

Высокоселективные «трехмерные» брэгговские резонаторы для мощных суб-ТГц ЛСЭ

Е.Д. Егорова¹, Н.Ю. Песков^{1,2}, А.С. Сергеев¹, И.М. Царьков¹

¹Институт прикладной физики РАН

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Аннотация: Предложена новая схема брэгговских резонаторов, реализующих трехмерную распределенную обратную связь. Исследованы электродинамические свойства резонаторов нового типа, продемонстрированы их высокие селективные свойства по трем индексам мод в условиях существенной сверхразмерности. Результаты теоретического анализа подтверждены трехмерным моделированием, выполненным в суб-ТГц диапазоне.

Ключевые слова: брэгговские резонаторы, лазеры на свободных электронах, селекция мод

1. Введение

Основной тенденцией развития современной СВЧ - электроники является увеличение мощности генераторов и их продвижение во все более коротковолновые диапазоны. Это неизбежно влечет увеличение поперечных размеров их пространства взаимодействия. Таким образом, одной из основных проблем на пути создания подобных генераторов становится проблема разработки электродинамических систем, способных обеспечить селективное возбуждение рабочей моды в условиях существенной сверхразмерности.

Широкое применение в качестве электродинамических систем мощных микроволновых генераторов на основе релятивистских электронных пучков (РЭП) получили предложенные в [1] брэгговские резонаторы в виде отрезков волноводов с неглубокой гофрировкой боковых стенок, реализующие одномерную распределенную обратную связь (РОС). В традиционном («одномерном») варианте данные структуры, как и их оптические аналоги [2], в условиях брэгговского резонанса осуществляют связь и взаимное рассеяние двух встречно-распространяющихся волновых пучков: попутного, синхронно взаимодействующего с РЭП, и встречного, формирующего цикл обратной связи. Однако увеличение размеров подобных электродинамических систем сопряжено с потерей их селективности по поперечным индексам мод, т.е. мод обладающих различной поперечной структурой.

Эффективная селекция мод в релятивистских генераторах с поперечно-развитым пространством взаимодействия может быть достигнута путем использования так называемых «двумерных» брэгговских резонаторов, реализующих механизм двумерной РОС [3]. Резонаторы данного типа обладают двумерно-периодической гофрировкой, которая обеспечивает связь и взаимное рассеяние четырех парциальных волн, две из которых распространяются вдоль поступательного движения электронов и во встречном направлении (подобно «традиционным» брэгговским резонаторам), а две другие - в поперечном направлении. Как показывают проведенные исследования, резонаторы данного типа позволяют обеспечить эффективную селекцию мод по «широкому» поперечному индексу (т.е. вдоль поперечной координаты x , направленной параллельно пластинам планарного резонатора, см. рис. 1) вплоть до поперечных размеров системы $l_x/\lambda \geq 10^2$.

Развитие системы вдоль второго поперечного направления (по координате y , направленной вдоль зазора резонатора) может быть достигнуто путем использования

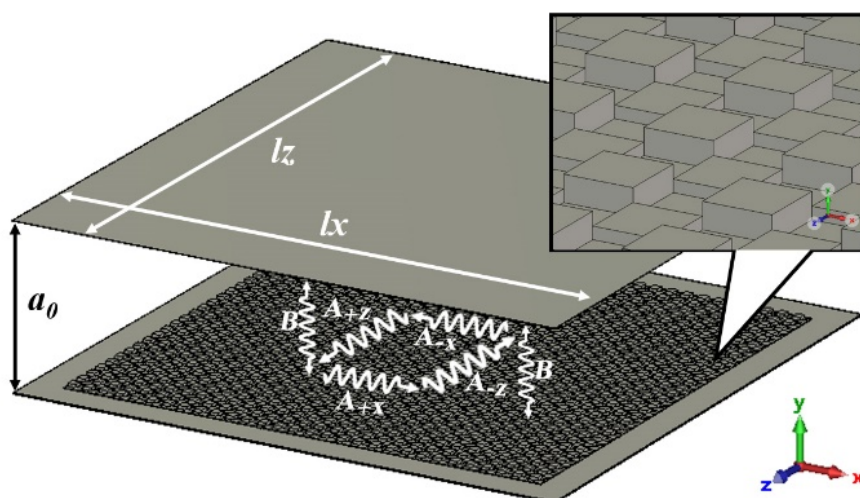


Рисунок 1. Схема планарного брэгговского резонатора, реализующего механизм трёхмерной распределенной обратной связи.

другой разновидности брэгговских структур - так называемых модифицированных брэгговских структур, основанных на связи бегущих и квазикритических волн [4]. Включение в цепь обратной связи квазикритических волн позволяет существенно увеличить селективность подобных резонаторов по сравнению с «традиционными» аналогами и обеспечить селективное возбуждение рабочей моды при размерах пространства взаимодействия $a_0/\lambda \sim 20 - 40$.

Работоспособность брэгговских структур нового типа подтверждена экспериментально в МСЭ-генераторах, реализованных вплоть до W-диапазона частот, при сверхразмерности систем до 5 длин волн в случае использования брэгговских резонаторов модифицированного типа [5] и ~ 50 длин волн в резонаторах, основанных на двумерных брэгговских структурах [6].

Комбинация методов селекции, реализуемых в описанных выше новых типах брэгговских резонаторов, позволяет осуществить развитие поперечных размеров релятивистских генераторов в обоих поперечных направлениях. Настоящая статья посвящена синтезу брэгговской структуры, реализующей механизм обратной связи, который можно назвать «трехмерным». Развита модель для описания рассеяния волн на данной структуре в рамках метода связанных волн, исследован ее спектр мод. Высокие селективные свойства структуры нового типа подтверждены результатами трехмерного моделирования с использованием кода CST Microwave Studio.

2. Теоретический анализ и результаты моделирования

Брэгговский резонатор, реализующий механизм трехмерной РОС, может быть выполнен в виде отрезка планарного волновода шириной l_x , длиной l_z и зазором a_0 , на пластины которого нанесена гофрировка (рис.1)

$$a = a_{2D} \cos(\bar{h}x) \cos(\bar{h}z) + a_{1D} [\cos(\bar{h}z) + \cos(\bar{h}x)] \quad (1)$$

При выполнении условия брэгговского резонанса

$$\bar{h} \approx h \quad (2)$$

гофрировка данного вида обеспечивает рассеяние волновых потоков,

распространяющихся в трех взаимно-перпендикулярных направлениях: первое слагаемое в (1) (аналогично двумерной брэгговской структуре [3]) отвечает за взаимное рассеяние волновых потоков

$$\vec{E}_A(A_{+z}e^{-ihz} + A_{-z}e^{ihz} + A_{+x}e^{-ihx} + A_{-x}e^{ihx})e^{icot}, \quad (3a)$$

распространяющихся в $\pm z$ и $\pm x$ направлениях, а второе слагаемое (аналогично модифицированным брэгговским структурам [4]) - за рассеяние этих волн (3a) в квазикритическую волну

$$B\vec{E}_B e^{icot}, \quad (3b)$$

которая (согласно концепции Бриллюэна) может быть интерпретирована как стоячая волна в направлении y , запертая между пластин, формирующих планарный волновод. Здесь $\bar{h} = 2\pi/d$, d - период гофрировки, a_{1D} и a_{2D} амплитуды соответствующих «компонент» (пространственных гармоник) гофрировки, $A_{\pm x, \pm z}$ и B - медленно-меняющиеся амплитуды парциальных волн, $E_{A,B}$ - функции, описывающие поперечную (по оси y) структуру этих волн, которая совпадает с одной из собственных мод невозмущенного планарного волновода. Будем для простоты считать, что волны $A_{\pm x, \pm z}$ относятся к низшему ТЕМ-типу. При этом волна B принадлежит к одной из ТМ _{p} волн планарного волновода, причем в условиях существенной сверхразмерности (т.е. $a_0 \gg \lambda$) имеет высокий поперечный индекс $p \gg 1$ и, соответственно, большое число вариаций вдоль зазора (по координате y).

Для верификации результатов теоретического анализа, полученных в рамках метода связанных волн, было проведено моделирование с использованием трехмерного электромагнитного кода CST Microwave Studio. Брэгговский резонатор, реализующий трехмерный механизм обратной связи, был рассчитан на работу в диапазоне около 0.3 ТГц и имел следующие параметры: $l_x = l_z = 50$ мм (т.е. $\sim 50\lambda$), $a_0 = 5$ мм (т.е. $\sim 5\lambda$), $d = 1$ мм, $a_{1D} = 0.05$ мм, $a_{2D} = 0.14$ мм (амплитуды гофрировки выбирались так, чтобы обеспечить равенство коэффициентов связи волн для двух описанных механизмов рассеяния). Для аппроксимации гармонических функций использовались периодические функции типа меандр (см. выноски на рис. 1).

Структура возбуждалась коротким электромагнитным импульсом генерируемым диполем, который располагался внутри резонатора. Результаты моделирования пространственно-временной динамики ВЧ-поля в резонаторе представлены на рис. 2a, приведены спектры ВЧ-поля на начальной $1 \text{ нс} \leq t \leq 6 \text{ нс}$ и конечной $10 \text{ нс} \leq t \leq 15 \text{ нс}$ стадиях эволюции. Моделирование показывает, что на начальном этапе возбуждается

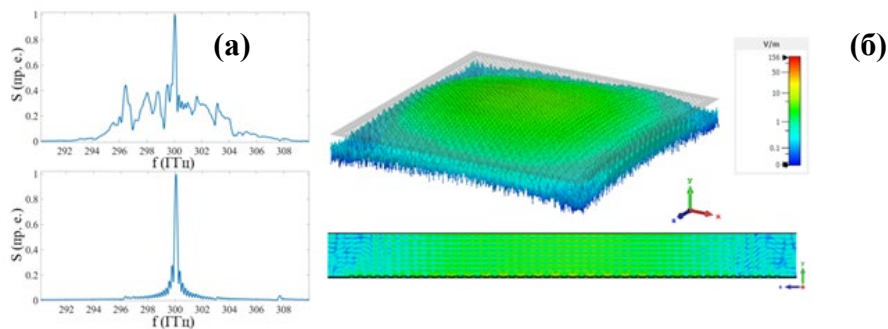


Рисунок 2. Результаты CST-моделирования «трехмерного» брэгговского резонатора в суб-ТГц диапазоне частот: (а) Спектры ВЧ поля на начальной (верхний фрагмент) и конечной (нижний фрагмент) стадиях, а также (б) пространственная структура ВЧ поля в резонаторе на финальной стадии эволюции.

большое число собственных мод структуры, принадлежащих к различным семействам. Частоты этих мод находятся в хорошем соответствии с решениями, найденными в рамках теоретического анализа спектра мод на основе метода связанных волн. Далее происходит затухание волн и высвечивание из резонатора на временах, обратно пропорциональных их добротностям. В результате, на финальной стадии выделяется основная наиболее добротная мода системы, расположенная в центре полосы брэгговского рассеяния на частоте точного резонанса, определяемого соотношением (2). Добротность этой моды может быть оценена по декременту затухания ВЧ-поля и составляет $Q \sim 4500$. Структура ВЧ-поля в резонаторе на финальной стадии эволюции приведена на рис. 2б. Структура этой моды по y - координате соответствует возбуждению квазикритической волны с 10 вариациями поля, что подтверждает установление в резонаторе нормальной волны, сформированной расчетной связкой парциальных волновых потоков в виде четырех бегущих волн ТЕМ-типа (3а) и квазикритической волны TM_{10} .

3. Заключение

Таким образом, проведенный теоретический анализ и компьютерное моделирование демонстрируют высокие селективные свойства предложенных пространственно-развитых брэгговских резонаторов, реализующих механизм трехмерной распределенной обратной связи. Данные резонаторы имеют большой потенциал использования в качестве электродинамических систем ЛСЭ, которые способны обеспечить устойчивую одномодовую генерацию в условиях существенной сверхразмерности в суб-ТГц/ТГц диапазонах.

Исследование выполнено при частичной поддержке **Российского научного фонда (грант № 19-12-00212)**.

Список литературы

1. Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S., Petelin M.I. FEL's with Bragg reflection resonators: cyclotron autoresonance masers versus ubitrons // IEEE J. of Quant. Electron. - 1983. - V.QE-19 (3). - P.282-296.
2. Yariv A. Quantum Electronics. - John Wiley and Sons Inc., N.Y., 1975.
3. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. Использование двумерной распределенной обратной связи в лазерах на свободных электронах // Письма в ЖТФ. - 1992. - Т.18 (9). - С.23-28.
4. Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Зотова И.В., Малкин А.М., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. Лазеры на свободных электронах терагерцового диапазона с брэгговскими структурами, основанными на связи бегущих и квазикритических волн // Письма в ЖЭТФ. - 2010. - Т.91 (6). - С.286-290.
5. Peskov N.Yu., Ginzburg N.S., Golubev I.I., Golubykh S.M., Kaminsky A.K., Kozlov A.P., Malkin A.M., Sedykh S.N., Sergeev A.S., Sidorov A.I., Zaslavsky V.Yu. Powerful oversized W-band free-electron maser with advanced Bragg resonator based on coupling of propagating and cutoff waves // Appl. Phys. Lett. - 2020. - V.116. - P.0006047.
6. Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Калинин П.В., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Сеницкий С.Л., Степанов В.Д., Тумм М. Генерация мощного узкополосного излучения 75 GHz в мазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью // Письма в ЖТФ. - 2013. - Т.39 (18). - С.8-16.