

УДК 621.382.32, 621.373

## **СУММИРОВАНИЕ МОЩНОСТЕЙ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН-ГЕНЕРАТОРОВ В РЕЗОНАТОРЕ, ВСТРОЕННОМ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПОДЛОЖКУ**

**В.Е. Любченко, В.И. Калинин, В.Д. Котов, Д.Е. Радченко, С.А. Телегин, Е.О. Юневич**  
**Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,**  
**Фрязинский филиал, 141120, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского 1**

Статья поступила в редакцию 8 марта 2017 г.

**Аннотация.** Предложена и исследована конструкция автогенератора СВЧ излучения на основе линейки микрополосковых антенн логопериодического типа, интегрированных с полевыми транзисторами, и волновода, встроенного в диэлектрическую подложку. Данный тип волноводов представляет собой линию передачи, которая состоит из диэлектрической подложки, ограниченной двумя параллельными металлическими пластинами и двумя рядами межслойных цилиндрических переходов, и обладает рядом достоинств, среди которых: малые потери, высокая добротность резонаторов на их основе, хорошие экранирующие свойства, а также возможность интегрировать все компоненты на одной подложке. Геометрия конструкции генератора представляла собой прямоугольный резонатор, выполненный на основе волновода, встроенного в подложку, интегрированного с четырьмя антеннами-генераторами. В качестве активного элемента использовался полевой транзистор NE350184C с коэффициентом усиления 13,5 дБ на частоте 20 ГГц. Вывод энергии из резонатора осуществлялся через волновод, встроенный в подложку, размеры которого выбирались в соответствии с расчетной частотой генерации антенны-генератора. Для измерения параметров генерируемого сигнала конец волновода был сделан в форме клина и вводился в полый металлический волновод. Основная частота генерации всех антенн-генераторов составила ~12 ГГц. В результате эксперимента получено, что имеет место взаимная синхронизация всех четырех генераторов, несмотря на относительно

большую разницу их собственных частот; суммарная мощность при этом более чем вдвое превысила сумму мощностей отдельных антенн в данном резонаторе и составила порядка 1,5 мВт.

**Ключевые слова:** СВЧ, автогенератор, интегрированный в подложку волновод, логопериодическая антенна, полевой транзистор.

**Abstract.** Microwave oscillator, based on the one-dimensional microstrip log-periodic antenna array, integrated with field-effect transistors and substrate integrated waveguide (SIW), is proposed and studied. The waveguide consists of the dielectric substrate bounded with two parallel metal plates and two rows of interlayer metalized cylindrical holes. Substrate integrated waveguide technology has some advantages, such as low loss, high Q-factor of cavities, good shielding properties, and the ability to integrate all components on the same substrate. The oscillator is based on the rectangular substrate integrated cavity. The cavity was excited by four active antenna-oscillators. Field effect transistor NE350184C with  $G_a = 13.5$  dB at 20 GHz was used as an active device. The substrate integrated waveguide with sizes corresponding to the estimated frequency was used to transmit the energy from the cavity. The end of the waveguide had a wedge form and was inserted into the hollow metal waveguide. The fundamental frequency of generation was  $\sim 12$  GHz. Mutual synchronization of all four antenna-oscillators was obtained despite the difference of the fundamental frequencies. Measured total output power was 1.5 mW, that exceeded the summarized power of the single antenna-oscillators.

**Key words:** microwaves, oscillator, substrate integrated waveguide, log-periodic antenna, field-effect transistor.

## Введение

Активные микрополосковые антенны-генераторы (АГ) являются перспективным направлением развития маломощных источников микроволнового излучения. Основными преимуществами таких излучателей являются их компактность, отсутствие потерь в промежуточных фидерах и

возможность объединения в многоэлементные матрицы с целью суммирования мощностей и создания активных фазированных антенных решеток.

В работах [1-3] показана возможность эффективной генерации волн СВЧ-диапазона и излучения их в свободное пространство с помощью АГ, которые могут представлять собой как отдельные микрополосковые антенны, так и матричную структуру. Существует ряд практических приложений, где может быть полезна конструкция АГ, с выводом мощности не в открытое пространство, а в волновод через диэлектрическую подложку. В последнее время большое внимание привлекает волновод, встроенный в диэлектрическую подложку - Substrate Integrated Waveguide (SIW), представляющий собой линию передачи, образованную двумя параллельными металлическими слоями, нанесенными на диэлектрическую подложку и соединенными двумя рядами металлизированных отверстий [4,5].

В настоящей работе показана возможность сложения мощностей в линейной матрице микрополосковых антенн-генераторов, интегрированных с SIW-резонатором и обеспечивающей вывод излучения в волновод. Достоинство данной технологии – возможность интегрировать все компоненты на одной диэлектрической подложке, что особенно важно при работе в миллиметровом диапазоне волн.

### **Конструкция**

Антенна-генератор представляет собой микрополосковую антенну логопериодического типа, интегрированную с полевым транзистором [2]. Линейка АГ размещается в резонаторе, который представляет собой отрезок SIW волновода, образованного двумя параллельными металлическими слоями, нанесенными на диэлектрическую подложку и соединенными двумя рядами металлизированных отверстий (Рис. 1). Основой конструкции являются две металлизированных пластины диэлектрика, на одной из которых размещены АГ (корпус), а вторая (крышка) служит для образования замкнутого SIW волновода, который таким образом представляет собой прямоугольный резонатор.

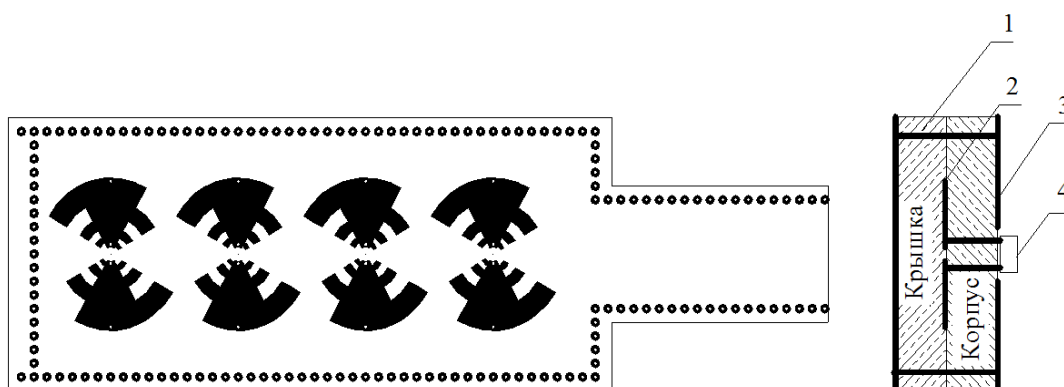


Рис. 1. Конструкция генератора СВЧ излучения на основе SIW –волновода и линейной матрицы микрополосковых антенн, интегрированных с полевым транзистором: а) – вид резонансной камеры со снятой крышкой; б) – камера в разрезе: 1- металлизированные отверстия; 2 – антенна; 3 – металлизация диэлектрика; 4 – транзистор.

Антенны при этом оказываются внутри резонатора и питание транзистора подается через металлизированные отверстия в диэлектрике. Резонатор непосредственно связан с другим SIW волноводом, размеры которого выбирались в соответствии с расчетной частотой генерации АГ.

При измерении параметров генерируемого сигнала SIW волновод, имеющий на конце форму клина, водится в полый металлический волновод. К выходу волновода присоединяются термисторная головка измерителя мощности и через направленный ответвитель - датчик анализатора спектра. Расчетная основная частота генерации АГ составляет 13 ГГц. Расчет спектра собственных частот резонатора показывает наличие резонансных частот высших мод вблизи 6,10,13, 16 и 19 ГГц.

## Результаты эксперимента

### 1. Генерация одиночной АГ в составе матрицы

Спектр генерации одиночной АГ, из числа находящихся в резонаторе, представлен на рис. 2.

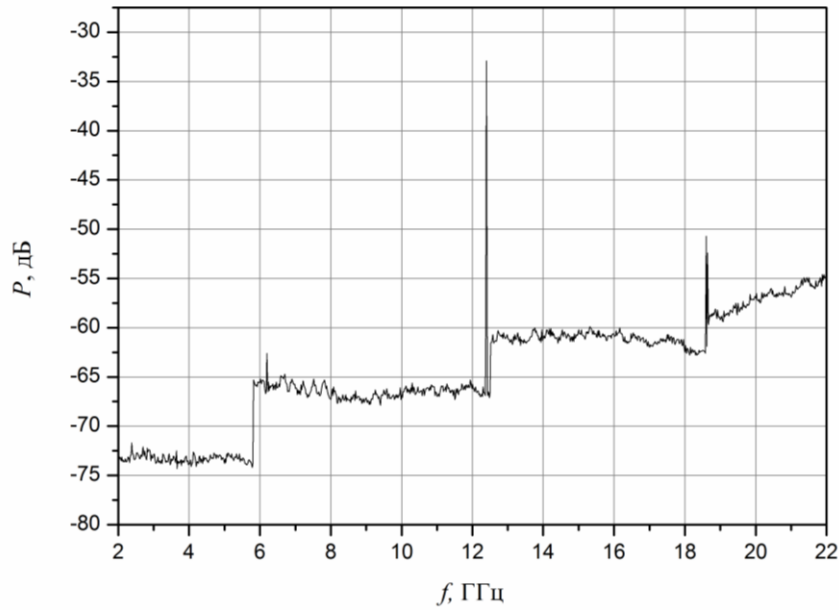


Рис. 2. Спектр излучения одиночной АГ в матрице, помещенной в резонатор.

Наблюдаются три частоты излучения - около 6 ГГц, 12 ГГц и 18 ГГц. Основная мощность генерируется на частоте 12,4 ГГц, что близко к частоте излучения АГ в свободное пространство (Рис. 3) Наличие частот 6,2 ГГц и 18,6 ГГц обусловлено, видимо, возбуждением собственных мод резонатора.

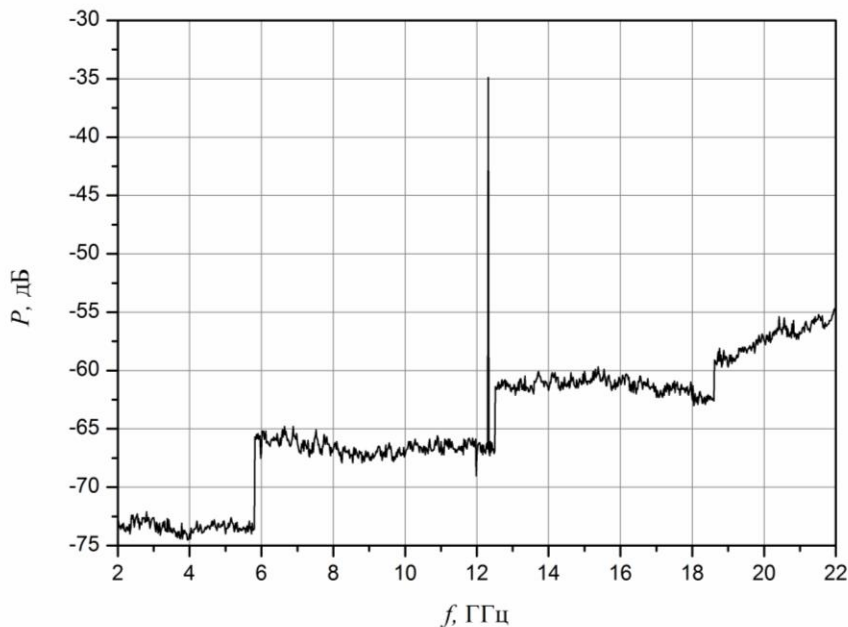


Рис. 3. Спектр излучения одиночной АГ при снятой крышке резонатора

Измерения спектров одиночных АГ показало, что их собственные частоты существенно отличаются. Так же отличаются и их мощности, измеряемые на

выходе SIW волновода (таблица 1).

Таблица 1.

Номер АГ	Частота, ГГц	Мощность, мкВт
1	12,0	180
2	11,52	70
3	12,08	440
4	12,04	160

Обращает на себя внимание различие уровня выходной мощности для различных антенн, хотя во всех случаях параметры и режимы работы транзисторов близки. Это связано с формой стоячей волны, которая образуется при возбуждении колебаний различными АГ. Так как установлено, что частота определяется в основном резонансными свойствами антенны, а уровень мощности излучения вблизи собственных частот резонатора незначителен, распределение поля внутри резонатора определяется геометрическим расположением АГ.

## 2. Сложение мощностей

Проведенные ранее исследования сложения мощностей в пространстве такой же линейки из четырех АГ показали [6], что необходимым условием для синфазного сложения мощностей является различие собственных частот генераторов, не превышающее 50 МГц. В случае работы в резонаторе разброс частот может быть значительно больше (Таблица 1). Данные измерения выходной мощности при одновременной работе нескольких АГ приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Работающие АГ	Частота, ГГц	Мощность, мкВт
1 + 2	Не синхронизируются	320
1 + 2 + 3	12,32	320
1 + 2 + 3 + 4	12,34	1500

Сложение мощностей двух антенн А1 и А2, частота которых отличаются более чем на 500 МГц приводит к возникновению асинхронного спектра (рис. 4).

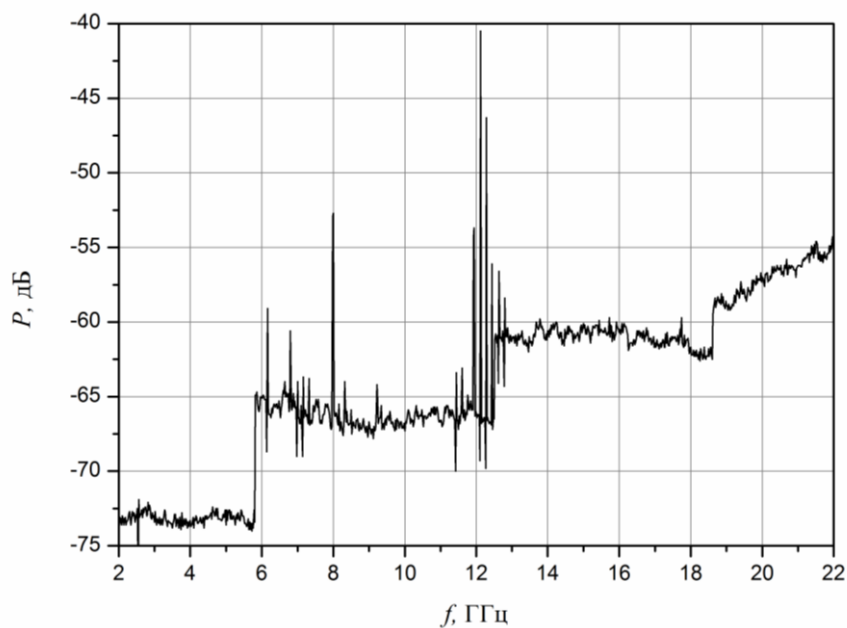


Рис. 4. Спектр излучения одновременно работающих антенн-генераторов А1 и А2

Однако подключение третьей антенны А3 снова дает синхронный спектр (рис. 5).

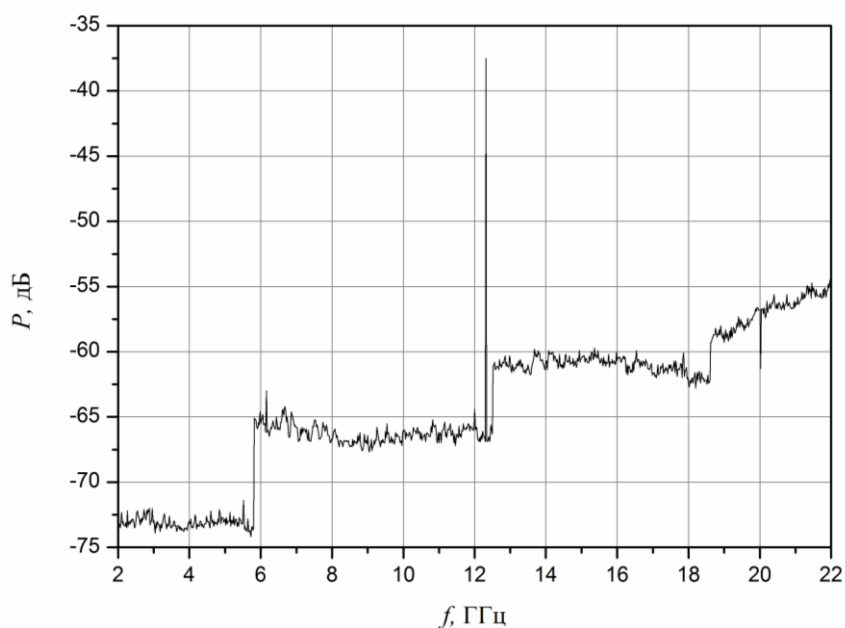


Рис. 5. Спектр излучения трёх одновременно работающих антенн-генераторов А1, А2 и А3

Так же синхронный спектр имеет место и при включении всех четырех антенн (рис. 6).

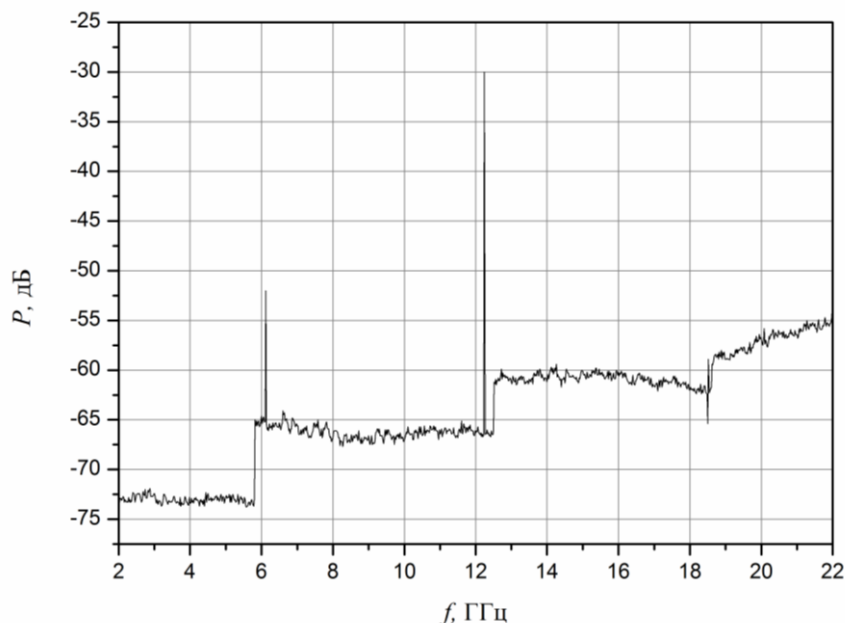


Рис. 6. Спектр излучения одновременно работающих антенн-генераторов А1, А2, А3 и А4

Суммарная мощность при этом составляет до 2 мВт.

Таким образом, при соединении четырех антенн в линейную матрицу, помещенную в SIW резонатор, имеет место их взаимная синхронизация, несмотря на большую разницу собственных частот отдельных антенн-генераторов, а суммарная мощность более чем вдвое превышает сумму мощностей отдельных антенн.

### Результаты эксперимента

Матрица микрополосковых антенн-генераторов на полевых транзисторах, интегрированная с волноводом и резонатором, встроенными в диэлектрическую подложку позволяет обеспечить сложение мощностей излучающих элементов. При этом наличие резонатора усиливает взаимное влияние АГ в многоэлементной решетке, увеличивая при этом эффективность взаимной синхронизации источников излучения, и обеспечивает сложение мощностей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-07-00094-а.



## Литература

- [1] Murata M. et al. Active radiating butterfly antenna //Antennas and Propagation Society International Symposium, 1997. IEEE., 1997 Digest. – IEEE, 1997. – Vol. 4. – P. 2464-2467.
- [2] Любченко В. Е. и др. Генерация СВЧ колебаний в логопериодической антенне, интегрированной с полевым транзистором //Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53. – №. 11. – С. 1417-1419.
- [3] Калинин В. И. и др. Сложение мощностей и синхронизация излучения активных антенн на полевых транзисторах в СВЧ диапазоне //Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55. – №. 8. – С. 1-4.
- [4] Bozzi M., Georgiadis A., Wu K. Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas //IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2011. – Vol. 5. – №. 8. – P. 909-920.
- [5] Любченко В. Е. и др. Логопериодическая активная антенна, интегрированная с волноводом на диэлектрической подложке. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/5/text.pdf>
- [6] Lyubchenko V. et al. Active integrated antennas and arrays with field-effect transistors //Information and Telecommunication Sciences. – 2012. – Т. 3. – №. 1. – С. 55 – 60
- [7] Любченко В. Е. и др. Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в условиях синхронизации внешним сигналом //Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58. – №. 10. – С. 1044-1047.

**Ссылка на статью:**

В.Е. Любченко, В.И. Калинин, В.Д. Котов, Д.Е. Радченко, С.А.Телегин, Е.О. Юневич. Суммирование мощностей микрополосковых антенн-генераторов в резонаторе, встроенном в диэлектрическую подложку. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr17/4/text.pdf>