

УДК 621.385.633

Д. Г. Афонин, А. И. Костиенко

О ВОЗБУЖДЕНИИ  
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ  
В ОТКРЫТОМ РЕЗОНАТОРЕ

При пропускании вблизи периодической структуры электронного пучка под различными углами к плоскости периодической структуры наблюдается дифракционное излучение [1]. Длина волны дифракционного излучения  $\lambda$  следующим образом зависит от направления излучения, периода структуры  $l$  и скорости электронов  $v_0$  [2]:

$$\lambda = l/n(c/v_0 - \cos \alpha), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол между направлением движения электронов и направлением излучения;  $n=1, 2, 3, \dots$  — дифракционный порядок излучения,  $c$  — скорость света.

Когда периодическая структура с периодом, много меньшим длины волны, одновременно выполняет и роль зеркала открытого резонатора, наиболее интенсивное излучение существует при углах  $\alpha$ , близких к  $90^\circ$ , при которых обеспечивается существование в резонаторе высокодобротных типов колебаний.

Применение в вакуумной электронике в качестве колебательных систем открытых резонансных систем с периодическими структурами открывает возможность создания серии приборов для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Первые из серии таких приборов уже созданы [3, 4]. В связи с этим становится важным исследование самих резонансных систем с периодическими структурами и в первую очередь дисперсионных характеристик таких систем.

Дисперсионные характеристики открытых резонансных систем с периодическими структурами типа «решетка» (или «гребенка») могут быть рассчитаны в соответствии с выражением (1), которое для этой цели может быть представлено в таком виде:

$$c/v_\phi = \lambda n/l + \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $n$  — номер пространственной гармоники,  $v_\phi$  — фазовая скорость  $n$ -й гармоники,  $\alpha$  — угол между направлением, перпендикулярным образующим периодической структуры, и направлением падения электромагнитной волны. Два граничных случая такого падения волны осуществляются при углах «скольжения»  $\alpha=0^\circ$  и  $\alpha=180^\circ$  и соответствуют при распространении поверхностной волны возбуждению периодической структуры в режимах ЛБВ и ЛОВ.

При взаимодействии электронного пучка с пространственными гармониками, формируемыми при падении электромагнитных волн под углами, не равными  $0^\circ$  и  $180^\circ$ , говорят о дифракционном типе взаимодействия (ДИ-взаимодействии) [2].

В случае  $\alpha=90^\circ$  имеет место оротронный режим (ОРО-режим), впервые осуществленный в генераторе типа оротрон [3, 5].

Таким образом, оротронный режим можно рассматривать как частный случай, а режимы типа ЛОВ и ЛБВ — как граничные случаи режима дифракционного.

В соответствии с принятой терминологией и выражением (2) ДИ-взаимодействия для каждой  $n$ -й гармоники должны наблюдаться в полосе замедлений  $c/v_\phi$ , отличающихся на две единицы. Средняя линия в этой области отображает оротронный режим. Формула (2), однако, не учитывает особенностей конкретных реальных резонансных систем и по существу определяет лишь границы существования ДИ-режима, оставляя при этом открытым вопрос об областях наиболее эффективного возбуждения периодической структуры. Таким образом, истинные дисперсионные характеристики реальных систем могут быть получены только в результате проведения экспериментальных исследований конкретных систем.

Экспериментально исследовались дисперсионные характеристики открытых полусферических резонаторов с плоским зеркалом, полностью покрытым периодической структурой типа «гребенка», и низкодобротных систем [6], состоящих из облучающей антенны типа рупор и плоского зеркала с периодической структурой. В проведенных исследованиях использовался макет и аппаратура, описанные в работе [7].

В качестве зонда использовался электронный пучок, проходящий в вакууме вблизи зеркала с периодической структурой; взаимодействие электронов с пространственными гармониками вблизи периодической структуры анализировалось в следующем за структурой двухэлектродном промежутке, в котором создавался режим существования виртуального катода [8].

Полусферический резонатор состоял из плоского зеркала диаметром 23 мм с периодической структурой, период которой составлял 0,2 мм, ширина канавки — 0,1 мм, глубина канавки — 0,5 мм, и сферического зеркала, диаметр и радиус кривизны которого составляли соответственно 25—30 мм. Низкодобротная система состояла из такого же плоского зеркала с периодической структурой и рупорной антенны длиной 13 мм с углом раскрыва в  $E$ -плоскости  $35^\circ$ , углом в  $H$ -плоскости  $40^\circ$  и с апертурой раскрыва  $9 \times 11$  мм<sup>2</sup>. Открытые резонансные системы исследовались в режиме возбуждения от внешнего генератора. В качестве источника электромагнитных волн использовалась ЛОВ, генерирующая излучение в двухмиллиметровом диапазоне длин волн. Связь открытых резонансных систем с внешним генератором осуществлялась через отверстие связи в центре сферического зеркала, отверстие в вершине рупорной антенны и подводящие стандартные волноводы прямоугольного сечения ( $0,8 \times 1,6$  мм<sup>2</sup>).

В процессе исследований имелась возможность изменения связи резонаторов с внешним трактом за счет изменения формы и размеров отверстия связи.

В результате проведенных исследований обнаружено эффективное взаимодействие электронов с пространственными гармониками перио-

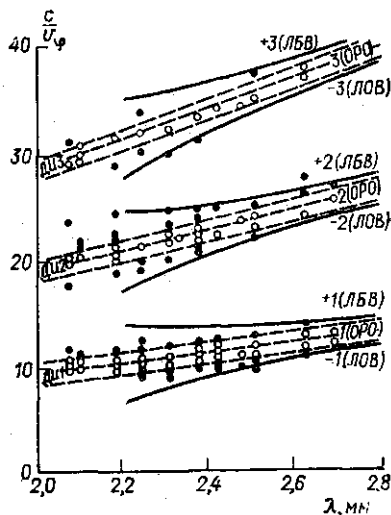
дической структуры в открытых резонансных системах в ОРО- и ДИ-режимах, в режимах ЛОВ и ЛБВ. В ОРО- и ДИ-режимах зафиксировано взаимодействие с гармониками вплоть до десятой; в режиме ЛОВ взаимодействие зафиксировано с минус первой, минус второй и т. д. — вплоть до минус девятой гармоники поверхностной волны. Обнаружено также взаимодействие с прямыми гармониками поверхностной волны (режим ЛБВ) с номерами  $n=1, 2, \dots, 9$ . ОРО- и ДИ-режимы, как правило, осуществлялись при возбуждении в открытом резонаторе резонансного колебания, режимы ЛОВ и ЛБВ осуществлялись как при наличии в резонаторе резонансного колебания, так и за счет нерезонансного фона. В последнем случае эффективность взаимодействия практически не зависела от расстояния между отражателями открытого резонатора. Однако она в значительной степени зависела от ориентации отражателя, через который осуществлялась связь с внешним трактом, по отношению к зеркалу с периодической структурой. По этим признакам и по виду дисперсионной характеристики определялась принадлежность экспериментально обнаруженных областей взаимодействия к ДИ-режиму или режимам ЛОВ и ЛБВ. При этом в большинстве случаев оказалось невозможным четко различать оротронный и ДИ-режимы для областей взаимодействия, расположенных на дисперсионных характеристиках вблизи прямых ОРО-режима.

На рисунке показаны результаты исследования дисперсионных характеристик полусферического открытого резонатора с прямоугольным отверстием связи (размером  $1,8 \times 1,6$  мм<sup>2</sup>) в центре сферического зеркала. Для большей наглядности на рисунке приведены результаты, полученные только для низших гармоник.

На этом же рисунке пунктиром показаны ОРО-режим и границы существования ДИ-режима, построенные в соответствии с формулой (2) для первой, второй и третьей пространственных гармоник; сплошными линиями изображены кривые, рассчитанные по результатам работы [9] для трех гармоник ЛОВ и ЛБВ.

Ввиду сложности определения оротронного режима все обнаруженные области взаимодействия при  $0^\circ < \alpha < 180^\circ$  на рисунке отнесены к одному — дифракционному — режиму. Некоторые области взаимодейст-

Рис. 1. Дисперсионные зависимости:  $\circ$  — области эффективного взаимодействия электронов с пространственными гармониками в дифракционном режиме,  $\bullet$  — области эффективного взаимодействия с пространственными гармониками в режимах ЛОВ и ЛБВ



вия, расположенные на границе существования ДИ-режима (при  $\alpha \cong 0^\circ$  и  $\alpha \cong 180^\circ$ ), принадлежность которых к определенному режиму определить не удалось, отнесены к тому или иному режиму условно.

В связи с тем что внешний источник генерировал электромагнитные колебания с некоторыми фиксированными длинами волн, периодическая структура могла возбуждаться лишь при этих значениях длин волн.

Как видно из рисунка, структура возбуждалась на этих длинах волн не во всех режимах и эффективное взаимодействие было зафиксировано не при непрерывном изменении фазовой скорости гармоник, а лишь при некоторых значениях коэффициента замедления. Связано это со сложным характером возбуждения периодической структуры в открытом резонаторе, обусловленным выполнением необходимых условий резонанса для такой системы в целом как открытого резонатора, и соблюдением условий резонанса по медленным (поверхностным) волнам. Выполнение этих резонансных условий зависит от величины и характера неоднородностей, вносимых в открытый резонатор отверстием связи, периодической структурой, прикатодной и приколлекторной диафрагмами. Эти неоднородности трудно учесть, поэтому экспериментально полученные дисперсионные характеристики внешне идентичных экземпляров открытых резонансных систем с периодическими структурами могут значительно отличаться.

Как показали результаты исследований, на высших гармониках (выше третьей) количество областей, в которых осуществлялось эффективное взаимодействие в режимах ОРО, ДИ, ЛОВ, ЛБВ, уменьшалось. Диафрагмирование отверстия связи на сферическом зеркале также приводило к уменьшению областей эффективного взаимодействия.

При исследовании дисперсионных характеристик открытых резонансных систем с периодическими структурами характерным было наличие в ДИ-режиме наибольшего количества областей эффективного взаимодействия.

При исследовании дисперсионных характеристик низкодобротных систем обнаружено больше, чем в высокодобротных резонаторах, областей взаимодействия в режимах ЛОВ и ЛБВ.

Полученные результаты показали, что эффективное взаимодействие в этих режимах может быть осуществлено не только с низшими, но и с высшими пространственными гармониками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith S. J., Parcella E. M. „Phys. Rev.“, 1953, 92, 1069.
2. Шестопапов В. П. и др. «Вестн. АН УССР», 1972, № 3, 27.
3. Русин Ф. С., Богомолов Г. Д. «Письма в ЖЭТФ», 1966, 4, № 6, 236.
4. Балаклицкий И. М. и др. «Украинский физический журнал», 1969, 14, 539.
5. Богомолов Г. Д. и др. «Электронная техника. Электроника СВЧ», 1970, 1, 97.
6. Афонин Д. Г. и др. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астроном.», 1973, № 2, 243.
7. Афонин Д. Г., Костиенко А. И., Пирогов Ю. А., Рышков С. И. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астроном.», 1973, 3, 375.
8. Костиенко А. И., Девятков М. Н., Лебедь А. А. «Радиотехника и электроника», 1959, 4, 3, 482.
9. Казанцев Ю. Н. «Изв. вузов. Радиофизика», 1967, 10, 4, 518.