

УДК 535.825.3

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ В ОТКРЫТОМ РЕЗОНАТОРЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. К. Қорнеев, В. С. Мирошниченко, В. П. Шестопаев

Проведены исследования распределения полей в открытом резонаторе (ОР) действующего генератора дифракционного излучения (ГДИ). В специально разработанном макете ГДИ организован прямой доступ в объем его ОР. Визуализация полей в ОР проводилась как при помощи термохимической бумаги (ТХБ), так и сканированием рассеивающего пробного тела. В результате обнаружены оптимальные рабочие моды ОР, установлено влияние ограниченной периодической структуры на амплитудное и фазовое распределение полей в ОР.

В генераторах дифракционного излучения, являющихся перспективными источниками когерентных колебаний в миллиметровых и субмиллиметровых областях спектра, в качестве резонансной системы используется высокодобротный открытый резонатор. Наличие на одном из зеркал ОР ограниченной периодической структуры сильно усложняет задачу теоретического исследования распределения полей возбуждаемых типов колебаний, поэтому экспериментальные исследования характера возбуждаемых полей в сложных ОР, в силу приближенности используемых методов расчета, имеют существенное значение. Особую ценность имеют исследования полей в ОР действующих макетов ГДИ [1]. Получаемая информация о распределении полей в ОР действующего ГДИ необходима при разработке генераторов по следующим причинам: возбуждение в ОР различных мод зачастую затрудняет их идентификацию, поэтому информация о распределении полей в ОР позволяет выбрать оптимальные рабочие моды и наметить пути борьбы с паразитными типами колебаний; при расчете выходных характеристик генератора необходима информация о распределении поля вблизи периодической структуры и количественные соотношения между амплитудой поля вблизи периодической структуры и амплитудой стоячей волны в объеме ОР; наличие электронного пучка в «горячей» модели генератора приводит к изменению добротности ОР, величины связи с нагрузкой, резонансной частоты по сравнению с «холодной» моделью генератора.

1. Методика эксперимента. Для исследования полей в действующем ГДИ необходимо осуществить свободный доступ в объем ОР. Для этого была разработана специальная конструкция макета генератора, схематически представленная на рис. 1. Макет ГДИ состоит из двух основных частей: нижнее зеркало 1, содержащее ограниченную периодическую структуру 2 и электронную пушку 3, вакуумно изолируется от остального объема ОР тонким слоем СВЧ-прозрачного диэлектрика 4; верхнее зеркало 5 резонатора, содержащее вывод энергии 6, размещается в свободном пространстве при атмосферном давлении. Узел нижнего зеркала 1 находится под непрерывной откачкой до $P \approx$

$\approx 1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Перестройка генератора осуществляется перемещением вдоль оси ОР зеркала 5 с одновременным изменением ускоряющего напряжения. Для исследования распределения полей в действующем макете ГДИ используется два метода. Для получения экспресс-информации о возбуждаемых типах колебаний применяется эффект воздействия СВЧ-поля на термохимическую бумагу, при детальном исследовании распределения полей — метод сканирования пробного тела в исследуемом сечении ОР. Рассмотрим эти методы более подробно.

Известные методы визуализации электромагнитных полей с применением фотобумаги, люминесцентных экранов [2], жидкокристаллических индикаторов [3] малоприспособлены для исследования полей в ОР в связи с большими вносимыми потерями и с трудностями осуществления подсветки, фотографирования изображения и др. Однако, благодаря высокой добротности ОР, даже при небольшой мощности генерации амплитуда СВЧ-поля в резонаторе может оказаться достаточной для воздействия на термохимическую бумагу. Так, если для регистрации на ней нормально падающего СВЧ-излучения плотность потока мощности должна составлять около 80 Вт/см^2 ($\lambda = 8 \text{ мм}$), то для получения изображения электромагнитного поля на термохимической бумаге, помещенной в ОР, достаточно подводить к резонатору мощность $0,1\text{—}0,2 \text{ Вт}$. Регистрация распределения СВЧ-полей на такой бумаге удобна для получения экспресс-информации, поскольку полученное изображение полей не требует дальнейшей химической обработки.

Рассмотрим основные свойства термохимической бумаги как материала для регистрации СВЧ-полей. Изменение ее «цвета» происходит в узком интервале температур $t_{\text{цв}} = (110\text{—}115)^\circ\text{C}$ практически без промежуточных градаций плотности, а разрушение бумаги происходит при температуре 200°C , что существенно снижает диапазон регистрируемых амплитуд СВЧ-поля. Поскольку термохимическая бумага вносит диэлектрические потери, целесообразно размещать ее в пучностях электрического поля стоячей волны в ОР. Для регистрации СВЧ-полей в длинноволновой части миллиметрового диапазона, как показали экспериментальные исследования, необходимо, чтобы амплитуда электрической составляющей поля составляла $\sim 270 \text{ В/см}$ при температуре окружающей среды $\sim 20^\circ\text{C}$. Дополнительный нагрев термохимической бумаги в специальном термостате позволяет снизить минимальный уровень и расширить диапазон регистрируемых амплитуд полей, однако снижает точность регистрации амплитуды поля:

$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{\delta t}{t_{\text{цв}} - t_0}, \quad (1)$$

где δt — диапазон температур, в котором происходит изменение «цвета» ТХБ, $t_{\text{цв}}$ — средняя температура переходной области ТХБ, t_0 — температура окружающей среды (термостата).

Методика регистрации определенного уровня амплитуды СВЧ-поля на термохимической бумаге состоит в следующем: ее размещают в исследуемом сечении ОР, затем постепенно увеличивают мощность генератора, контролируя ее измерителем мощности, до начала изменения «цвета» бумаги в области с максимальной интенсивностью электрического поля стоячей волны $E_{\text{макс}}(x_0, y_0)$. При этом фиксируется уровень выходной мощности генератора P_0 . Затем для получения изображения распределения электрического поля на уровне $E(x, y)$ выходная мощность генерации увеличивается до

$$P = P_0 [E_{\text{макс}}(x_0, y_0) / E(x, y)]^2, \quad (2)$$

Для получения подробной информации о распределении поля в ОР генератора также можно использовать метод сканирования пробного тела. Большая плотность электромагнитной энергии в объеме ОР действующего ГДИ не позволяет применять для этих целей поглощающее пробное тело, поэтому в эксперименте применялся рассеивающий проводящий зонд. Для регистрации только электрической компоненты поля резонатора зонд представлял собой иглу, ориентированную вдоль вектора E , длина которой выбиралась в зависимости от добротности исследуемого ОР, требуемой точности измерений и, как правило, составляла $\sim \lambda/4$. Амплитудное распределение СВЧ-поля в резонаторе регистрировалось по изменению пусковых токов генератора при сканировании пробного тела [1]:

$$E^2(x, y, z) = CE_0^2 [(I_{\pi}(x, y, z)/I_{\pi 0})^\alpha - 1], \quad (3)$$

где $I_{\pi 0}$ — пусковой ток генератора без пробного тела, $I_{\pi}(x, y, z)$ — пусковой ток генератора при помещении пробного тела в точку (x, y, z) , C — нормировочный множитель, E_0 — максимальная амплитуда поля в исследуемом сечении резонатора.

Согласно линейной теории ГДИ [4] показатель степени $\alpha=1$ при малом пространственном заряде пучка и $\alpha=1/2$ — при большом пространственном заряде пучка.

Для полусферического ОР с гладкими зеркалами, как известно [4], дисперсионное уравнение для TEM_{mnq} -моды имеет вид

$$2D/\lambda = q + \alpha_{mn}, \quad (4)$$

где $\alpha_{mn} = \frac{1}{2\pi} (1+m+n) \arccos(1-2D/R)$ — параметр удлинения волны

в резонаторе, D — расстояние между зеркалами резонатора, R — радиус кривизны сферического зеркала ОР, m, n, q — индекс резонансной TEM_{mnq} -моды. Распределение интенсивности электромагнитного поля на зеркалах ОР характеризуется радиусом пятна поля ω_0 , который на плоском зеркале составляет величину

$$\omega_0^2 = (\lambda/\pi) \sqrt{D(R-D)}, \quad (5)$$

где λ — длина волны в свободном пространстве.

Соотношения (4), (5) можно использовать и для ОР, на зеркале которого размещена ограниченная периодическая структура, если предусмотреть меры по компенсации фазовой неоднородности вносимой структурой. Более того, представляет интерес сравнение расчетных значений D и ω_0 с полученными в эксперименте, поскольку соотношения (4), (5) были выведены для случая $\lambda \ll \omega_0$, а в эксперименте имелась возможность исследовать свойства ОР на $\lambda \approx 0,5\omega_0$.

2. Экспериментальные результаты. Экспериментальные исследования распределения полей в ОР действующего генератора проводились в длинноволновой части миллиметрового диапазона на макете генератора, схема которого представлена на рис. 1. Сферическое зеркало δ находилось вне вакуумированного объема, что позволило исследовать спектр колебаний генератора в диапазоне $0,26 < D/R < 0,66$, причем продольный индекс q возбуждаемых типов колебаний изменялся от 2 до 7 (см. рис. 2). В генераторе наблюдалось возбуждение более 18 различных типов колебаний, идентификация которых проводилась при помощи визуализации распределения полей в различных сечениях ОР на термохимической бумаге и сравнения расчетных расстояний между зеркалами ОР (см. (4)) с полученными в эксперименте. Для возбуждения ГДИ необходимо, чтобы электронный пучок, движущийся вблизи

периодической структуры, эффективно взаимодействовал с полем ОР, что возможно лишь при настройке ОР на тип колебаний, имеющий монотонное распределение электрического поля в периодической структуре вдоль пространства взаимодействия, и выборе скорости электронного пучка согласно условию фазового синхронизма: $v_e \approx cl/\lambda$. Эти условия обеспечивают селекцию возбуждаемых мод ОР по частоте, поляризации и поперечным индексам m, n , а именно: эффективно возбуждаются лишь моды ОР с E_y -поляризацией, имеющие одно пятно поля на ограниченной периодической структуре — TEM_{00q} , TEM_{20q} , TEM_{40q} и т. д.

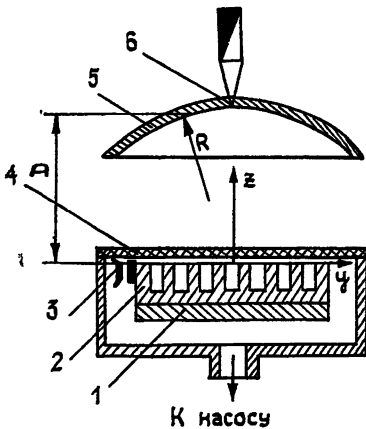


Рис. 1.

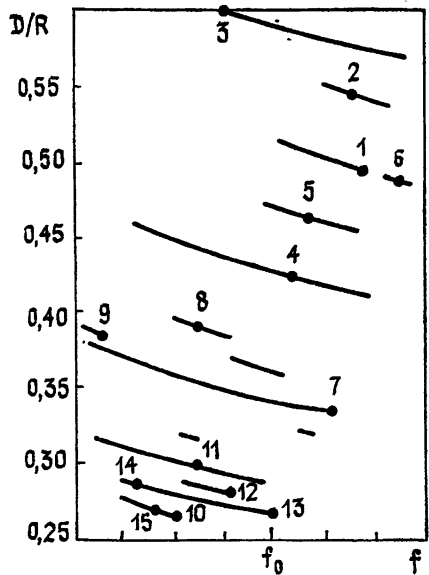


Рис. 2.

Распределения полей для 15 возбуждаемых колебаний, полученные на термохимической бумаге, представлены на рис. 3. Как видно, в спектре ОР ГДИ присутствует пять нижних TEM_{00q} -колебаний с индексами $q=3, 4, \dots, 7$ (рис. 3.1; 3.3; 3.4; 3.7; 3.10). Для сравнения на рис. 3 представлены сплошными линиями расчетные пятна полей для TEM_{00q} - и TEM_{20q} -колебаний в соответствии с (2), (5). Для TEM_{00q} -моды наблюдается удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных пятен полей, для моды TEM_{20q} имеется лишь качественное сходство, однако отчетливо видны несовершенства юстировки зеркал резонатора. При сближении зеркал ОР ($D/R < 0,45$) происходит сгущение спектра возбуждаемых колебаний, многие из которых не удастся идентифицировать (см. рис. 3.12; 3.13; 3.14). Особенностью исследуемого ОР является вырождение колебаний TEM_{006} и TEM_{405} , так как при $D/R=0,5$ удовлетворяется соотношение $\alpha_{00}+1=\alpha_{40}$. Следует отметить, что зона фазового синхронизма электронного пучка с полем в периодической структуре может составить $\Delta u/u_0 \approx 17\%$ [4], поэтому для взаимодействия электронного пучка одновременно с TEM_{00q} - и $TEM_{40(q-1)}$ -модами ОР не обязательно выполнение условия вырождения, а достаточно, чтобы частоты этих мод находились в интервале $\Delta f/f_0 = (1/2)(\Delta u/u_0)$. Так, при $D/R=0,26 \div 0,27$ колебание TEM_{402} доминирует над TEM_{003} , поэтому для возбуждения моды TEM_{003} приходилось вносить в резонатор дополнительные дифракционные потери, для чего

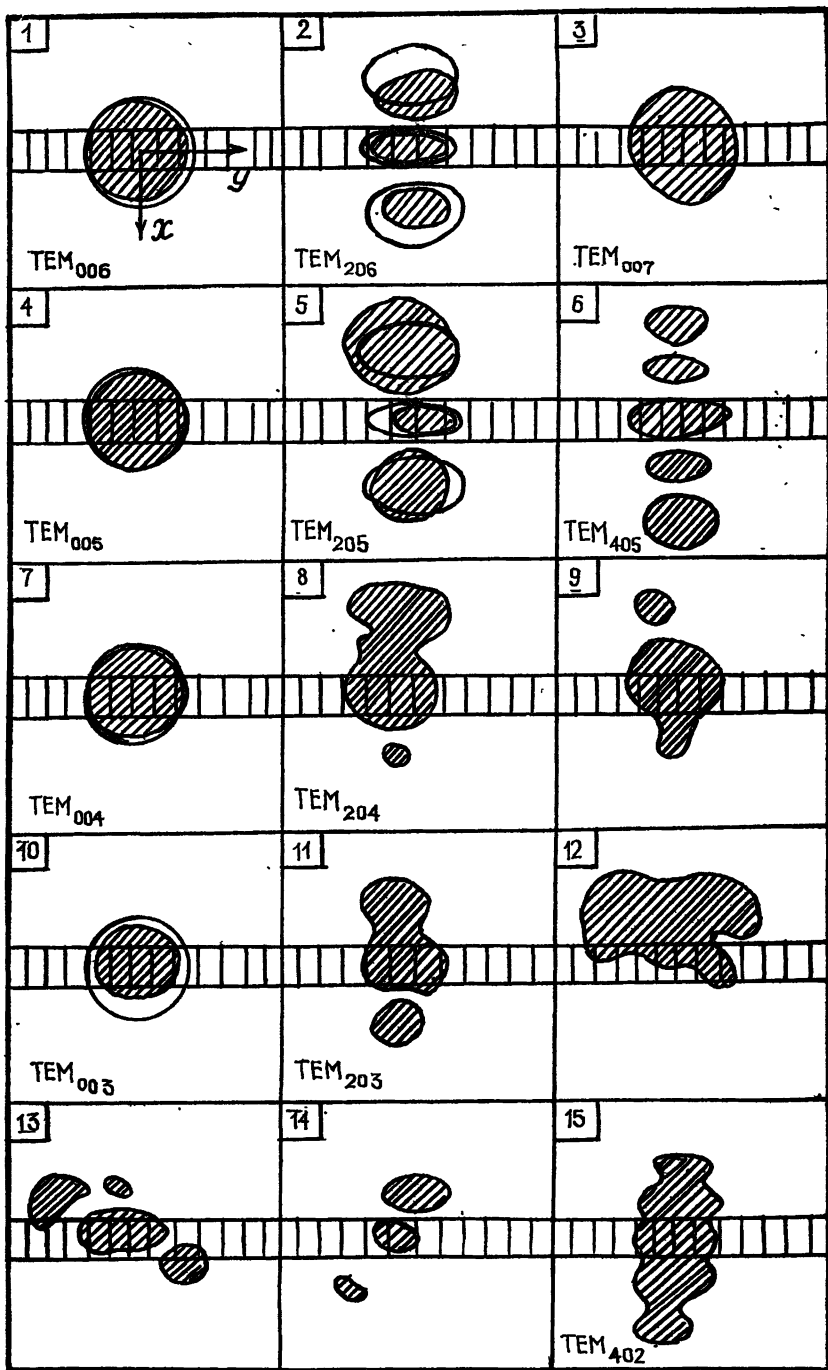


Рис. 3.

на нижнем зеркале ОР размещалось дополнительное кольцо с внутренним диаметром около $4\omega_0$ (ω_0 — радиус пятна поля TEM_{003} -типа колебания).

Наличие на одном из зеркал резонатора ограниченной периодической структуры приводит к искажению амплитудного и фазового распределения полей в ОР. Так, если при сканировании пробного тела в сечении резонатора $z \approx \lambda/4$ регистрируемое распределение $E^2(x, y, z)$ вдоль пространства взаимодействия ($0y$) практически совпадает с гауссовым (см. рис. 4, кривые 2, 3), то распределение $E^2(x, y, z)$ в перпендикулярном ($0x$) направлении (см. рис. 4, кривая 1) существенно отличается от гауссова. Область с высокой интенсивностью поля вдоль направления $0x$ сосредоточена вблизи периодической структуры, в результате интерференции волн, отраженных периодической структурой и гладкой поверхностью зеркала, имеет место немонотонный спад интенсивности поля к краям зеркала, увеличиваются дифракционные потери.

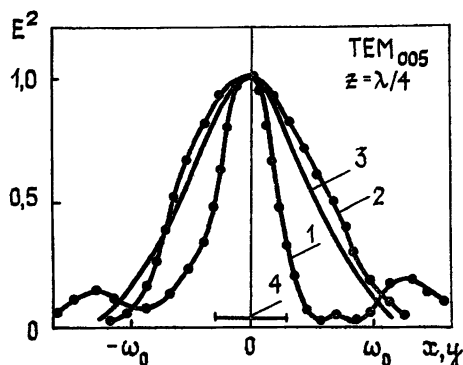


рис. 4.

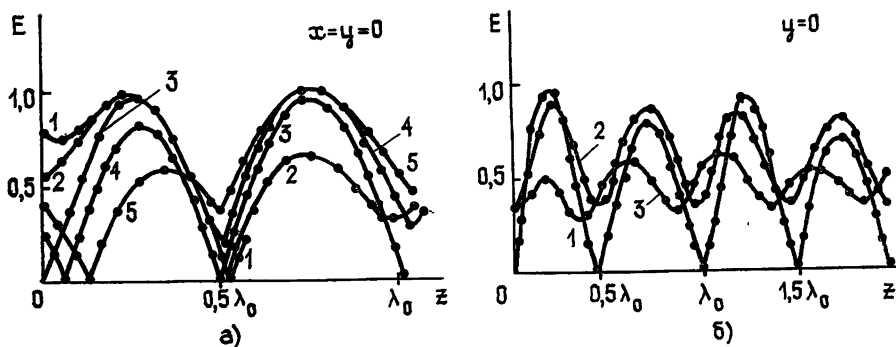


Рис. 5.

Исследование распределения электрической составляющей поля вдоль оси резонатора ($0z$) позволяет установить соотношения между амплитудой поля вблизи периодической структуры и в объеме ОР при различных рабочих частотах генератора (см. рис. 5а). При работе генератора на частоте f_0 , соответствующей случаю равенства фаз волн, отраженных периодической структурой и гладкой поверхностью плоского зеркала, амплитуда стоячей волны вдоль оси резонатора практически постоянна (рис. 5а, кривая 3). Перестройка ГДИ как в сторону высших частот (рис. 5а, кривые 1, 2), так и в сторону низших частот (рис. 5а, кривые 4, 5) приводит к перепадам в амплитуде стоячей

волны, достигающим $0,4 E_0$, причём возникает конечная интенсивность поля в узлах стоячей волны, достигающая $0,3 E_0$. Конечная интенсивность поля в узлах стоячей волны наблюдается также при смещении оси подъема зонда вдоль Ox в результате различного фазового набега для волн, отраженных периодической структурой и гладкой поверхностью зеркала (см. рис. 5б, кривая 1 — $x=0$, 2 — $x=0,4\omega_0$, 3 — $x=0,8\omega_0$), что свидетельствует о нарушении фазового распределения полей в ОР, вызванного ограниченной периодической структурой.

Проведенные исследования распределений полей в ОР действующего ГДИ позволили детально проанализировать физические особенности его работы. Разработанный метод визуализации СВЧ-полей резонатора на ТХБ дал возможность оперативно идентифицировать типы возбуждаемых мод ОР, выбрать оптимальные рабочие моды, предусмотреть меры по подавлению высших мод. В ходе детального исследования распределения полей в стоячей волне резонатора были установлены соотношения между амплитудами волн вблизи периодической структуры и в объеме ОР, необходимые для расчета выходных характеристик ГДИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балаклицкий И. М., Курин В. Г., Скрынник Б. К., Шестопалов В. П. — ПТЭ, 1974, № 5, с. 107.
2. Бажулин А. П., Виноградов Е. А., Ирисова И. А. — ПТЭ, 1970, № 6, с. 152.
3. Максимов В. И., Буханцов Н. И. — Зарубежная радиоэлектроника, 1979, № 12, с. 3.
4. Шестопалов В. П. Дифракционная электроника. — Харьков: Вища школа, 1976. — 231 с.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
13 сентября 1984 г.

INVESTIGATION OF THE FIELD DISTRIBUTION IN AN OPEN RESONATOR OF THE OPERATIVE DIFFRACTION RADIATION GENERATOR

V. K. Korneenkov, V. S. Miroshnichenko, V. P. Shestopalov

Investigations of the field distributions in an open resonator (OR) of the operative diffraction radiation generator have been carried out. A direct access to the volume of its OR is organized in the specifically developed model of the DRG. The field visualization in the OR was carried out both by thermochemical paper and by scanning of the scattering test body due to which optimal operating OR modes were discovered; an influence of limited periodic structure on amplitude and phase field distribution in the OR was established.