

УДК 621.382.32, 621.373

**ГЕНЕРАЦИЯ И ФИЛЬТРАЦИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В СХЕМЕ
МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ-ГЕНЕРАТОРА,
ИНТЕГРИРОВАННОЙ С ВОЛНОВОДОМ, ВСТРОЕННЫМ 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**

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2016 г.

Аннотация. Экспериментально исследована конструкция генератора микроволнового излучения на основе микрополосковой антенны логопериодического типа, интегрированной с полевым транзистором, и волновода, встроенного в диэлектрическую подложку. Волновод состоял из двух диэлектрических пластин, покрытых с одной стороны тонкой металлической пленкой. Другая сторона одной из пластин служила подложкой для антенно-связанного полевого транзистора. Таким образом микрополосковая антенна-генератор была размещена внутри волновода. Геометрия волновода обеспечивает возможность распространения и выхода излучения, как на основной частоте логопериодической антенны, так и на ее второй гармонике. Для повышения эффективности генерации один конец волновода замыкался накоротко, а другой сужался до размера, запредельного для основной частоты, поэтому антенна-генератор оказывается внутри прямоугольного резонатора. Методом конечных разностей во временной области проведено компьютерное моделирование конструкции генератора в частотном диапазоне вблизи первой и второй гармоники. Определены S-параметры в диапазоне 10,5-12,5 ГГц, что позволило подтвердить хорошее согласование и уровень обратной связи в генераторе. Расчеты показали также, что при использовании запредельного волновода по основной гармонике, энергия излучения сконцентрирована внутри резонатора, а излучение на второй гармонике выходит через суженную часть волновода. В качестве диэлектрика для изготовления волновода

использовался Arlon AD255, а транзистор NE350184C с коэффициентом усиления 13,5 дБ на частоте 20 ГГц служил активным элементом антенны-генератора. Экспериментально полученная мощность на выходе составила 1 мВт на частоте основной гармоники (12 ГГц) и 100 мкВт на частоте второй гармоники.

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

Abstract: Microwave oscillator, based on the microstrip log-periodic antenna integrated with field-effect transistor and substrate integrated waveguide (SIW) is experimentally studied. SIW consisted of two dielectric plates with one side being covered by thin metal film. Another side of one of these dielectric plates was used as a substrate for the antenna-coupled field-effect transistor. Thus the microstrip antenna-oscillator was inserted into the SIW. SIW geometry provides microwave propagation and output both at the fundamental frequency of the log-periodic antenna and at the second harmonic. For more generation efficiency one end of the SIW was shorted and another one was narrowed, so the microstrip antenna-oscillator turned to be inside the rectangular microwave resonator. Computer modeling of the oscillator construction at the fundamental frequency and second harmonic was performed via FDTD method. S-parameters were evaluated in the frequency range 10.5-12.5 GHz, that confirmed a good matching and feedback in the oscillator. The simulation showed also, that the microwave energy at the fundamental frequency is concentrated inside the resonator and the second harmonic radiation propagates outside through the narrow part of the SIW if the evanescent waveguide is used. In the experiments Arlon AD255 was used as a dielectric for SIW fabrication and NE350184C field-effect transistor with 13,5 dB gain at 20 GHz was integrated with log-periodic antenna. Experimentally obtained output power was 1mW at the fundamental frequency (12 GHz) and 100 uW at the second harmonic.

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

Введение

Интегрированные в подложку волноводы (Substrate Integrated Waveguide – SIW), обладая свойствами, как полых волноводов, так и микрополосковых линии, позволяют создавать автогенераторы СВЧ и КВЧ диапазона [1 - 4]. В настоящей работе показана возможность создания СВЧ генератора на основе SIW-волновода и интегрированной с полевым транзистором микрополосковой логопериодической антенны.

Конструкция генератора

Конструкция генератора состоит из SIW резонатора, образованного двумя металлизированными с одной стороны диэлектрическими пластинами, соединенными между собой металлизированными отверстиями (рис. 1). На поверхности одной из пластин размещена микрополосковая антенна-генератор (АГ) – интегрированная с полевым транзистором зубчатая логопериодическая антенна. Положительная обратная связь образуется за счет индуцированного излучения на лепестке антенны, соединенном с затвором транзистора.

Собственные частоты закрытого SIW-резонатора определяются по формуле [5]:

$$f_{mnk} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{w_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{k\pi}{l_{eff}}\right)^2}, \quad (1)$$

где $l_{eff} = l - 1.08\frac{d^2}{p} + 0.1\frac{d^2}{l}$ – эффективная длина резонатора,

$w_{eff} = w - 1.08\frac{d^2}{p} + 0.1\frac{d^2}{w}$ – эффективная ширина резонатора, p – шаг отверстий, d

– их диаметр, h – толщина подложки, w – ширина волновода, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Резонансные длины волн логопериодической антенны расположенной на диэлектрической подложке можно найти исходя из геометрии антенны: длина зубца приблизительно равна четверти эффективной длины волны

$$l_n = \frac{\lambda_{eff}^n}{4}, \quad (2)$$

где $\lambda_{eff}^n = \frac{\lambda_n}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$ – эффективная длина волны;

$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость.

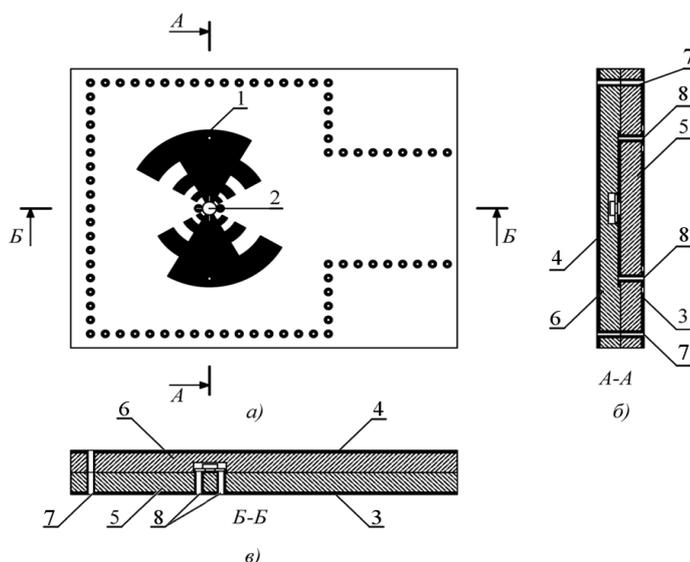


Рис.1. Конструкция СВЧ генератора на основе волновода интегрированного в подложку [4]. 1 - логопериодическая антенна; 2 - транзистор; 3,4 - внешняя металлизация; 5, 6 – диэлектрические пластины; 7,8 – металлизированные отверстия.

Для детального исследования конструкции было проведено электромагнитное моделирование конструкции автогенератора на расчетную частоту около 12 ГГц методом конечных разностей во временной области (FDTD) [6, 7]. В результате моделирования были получены S-параметры (рис. 3), из которых видно, что конструкция имеет хорошее согласование в широком диапазоне частот (от 10,5 до 12,5 ГГц). В этом же диапазоне коэффициент положительной обратной связи, определяемый коэффициентом передачи S_{21} , близок к единице. Это говорит о том, что значительная часть генерируемой энергии попадет на затвор полевого транзистора и при достаточном коэффициенте усиления транзистора на этих частотах возможно возникновение генерации СВЧ излучения.

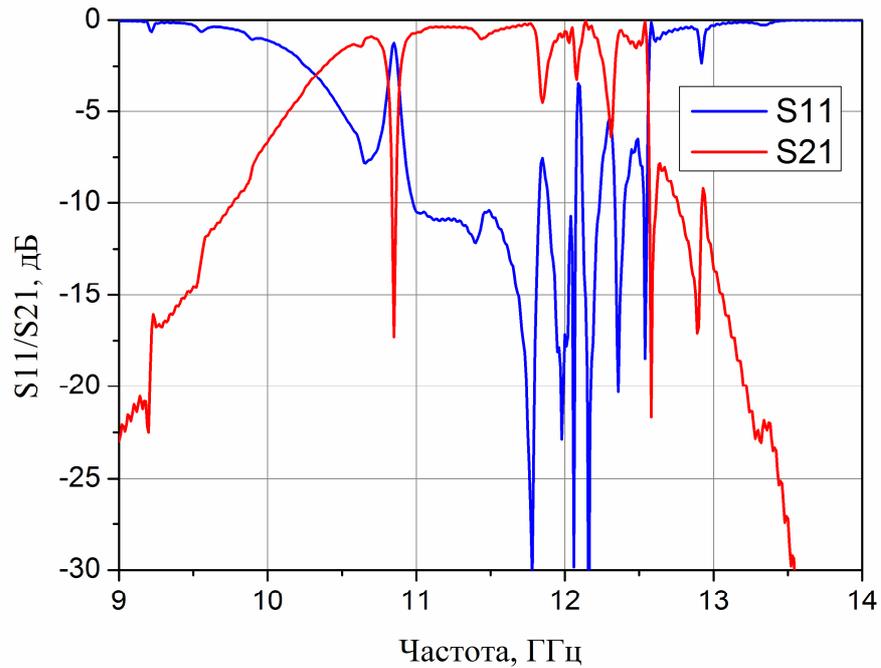


Рис.3. Коэффициент отражения и обратной связи.

Возникающее при этом распределение энергии в плоскости антенны на частоте 12 ГГц показано на рис. 4. Исходя из расчета видно, что значительная часть энергии распространяется в волноводе встроенном в подложку.

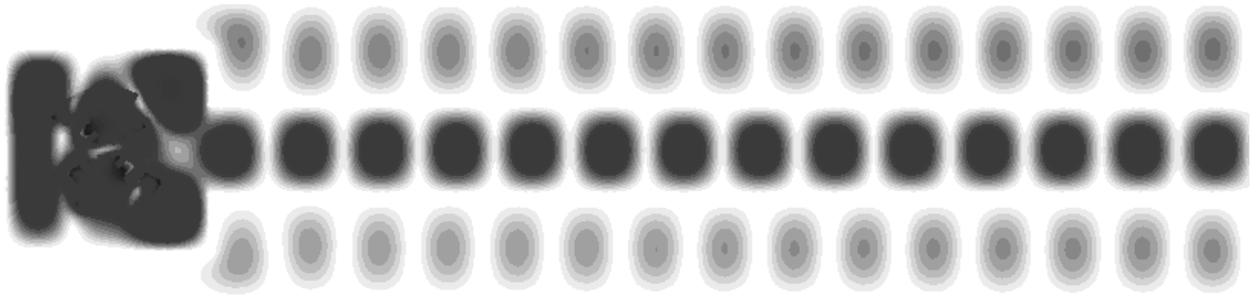


Рис.4. Распределение энергии в плоскости антенны.

Исследуемая конструкция позволяет за счет небольших изменений геометрии волновода выделить вторую гармонику. SIW-волновод можно спроектировать так, что для первой гармоники он является запертым, вторая же гармоника беспрепятственно в нем распространяется. Расчет матрицы рассеяния показывает наличие областей частот лежащих в диапазоне частот второй гармоники с малым коэффициентом отражения S_{11} и высоким значением коэффициента передачи S_{21} (рис. 4).

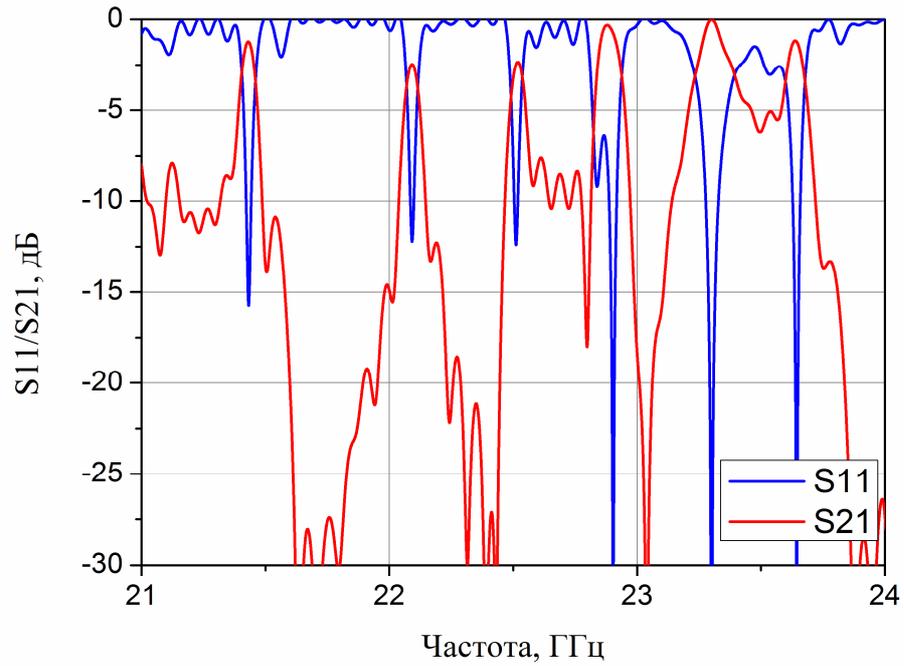


Рис.4. Коэффициент отражения и обратной связи для генератора на вторую гармонику.

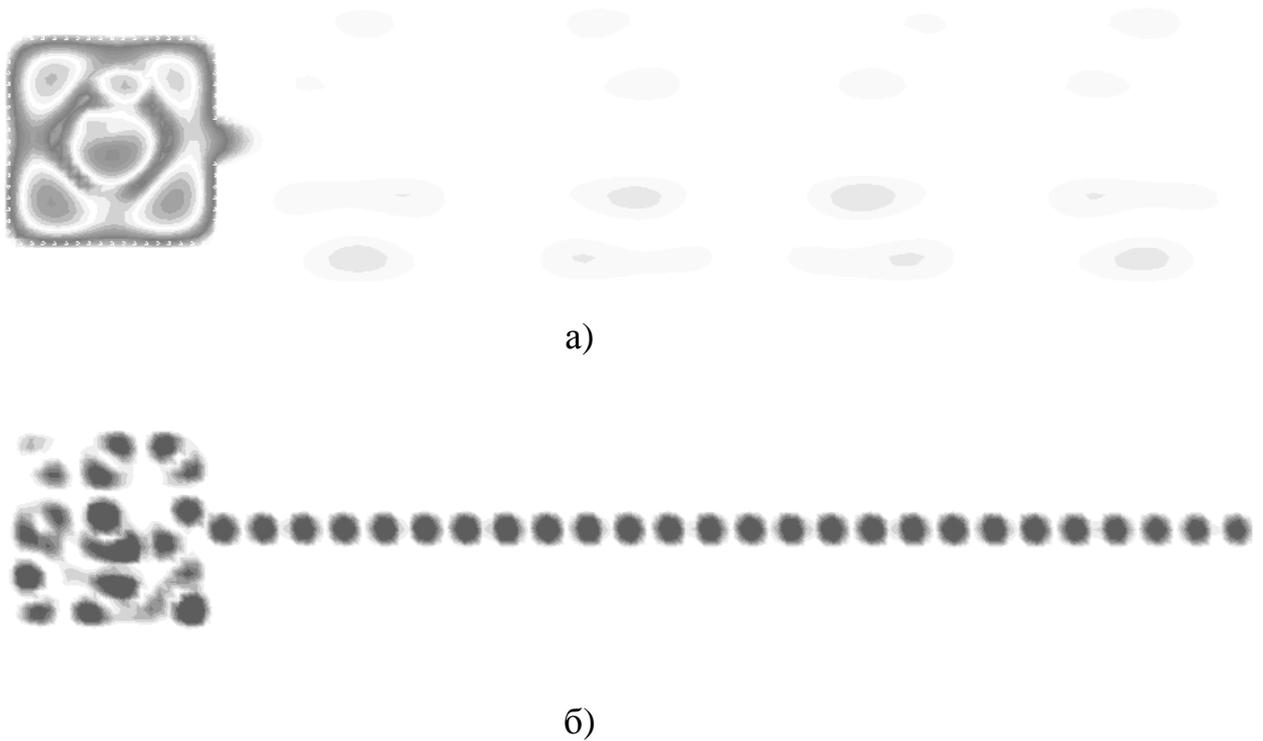


Рис. 5. Распределение энергии в плоскости антенны для конструкции, рассчитанной на вывод энергии второй гармоники. а) на частоте первой гармоники, б) на частоте второй гармоники

При этом расчет распределения энергии в плоскости антенны на частоте первой гармоники (рис. 5 а) показывает, что в отличие от энергии второй гармоники (рис. 5 б), которая распространяется в направлении волновода, вся энергия сосредоточена в объеме резонатора и практически сразу затухает в волноводе встроенном в подложку.

Результаты эксперимента

Для апробации идеи было создано два макета SIW-генераторов рассчитанных на частоту около 12 ГГц по первой гармонике. Материалом диэлектрической подложки служил Arlon AD255 толщиной 2 мм (общая толщина двух пластин 4 мм). В качестве активного элемента использовался полевой транзистор NE350184с с коэффициентом усиления 13,5дБ на частоте 20ГГц. Измерение мощности производилась с помощью ваттметра МЗ-22А.

На конце SIW-волноводов был сделан скос, что позволяло совмещать их с полым металлическим волноводным трактом. В результате эксперимента максимальная измеренная мощность (за счет изменения напряжений питания транзистора) на выходе из волновода конструкции, рассчитанной на первую гармонику, составила порядка 1 мВт. При этом, как и ожидалось, конструкция, рассчитанная на вторую гармонику, эффективно отсекала первую гармонику и на выходе волновода мощность второй гармоники составила порядка 100мкВт. Для сравнения, полная мощность, генерируемая АГ в открытое пространство (т.е. вне закрытого резонатора) составила 5 мВт. Оценка мощности производилась через формулу Фрииса [8] по значению мощности в пике и ширине диаграмм направленности в двух плоскостях.

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

Литература

- [1] Донец И. В. Электродинамический анализ интегрированного в подложку волновода //Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13. – №. 5.

- [2] Cassivi Y., Wu K. Low cost microwave oscillator using substrate integrated waveguide cavity //Microwave and Wireless Components Letters, IEEE. – 2003. – Vol. 13. – №. 2. – P. 48-50.
- [3] Zhong C. et al. Ka-Band Substrate Integrated Waveguide Gunn Oscillator //Microwave and Wireless Components Letters, IEEE. – 2008. – Vol. 18. – №. 7. – P. 461-463.
- [4] Любченко В.Е., Радченко Д.Е., Телегин С.А., Юневич Е.О. Микрополосковая антенна-генератор. Патент на полезную модель №156623 с приоритетом от 23 июня 2015г. Зарегистрирован в Госреестре полезных моделей РФ 16.10.2015г.
- [5] Ahmad B. H., Sabri S. S., Othman A. R. Design of a compact X-Band substrate integrated waveguide directional coupler //International Journal of Engineering and Technology (IJET). – 2013. – Vol. 5. – №. 2. – P. 1905-1911.
- [6] Жердев Д. А., Фурсов В. А. Высокопроизводительное моделирование распространения электромагнитного поля с использованием технологии CUDA //Сборник трудов международной научной конференции Параллельные вычислительные технологии. – 2013. – С. 338-345.
- [7] Jin J. M. The finite element method in electromagnetics. – John Wiley & Sons, 2014. 753 с.
- [8] Shaw J. A. Radiometry and the Friis transmission equation //American Journal of Physics. – 2013. – Vol. 81. – №. 1. – P. 33-37.