

УДК 621.385.6

ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ГЕНЕРАТОРЕ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МНОГОКАСКАДНЫМ ПРОСТРАНСТВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В. С. Мирошниченко, Е. Б. Сенкевич, А. Г. Пивоварова, Д. В. Юдинцев

Институт радиофизики и электроники им А. Я. Усикова НАНУ, г. Харьков, Украина

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования особенностей возбуждения колебаний в генераторе дифракционного излучения с двух- и трёхкаскадным пространством взаимодействия, реализованном в одном открытом резонаторе. В теоретической модели для описания многокаскадного механизма взаимодействия рассмотрено возбуждение колебаний типа $ТЕМ_{0nq}$, имеющих на решётке n синфазных «пятен» поля, т.е. каскадов, вдоль движения электронного пучка. Показано, что уже использование двухкаскадного пространства взаимодействия, реализованного на колебаниях типа $ТЕМ_{01q}$, позволяет в 1,91 раза снизить стартовый ток генератора. Приведены результаты экспериментальных исследований двухкаскадного генератора в 5 и 1,5-миллиметровом диапазонах длин волн. Синфазность электронного пучка с резонансным полем в обоих каскадах достигалась сбоем периодичности нарезки щелей решётки в середине пространства взаимодействия. Выходная мощность двухкаскадного генератора дифракционного излучения в 5-миллиметровом диапазоне на колебаниях типа $ТЕМ_{013}$ составляла 3÷5 Вт. Также наблюдалось возрастание стартового тока для режима поверхностных волн в 4÷5 раз.

ВВЕДЕНИЕ

Выбору оптимального продольного распределения поля в области взаимодействия в генераторе дифракционного излучения (ГДИ) уделялось много внимания как в теоретических, так и в экспериментальных исследованиях [1–3]. Минимальный пусковой ток в ГДИ при заданной длине области взаимодействия наблюдается при однородном распределении поля вдоль периодической структуры, что трудно реализовать в открытом резонаторе с ограниченной апертурой зеркал. Напротив, гауссово продольное распределение поля в области взаимодействия легко создаётся в высокодобротном открытом резонаторе полусферической геометрии, например, для колебаний типа $ТЕМ_{00q}$ и до настоящего времени широко используется для возбуждения электромагнитного поля в однокаскадных ГДИ. Снижение эффективности взаимодействия электронного пучка с резонансным полем в ГДИ терагерцового диапазона требует увеличения длины области взаимодействия. Однако использование зеркал с большим радиусом кривизны приводит к необходимости повышения точности их юстировки.

Существенное снижение пускового тока ГДИ возможно при использовании многокаскадной области взаимодействия, образованной несколькими открытыми резонаторами, которые пронизывает единый электронный пучок [4]. Однако использование многорезонаторных систем увеличивает габариты прибора и вес магнитной фокусирующей системы. С другой стороны, многокаскадную область взаимодействия можно реализовать в одном открытом резонаторе при возбуждении в ГДИ колебания высшего типа $ТЕМ_{0nq}$, имеющего n «пятен» поля, т.е. каскадов, на решётке вдоль движения электронного пучка. Проведённый ранее анализ особенностей возбуждения высших типов колебаний в ГДИ [5] и оротроне [6] с противофазным полем в соседних «пятнах» на решётке продемонстрировал увеличение пускового тока по сравнению с возбуждением колебаний основного типа $ТЕМ_{00q}$. Но при обеспечении синфазности электронного пучка с резонансным полем во всех пятнах-каскадах для колебаний высшего типа $ТЕМ_{0nq}$ можно увеличить длину области взаимодействия в ГДИ без изменения радиуса кривизны зеркал открытого

резонатора и, соответственно, снизить величину пускового тока. Синфазность резонансного поля в соседних «пятнах» на решётке можно обеспечить или введением в объём открытого резонатора фазового фильтра, или изменением длины пространства дрейфа между каскадами за счёт сбоя периодичности нарезки щелей решётки, что и было осуществлено в данной работе.

Одним из серьёзных препятствий при разработке ГДИ и оротронов в терагерцовом диапазоне выступает перекрытие по ускоряющему напряжению зон генерации на быстрой моде открытого резонатора (режим ГДИ) и зон генерации на медленной поверхностной волне, распространяющейся вдоль поверхности решётки (режим лампы обратной волны (ЛОВ)) [7]. Действительно, с увеличением длины области взаимодействия L стартовый ток в режиме ЛОВ снижается быстрее ($I_{st, ЛОВ} \propto 1/L^3$), чем стартовый ток в режиме ГДИ ($I_{st, ГДИ} \propto 1/L^2$). Подавление режима ЛОВ легко реализовать в мощных ГДИ миллиметрового диапазона длин волн с изохронной периодической структурой. Однако такой метод малоприменим для маломощных генераторов в терагерцовом диапазоне. Более эффективным способом подавления режима ЛОВ является введение одного или нескольких скачков фазы для поверхностной волны за счёт сбоя периодичности нарезки щелей решётки. Так, один сбой периода в середине решётки снижает длину однородного участка замедляющей структуры в два раза и может повысить стартовый ток для режима ЛОВ до 8 раз.

В данной работе проведено сравнение особенностей возбуждения колебаний в ГДИ с одно-, двух- и трёхкаскадной областью взаимодействия, реализованной в одном открытом резонаторе на колебаниях типа $ТЕМ_{0nq}$ без увеличения габаритов прибора в фокусирующем магнитном поле. Также рассмотрены особенности конкуренции мод в многокаскадном ГДИ.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведённые в данной работе исследования энергообмена в ГДИ с многокаскадной областью взаимодействия основываются на общей теории возбуждения резонансных систем и на методе «крупных» частиц, а также на результатах, полученных в ходе развития теоретических моделей ГДИ в ИРЭ НАНУ [1]. В частности, была использована самосогласованная система уравнений, описывающая динамику линейных и нелинейных режимов ГДИ с учётом дискретного взаимодействия [8], и алгоритм поиска решений этой системы [9].

В качестве резонансной системы многокаскадного ГДИ выберем полусферический открытый резонатор, плоское зеркало которого частично покрыто отражательной дифракционной решёткой (см. рис. 1). В теоретической модели решётку будем считать однородной, а её период $l = \text{const} \ll \ll \lambda$, где λ — длина волны излучения ГДИ в свободном пространстве, так что изменяться будет только вид распределения электрического поля на решётке. Будем считать, что для одномерной модели, не учитывающей изменение резонансного поля по толщине ленточного электронного пучка, распределение продольной электрической составляющей поля вблизи поверхности решётки

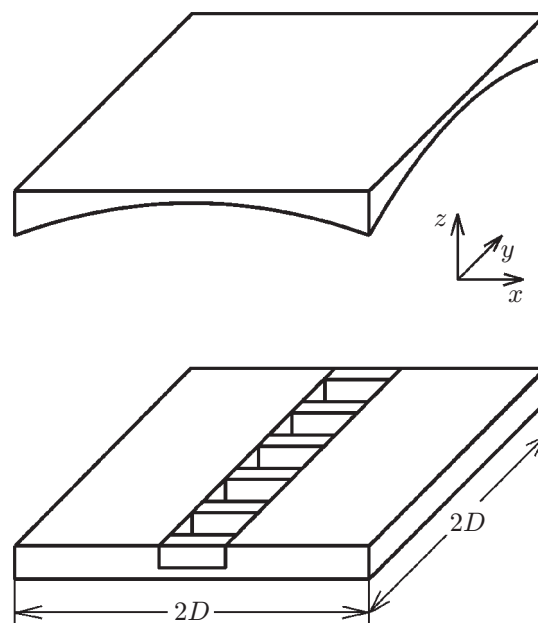


Рис. 1. Схема открытой резонансной системы ГДИ

носит ступенчатый характер с постоянной амплитудой поля над щелью решётки и отсутствием поля над ламелями решётки. Тогда распределение амплитуды огибающей электрического поля над щелями решётки $E(x, y)$ задаётся структурой поля колебаний типа TEM_{0nq} на плоском зеркале и для многокаскадного ГДИ даётся следующей формулой:

$$E(x, y) = \Psi |E_{0nq}(x, y)| = \Psi A_{0nq} \left| H_n \left(\sqrt{2} \frac{y}{r_0} \right) \right| \exp \left(- \frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right), \quad (1)$$

где A_{0nq} — нормировочный множитель, определяемый из условия запасённой энергии для колебаний типа TEM_{0nq} : $\int_{-D}^D \int_{-D}^D E_{0nq}^2 dx dy = 1$. Здесь $2D$ — апертура зеркал открытого резонатора, $\Psi = \sin(2\pi h/\lambda) / \sqrt{\cos^2(2\pi h/\lambda) + (d/l)^2 \sin^2(2\pi h/\lambda)}$ — коэффициент, учитывающий резонансные свойства дифракционной решётки [10], $H_n(x)$ — полином Эрмита порядка n , h — глубина щелей решётки, d — ширина щелей решётки, r_0 — радиус гауссова «пятна» поля на дифракционной решётке. Апертура зеркал открытого резонатора выбиралась из условия малости дифракционных потерь для колебания типа TEM_{00q} , TEM_{01q} , TEM_{02q} и составляла $2D \geq 4r_0$. Модуль полинома Эрмита в (1) как раз и описывает в теоретической модели синфазность резонансного поля над щелями дифракционной решётки во всех n «пятнах» (каскадах), расположенных вдоль области взаимодействия (см. рис. 2а). На практике такая многокаскадная область взаимодействия может быть создана в ГДИ, например, при использовании дифракционной решётки со сбоем периода в узлах полинома $H_n(\sqrt{2}y/r_0) = 0$.

Стартовый ток I_{st0nq} для возбуждения колебаний типа TEM_{0nq} в многокаскадном ГДИ определялся из условия баланса активных мощностей в открытом резонаторе:

$$P_{ea} = P_0 F_{0nq}(b, r_0/D, \varphi_p) = \frac{\omega W_{0nq}}{Q_{0nq}}, \quad (2)$$

где P_{ea} — активная мощность, отдаваемая электронным пучком резонансному полю, $P_0 = I_{st0nq} U_0$ — мощность электронного пучка на входе в пространство взаимодействия, F_{0nq} — функция рассинхронизма, т. е. электронный КПД, ω — круговая частота колебаний, W_{0nq} — энергия, запасённая в открытом резонаторе, Q_{0nq} — добротность колебаний типа TEM_{0nq} , $b = (v_b - v_\Phi)/v_\Phi$ — параметр рассинхронизма, v_b — скорость электронного пучка, $v_\Phi = (l/\lambda)c$ — фазовая скорость 1-й пространственной гармоники поля периодической структуры, синхронной с электронным пучком, $\varphi_p = 2r_0\omega_p/v_b$ — параметр пространственного заряда, ω_p — редуцированная плазменная частота, вычисляемая с учётом пролётного канала.

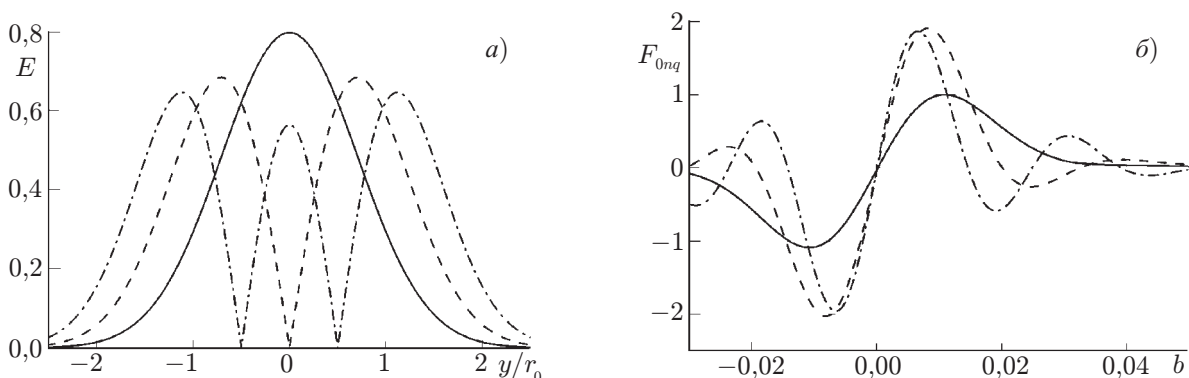


Рис. 2. Распределение электрического поля на дифракционной решётке в одно- (сплошная линия), двух- (штриховая линия) и трёхкаскадном (штрих-пунктирная линия) ГДИ (а) и вид соответствующих функций F_{0nq} , определяющих характер энергообмена в многокаскадном ГДИ (б)

Тогда, при одинаковой частоте колебаний, отношение стартовых токов в ГДИ с различным числом каскадов составит

$$\frac{I_{st\,0nq}}{I_{st\,00q}} = \frac{F_{00q}}{F_{0nq}} \frac{W_{0nq}Q_{00q}}{W_{00q}Q_{0nq}}. \quad (3)$$

Условие нормировки, используемое в (1) для задания амплитуды поля резонансного колебания на зеркале открытого резонатора, содержащем решётку, обеспечивает равенство запасённой энергии для колебаний с одинаковым числом полуволн вдоль оси z : $W_{0nq} = W_{00q}$. Омические потери в решётке для колебаний типа TEM_{0nq} , отличающихся только числом вариаций поля вдоль области взаимодействия ($n = 0; 1; 2$), также одинаковы и существенно превосходят дифракционные потери в открытом резонаторе при $2D \geq 4r_0$, т.е. можно считать, что $Q_{0nq} = Q_{00q}$. Это позволяет сравнить стартовые токи в многокаскадном ГДИ, зная максимальные значения функции рассинхронизма: $I_{st\,0nq}/I_{st\,00q} = F_{00q\max}/F_{0nq\max}$. Кроме того, расчёт функций рассинхронизма для соседних колебаний в спектре открытого резонатора позволяет установить особенности конкуренции мод при перекрытии по ускоряющему напряжению зон передачи энергии электронным пучком ($F_{0nq} > 0$).

Для численного анализа был выбран ГДИ 5-миллиметрового диапазона длин волн. Период решётки составлял $l = 0,5$ мм, длина области взаимодействия $2D = 32$ мм, безразмерный диаметр «пятна» поля на решётке $2r_0/(2D) = 0,47$. Число «крупных» частиц, поступающих в область взаимодействия за период колебаний, составляло $N = 24$. Результаты расчёта F_{0nq} в многокаскадном ГДИ при $\varphi_p < 1$ для колебаний типов TEM_{00q} , TEM_{01q} и TEM_{02q} приведены на рис. 2б. Значения F_{0nq} нормированы на максимум функции рассинхронизма для основного колебания типа TEM_{00q} . Сопоставление максимумов для F_{00q} и F_{01q} показало, что уже двухкаскадная область взаимодействия для колебаний типа TEM_{01q} даёт для стартового тока выигрыш в 1,91 раза по сравнению с однокаскадным (гауссовым) распределением поля в ГДИ на колебаниях типа TEM_{00q} . Для трёхкаскадного ГДИ, работающего на колебаниях типа TEM_{02q} эффективность энергообмена сравнима с двухкаскадным режимом, но присутствуют также дополнительные зоны по рассинхронизму пучка, где $F_{02q} > 0$.

При токе электронного пучка, превышающем стартовые значения для возбуждения нескольких мод в открытом резонаторе, и перекрытии их зон генерации по ускоряющему напряжению в ГДИ может наблюдаться нежелательная конкуренция мод по отбору энергии от электронного пучка. Использование в ГДИ многокаскадного пространства взаимодействия позволяет снизить

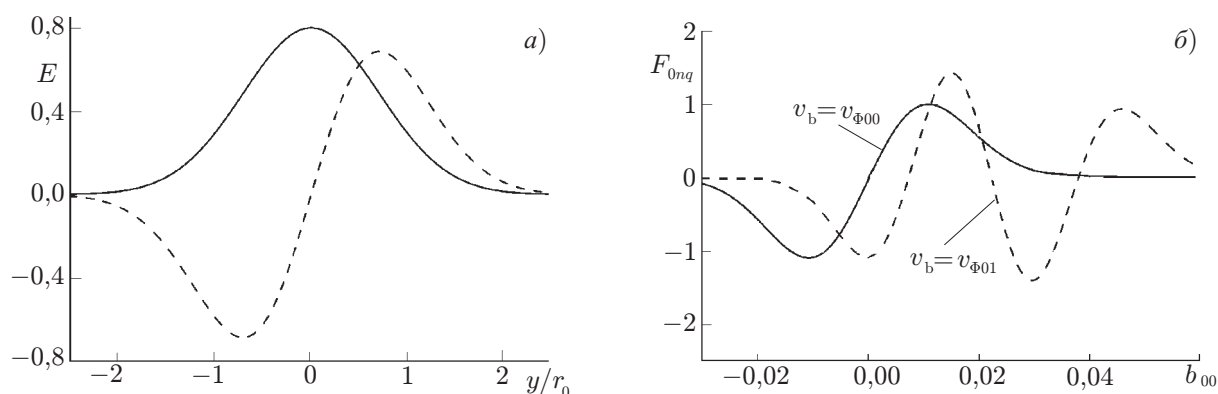


Рис. 3. Распределение электрического поля мод TEM_{00q} (сплошная линия) и TEM_{01q} (штриховая линия) в ГДИ над равномерной дифракционной решёткой (а) и особенности перекрытия по ускоряющему напряжению функций F_{00q} (сплошная линия) и F_{01q} (штриховая линия) для конкурирующих мод (б). Параметр $b_{00} = (v_b - v_{\phi 00})/v_{\phi 00}$

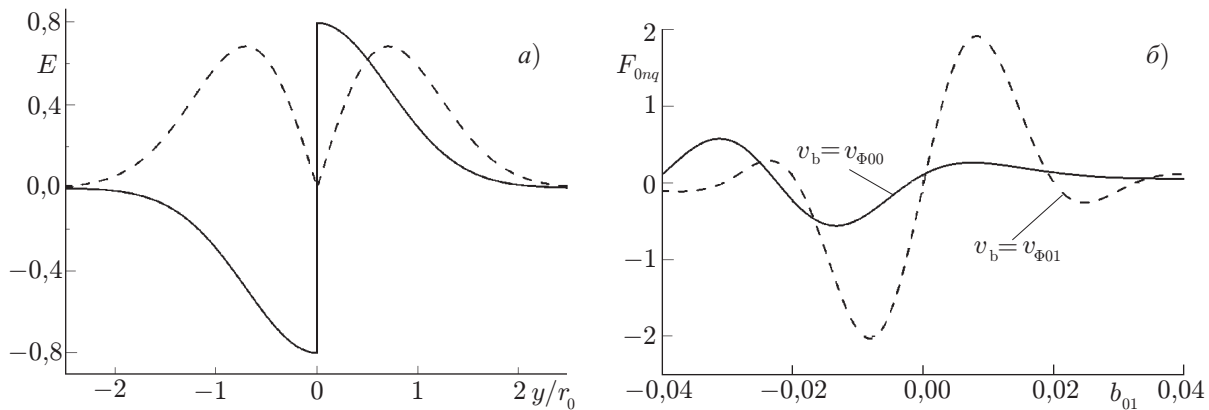


Рис. 4. Распределение электрического поля мод TEM_{00q} (сплошная линия) и TEM_{01q} (штриховая линия) в ГДИ над дифракционной решёткой со сбоем периода (а) и изменение характера перекрытия по ускоряющему напряжению функций F_{00q} (сплошная линия) и F_{01q} (штриховая линия) для конкурирующих мод (б). Параметр $b_{01} = (v_b - v_{\phi 01})/v_{\phi 01}$

эту конкуренцию между соседними типами колебаний. Так, при фиксированном расстоянии между зеркалами разнос частот для колебаний типов TEM_{003} и TEM_{013} в моделируемом открытом резонаторе для ГДИ 5-миллиметрового диапазона длин волн составляет всего $\omega_{013}/\omega_{003} = 1,0223$. При использовании равномерной дифракционной решётки ($l = \text{const}$) это приводит к перекрытию зон генерации по ускоряющему напряжению для колебаний типов TEM_{003} и TEM_{013} и сильной конкуренции мод. В этом случае поля в соседних «пятнах» поля колебаний типа TEM_{013} противофазны (см. рис. 3а), а отбор энергии от электронного пучка происходит в двух зонах по параметру рассинхронизма при $v_b < v_{\phi 01}$ и $v_b > v_{\phi 01}$. Возникновение дополнительной зоны генерации при $v_b < v_{\phi 01}$ впервые было обнаружено в работе [5], а особенности энергообмена электронного пучка при отрицательной расстройке скоростей исследованы в работе [11]. Небольшой разнос частот колебаний типов TEM_{003} и TEM_{013} в открытом резонаторе как раз и приводит к перекрытию зоны генерации по ускоряющему напряжению для колебаний типа TEM_{003} при $v_b > v_{\phi 00}$ и низковольтной зоны генерации для колебаний типа TEM_{013} при $v_b < v_{\phi 01}$ (см. рис. 3б), что приводит к снижению максимального КПД генератора и увеличению зоны гистерезиса при электронной перестройке частоты.

Если в середине области взаимодействия ввести скачок фазы $\Delta\Phi = 180^\circ$ для синхронной с электронным пучком пространственной гармоники, например, за счёт однократного сбоя периода нарезки щелей дифракционной решётки, то для колебаний типа TEM_{01q} образуется двухкаскадная область взаимодействия. В этом случае распределение электрического поля на дифракционной решётке для колебаний типов TEM_{003} и TEM_{013} как бы меняются местами: для основного колебания типа TEM_{003} поле над решёткой представлено двумя противофазными участками с гауссовым распределением, а для колебаний типа TEM_{013} на дифракционной решётке имеются два синфазных каскада с нулевой областью дрейфа (см. рис. 4а). Для двухкаскадного ГДИ, работающего на колебаниях типа TEM_{01q} , наблюдается улучшение селекции возбуждаемых мод, т. к. сдвиг периода решётки в середине области взаимодействия снижает эффективность энергообмена с колебаниями типа TEM_{00q} почти в 2 раза (см. рис. 4б). Наоборот, эффективность отбора энергии для колебаний типа TEM_{01q} в ГДИ с двухкаскадным пространством взаимодействия повышается в 1,91 раза, и возбуждение открытого резонатора на колебаниях этого типа становится основным режимом работы ГДИ.

Поскольку в ГДИ, работающем на колебаниях типа TEM_{01q} , изменение диаметра «пятна» поля при перестройке открытого резонатора не приводит к смещению узла $H_1(y) = 0$, где вводится

скачок фазы $\Delta\Phi = 180^\circ$, то двухкаскадный ГДИ будет обладать широким диапазоном комбинированной перестройки по частоте. Наоборот, для конкурирующих колебаний типа TEM_{02q} введение только одного скачка фазы $\Delta\Phi = 180^\circ$ при $y = 0$ создаёт в распределении электрического поля вдоль области взаимодействия четыре противофазных участка, что существенно снижает эффективность энергообмена с электронным пучком. Кроме того, подавление возбуждения колебаний типа TEM_{02q} легко осуществить при уменьшении апертуры зеркал открытого резонатора.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРА ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДВУХКАСКАДНОЙ ОБЛАСТЬЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Для проведения эксперимента по влиянию скачка фазы резонансного поля на возбуждение колебаний в ГДИ использовался макет генератора 5-миллиметрового диапазона длин волн с прямоугольной канавкой на зеркале, содержащем периодическую структуру (см. рис. 5). Прямоугольная канавка обеспечивает эффективную селекцию резонансных мод в открытом резонаторе и приводит к возбуждению только колебаний типа TEM_{0nq} , отличающихся числом вариаций поля n вдоль пространства взаимодействия и числом полуволн q вдоль оси открытого резонатора [12, 13].

Прямоугольная канавка была выполнена вдоль образующей цилиндрического зеркала с $R_c = 80$ мм и имела ширину 7 мм. Второе зеркало открытого резонатора было сферическим с радиусом кривизны $R_s = 110$ мм. Период решётки l составлял 0,5 мм, ширина щелей решётки $d = 0,2$ мм, длина пространства взаимодействия $2D = 32$ мм, безразмерная длина «пятна» поля вдоль решётки при перестройке частоты колебаний изменялась в пределах $2r_0/(2D) = 0,42 \div 0,47$. Для сравнения результатов измерений в прямоугольной канавке на цилиндрическом зеркале последовательно размещались однородная решётка и неоднородная решётка со сбоем периода. Ленточный электронный пучок с поперечным сечением $0,12 \times 3,8$ мм пропусклся в непосредственной близости над поверхностью решётки и удерживался фокусирующим магнитным полем $B = 0,45$ Тл.

При работе ГДИ на 1-й пространственной гармонике сбой периодичности нарезки щелей на $0,5l$ в середине решётки приводит к задержке времени подлёта электрона к очередной щели решётки, что аналогично скачку фазы $\Delta\Phi = 180^\circ$ для электрической составляющей поля колебаний типа TEM_{01q} вблизи решётки в соотношении (1). При этом для колебаний типа TEM_{00q} для электронного пучка в области взаимодействия возникают два противофазных «пятна» поля, а для колебаний типа TEM_{01q} — два синфазных «пятна» поля (см. рис. 4а), образующих два каскада, разделённых пространством дрейфа с длиной $s = 0,5l$. Отметим, что сбой нарезки периода щелей решётки не изменяет распределение амплитуды и фазы поля резонансного колебания на зеркалах открытого резонатора, т. к. период решётки составляет $l \approx 0,1\lambda$. Для вывода энергии из открытого резонатора при работе ГДИ на колебаниях типа TEM_{00q} и TEM_{01q} узел связи с нагрузкой смещался на 6 мм от центра сферического зеркала.

Были проведены испытания ГДИ с однородной дифракционной решёткой, соответствующей

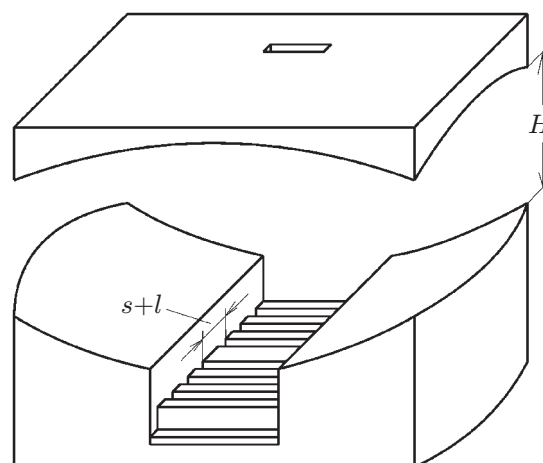


Рис. 5. Схема экспериментального макета ГДИ с неоднородной дифракционной решёткой. H — расстояние между зеркалами

$\Delta\Phi = 0^\circ$, и с неоднородной дифракционной решёткой, имеющей сбой периода в середине решётки ($\Delta\Phi = 180^\circ$). При токах электронного пучка вплоть до $I \leq 160$ мА в макете ГДИ с неоднородной решёткой возбуждались только колебания типа TEM_{01q} : TEM_{013} , TEM_{014} , TEM_{015} . В то же время в спектре ГДИ с однородной решёткой присутствуют колебания типов TEM_{00q} и TEM_{01q} с частичным перекрытием зон генерации по ускоряющему напряжению, приводящему к энергетической конкуренции мод (см. рис. 6а). Таким образом, в ГДИ с неоднородной решёткой удастся дополнительно разредить спектр возбуждаемых колебаний без уменьшения апертуры зеркал.

Для ГДИ с неоднородной решёткой наблюдается широкий диапазон перестройки по частоте для колебаний типа TEM_{013} , а уровень выходной мощности генератора сравним с выходной мощностью ГДИ с однородной дифракционной решёткой, работающего на колебании типа TEM_{003} (рис. 6б). Увеличение области дрейфа между каскадами до $s = 2,5l$ и $s = 3,5l$ не привело к снижению выходной мощности двухкаскадного ГДИ, работающего на колебании типа TEM_{013} . При дальнейшем увеличении области дрейфа наблюдалось снижение выходной мощности ГДИ, вызванное сильным возмущением поля колебания типа TEM_{013} протяжённой фазовой неоднородностью в решётке.

Для однородной решётки стартовые токи в режимах ГДИ и ЛОВ были сравнимы по величине, а также наблюдалось частичное перекрытие зон генерации по ускоряющему напряжению (см. рис. 7а). Для неоднородной решётки с инверсией фазы поля стартовый ток для режима ЛОВ возрос в 4÷5 раз, а в режиме ГДИ возбуждались только колебания типа TEM_{01q} (рис. 7б). Стартовый ток для колебания типа TEM_{013} в ГДИ со скачком фазы поля был в 1,5 раза ниже, чем стартовый ток для колебания типа TEM_{003} в ГДИ с однородной решёткой. Снижение стартового тока в ГДИ со скачком фазы поля можно объяснить увеличением эффективной длины области взаимодействия для колебаний типа TEM_{01q} по сравнению с «пятном» поля для колебаний типа TEM_{00q} для открытого резонатора с однородной решёткой. Для стартовых токов режима ГДИ $I_{st} \leq 20$ мА параметр пространственного заряда в пучке $\varphi_p \leq 0,2\pi$, что позволяет не учитывать пространственный заряд в электронном пучке при расчёте функции рассинхронизма [6].

3. ДВУХКАСКАДНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 1,5-МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

С укорочением длины волны излучения в ГДИ возрастает конкуренция со стороны режима поверхностных волн. С другой стороны, продвижение ГДИ в терагерцовый диапазон сопровождается постоянно возрастающими технологическими трудностями изготовления мелкогабаритных периодических структур и формирования тонких электронных пучков с высокой плотностью тока, а также проблемами теплоотвода от поверхностей, на которые осаждаются электроны пучка. Одним из способов преодоления указанных трудностей является увеличение периода структуры и использование механизма взаимодействия электронного пучка с высшими пространственными гармониками периодического поля, сосредоточенного вблизи поверхности структуры.

Для проверки эффективности борьбы с режимом ЛОВ при помощи предложенной выше многокаскадной области взаимодействия были проведены экспериментальные исследования двухкаскадного ГДИ в 1,5-миллиметровом диапазоне длин волн, работающего на 2-й пространственной гармонике дифракционной решётки. Создание двухкаскадной области взаимодействия в ГДИ обеспечивалось возбуждением в открытом резонаторе колебаний типа TEM_{21q} , имеющего два «пятна» поля вдоль решётки (ось y на рис. 1) и три «пятна» в поперечном направлении (ось x на рис. 1). Синфазность поля 2-й пространственной гармоники в обоих каскадах достигалась сбоем периодичности нарезки щелей на $s = 0,25l$ в середине решётки. Период дифракционной решётки составлял $l = 0,36$ мм, ширина щелей решётки $d = 0,09$ мм, глубина щелей $h = 0,38$ мм, длина

пространства взаимодействия $2D = 26$ мм. Дифракционная решётка размещалась на цилиндрическом зеркале с радиусом кривизны $R_c = 110$ мм, второе зеркало открытого резонатора было сферическим с радиусом кривизны $R_s = 300$ мм. Безразмерная длина «пятна» вдоль решётки составляла $2r_0/(2D) = 0,36$. Для улучшения фазового согласования с полем открытого резонатора решётка была приподнята на 0,25 мм над поверхностью цилиндрического зеркала.

Исследования экспериментального макета ГДИ были проведены в импульсном режиме, что позволило избежать перегрева периодической структуры при увеличении плотности тока в ленточном электронном пучке с поперечным сечением $0,1 \times 3,8$ мм. Длительность импульсов тока составляла $\tau = 10$ мкс при скважности $\theta = 200$. В спектре возбуждаемых колебаний в исследуемом ГДИ присутствовали только колебания типа TEM_{21q} , имеющие два «пятна» поля вдоль области взаимодействия. При работе на колебаниях типа TEM_{219} и TEM_{2110} двухкаскадный ГДИ перестраивался в диапазоне частот $178 \div 192$ ГГц вблизи максимума амплитуды 2-й пространственной гармоники в дифракционной решётке. Изменение ускоряющего напряжения электронного пучка

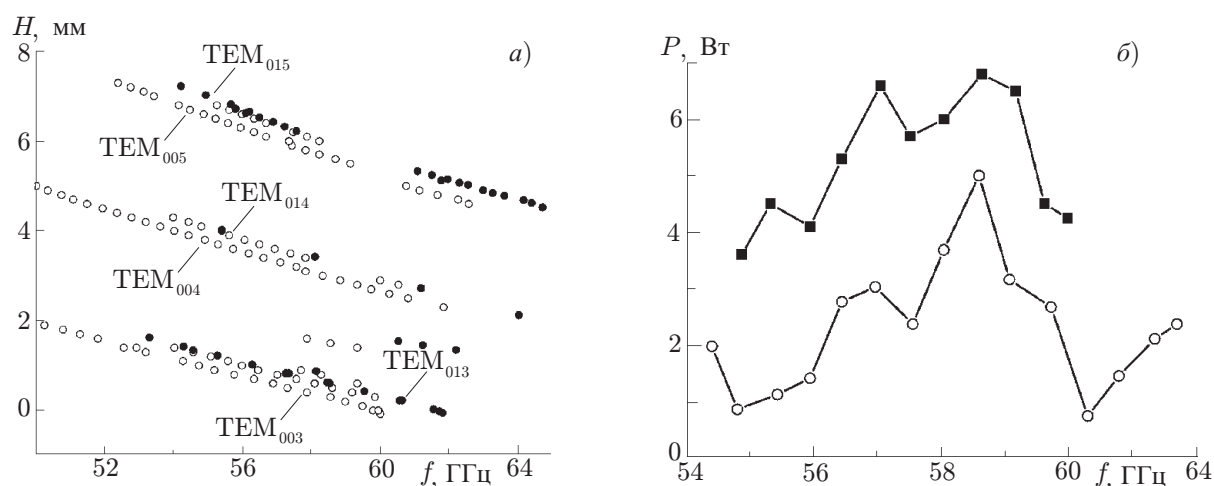


Рис. 6. Спектр возбуждаемых колебаний в ГДИ с однородной решёткой ($\Delta\Phi = 0^\circ$, светлые кружки) и неоднородной решёткой ($\Delta\Phi = 180^\circ$, тёмные кружки) (а) и изменение выходной мощности при перестройке частоты путём изменения H , см. рис. 5, (б) в ГДИ с однородной решёткой ($\Delta\Phi = 0^\circ$, мода TEM_{003} , тёмные квадраты) и неоднородной решёткой ($\Delta\Phi = 180^\circ$, мода TEM_{013} , светлые кружки)

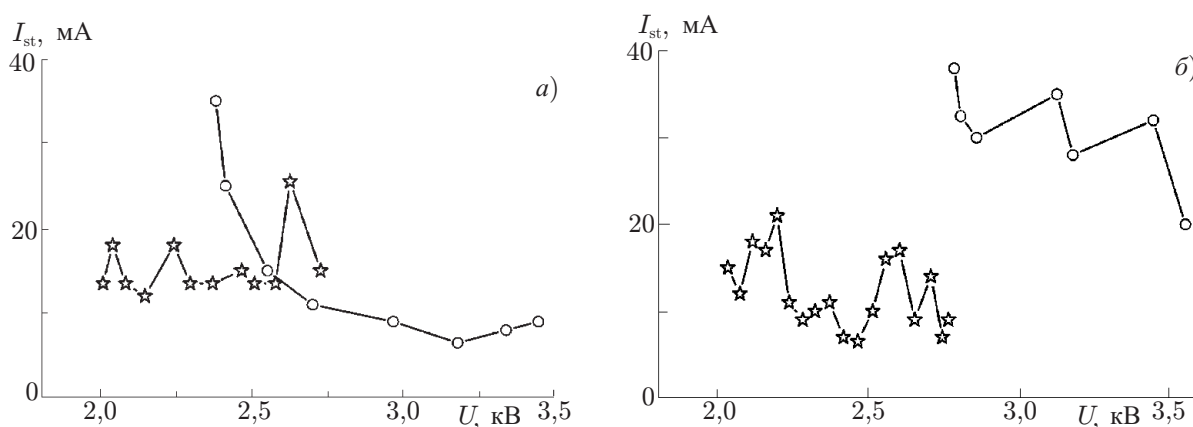


Рис. 7. Характер поведения стартовых токов для режимов ГДИ (звёздочки) и ЛОВ (светлые кружки) при однородной решётке, соответствующей случаю $\Delta\Phi = 0$ (а), и неоднородной решётке, соответствующей случаю $\Delta\Phi = 180^\circ$ (б)

при перестройке частоты ГДИ составляло $U = 3,2 \div 3,6$ кВ, а стартовый ток I_{st} по диапазону перестройки изменялся незначительно и находился в диапазоне $240 \div 260$ мА. Конкуренции со стороны режима поверхностных волн не наблюдалось даже при максимальном токе пучка, составлявшем $I = 340$ мА.

ВЫВОДЫ

Использование для работы ГДИ высших типов колебаний в открытом резонаторе и неоднородной дифракционной решётки позволяет реализовать многокаскадную область взаимодействия в одном открытом резонаторе и увеличить её эффективную длину без увеличения радиуса кривизны зеркал, что особенно важно при разработке ГДИ для терагерцового диапазона.

Показано, что использование в ГДИ уже двухкаскадного пространства взаимодействия, реализованного для колебаний типа $ТЕМ_{01q}$ в открытом резонаторе, позволяет снизить стартовый ток в 1,91 раза и обеспечить перестройку ГДИ в широкой полосе частот. Изменение характера энергообмена электронного пучка с резонансным полем в многокаскадном ГДИ позволяет улучшить селекцию возбуждаемых колебаний без уменьшения апертуры зеркал открытого резонатора. Применение в двухкаскадном ГДИ дифракционной решётки с одноразовым сбоем периодичности нарезки щелей в середине области взаимодействия является эффективным средством для подавления конкуренции со стороны режима поверхностных волн.

При укорочении рабочей длины волны и переходе к использованию в ГДИ дифракционных решёток, оптимизированных для работы на высших пространственных гармониках, сохраняются преимущества использования многокаскадного механизма энергообмена в ГДИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестопапов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 2. Источники. Элементная база. Радиосистемы. Киев: Наук. думка, 1985. 256 с.
2. Васильева Т. И., Ревин И. Д., Шестопапов В. П. // Докл. АН УССР. Сер. А. 1984. № 7. С. 53.
3. Максимов П. П., Цвык А. И., Шестопапов В. П. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1985. Т. 28, № 10. С. 59.
4. Ваврив Д. М., Третьяков О. А. Теория резонансных усилителей О-типа. Киев: Наук. думка, 1989. 152 с.
5. Евдокименко Ю. И., Лукин К. А., Ревин И. Д., Скрынник Б. К. // Журнал технической физики. 1982. Т. 52, № 3. С. 525.
6. Соловьёв А. Н., Цейтлин М. Б. // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27, № 2. С. 368.
7. Русин Ф. С., Костромин В. П. // Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30, № 5. С. 994.
8. Евдокименко Ю. И., Лукин К. А., Скрынник Б. К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 11. С. 1443.
9. Лебедев А. Б., Пивоварова А. Г. // Научное приборостроение в мм и субмм диапазонах. Харьков: ИРЭ АН УССР, 1988. С. 83.
10. Русин Ф. С. // Электроника больших мощностей. М.: Наука, 1968. Сб. 5. С. 9.
11. Евдокименко Ю. И., Лукин К. А., Шестопапов В. П. // Журнал технической физики. 1984. Т. 54, № 12. С. 2359.
12. Мирошниченко В. С., Демченко М. Ю., Сенкевич Е. Б., Скрынник Б. К. // 15-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005). Севастополь, 2005. Т. 1. С. 271.

13. Демченко М. Ю., Мирошниченко В. С., Свищев Ю. В., Сенкевич Е. Б. // Радиофизика и электроника. Харьков: ИРЭ НАН Украины, 2007. Т. 12, № 2. С. 383.

Поступила в редакцию 13 января 2009 г.; принята в печать 23 марта 2010 г.

MODE EXCITATION IN A GENERATOR FOR DIFFRACTION RADIATION WITH A MULTISTAGE INTERACTION SPACE

V. S. Miroshnichenko, E. B. Senkevich, A. G. Pivovarova, and D. V. Yudinsev

We present the results of studying theoretically and experimentally the features of mode excitation in a generator of diffraction radiation with the two- and three-cascade interaction space in one open resonator. To describe the multistage interaction mechanism, the theoretical model used considers the excitation of the TEM_{0nq} modes, which have n in-phase field “spots”, i.e., cascades, along the direction of the electron beam motion. It is shown that even the use of the two-cascade interaction space with the TEM_{01q} modes allows one to reduce the starting current of the generator by 1.91 times. The results of studying experimentally the two-cascade generator in the 5 and 1.5 wavelength ranges are presented. The in-phase property of the electron beam with the resonance field was achieved by disrupting the periodicity of the slots cut in the lattice at the center of the interaction space. The output power of the two-stage generator of the 5-millimeter diffraction radiation in the TEM_{013} mode ranged from 3 to 5 W. We also observed a 4–5-fold increase in the starting current for the regime of surface waves.