

УДК 621.382, 621.373

## РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ-ГЕНЕРАТОРА, ИНТЕГРИРОВАННОЙ С ВОЛНОВОДОМ, ВСТРОЕННЫМ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПОДЛОЖКУ

С. А. Телегин, В. Е. Любченко, Д. Е. Радченко, Е. О. Юневич

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 17 октября 2018 г.

**Аннотация.** Рассматривается конструкция генератора микроволнового излучения на основе микрополосковой антенны логопериодического типа, интегрированной с полевым транзистором, и волновода, встроенного в диэлектрическую подложку. Проведено электромагнитное моделирование автогенератора на расчетную частоту около 12 ГГц методом конечных разностей во временной области (FDTD). Определены S-параметры в диапазоне 11-13 ГГц для различных размеров резонатора, а также рассчитаны моды резонатора в данной полосе частот. Расчеты показали, что при совпадении одной из низших мод резонатора с собственной частотой антенны на данной частоте происходит рассогласование транзистора с антенной, а также уменьшается коэффициент обратной связи, что делает невозможным генерацию. В то же время для второй гармоники, когда низшие моды резонаторы не могут быть возбуждены, изменение расположения антенны позволяет согласовать генератор с волноводом и обеспечить эффективный вывод излучения через суженную часть волновода.

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

**Abstract.** Microwave oscillator design based on the log-periodic microstrip antenna integrated with a field-effect transistor and a waveguide embedded in a dielectric substrate is considered. Computer simulation was performed using the finite difference method in the time domain. S-parameters were determined in the 11-13 GHz frequency range for different sizes of the resonator, and resonator modes in this

frequency range were also calculated. Simulation results have demonstrated that in the case when one of the lower resonator modes coincides with the eigen frequency of the antenna, in this frequency range the transistor is unbalanced with the antenna, and the oscillator feedback decreases, that makes oscillations to be impossible. At the same time, for the second harmonic, when the lowest resonator modes cannot be excited, changing the antenna position in resonator allows the oscillator to be balanced with the waveguide and provides efficient radiation output through the narrowed part of the waveguide.

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

## **Введение**

Конструкция микрополосковой антенны-генератора (АГ), объединенной с встроенным в диэлектрическую подложку волноводом (SIW), позволяет осуществлять генерацию СВЧ излучения в заданной полосе частот и выводить излучение в диэлектрическую подложку [1]. Как показали измерения [2], использование SIW также позволяет выделить вторую гармонику АГ. В настоящей работе проведено компьютерное моделирование и определено влияние собственных частот SIW-резонатора на генерацию излучения, а также установлены условия, позволяющие повысить эффективность генерации и вывода излучения в волновод.

## **Конструкция генератора**

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

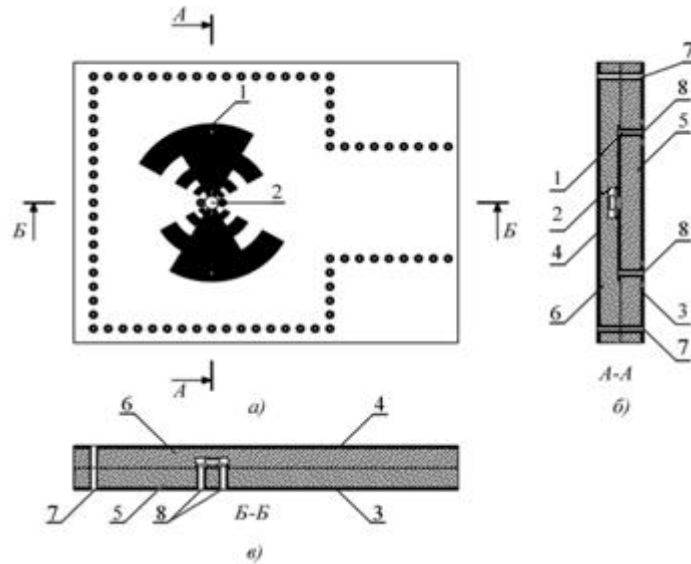


Рис.1. Конструкция СВЧ генератора на основе волновода интегрированного в подложку [3]: а) – схема размещения АГ в SIW резонаторе; б) – разрез по А-А; в) – разрез по Б-Б. Цифрами обозначены: 1 - логопериодическая антенна; 2 - транзистор; 3,4 - внешняя металлизация; 5, 6 – диэлектрические пластины; 7,8 – металлизированные отверстия.

Собственные частоты SIW-резонатора определяются по формуле [4]:

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

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,  $\epsilon_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Резонансные длины волн логопериодической антенны расположенной на диэлектрической подложке можно найти исходя из геометрии антенны: длина  $n$ -го 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.

## Результаты

Для детального исследования конструкции было проведено электромагнитное моделирование автогенератора на расчетную частоту около 12 ГГц методом конечных разностей во временной области (FDTD) [5,6]. Вместо транзистора использовались 2 порта, имитирующие соединения сток-исток (1-й порт) и затвор-исток (2-й порт). Источник колебаний подключался к 1-му порту. Для оценки эффективности вывода излучения на конце волновода был также размещен 3-й порт. В результате были получены S-параметры (рис. 2), из которых видно, что конструкция имеет хорошее согласование (определяется параметром S11) в широком диапазоне частот (от 11 до 12,5 ГГц). В этом же диапазоне коэффициент положительной обратной связи, определяемый коэффициентом передачи S21, 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.

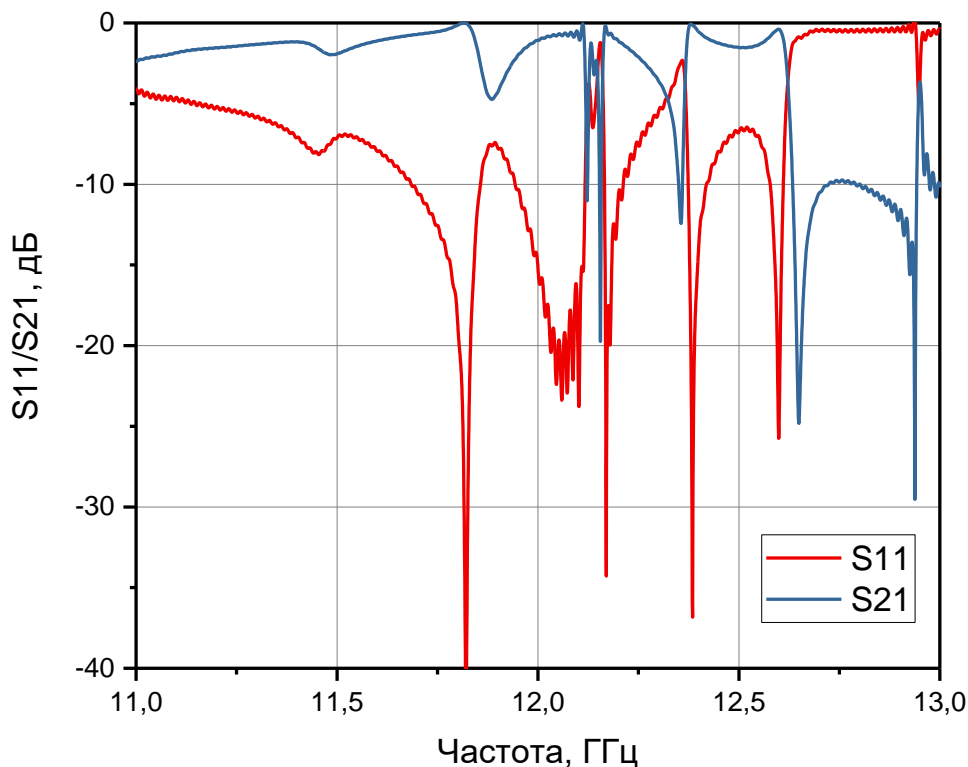


Рис.2. Коэффициент отражения и обратной связи.

Расчет собственных частот резонатора в диапазоне 11-13ГГц дает следующие значения мод: 11,07 ГГц, 11,13 ГГц, 12,67 ГГц, 12,68ГГц.

Как видно из полученных результатов, данные частоты не совпадают со значениями, на которых параметр S21 минимален, т е в данном случае должна наблюдаться генерация на частоте, задаваемой антенной.

Для изучения случая совпадения собственных частот резонатора и антенны был выбран размер резонатора так, чтобы одна из мод с точностью 0,01 ГГц совпадала с основной собственной частотой генерации антенны. Результаты расчета S-параметров приведены на рис. 3.

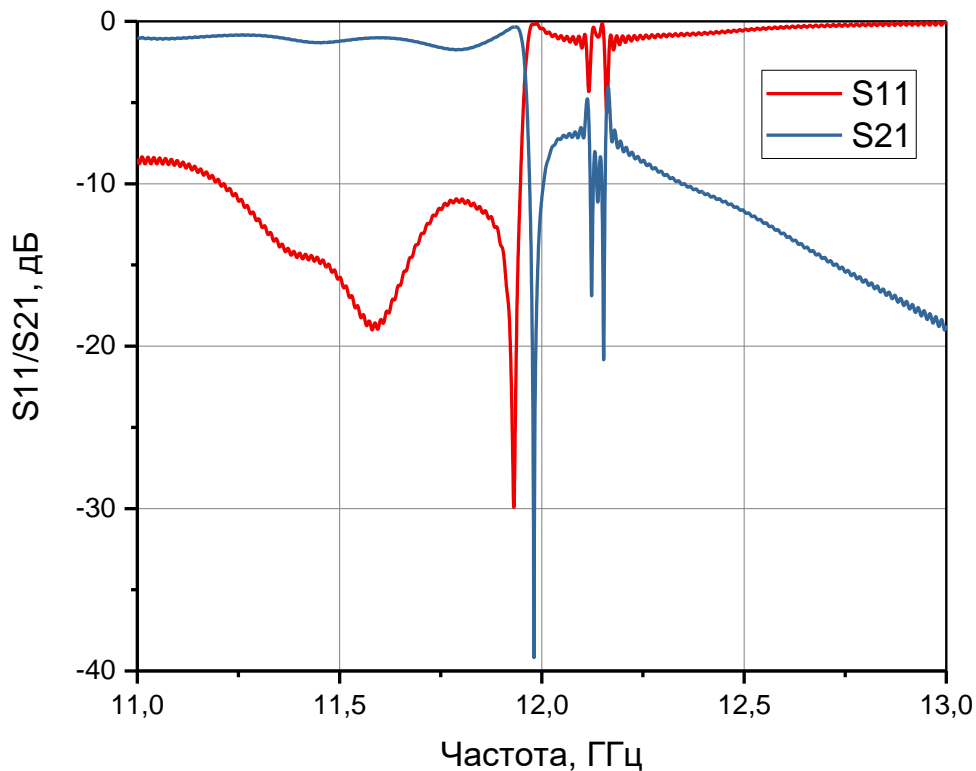


Рис.3. Коэффициент отражения и обратной связи при совпадении собственных частот резонатора и антенны.

В данном случае коэффициент отражения S11 значительно увеличился в исследуемом диапазоне, начиная с собственной частоты резонатора (в данном случае - 11,96 ГГц), а коэффициент обратной связи S21 наоборот уменьшился, вследствие чего осуществление генерации в данной полосе частот (11,96 – 12,5

ГГц) становится невозможным. На рис. 4 представлено распределение поля на исследуемой моде резонатора.

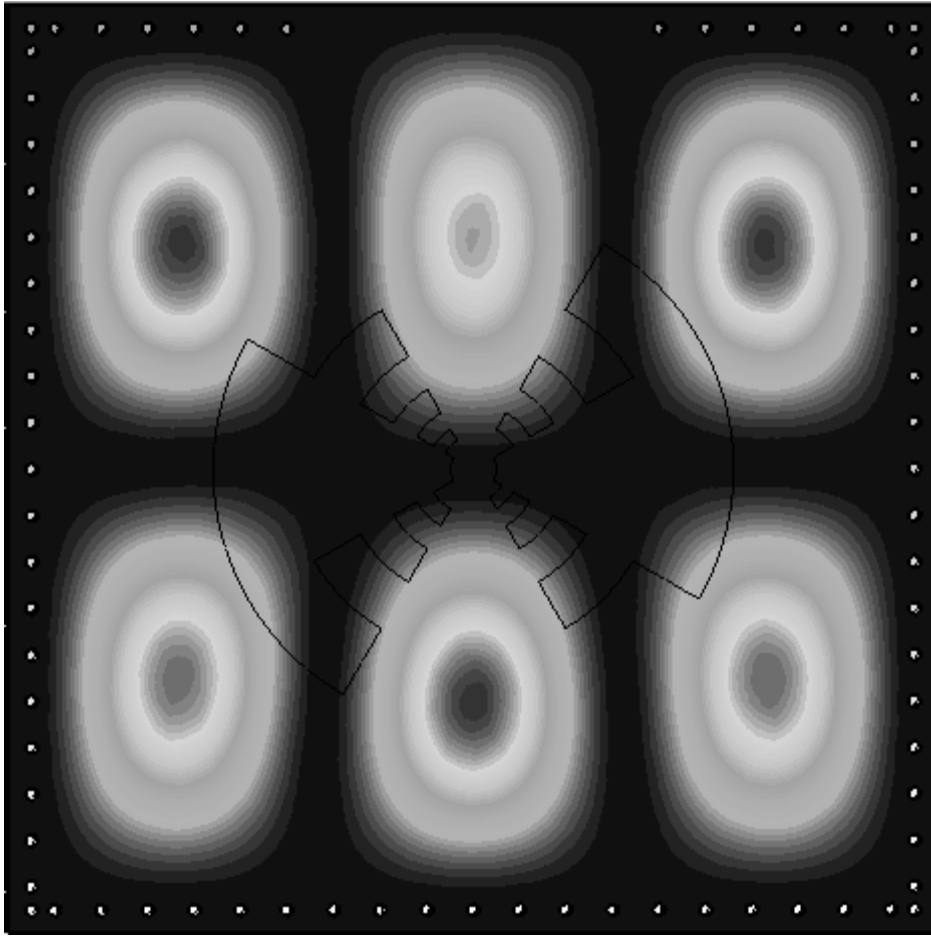


Рис.4. Распределение электрической энергии на собственной частоте резонатора.

В случае АГ, расположенной в резонаторе, необходимо обеспечивать не только хорошую связь генератора с резонатором на необходимой моде, но и требуемый коэффициент обратной связи на противоположном лепестке антенны. В данном случае оба лепестка, на которых осуществляется генерация свободной антенной, находятся не в максимумах распределения энергии моды резонатора, а требуемое условие в общем случае не может быть обеспечено на произвольной частоте для низких мод резонатора (размер резонатора не может быть меньше размера самой логопериодической антенны). Таким образом, при проектировании антенн-генераторов, интегрированных с волноводом на диэлектрической подложке, желательно увеличивать размер резонатора, чтобы

низшие моды, обладающие высокой добротностью, не попадали в расчетную область частот АГ.

В то же время, изменяя конфигурацию поля внутри волновода на расчетной частоте антенны, возможно повысить связанность антенны с волноводом, что особенно актуально для второй гармоники, где генерируемая мощность достаточно низкая. В исследованном нами примере ось антенны располагалась перпендикулярно направлению волновода. Распределение электрической энергии 2-й гармоники в запредельный для 1-й гармоники волновод представлено на рис. 5а.

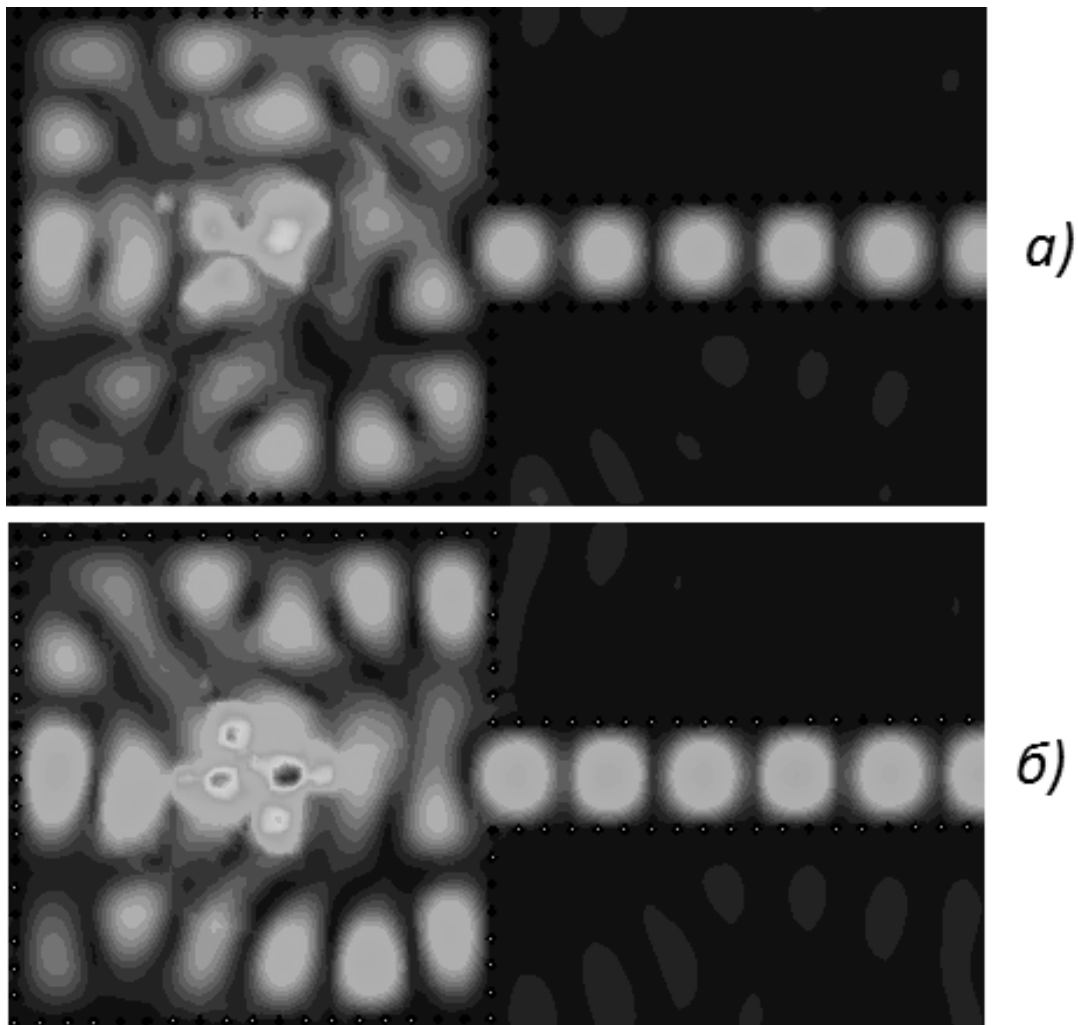


Рис.5. Распределение электрической энергии на частоте 2-й гармоники.  
а). Ось антенны перпендикулярна направлению волновода (см. рис. 1);  
б). Поворот оси на  $30^\circ$ .

В результате расчета коэффициента передачи на выход волновода ( $S_{31}$ ) было получено, что он достигает наибольшего значения при повороте антенны на 30 градусов относительно начального положения. Для этого случая распределение электрической энергии приобретает вид, изображенный на рис. 5б. При этом значение  $S_{31}$  увеличивается с 0,44 до 0,83, что демонстрирует возможность улучшения согласования с волноводом.

## Выводы

Результаты проведенного в работе моделирования показывают, что использование SIW резонатора в конструкции АГ с микрополосковой логопериодической антенной наиболее целесообразно для генерации на второй гармонике, когда влияние низших мод резонатора минимально. При этом возможно расположить антенну таким образом, чтобы обеспечить согласование с волноводом и эффективный вывод излучения.

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

## Литература

1. Любченко В. Е., Калинин В. И., Котов В. Д., Любченко Д. В., Радченко Д. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О. Микрополосковые антенны-генераторы, интегрированные с волноводом, встроенным в подложку. Радиотехника и электроника, 2018, т. 63, № 9, с. 998-1002.
2. Любченко В. Е., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С. А., Юневич Е. О., Генерация и фильтрация СВЧ излучения в схеме микрополосковой антенны-генератора, интегрированной с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2016, № 10, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/12/text.html>.
3. 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.

4. 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. Т. 5. №. 2. С. 1905-1911.
5. 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.
6. Jin J. M. The finite element method in electromagnetics. John Wiley & Sons, 2014. 753 с.

**Для цитирования:**

С. А. Телегин, В. Е. Любченко, Д. Е. Радченко, Е. О. Юневич. Резонансные свойства микрополосковой антенны-генератора, интегрированной с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/15/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.11.15