изучения влияния междутиповых колебаний на характеристики ГДИ в зоне электронной перестройки такие колебания, в которых различается структура поля вдоль пространства взаимодействия, например, TEM_{21q} - и TEM_{40q} -типов. Здесь важно различие не первых (поперечных) индексов, а вторых (продольных). Для таких типов колебаний выход морсовской точки снимается и восстанавливается один из доминирующих типов колебания незначительным перемещением прибора в магнитном поле.

На рис. 1 показаны зависимости выходной мощности и частоты в зоне электронной перестройки ГДИ для типов колебания TEM_{21q} и TEM_{40q} , полученные при различных установках прибора в магнитном поле. Видно, что зоны генерации на этих типах колебаний имеют значительную область совпадения по анодному напря-

жению ($\Delta U \approx 80$ В) и малую область перекрытия по частоте ($\Delta f \approx 1,2$ МГц). Видно, что в случае возбуждения колебания TEM_{21q} при приближении ускоряющего напряжения к значению ($U = 3690$ В), при котором возможно возбуждение и другого типа колебания (в данном случае TEM_{40q}), в монотонном уменьшении величины мощности наблюдается некоторая нерегулярность, а затем происходит срыв генерации.

Междутиповое взаимодействие различных колебаний за счет установки генератора в положение, строго соответствующее морсовской точке, превращает два простых определенных колебаний в одно сложное с непрерывно изменяющимся распределением поля в результате интерференции двух пучков волн дифракционного излучения. При изменении анодного напряжения распределение поля такого колебания не совпадает даже в двух соседних точках. Это связано с тем, что непрерывно изменяется энергетическое соотношение между двумя разрешенными углами дифракционного излучения и происходит плавное изменение интерференционной картины. Следовательно, колебание в морсовской точке (междутиповое колебание), перманентно перестраиваясь, изменяет и длину взаимодействия электронного потока в ГДИ. В результате изменяется крутизна электронной перестройки генератора.

Электронная перестройка ГДИ в случае междутипового взаимодействия двух вырожденных колебаний представлена на рис. 2. Минимальная крутизна электронной перестройки частоты $\Delta f/\Delta U$, наблюдаемая при работе генератора на отдельных типах колебаний (рис. 1), равна $\sim 0,3$ МГц/В. Существенно важно, что в области интенсивного взаимодействия между типами колебаний (непосредственно в морсовской точке) минимальная крутизна электронной перестройки в два раза меньше и равна $\sim 0,15$ МГц/В. Распределение поля при этом показано на рис. 2.

При возбуждении междутиповых колебаний происходит не только уменьшение крутизны электронной перестройки частоты, но и наблюдаются участки, где крутизна электронной перестройки $\Delta f/\Delta U$ меняет знак при монотонном изменении анодного напряжения. Следовательно, при работе ГДИ на междутиповом колебании (т.е. строго в морсовской точке соответствующего дисперсионного уравнения) величина отношения активной и реактивной мощностей взаимодействия, ответственная за перестройку частоты генератора, остается постоянной ($P_a/P_r = \text{const}$) в диапазоне небольших изменений ускоряющего напряжения, в результате чего $\Delta f/\Delta U = 0$, т.е. наблюдается случай адиабатического инварианта.

Очевидно, используя это явление, можно свести к минимуму чувствительность частоты генератора к нестабильности анодного напряжения и значительно повысить стабильность ГДИ. По-видимому, это явление должно иметь место в сложных открытых резонаторах и при других способах их возбуждения.

3. Прямые эксперименты по исследованию междутиповых колебаний ОР ГДИ показали, что это явление может быть использовано для улучшения характеристик источника электромагнитных колебаний в коротковолновой части миллиметрового диапазона. До сих пор же было известно, что междутиповые колебания в резонаторах носят исключительно негативный характер, уменьшая его добротность и др.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук УССР
Харьков

Поступило
30 X 1990

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестопалов В.П. Спектральная теория и возбуждение открытых структур. Киев: Наук. думка, 1987. 275 с.
2. Мележик П.Н., Поединчук А.Е., Тучкин Ю.А., Шестопалов В.П. – ДАН, 1988, т. 300, № 6, с. 1355–1359.
3. Шестопалов В.П. – ДАН, 1988, т. 303, № 5, с. 1131–1135.
4. Штейншлейгер В.Б. – ДАН, 1949, т. 69, № 5, с. 699–703.
5. Штейншлейгер В.Б. Явление взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. М.: Оборонгиз, 1955. 178 с.
6. Шестопалов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Киев: Наук. думка, т. 2, 1985. 258 с.
7. Шестопалов В.П. Дифракционная электроника. Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1976. 232 с.