

09

## Релятивистская резонансная лампа бегущей волны с перестраиваемой частотой генерации

© Э.Б. Абубакиров, А.Н. Денисенко, А.В. Савельев,  
Е.И. Солуянов, В.В. Ястребов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Поступило в Редакцию 5 августа 1999 г.

Экспериментально реализован мощный СВЧ генератор на основе релятивистской лампы бегущей волны с цепью обратной связи, замыкаемой перестраиваемыми по частоте Брэгговскими волноводными рефлекторами. В 3-сантиметровом диапазоне длин волн в генераторе достигнут гигаваттный уровень импульсной мощности, сохраняющийся при перестройке несущей частоты излучения в диапазоне около 5%.

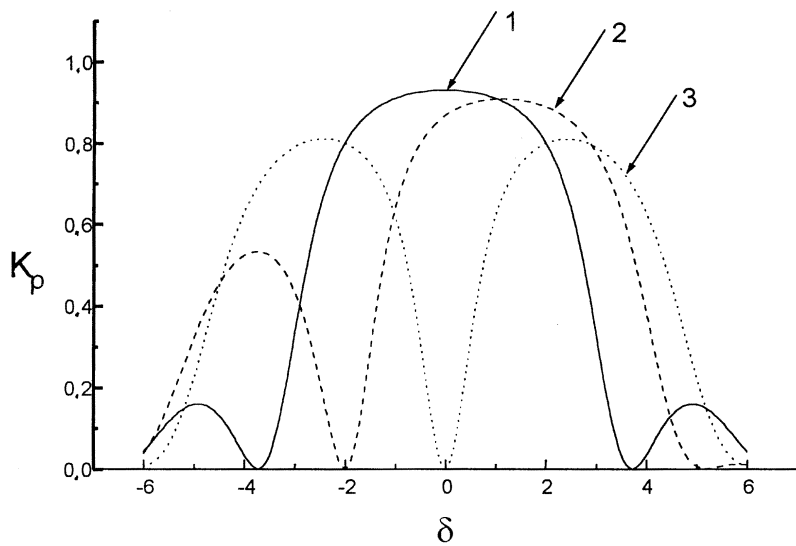
Одним из наиболее перспективных направлений исследований источников СВЧ излучения на релятивистских электронных пучках представляется поиск возможностей перестройки несущей частоты выходного сигнала [1–3]. При импульсной работе источника излучения одним из вариантов такой перестройки является изменение частоты от импульса к импульсу, которое может быть осуществлено механической перестройкой электродинамической системы генератора. Один из вариантов устройства, допускающего механическую перестройку частоты генерации, может быть построен на основе релятивистской резонансной лампы бегущей волны (ЛБВ). Релятивистская резонансная ЛБВ [4] представляет собой сверхразмерный гофрированный волновод, канализирующий синхронную с электронным пучком медленную электромагнитную волну, а организация положительной обратной связи осуществляется резонансными отражателями Брэгговского типа [5], установленными на концах этого волновода. Сверхразмерность волновода позволяет снизить вероятность его высокочастотного пробоя при высокой мощности электромагнитного излучения. Когерентность же излучения обеспечивается избирательными по частоте и типу волны отражателями. Так как в рассматриваемом варианте собственно релятивистская ЛБВ, реализо-

ванная на медленной волне сверхразмерного волновода, достаточно широкополосна, то перестройка рабочей частоты генератора в целом может быть достигнута за счет смещения рабочей частоты отражателей.

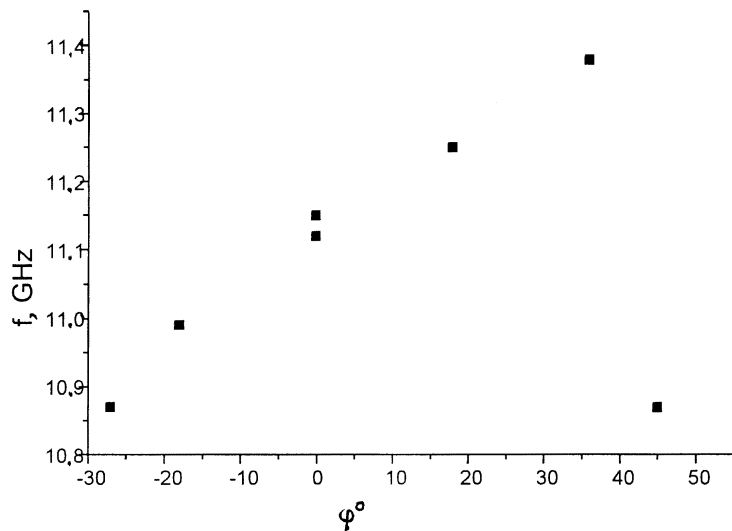
Для рефлекторов рассматриваемого Брэгговского типа смещение полосы отражения реализуется при введении в их конструкцию регулируемой неоднородности, например скачка фазы гофрировки боковых стенок. Важно отметить, что если волновод круглый, а падающая и отраженная волны имеют разные азимутальные индексы ( $m_1$  и  $m_2$ ), то связывающий их рефлектор имеет винтовую гофрировку с числом заходов винта

$$\bar{m} = m_1 - m_2, \quad (1)$$

а скачок фазы в такой гофрировке изменяется простым поворотом одной части отражателя относительно другой.



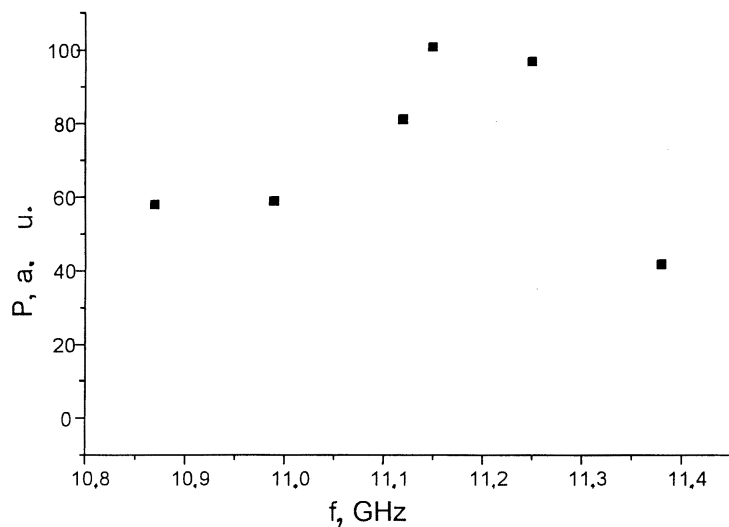
**Рис. 1.** Расчетные значения коэффициента отражения брэгговского рефлектора  $K_p$  от расстройки волновых чисел  $h_1$ ,  $h_2$  взаимодействующих волн  $\delta = (2\pi/d - h_1 - h_2)/2$ ,  $d$  — пространственный период рефлектора, для разных значений сбоя фазы гофрировки: 1 —  $0^\circ$ , 2 —  $90^\circ$ , 3 —  $180^\circ$ .



**Рис. 2.** Зависимость центральной частоты генерации резонансной ЛБВ от скачка фазы гофрировки катодного рефлектора.

Анализ работы такого рефлектора может быть проведен, так же как и для регулярного варианта, на основе использования модели связанных волн. Такой анализ показывает, что введение нерегулярности в гофрировку в середине рефлектора приводит к появлению в полосе отражения частоты, на которой волны, отраженные двумя частями рефлектора, полностью компенсируют друг друга и суммарный коэффициент отражения обращается в ноль. При изменении величины скачка фазы в интервале  $(0, 2\pi)$  точка компенсации пробегает от одной границы полосы отражения до другой, тем самым деформируя ее и изменяя частотное положение максимума коэффициента отражения (рис. 1). При умеренных коэффициентах отражения (80–90%) смещение максимума имеет порядок невозмущенной рабочей полосы рефлектора.

Описанная возможность управления рабочей частотой релятивистского СВЧ генератора была исследована экспериментально. В качестве базового элемента в экспериментах использовалась резонансная ЛБВ с рабочей модой гибридного типа  $HE_{11}$  круглого гофрированного волно-



**Рис. 3.** Изменение пиковой мощности резонансной ЛБВ при перестройке несущей частоты.

вода и цепью обратной связи, замыкавшейся волной  $TE_{41}$ . Связь волн обеспечивалась двумя рефлекторами, выполненными в виде отрезков волноводов с 5-заходной винтовой гофрировкой. Катодный рефлектор был разделен по длине на две одинаковые части, которые могли вращаться относительно друг друга. Максимальный коэффициент трансформации катодного рефлектора составлял 90%, коллекторного — 10%. Рабочие моды имели вращающуюся поляризацию, причем основная мода и мода обратной связи имели противоположные направления вращения своих пространственных структур. Выбор типов мод и их поляризации определялся необходимостью обеспечения одномодовой генерации.

Источником питания генератора служил сильноточный ускоритель электронов с энергией частиц 1–1,2 MeV, током пучка около 7 кА и длительностью ускоряющего импульса на уровне 0,8 амплитуды 150 ns. Ускоритель формировал трубчатый электронный пучок диаметром 38 mm, транспортировавшийся однородным магнитным полем с индукцией 2Т. Выходное излучение выводилось дифракционным образом

сверхразмерной рупорной антенной через полиэтиленовое окно диаметром 440 mm. Диагностика СВЧ излучения проводилась при помощи набора калиброванных СВЧ датчиков, расположенных на расстоянии 4 m от выходного окна. Коэффициент передачи тракта "выходное окно-приемный рупор СВЧ датчика" определялся в предварительных экспериментах с помощью стандартной измерительной аппаратуры. Измерение частоты излучения проводилось при помощи волноводного полосового фильтра с механической перестройкой центральной частоты полосы пропускания.

В регулярном варианте резонансная ЛБВ данного типа генерировала СВЧ излучение пиковой мощностью около 1.5 GW, длительностью 30–40 ns, с несущей частотой 11.1 GHz [4].

При перестройке катодного рефлектора за счет изменения взаимной фазировки его частей наблюдалось смещение центральной частоты генерации в пределах 10.9–11.4 GHz (рис. 2) при изменении выходной мощности не более чем в 2 раза (рис. 3).

Таким образом, рассмотренный метод позволяет осуществить механическую перестройку частоты мощных СВЧ генераторов в пределах нескольких процентов при сохранении основных свойств прибора.

## Список литературы

- [1] *Nusinovich G., Levush B., Antonsen T. et al.* // Proc. of 2nd Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas". Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia. 1994. V. 2. P. 712–729.
- [2] *Brown L., Maitland A., Parkes D.M.* Abstracts of EUROEM 94 Int. Symposium. Bordeaux, France, 1994. P. TUa-01-10.
- [3] *Moreland L.D., Schamiloglu E., Korovin S.D. et al.* // IEEE Trans. On Plasma Science. 1996. V. 24. N 3. P. 852–858.
- [4] *Abubakirov E.B., Fuchs M.I., Gintsburg V.A. et al.* // Proc. of 8th Int. Conf. On High-Power Particle Beams. World Scientific. 1991. V. 2. P. 1105–1110.
- [5] *Денисов Г.Г., Резников М.Г.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 5. С. 562–566.