

УДК 537.86

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ТАЛЬБОТА ДЛЯ СУММИРОВАНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Г. Г. Денисов<sup>1,2</sup>, М. Ю. Шмелёв<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН;

<sup>2</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе рассмотрена задача суммирования мощности нескольких когерентных источников сверхвысокочастотного излучения. Для её решения предложено использовать эффект Тальбота в сверхразмерном прямоугольном волноводе. Рабочая частота сумматора равна 94,4 ГГц. Расчётный коэффициент суммирования единичных сигналов составил 2,8 дБ в полосе частот 800 МГц при учёте омических потерь. Проведено компьютерное моделирование сумматора, исследованы его характеристики при низком уровне мощности.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из усилителей, позволяющих получить мультимегаваттный уровень мощности на частотах в окрестности 100 ГГц, является гироклистрон. Однако в настоящее время не существует достаточно мощных источников сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, позволяющих обеспечить заданный уровень мощности входного сигнала при реалистичных значениях коэффициента усиления гироклистрона (25÷30 дБ). Для решения указанной задачи предложена схема синхронизации нескольких независимых источников (магнетронов), что может обеспечить мощность входного сигнала в несколько десятков киловатт. Подобная схема была реализована в балансном сумматоре мощности магнетронов, основанном на одномодовом волноводе на частоте порядка 34 ГГц [1]. При этом при отражении небольшой части излучения одного магнетрона в другой магнетрон происходит взаимный захват частоты и магнетроны становятся когерентными. Увеличение частоты осложняет применение одномодовых волноводов при большой мощности (порядка 10 кВт). Использование сверхразмерного волновода позволяет решить эту проблему. Для суммирования мощностей излучения в данной статье предложено использовать эффект Тальбота в сверхразмерном волноводе.

В работах, посвящённых исследованию и использованию эффекта Тальбота [2], показано, что параксиальный волновой пучок при введении в сверхразмерный волновод может повторяться, симметрично отображаться, делиться на несколько симметричных пучков и т. д. [3]. Также описывались устройства, позволяющие управлять выходным излучением с помощью изменений фазовых соотношений на входе волновода [4, 5].

Эти явления связаны с интерференцией мод, на которые можно разложить поле входного пучка. Набеги фаз для каждой моды становятся кратны  $\pi$  на некоторых фиксированных расстояниях. Так, например, в планарном волноводе на расстояниях  $z = (p/q)(a^2/\lambda)$  сдвиг фазы между модами с поперечными индексами  $n$  и  $m$  приближённо определяется следующим выражением [4]:

$$\Delta\varphi_{nm} = \frac{\pi}{4} \frac{p}{q} (n^2 - m^2).$$

\* shm@appl.sci-nnov.ru

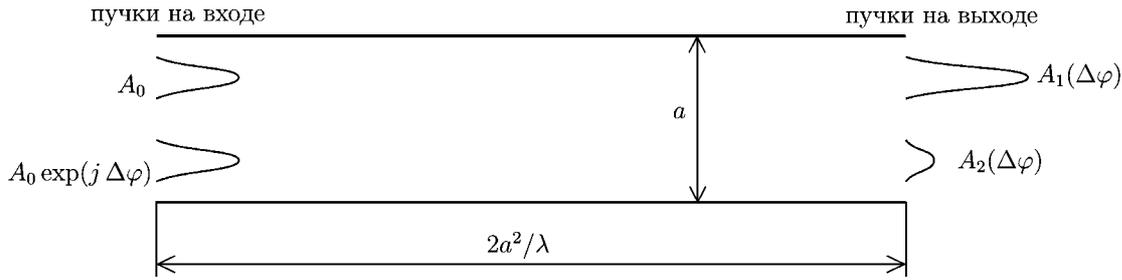


Рис. 1. Квазиоптический направленный ответвитель

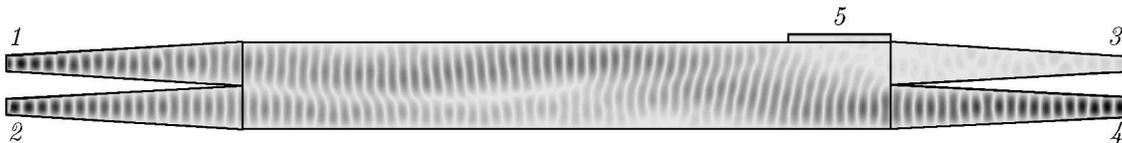


Рис. 2. Распределение электрического поля в сумматоре

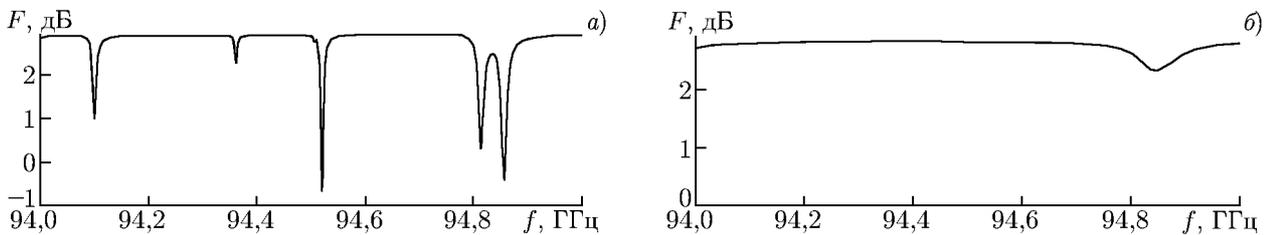


Рис. 3. Коэффициент суммирования в «закрытой» системе с четырьмя портами (а) и в «открытой» системе при наличии пятого порта с поглотителем (б)

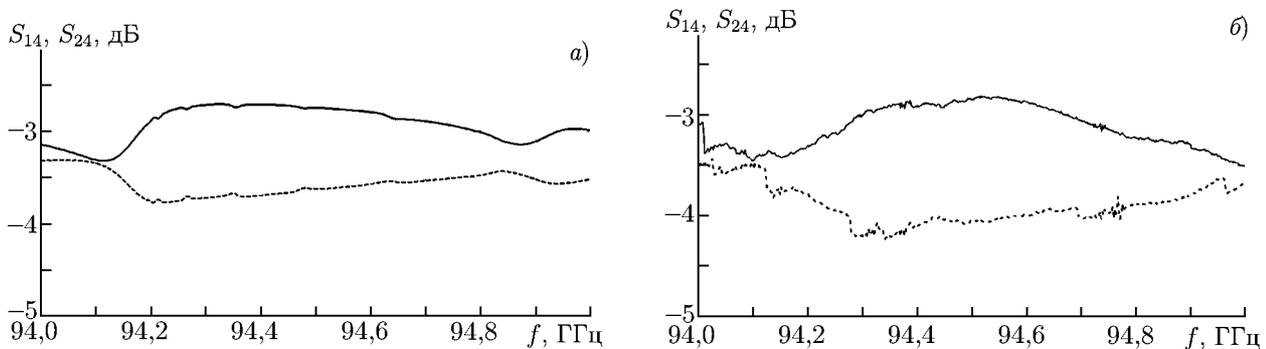


Рис. 4. Вычисленные (а) и измеренные (б) коэффициенты прохождения сигналов из портов 1 ( $S_{14}$ , сплошная линия) и 2 ( $S_{24}$ , пунктирная линия)

Здесь  $p$  и  $q$  — целые положительные числа,  $a$  — поперечный размер волновода,  $\lambda$  — длина волны в вакууме. При длине волновода  $z = 2a^2/\lambda$  два волновых пучка, имеющие на входе волновода одинаковые амплитуды  $A_0$ , но разные фазы (сдвиг фаз  $\Delta\varphi$ ), преобразуются на его выходе в два пучка с разными амплитудами  $A_1$  и  $A_2$  (см. рис. 1). В частности, если направить в такое устройство два одинаковых когерентных пучка с фазовым сдвигом  $\pi/2$ , то получится волноводный сумматор мощности:  $A_1^2(\pi/2) = 2A_0^2$ ,  $A_2^2(\pi/2) = 0$ .

## 1. РАСЧЁТЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

Для расчёта была взята модель сумматора на частоте 94,4 ГГц. Входные порты (обозначены цифрами 1 и 2 на рис. 2) представляли собой волноводные переходы с сечения одномодового волновода  $2,4 \times 1,2$  мм на сечение  $6 \times 2$  мм. Порт 4, в котором происходило суммирование, имеет выходной размер  $3,0 \times 1,5$  мм. Ширина средней части сумматора  $a = 12$  мм, при этом длина сумматора составляет 94,6 мм. Эта длина получена при оптимизации по максимальному коэффициенту суммирования в порту 4 и немного отличается от длины, даваемой выражением  $z = 2a^2/\lambda = 91$  мм.

Детальные расчёты такого сумматора с помощью программы «CST Studio» [6] показали, что некоторые высшие моды оказывались запертыми в центральной части сумматора, что приводило к резонансному поглощению излучения внутри устройства. Чтобы избежать этого эффекта, было принято решение «открыть систему». Для этого вблизи неработающего порта 3 (в области слабого поля) в боковой стенке сумматора был создан порт 5, представляющий собой волновод с сечением  $15 \times 2$  мм с согласованной нагрузкой.

На порты 1 и 2 устройства подаются единичные (0 дБ) сигналы с разностью фаз  $\pi/2$ . Суммирование происходит в порту 4. На рис. 2 показано распределение поля в сумматоре, цифрами обозначены порты.

На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициента суммирования  $F$ , соответствующего величине сигнала первой моды в порту 4 при подаче единичных сигналов первой моды в порты 1 и 2 со сдвигом фазы  $\pi/2$  на частоте 94,4 ГГц. Рисунок 3а соответствует суммированию в закрытой системе (без порта 5), рис. 3б — суммированию при наличии порта 5. Видно, что суммарный сигнал в открытой системе становится меньше (2,8 дБ вместо 2,9 дБ), но при этом пропадают резонансные провалы и рабочая полоса сумматора увеличивается до 800 МГц. Расчётные значения коэффициентов отражения  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  и переходных коэффициентов  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  не превышают  $-20$  дБ. Таким образом, потери в системе обусловлены поглощением, в основном в порту 5. Из-за отсутствия двух когерентных источников с регулируемыми фазами экспериментальная проверка устройства проходила на примере разделения единичного сигнала (0 дБ), поданного в порт 4, между портами 1 и 2. Предварительный численный эксперимент дал рас-

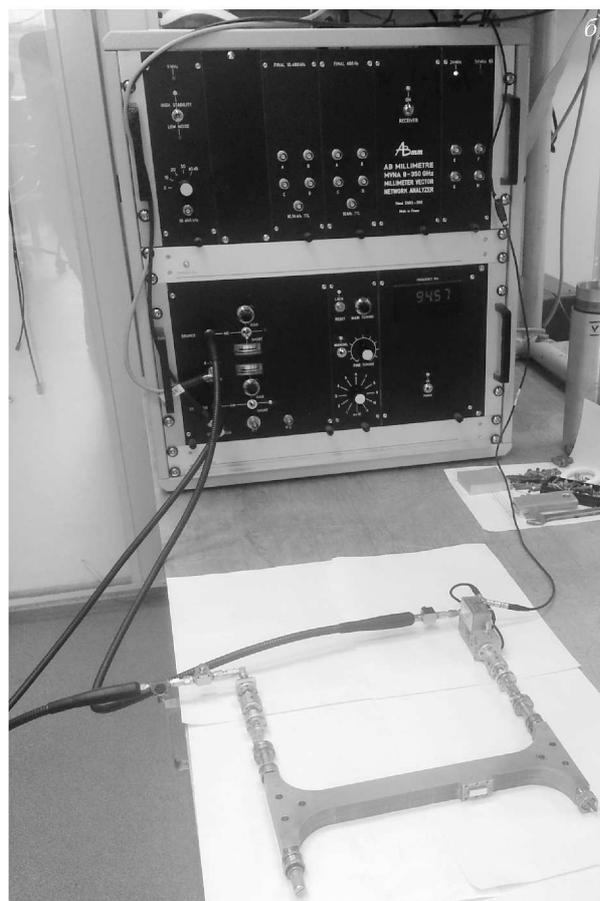
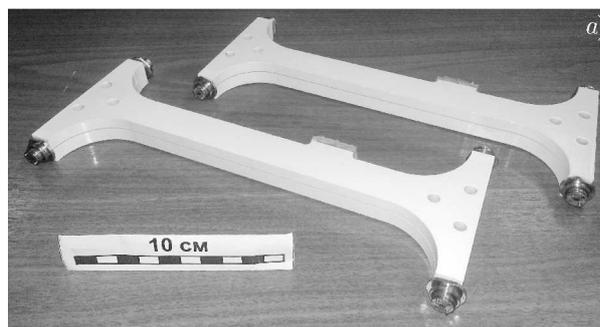


Рис. 5. Фото сумматоров (а) и измерение характеристик сумматора с помощью векторного анализатора (б)

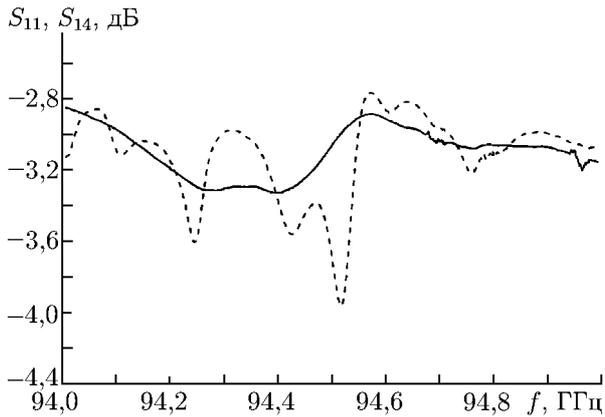


Рис. 6. Измеренный коэффициент прохождения  $S_{14}$  при наличии порта 5 с поглотителем (сплошная линия) и без порта 5 (пунктирная линия)

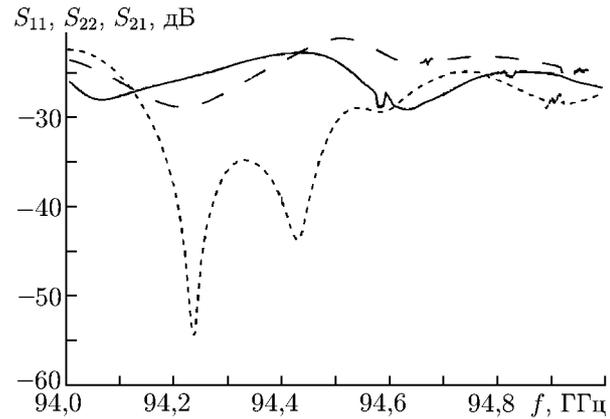


Рис. 7. Измеренные коэффициенты отражения  $S_{11}$  (сплошная линия),  $S_{22}$  (пунктирная линия) и переходный коэффициент  $S_{21}$  (штриховая линия)

пределение полей, практически идентичное распределению полей для задачи суммирования (см. рис. 2).

Были рассчитаны измеряемые в эксперименте параметры  $S_{14}$  и  $S_{24}$  (см. рис. 4а). Расчёт показал асимметрию между каналами 1 и 2, что вызвано асимметрией самой задачи (наличие порта 5 с поглотителем).

Полученные с помощью векторного анализатора (см. рис. 5) экспериментальные данные были очень близки к расчётным (рис. 4б). Небольшое уменьшение коэффициента прохождения обусловлено качеством изготовления волноводной поверхности сумматора. Также экспериментально подтверждена эффективность работы порта 5 с поглощающей вставкой. Наличие дополнительного центра поглощения убирает резонансные провалы, а размещение его в области слабого поля практически не снижает уровень сигнала (см. рис. 6). Измеренные коэффициенты отражения  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  и переходный коэффициент  $S_{21}$  не превысили уровень  $-20$  дБ (см. рис. 7).

## 2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты расчёта и измерений характеристик квазиоптического сумматора мощности, основанного на эффекте Тальбота в сверхразмерном волноводе. Введение в сумматор узла поглощения в виде дополнительного порта с согласованной нагрузкой позволило избавиться от паразитных резонансов и обеспечить рабочую полосу частот до 800 МГц. Экспериментальная проверка изготовленного сумматора с помощью одного источника дала результат, близкий к полученному при численном моделировании.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-29-00192).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гутцайт Э. М., Иванов И. М., Курушин А. А. // Труды конф. «Проблемы СВЧ электроники», Москва, 24–25 октября 2013 г. С. 52.
2. Talbot H. F. // J. Sci. 1836. V. 9. P. 401.
3. Ривлин Л. А., Шильдяев В. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 4. С. 572.

4. Denisov G. G., Kuzikov S. V. // Proc. Int. Workshop Strong Microwaves in Plasmas, Nizhny Novgorod, 2–9 August 1999. V. 2. P. 960.
5. Kuzikov S. V. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1998. V. 19, No. 11. P. 1523.
6. <http://www.cst.com/>

Поступила в редакцию 2 июня 2015 г.; принята в печать 22 сентября 2015 г.

## USING THE TALBOT EFFECT FOR SUMMATION OF MICROWAVE SIGNALS IN THE MILLIMETER-WAVELENGTH BAND

*G. G. Denisov and M. Yu. Shmelyov*

We consider the problem of summing the power produced by several coherent sources of microwaves and propose to use the Talbot effect in an oversized rectangular waveguide to solve it. The operating frequency of the summator is 94.4 GHz. The calculated coefficient of summation of individual signals is equal to 2.8 dB in the 800 MHz frequency range with allowance for the ohmic loss. Computer simulation of the summator has been performed, and its characteristics have been studied at a low power level.