

# ВАКУУМНАЯ И ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 519.237.4:621.385.6

## КОНКУРЕНЦИЯ И КООПЕРАЦИЯ МОД В МАЛООБЪЕМНОМ ГДИ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ИЗ СВЯЗАННЫХ ЖЕЛОБКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

В. С. Мирошниченко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [mirosh@ire.kharkov.ua](mailto:mirosh@ire.kharkov.ua)*

Рассмотрены особенности возбуждения колебаний в малообъемном генераторе дифракционного излучения (ГДИ). Проведены исследования особенностей конкуренции мод в ГДИ в 8-мм диапазоне длин волн. Обнаружен двухчастотный режим генерации, характеризующийся кооперативным взаимодействием возбуждаемых мод. Проведена идентификация резонансных мод, участвующих в кооперативном взаимодействии, и предложен механизм возникновения синхронных двухчастотных режимов в резонансных автогенераторах с распределенным взаимодействием. Ил. 10. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** генератор дифракционного излучения, электронный поток, конкуренция и кооперация мод, открытая резонансная система, миллиметровый диапазон.

Использование в ГДИ малообъемных открытых резонансных систем (ОРС) было обусловлено практической необходимостью снижения веса и габаритов используемых магнитных фокусирующих систем (МФС), а также было продиктовано необходимостью расширения диапазона электрической настройки частоты для данных источников когерентного излучения [1]. Несмотря на малые значения продольного индекса колебаний ( $q = 1 \div 3$ ), добротность колебаний в малообъемной ОРС составляет  $Q_L \approx 500$ , что обеспечивает стабильность частоты генерации не менее  $10^{-5}$ . С другой стороны, в малообъемном ГДИ электродинамическая система помещена в закрытый вакуумный объем, что приводит к снижению дифракционных потерь для высших типов колебаний, вследствие чего возбуждение колебаний сопровождается конкуренцией либо кооперацией мод в ОРС.

Исследованию особенностей взаимодействия мод в резонансных автогенераторах с длительным взаимодействием и поиску многочастотных режимов генерации уделялось достаточно много внимания, как в теоретическом плане, так и в эксперименте. Однако наблюдавшиеся ранее многочастотные режимы отличались скорее конкуренцией возбуждаемых мод и снижением суммарного уровня выходной мощности, а механизму кооперации мод в ГДИ не уделялось достаточного внимания. Так в работе [2] продемонстрирована конкуренция близлежащих мод в оротроне, приводящая к установлению колебаний только на одной из частот. Многочастотный режим генерации в оротроне на близлежащих, но не взаимодействующих в “холодной” ОРС модах смоделирован в работе [3]. В эксперименте [4] одновременная генерация на нескольких частотах в ГДИ

наблюдалась в зоне электронного гистерезиса. Механизм кооперативного взаимодействия мод и его практическое использование детально исследованы в гиротронах [5] и релятивистских ЛБВ [6].

В этой работе приведены результаты экспериментального исследования особенностей конкуренции и кооперации мод в малообъемном ГДИ, проведена идентификация резонансных мод, участвующих во взаимодействии, а также определены условия возникновения двухчастотных режимов генерации, характеризующихся кооперацией мод.

**1. Объект исследования и методика эксперимента.** Исследование режимов конкуренции и кооперации возбуждаемых мод было проведено на макете малообъемного ГДИ в 8-мм диапазоне длин волн. ОРС ГДИ состояла из полусферического открытого резонатора (ОР) и сдвоенной периодической структуры из связанных желобковых волноводов [7], размещенной на плоском зеркале (см. рис. 1).

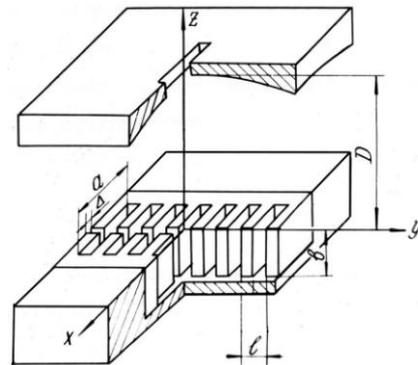


Рис. 1. Схема ОРС ГДИ

Здесь  $a$  - суммарная ширина желобковых волноводов;  $b$  - высота периодической структуры;

$l$  - период структуры;  $L$  - длина пространства взаимодействия;  $D$  - межзеркальное расстояние;  $A$  - апертура плоского зеркала вдоль оси  $OX$ . Узел связи ОР с нагрузкой располагался в центре сферического зеркала и был выполнен в виде волноводного перехода на сечение  $7,2 \times 0,25$  мм<sup>2</sup>. Возбуждение колебаний в ГДИ осуществлялось при движении ленточного электронного пучка вдоль оси  $OY$  в канале периодической структуры ( $\Delta$  - ширина пролетного канала), ось электронного пучка была размещена на уровне  $z = -b/2$ . Для исключения влияния переходных процессов, возникающих при импульсном возбуждении ГДИ, все измерения проведены в режиме длинных импульсов ( $\tau_{\text{и}} = 1$  мкс;  $f_{\text{повт}} = 100 \div 200$  Гц).

**2. Идентификация типов возбуждаемых мод в ОРС малообъемного ГДИ.** Для идентификации возбуждаемых мод в ОРС малообъемного ГДИ были проведены “холодные” измерения параметров резонансных мод. Определялись: нагруженная добротность  $Q_L$ ; коэффициент связи ОРС с нагрузкой  $\beta$ ; дисперсионные зависимости  $D(f)$ . Для каждой из мод проведено сравнение дисперсионных кривых  $D(f)$  с результатами численного моделирования свойств резонансных мод в двумерной модели ОРС, где двойная решетка заменена прямоугольной канавкой с размерами  $a \times b$  [8]. При идентификации также учитывалось число зон генерации по ускоряющему напряжению для данной моды, наблюдавшееся в эксперименте.

Размещение периодической структуры на одном из зеркал ОРС приводит к непрерывной трансформации структуры поля при изменении межзеркального расстояния и непрерывной перестройке моды по частоте. Распределение поля в объеме ОР соответствует функциям Эрмита-Гаусса только на некоторых частотах, соответствующих режиму фазового согласования периодической структуры с полем ОРС. Поэтому структуру поля в ОРС на частотах фазового согласования мы возьмем за основу для обозначения дисперсионных кривых  $D(f)$ , характеризующих резонансные расстояния между зеркалами для наблюдавшихся мод. Тогда через  $TEM_{mnq}$  обозначим гауссовую моду в ОРС, а индексы  $m, n$ , описывают число вариаций поля в функции Эрмита-Гаусса вдоль  $OX$  и  $OY$ ,  $q$  – продольный индекс моды, описывающий число полуволн вдоль  $OZ$ . В качестве примера на рис. 2,а представлено распределение электрической компоненты поля резонансной моды  $TEM_{202}$  на частоте фазового согласования прямоугольной канавки с полем резонатора, полученное при численном моделировании свойств ОРС.

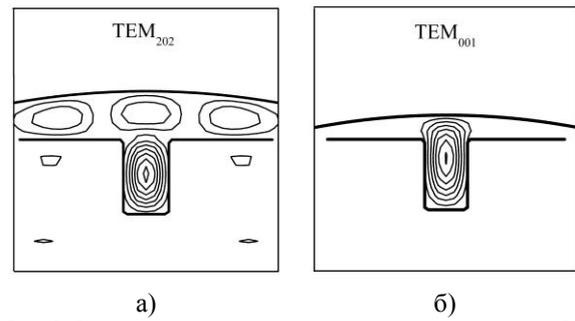


Рис. 2. Распределение  $E$ -компоненты резонансного поля в ОРС с прямоугольной канавкой на зеркале

Из всего спектра собственных колебаний ОРС генератора будем рассматривать только моды, имеющие составляющую электрического поля в пролетном канале  $\vec{E} \parallel OY$  и взаимодействующие с электронным пучком. Отметим, что для гауссовых мод перенос энергии происходит вдоль оси  $OZ$ , и влияние стенок корпуса макета на дисперсию мод незначительно.

При сближении зеркал резонатора вплоть до касания ( $D < \lambda/2$ ) резонансное поле стягивается к канавке на зеркале, заполненной в ГДИ периодической структурой, а гауссова мода  $TEM_{001}$  трансформируется в волноводную моду призматического резонатора  $H_{111}$ , сосредоточенную в объеме  $a \times L \times (b + D)$ . Для этого случая распределение электрической компоненты поля моды  $TEM_{001}$  представлено на рис. 2,б. Отметим, что для волноводной моды перенос энергии происходит как вдоль  $OZ$ , так и вдоль  $OY$ , что приводит к существенному изменению характера дисперсионных кривых  $D(f)$  и условий для фазового синхронизма медленной пространственной гармоники в периодической структуре с электронным пучком. Отметим, что для мод  $TEM_{212}$  и  $TEM_{011}$  структура поля в ОРС аналогична приведенной на рис. 2, только вдоль оси  $OY$  присутствуют два противофазных пятна поля на зеркале ОРС.

**3. Конкуренция мод при одночастотном режиме работы ГДИ.** Открытая электродинамическая система малообъемного ГДИ способна поддерживать несколько резонансных мод, которые не взаимодействуют между собой благодаря их высокой добротности. Поэтому конкуренция между близлежащими модами происходит из-за общего источника энергии – электронного пучка. Для возникновения такой конкуренции необходимо, чтобы ток электронного пучка превышал стартовый ток для каждой из мод ( $I \gg I_{st1}, I_{st2}$ ), а также наблюдалось перекрытие зон генерации для конкурирующих мод по ускоряющему напряжению ( $U_{\phi} \approx U_{\phi 1} \approx U_{\phi 2}$ ). Конкуренция мод приводит к

жесткому режиму возбуждения колебаний, ограничению зоны электронной перестройки частоты и срыву генерации вблизи максимума мощности, способствует затягиванию частоты конкурирующим колебанием в зоне электронного гистерезиса [9].

Активная мощность, отдаваемая электронным пучком резонансному полю гауссовой  $TEM_{mnq}$ -моды в ГДИ составляет [10]

$$P_e = C_{mn} \frac{L}{\varphi_p} \left\{ \left[ H_n \left( \frac{\varphi - \varphi_p}{2\sqrt{2}} \right) \right]^2 \times \exp \left[ -\frac{\varphi - \varphi_p}{8} \right] - \left[ H_n \left( \frac{\varphi + \varphi_p}{2\sqrt{2}} \right) \right]^2 \times \exp \left[ -\frac{\varphi + \varphi_p}{8} \right] \right\} = \rho F_{mn}(\varphi, \varphi_p), \quad (1)$$

где  $C_{mn}$ ,  $\rho$  - константы;  $H_n(\xi)$  - полиномы Эрмита;  $v_\Phi = \frac{lc}{s\lambda}$  - фазовая скорость  $s$ -й пространственной гармоники поля резонансной моды вблизи периодической структуры;  $c$  - скорость света в вакууме;  $v_0$  - начальная скорость электронов пучка;  $\varphi = L\omega/v_\Phi - \omega/v_0$  - параметр рассинхронизма;  $\varphi_p = L\omega_p/v_0$  - параметр пространственного заряда;  $L = 4r_{mn}$  - длина пространства взаимодействия;  $\omega = 2\pi c/\lambda$  - частота колебаний. Число зон с положительным балансом энергообмена электронного пучка с резонансным полем для функции рассинхронизма  $F_{mn}(\varphi, \varphi_p)$  составляет  $(n+1)$  и определяется числом вариаций поля  $TEM_{mnq}$ -моды вдоль пространства взаимодействия [11]. Взаимное расположение (перекрывание) зон генерации для соседних мод в ОРС генератора определяет характер энергообмена между ними (конкуренция или кооперация мод).

Рассмотрим особенности возбуждения гауссовой  $TEM_{002}$ -моды в экспериментальном макете малообъемного ГДИ. Отметим, что рабочий ток электронного пучка существенно превышал стартовый ток не только основной  $TEM_{002}$ -моды, но и стартовый ток ее ближайших спутников ( $TEM_{012}$ ,  $TEM_{022}$ ,  $TEM_{202}$ ). Другой особенностью работы ГДИ на  $TEM_{002}$ -моды являлась ее сильная пересвязь с нагрузкой: при нагруженной добротности  $Q_L = 250 \div 450$  коэффициент связи составлял  $\beta = 4 \div 10$  в диапазоне перестройки  $f = 34 \div 37$  ГГц.

Диаграмма комбинированной перестройки ГДИ, представленная на рис. 3,а в координатах

$D(f)$ , иллюстрирует взаимное расположение дисперсионных кривых для мод, возбуждаемых как в «холодном» режиме (сплошные кривые), так и в режиме генерации (точки-символы). Здесь значение параметра  $D - H = 0$  соответствует случаю касания сферического и плоского зеркал ( $H$  - величина прогиба сферического зеркала). Параллельное размещение кривых  $D(f)$  на диаграмме перестройки для мод  $TEM_{002}$ ,  $TEM_{012}$ ,  $TEM_{022}$  свидетельствует об отсутствии вырождения этих мод как в «холодной» ОРС, так и в режиме генерации: разнос частот мод-спутников достигал 1 ГГц при полосе пропускания нагруженной ОРС на каждой из мод  $\Delta f \leq 80 \div 120$  МГц.

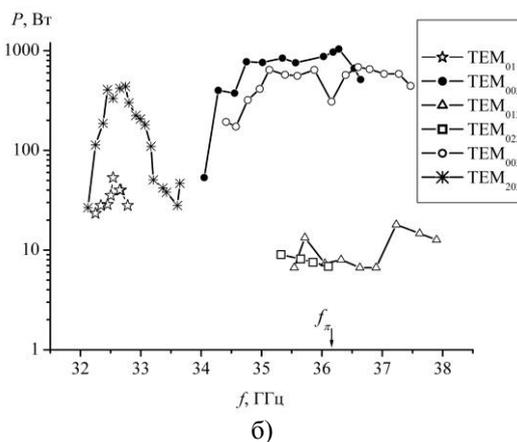
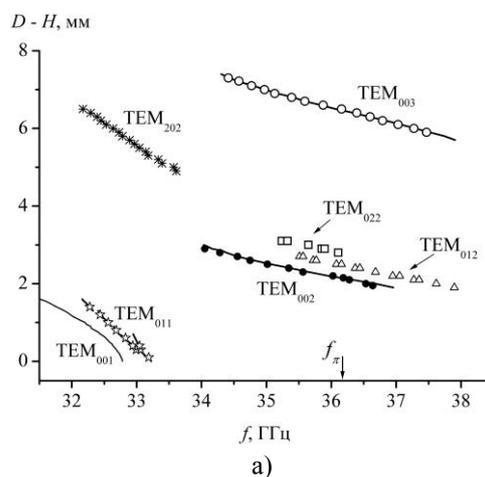


Рис. 3. Диаграмма комбинированной перестройки ГДИ (а) и уровень выходной мощности для возбуждаемых мод (б)

На рис. 3,б представлено изменение уровня выходной мощности ГДИ в полосе перестройки для каждой из возбуждаемых мод. Максимум выходной мощности ГДИ наблюдался при возбуждении генерации на модах  $TEM_{002}$  и  $TEM_{003}$  в полосе частот  $f = 34,5 \div 37,5$  ГГц, т. е. в зоне фазового согласования периодической структуры с полем ОРС

$$f \approx f_{\pi} = \frac{c}{2b} \sqrt{1 + \left(\frac{2b}{\lambda_c}\right)^2}. \quad (2)$$

Здесь  $\lambda_c \approx 2a$  - критическая длина волны, распространяющейся вдоль  $OZ$  в многожелобковом волноводе, образованном противостоящими щелями двойной решетки и пролетным каналом для электронного пучка [7].

В полосе частот  $f = 35 \div 38$  ГГц также наблюдалось возбуждение колебаний в ГДИ на моде  $TEM_{012}$  с двумя вариациями поля вдоль движения электронного пучка и моде  $TEM_{022}$  с тремя вариациями поля вдоль движения электронного пучка. Для каждой из этих мод обнаружены две зоны генерации при ускоряющем напряжении пучка  $U < U_{\Phi}$  и  $U > U_{\Phi}$ .

Таким образом, в отличие от работы [3] для гауссовых мод-сателлитов  $TEM_{002}$ ,  $TEM_{012}$ ,  $TEM_{022}$  в малообъемном ГДИ наблюдался только одночастотный режим генерации с энергетической конкуренцией мод при перекрытии зон генерации по ускоряющему напряжению для общего электронного пучка.

Как видно из представленной на рис. 4 дисперсионной диаграммы для фазовых скоростей, зоны генерации для  $TEM_{012}$  и  $TEM_{022}$ - типов колебаний размещены по обе стороны  $2\pi$ -линии, соответствующей условию синхронизма скоростей электронного пучка и пространственной гармоники:  $v_0 = v_{\Phi}$ . Для колебаний  $TEM_{002}$  и  $TEM_{202}$  с одним пятном поля вдоль движения электронного пучка присутствует только одна зона генерации при  $U > U_{\Phi}$ , размещенная ниже  $2\pi$ -линии на дисперсионной диаграмме.

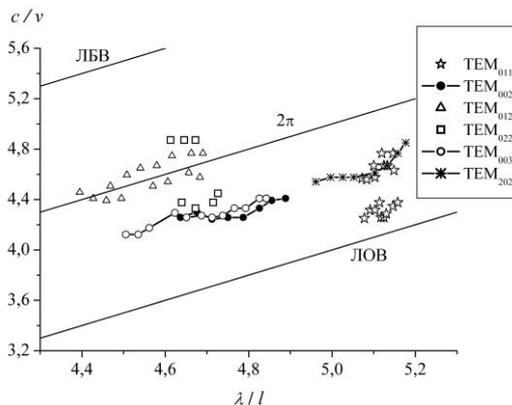


Рис. 4. Дисперсионная диаграмма для фазовых скоростей пространственных гармоник поля в периодической структуре малообъемного ГДИ

Расчет функции рассинхронизма согласно (1) для мод  $TEM_{002}$  и  $TEM_{012}$  показал частичное

перекрытие зон генерации, что приводит к жесткому режиму возбуждения ГДИ на моде  $TEM_{002}$  (рис. 5). Это типичный случай энергетической конкуренции разнесенных по частоте резонансных мод в ГДИ. Возбуждение ГДИ на гауссовой  $TEM_{202}$  -моде с одним пятном поля вдоль пространства взаимодействия наблюдалось только в низкочастотной области ( $f = 32 \div 34$  ГГц), что обусловлено перекрытием зоны генерации по напряжению для данной моды конкурирующими колебаниями  $TEM_{012}$  и  $TEM_{022}$ .

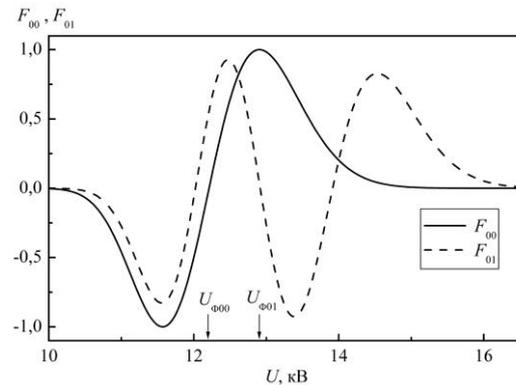


Рис. 5. Взаимное расположение функций рассинхронизма для конкурирующих мод  $TEM_{002}$  ( $F_{00}$ ) и  $TEM_{012}$  ( $F_{01}$ )

**4. Кооперативное взаимодействие мод при двухчастотном режиме генерации в ГДИ.** При малых межзеркальных расстояниях ( $D - H \leq 1,5$  мм) наблюдалось возбуждение ГДИ на моде  $TEM_{011}$  с двумя вариациями  $E$ -компоненты резонансного поля вдоль пространства взаимодействия, и соответственно на дисперсионной диаграмме (см. рис. 4) присутствуют две зоны генерации по ускоряющему напряжению. Однако обе зоны генерации располагаются ниже  $2\pi$ -линии на дисперсионной диаграмме. Это свидетельствует о трансформации данной моды в волноводную моду  $H_{121}$ , сосредоточенную в объеме  $a \times L \times (b + D)$ . Для волноводной моды наблюдается перенос части запасенной энергии вдоль оси  $OY$ , что и приводит к существенному изменению фазовой скорости медленной пространственной гармоники в периодической структуре, взаимодействующей с электронным пучком.

Характерной особенностью работы ГДИ на  $TEM_{011}$ -моде является наличие двух зон генерации с одинаковыми частотами при различных значениях ускоряющего напряжения пучка  $U_1$  и  $U_2$ , что и наблюдалось при комбинированной перестройке до  $D - H \geq 0,5$  мм. Однако при дальнейшем уменьшении межзеркального расстояния вплоть до касания зеркал возникал устойчивый двухчастотный режим в запретной зоне для само-

возбуждения генератора на  $TEM_{011}$ -мод, а именно, при ускоряющем напряжении  $U_1 < U < U_2$ . Для этого случая на рис. 6,а представлен ход изменения суммарной выходной мощности и парциальных частот резонансных мод от ускоряющего напряжения. Разделим зону электронной перестройки условно на три участка: *A* - (11÷13 кВ), *B* - (13÷14,5 кВ) и *C* - (14,5÷15 кВ). Участки *A* и *C* представляют собой типичные две зоны генерации с одинаковыми частотами, которые характерны для возбуждения ГДИ на  $TEM_{011}$ -мод с двумя противофазными пятнами поля вдоль движения электронного пучка. На промежуточном участке (зона *B*) самовозбуждение на  $TEM_{011}$ -мод невозможно, поэтому происходит возбуждение близлежащей моды в ОРС с резонансной частотой выше на 120 МГц. Причем наблюдаемое плавное изменение частоты при переходе на высшую по частоте моду ( $U = 13,2$  кВ), свидетельствует о сильном электродинамическом взаимодействии этих мод.

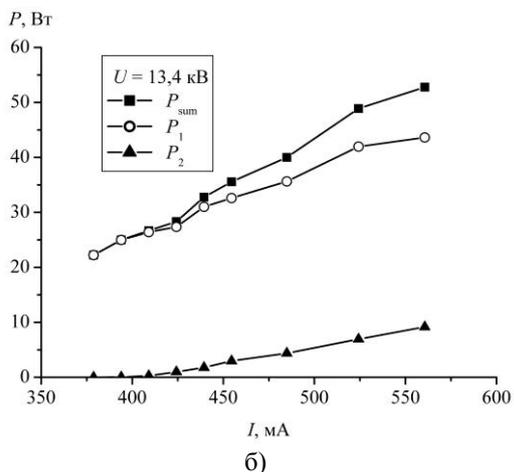
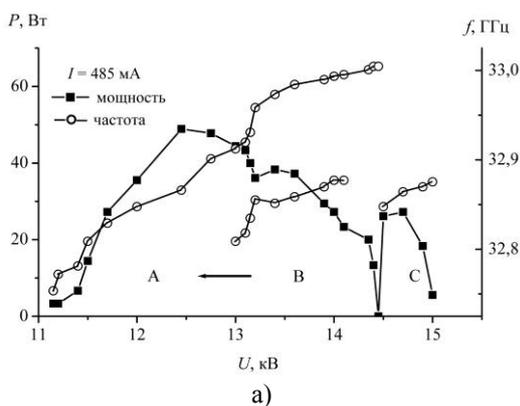


Рис. 6. Зона электронной перестройки ГДИ при двухчастотном режиме генерации (а) и зависимость мощности парциальных мод от рабочего тока (б)

При исследовании двухчастотной генерации регистрировались суммарная выходная мощ-

ность, частоты парциальных мод и индекс модуляции сигнала на выходе квадратичного детектора, а уровень мощности каждой из мод определялся расчетным путем. На рис. 6,б представлена зависимость от рабочего тока мощности, выведенной в нагрузку для каждой из парциальных мод, участвующих в режиме двухчастотной генерации в ГДИ. Здесь через  $P_1$  обозначена мощность генерации на высшей по частоте моде ОРС, которая возбуждается автономно на участке *B* зоны электронной перестройки ГДИ, а через  $P_2$  обозначена мощность второй парциальной моды  $TEM_{011}$ , не способной к самовозбуждению в зоне *B*. При увеличении тока пучка наблюдается рост, как суммарной мощности генерации, так и увеличение мощности каждой из парциальных мод, участвующих во взаимодействии. Возбуждение генерации на второй парциальной частоте ( $P_2$ ) при  $I > 375$  мА не приводит к срыву колебаний или хотя бы к снижению мощности колебаний на первой моде ( $P_1$ ), что и свидетельствует о кооперативном взаимодействии мод при двухчастотном режиме генерации колебаний в малообъемном ГДИ.

Отметим, что при анализе спектра выходного сигнала ГДИ наблюдались только две составляющие, разнесенные по частоте на 120 МГц, т. е. в генераторе не присутствовала амплитудная модуляция колебаний. Промежуточная частота (120 МГц), выделенная на квадратичном детекторе сигнала, была стабильна на протяжении всей длительности импульса излучения ( $\tau_u = 1$  мкс).

Для выяснения механизма кооперативного взаимодействия мод в ГДИ были проведены «холодные» измерения параметров резонансных мод в ОРС вблизи зоны двухчастотной генерации. На рис. 7 сплошными линиями представлена диаграмма перестройки основной  $TEM_{001}$ -моды в «холодной» ОРС и  $TEM_{011}$ -моды с двумя пятнами поля вдоль  $OY$ . Точками на диаграмме отмечена перестройка ОРС в режиме самовозбуждения колебаний на  $TEM_{011}$ -мод. Характерной особенностью ОРС оказалась ее низкая нагруженная добротность на  $TEM_{001}$ -мод ( $Q_L \approx 200$ ) вследствие большого коэффициента связи с нагрузкой ( $\beta \approx 3$ ) и больших омических потерь в периодической структуре. Это обстоятельство и привело к подавлению возбуждения колебаний в малообъемном ГДИ на  $TEM_{001}$ -мод. Добротность для  $TEM_{011}$ -моды значительно выше  $Q_L \approx 600 \div 1000$ , а небольшой коэффициент связи с нагрузкой ( $\beta = 0,1 \div 0,25$ ) обеспечивается благодаря незначительной асимметрии поля резонансной моды вдоль  $OY$  в экспериментальном макете генератора.

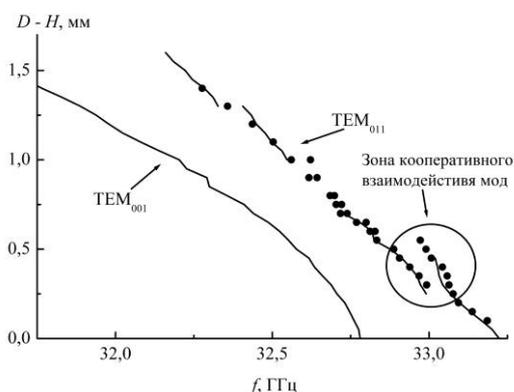


Рис. 7. Диаграмма перестройки резонансных мод в ОРС вблизи зоны двухчастотной генерации

Изрезанный характер кривой  $D(f)$  для перестройки на  $TEM_{011}$ -моду свидетельствует об ее электродинамическом взаимодействии с другими резонансными модами в ОРС. Ввиду близкого расположения зеркал ( $D < \lambda/2$ ) это уже не могут быть гауссовы  $TEM_{mnl}$ -моды, а скорее всего, во взаимодействие вступают объемные моды типа  $H_{mm0}$  с электрической составляющей параллельной оси  $OZ$ . Эти резонансные моды существуют в призматическом волноводном резонаторе  $A \times L \times D$ , образованном проводящими стенками корпуса ГДИ и зеркалами ОРС.

В пользу высказанного утверждения свидетельствует почти вертикальный характер разрывов на диаграмме перестройки  $TEM_{011}$ -моды, т. е. наблюдается слабая зависимость резонансных частот для объемных волноводных мод от межзеркального расстояния  $D$ . Исходя из приближенной оценки размеров закрытого объема в области двухчастотного режима ( $27 \times 24 \times 1,5 \text{ мм}^3$ ) одной из близлежащих по частоте мод призматического резонатора может быть мода  $H_{530}$ , которая имеет три вариации поля на поверхности периодической структуры вдоль  $OY$ . Примерная схема распределения электрической компоненты поля для моды  $H_{530}$  приведена на рис. 8.

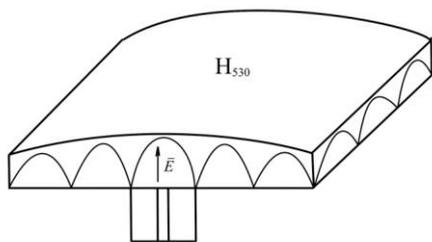


Рис. 8. Схема распределения электрической компоненты для объемной  $H_{530}$ -моды призматического резонатора в ОРС

Электродинамическая связь между модами  $TEM_{011}$  и  $H_{530}$  с различной симметрией вдоль оси  $OY$  может быть вызвана небольшим возмущением полей в макете генератора по сравнению с теоретической моделью ОРС.

На рис. 9 приведены добротность ОРС и коэффициент связи с нагрузкой для взаимодействующих мод. Как видим, в области взаимодействия происходит выравнивание нагруженной добротности для моды 1 ( $H_{530}$ ) и моды 2 ( $TEM_{011}$ ). При увеличении расстояния между зеркалами ( $D - H > 0,4 \text{ мм}$ ) объемная мода призматического резонатора ( $H_{530}$ ) теряет добротность, и прекращается взаимодействие мод.

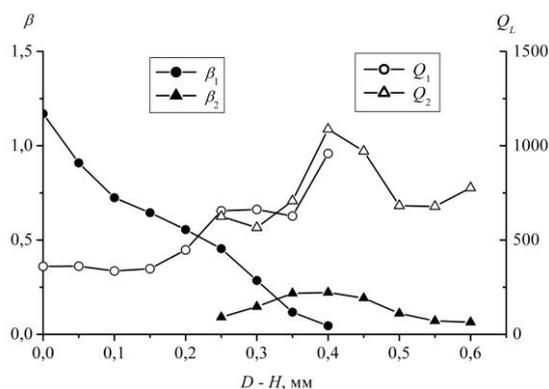


Рис. 9. Поведение нагруженной добротности и коэффициентов связи с нагрузкой для взаимодействующих мод  $H_{530}$  ( $Q_1, \beta_1$ ) и  $TEM_{011}$  ( $Q_2, \beta_2$ )

Для близлежащих по частоте резонансных мод с несколькими вариациями поля (две, три и более) вдоль движения электронного потока зоны генерации для функции рассинхронизма  $F_{mn}$  могут взаимно дополнять друг друга, что при наличии связи между модами может приводить к кооперативному взаимодействию мод. Представим механизм энергообмена моды  $H_{530}$  с электронным пучком функцией рассинхронизма для гауссовой  $TEM_{021}$ -моды, имеющей также три пятна поля вдоль пространства взаимодействия при той же фазовой скорости медленной пространственной гармонике. Тогда рассчитанное согласно (1) взаимное расположение зон генерации для мод  $TEM_{011}$  и  $H_{530}$  представлено на рис. 10. В запретной зоне для моды  $TEM_{011}$  при ускоряющем напряжении  $U = 10,5 \text{ кВ}$  ничто не препятствует возбуждению колебаний на моде  $H_{530}$ , а отработавшие электроны снижают свою энергию и переходят в оптимальную зону для генерации на  $TEM_{011}$ -моду при напряжении  $U = 9,7 \text{ кВ}$ . Этот механизм взаимодействия мод как раз и наблюдался в эксперименте: при уско-

ряющем напряжении  $U_B$  (рис. 6,а) происходило возбуждение моды  $H_{530}$ , а отработавшие электроны снижали свою скорость и переходили в зону А, способствуя синхронному возбуждению колебаний и на  $TEM_{011}$ -моды. Необходимые фазовые условия обеспечивались перекачкой запасенной энергии между связанными модами.

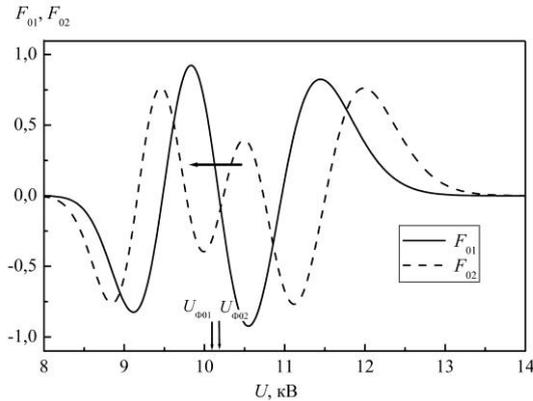


Рис. 10. Предполагаемое взаимное расположение функций рассинхронизма для  $TEM_{011}$ -моды ( $F_{01}$ ) и  $H_{530}$ -моды ( $F_{02}$ ) при кооперации мод в малообъемном ГДИ

Таким образом, в основе механизма кооперативного взаимодействия мод при синхронном двухчастотном режиме лежит сильная взаимосвязь колебаний с несколькими вариациями поля вдоль пространства взаимодействия. Это обеспечивает появление на зоне электронной перестройки ГДИ участка (зона В на рис. 6,а), где происходит возбуждение одной из связанных мод без конкуренции колебаний. Возбуждение колебаний на второй частоте происходит за счет группы отработавших электронов, попадающих в низковольтную зону рассинхронизма для  $TEM_{011}$ -моды (зона А на рис. 6,а), а также благодаря перекачке энергии между связанными модами. Отметим, что для кооперативного взаимодействия мод в ГДИ необходимо не только, чтобы отработавшие электроны имели скорость, синхронную со второй модой, но и попадали в пространство взаимодействия в оптимальной фазе ВЧ поля, что возможно только при фазовом синхронизме взаимодействующих мод.

**Выводы.** Для гауссовых мод  $TEM_{002}$ ,  $TEM_{012}$ ,  $TEM_{022}$ , не вступающих в межтиповое взаимодействие, в малообъемном ГДИ наблюдался только одночастотный режим генерации с энергетической конкуренцией мод при перекрытии зон генерации по ускоряющему напряжению.

Двухчастотный режим генерации в малообъемном ГДИ обнаружен на связанных модах в ОРС при малых межзеркальных расстояниях и

характеризуется кооперативным механизмом взаимодействия мод. Двухчастотный режим генерации отличается устойчивостью, существует в широком диапазоне ускоряющих напряжений пучка, причем, наблюдается увеличение как суммарной генерируемой мощности с ростом тока пучка, так и рост мощности колебаний для парциальных мод.

Обнаруженные двухчастотные режимы, по-видимому, могут быть реализованы и в других резонансных автогенераторах О-типа с распределенным взаимодействием, а на их основе могут быть созданы радиотехнические устройства с непосредственным переносом информации на промежуточную частоту в самом источнике излучения.

1. Скрынник Б. К., Корнеев В. К., Мирошниченко В. С. Генераторы дифракционного излучения миллиметрового диапазона длин волн // Вісник Харків. нац. ун-ту. Радіофізика та електроніка. - 2002. - №370, вип.2. - С.105-108.
2. Соловьев А. Н., Цейтлин М. Б., Белявский Б. А. Анализ условий возбуждения высших типов колебаний в оротроне на основе нелинейной многочастотной теории // Радиотехника и электроника. - 1985. - 30, вып.1. - С.106-110.
3. Lutger S. Mode Competition in the Orotron // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. - 1992. - 13, N1. - P.71-90.
4. Demchenko M. Yu., Korneenkov V. K., Kurin V. G. Frequency self-stabilization of the diffraction radiation oscillator in a biharmonic mode // Microwave and Optical Technology Letters. - 2001. - 31, N2. - P.112-115.
5. Idehara T., Mitsudo S., Pereyaslavets M. et al. Mode cooperation in a submillimeter wave FU series gyrotron // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. - 1999. - 20, N7. - P.189-210.
6. Бреднев А. А., Кураев А. А., Синицын А. К. Кооперация мод в релятивистской ЛБВ на гофрированном волноводе // 13-я Международная Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". - Севастополь: Вебер, 2003. - 1. - С.243-244.
7. Мирошниченко В. С. Периодическая структура ЛСЭ из связанных желобковых волноводов // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1998. - 3, №2. - С.69-72.
8. Делченко М. Ю., Корнеев В. К., Мирошниченко В. С. и др. Открытый резонатор с прямоугольной канавкой на зеркале, теория и эксперимент // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2000. - 5, №3. - С.19-29.
9. Корнеев В.К., Курин В.Г. Экспериментальное исследование автостабилизации частоты в генераторе дифракционного излучения // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2007. - 12, №2. - С.389-393.
10. Евдокименко Ю. И., Лукин К. А., Ревин И. Д. и др. Особенности энергообмена в генераторах дифракционного излучения - лазерах на свободных электронах. - Харьков, 1982. - 46 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; №191).
11. Евдокименко Ю. И., Лукин К. А., Ревин И. Д., Скрынник Б. К. Особенности работы ГДИ на высших модах открытого резонатора // Журн. техн. физики. - 1982. - 52, №3. - С.525-527.

COMPETITION AND COOPERATION OF  
MODES IN SMALL-VOLUME DRO WITH  
PERIODIC STRUCTURE FROM COUPLED  
GROOVED WAVEGUIDES

V. S. Miroshnichenko

The singularities of excitation of oscillations in small-volume diffraction radiation oscillator (DRO) are surveyed. The examinations of singularities of a competition of modes in DRO in 8-mm waveband are carried out. The bifrequency condition of generations described by cooperative interaction of excited modes detected. The identification of resonant modes participating in cooperative interaction is carried out and the mechanism of origin of synchronous bifrequency conditions in resonant self-oscillators with distributed interaction is offered.

**Key words:** diffraction radiation oscillator, electron beam, competition and cooperation of modes, open resonant system, millimeter waveband.

КОНКУРЕНЦІЯ ТА КООПЕРАЦІЯ МОД В  
МАЛООБ'ЄМНОМУ ГДВ З ПЕРІОДИЧНОЮ  
СТРУКТУРОЮ ІЗ ЗВ'ЯЗАНИХ ЖОЛОБКОВИХ  
ХВИЛЕВОДІВ

В. С. Мірошніченко

Розглянуто особливості збудження коливань в малооб'ємному генераторі дифракційного випромінювання (ГДВ). Проведені дослідження особливостей конкуренції мод в ГДВ у 8-мм діапазоні довжин хвиль. Виявлено двочастотний режим генерації, який характеризується кооперативною взаємодією збуджуваних мод. Проведена ідентифікація резонансних мод, які приймають участь в кооперативній взаємодії, та запропоновано механізм виникнення синхронних двочастотних режимів в резонансних автогенераторах з розподіленою взаємодією.

**Ключові слова:** генератор дифракційного випромінювання, електронний потік, конкуренція та кооперація мод, відкрита резонансна система, міліметровий діапазон.

*Рукопись поступила 25 января 2008 г.*