

Твердотельный СВЧ генератор на основе волноводно-коаксиального резонатора

Ю. Г. Макеев, С. П. Мартынюк, А. П. Моторненко, И. Г. Скуратовский

*Институт радиофизики и электроники НАН Украины
Украина, 61085, г. Харьков, ул. Академика Проскуры, 12
briz@ire.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2003 г.

Описана конструкция твердотельного генератора СВЧ на основе волноводно-коаксиального резонатора. Исследованы основные характеристики такого генератора в режиме работы на магнитных типах колебаний в 3-см диапазоне длин волн с использованием промышленного диода Ганна. Проведено сравнение полученных характеристик с аналогичными зависимостями генератора на основе волноводно-диэлектрического резонатора.

Наводиться конструкція твердотільного генератора НВЧ на основі хвилеводно-коаксиального резонатора. Досліджені головні характеристики такого генератора в режимі роботи на магнітних типах коливань в 3-см діапазоні довжин хвиль з застосуванням промислового діода Ганна. Отримані характеристики порівнюються з аналогічними залежностями генератора на основі хвилеводно-діелектричного резонатора.

Введение

Известно, что основные параметры твердотельного СВЧ генератора определяются возможностями активного элемента и качеством резонатора [1].

В работах [2, 3] представлены результаты разработок новых активных элементов на основе модернизированной кремниевой технологии и реализации ряда технических проектов по созданию передающих модулей мм диапазона длин волн на арсенид-галлиевых структурах. Изготовление диодов Ганна по оригинальной технологии и использование их в двухконтурном резонаторе позволило реализовать эффективную работу широкополосного СВЧ генератора [4].

Полупроводниковые генераторы на основе квазиоптических резонансных структур [5] занимают достойное место в ряду активных приборов нового поколения. Авторам работы [6] удалось расширить

функциональные возможности твердотельного генератора благодаря использованию экранированного диэлектрического резонатора, работающего как на колебаниях типа шепчущей галереи, так и на лучевых колебаниях. Тем не менее актуальной задачей до настоящего времени является поиск новых схемных и конструктивных решений по применению высококачественных твердотельных элементов.

В работе [7] описан новый тип резонансной структуры: отрезки круглого запердельного волновода расположены по обе стороны отрезка коаксиальной линии. Такой резонатор назван авторами волноводно-коаксиальным резонатором (ВКР). Как и волноводно-диэлектрический резонатор (ВДР) на основе запердельного волновода, он имеет малые габариты и вес, обладает разреженным спектром собственных колебаний, а как коаксиальный резонатор обеспечивает широкий диапазон перестройки частоты. Отметим, что твердо-

тельные СВЧ генераторы на основе ВДР построены в см и мм диапазонах радиоволн [8, 9], а на основе коаксиального резонатора – в дм диапазоне.

В ВКР могут возбуждаться резонансные колебания на основной волне коаксиальной линии, а также на ее волноводных модах. В связи с этим, построение нового твердотельного генератора СВЧ на основе ВКР представляет определенный интерес. В работе [10] теоретически и экспериментально изучены резонансные свойства магнитных типов колебаний в ВКР.

Целью настоящей работы является создание макета твердотельного СВЧ генератора на основе ВКР в режиме генерации на магнитных типах колебаний с использованием диода Ганна и исследование его электрических характеристик, а также сравнение их с аналогичными зависимостями генератора на основе ВДР.

Конструкция СВЧ генератора и измерительная аппаратура

Схематически конструкция генератора приведена на рис. 1. Она включает волноводно-коаксиальный резонатор, состоящий из отрезков круглого запердельного волновода 1, 2 и отрезка коаксиальной линии (ОКЛ) 3, а также диод Ганна 4 и короткозамыкающий (КЗ) поршень 5 с узлом крепления 6 – диэлектрическая втулка

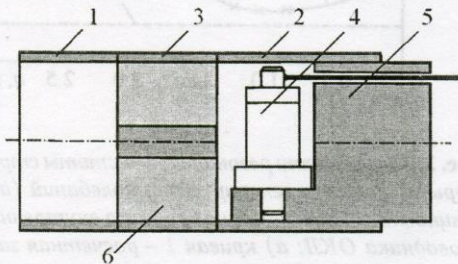


Рис. 1. Схематическое устройство генератора: 1 и 2 – отрезки круглого запердельного волновода; 3 – отрезок коаксиальной линии; 4 – диод Ганна; 5 – КЗ поршень с узлом крепления диода; 6 – диэлектрическая втулка

ния диода. Отрезки волновода, внутренний и внешний проводники ОКЛ и КЗ поршень изготовлены из латуни, а диэлектрическая втулка ОКЛ 6 – из фторопласта-4. Радиус запердельного волновода равен 6.5 мм; длина ОКЛ и узла крепления диода составляют 8.7 и 6.5 мм соответственно. Был изготовлен набор ОКЛ с разными радиусами внутреннего проводника: от 0.5 до 2.7 мм. Размеры ВКР и параметры диэлектрика выбраны из условия построения твердотельного генератора 3-см диапазона.

Использовался диод Ганна типа АА703А, который, согласно паспортным данным, может обеспечивать непрерывную мощность СВЧ колебаний не менее 10 мВт в диапазоне рабочих частот $8.24 \div 12.5$ ГГц.

Генерируемая мощность тестировалась измерителем мощности МЗ-22 с термисторной головкой М5-42, а частота – частотомером ЧЗ-46. Спектр выходного сигнала контролировался анализатором спектра С4-60. Измерения резонансной частоты ВКР проводились с помощью панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-61. Генератор подсоединялся к измерительному тракту посредством волноводно-коаксиального перехода и стандартного волновода сечением 23×10 мм.

Расчет резонансной структуры. Результаты экспериментальных исследований

В работе [10] изложены методика и результаты решения электродинамической задачи о спектре собственных колебаний магнитного типа в ВКР. Для основного колебания H_{111} уравнение, связывающее резонансную частоту с параметрами структуры (в случае удаления КЗ поршня на бесконечность), в одноволновом приближении выглядит следующим образом:

$$\beta_{11} \sin(\beta_{11} l/2) - \alpha_{11} \gamma_{11} \cos(\beta_{11} l/2) = 0, \quad (1)$$

где l – длина ОКЛ; а β_{11} и γ_{11} – продольные волновые числа волны H_{11} в коаксиальной линии и в волноводе соответственно, причем

$$\beta_{11} = [k^2 \epsilon - (\zeta_{11}/b)^2]^{1/2},$$

$$\gamma_{11} = [(\eta_{11}/b)^2 - k^2]^{1/2},$$

$k = 2\pi f/c$, f – резонансная частота, c – скорость света в вакууме, $\epsilon \cong 2.1$ – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей ОКЛ (частным случаем диэлектрика может быть воздух), ζ_{11}/b и η_{11}/b – поперечные волновые числа волны H_{11} в коаксиальной линии и в волноводе соответственно. При этом ζ_{11} для волны H_{11} определяется из уравнения

$$J_1'(\zeta_{11})N_1'(\zeta_{11} a/b) - J_1'(\zeta_{11} a/b)N_1'(\zeta_{11}) = 0,$$

а $\eta_{11} = 1.841$ – корень производной функции Бесселя; a и b – радиусы внутреннего и внешнего проводников коаксиальной линии;

$$\alpha_{11} = \frac{\Psi_{11}^2}{R_{11}N_{11}};$$

$$\Psi_{11} = \zeta_{11} \frac{a}{b} \frac{\eta_{11}\zeta_{11}}{\eta_{11}^2 - \zeta_{11}^2} J_1'(\eta_{11} a/b) K_1;$$

$$R_{11} = \frac{\zeta_{11}^2}{2} \left(1 - \frac{1}{\zeta_{11}^2} \right) K_2 -$$

$$\frac{(\zeta_{11} a/b)^2}{2} \left[1 - \frac{1}{(\zeta_{11} a/b)^2} \right] K_1;$$

$$N_{11} = \frac{\eta_{11}^2}{2} \left(1 - \frac{1}{\eta_{11}^2} \right) J_1^2(\eta_{11});$$

$$K_1 = J_1(\zeta_{11} a/b) - \frac{J_1'(\zeta_{11} a/b)}{N_1'(\zeta_{11} a/b)} N_1(\zeta_{11} a/b);$$

$$K_2 = J_1(\zeta_{11}) - \frac{J_1'(\zeta_{11})}{N_1'(\zeta_{11})} N_1(\zeta_{11});$$

$J_1(\zeta_{11})$, $N_1(\zeta_{11})$, $J_1'(\zeta_{11})$ и $N_1'(\zeta_{11})$ – функции Бесселя I и II рода и их производные.

На рис. 2, а (пунктирная кривая 1) представлена рассчитанная по формуле (1) зависимость резонансной частоты f колебания H_{111} в ВКР от радиуса a внутреннего проводника ОКЛ. Светлыми кружками на этой кривой отмечены экспериментальные значения резонансной частоты. При измерениях узел крепления диода касался ОКЛ. Как видно из рисунка, экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с расчетной кривой, полученной в предположении, что КЗ поршень удален на бесконечность. Кривая 2 показывает экспериментальную зависимость резонансной частоты ВКР от величины a при размещении негенерирующего диода в узле крепления. Из сравнения данных, представленных кривыми 1 и 2, можно сделать вывод о небольшом влиянии диода на резонансную частоту ВКР. На этом же рисунке приведена зависимость частоты генерируемых колеба-

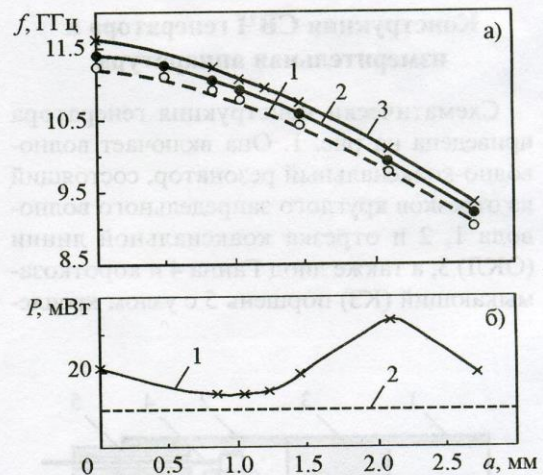


Рис. 2. Зависимости резонансной частоты структуры и частоты генерируемых колебаний (а) и мощности (б) от величины радиуса внутреннего проводника ОКЛ: а) кривая 1 – расчетная зависимость (светлые кружки – экспериментальные данные), кривая 2 – экспериментальная зависимость резонансной частоты структуры с негенерирующим диодом, кривая 3 – частота генерируемых колебаний; б) кривая 1 – мощность генерируемых колебаний, кривая 2 – паспортная мощность диода AA703A

ний от величины радиуса внутреннего проводника ОКЛ после подачи на диод питающего напряжения (кривая 3). Анализ кривых на рис. 2, а позволяет сделать вывод о возможности предварительного расчета резонансной структуры на заданную частоту генератора с помощью выражения (1).

На рис. 2, б приведена зависимость мощности генерируемых колебаний P от a (кривая 1). Здесь же пунктирной линией 2 отмечена величина СВЧ мощности диода АА703А согласно его паспортным данным. Как видно из этого рисунка, исследуемый генератор обеспечивает мощность, гарантируемую выбранным типом диода во всем интервале генерируемых частот.

На рис. 3, а, б приведены вольт-частотные (а) и вольт-ваттные (б) характеристики исследуемого генератора для $a = 0, 1.23, 2.09$ и 2.71 мм (кривые 1-4 соответственно). Кривые 1 представлены зависимости частоты и мощности генератора от напряжения питания диода для случая, когда в качестве ре-

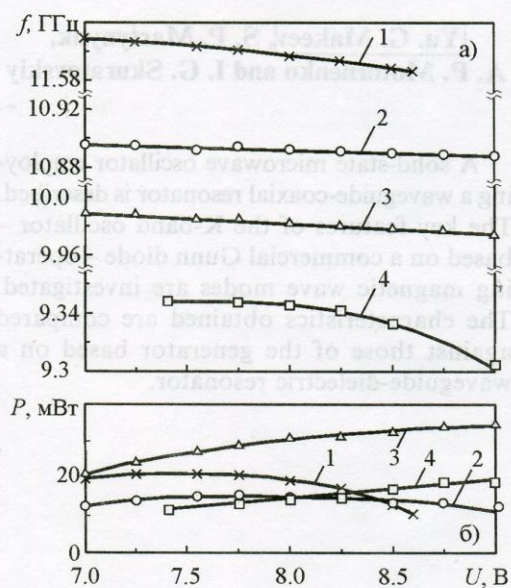


Рис. 3. Вольт-частотные (а) и вольт-ваттные (б) характеристики генератора: кривая 1 соответствует $a = 0$, кривая 2 – 1.23 мм, кривая 3 – 2.09 мм и кривая 4 – 2.71 мм

зонансной структуры использовался ВДР. Как видно, имеется некоторое отличие в поведении зависимостей величин f и P генератора на основе ВКР по сравнению с генератором на ВДР. С помощью кривых 2-4 на рис. 3, а можно определить полосу электронной перестройки частоты генератора на ВКР, которая составляет $\leq 0.4\%$.

Возможности механической подстройки частоты генератора проиллюстрированы зависимостями рис. 4, где приведены относительные изменения частоты f/f_{max} (рис. 4, а) и мощности P/P_{max} (рис. 4, б) от расстояния между торцом ОКЛ и узлом крепления диода L для пяти различных значений a : 0 и 0.75 мм (кривая 1); 1.02 мм (кривая 2); 2.09 мм (кривая 3) и 2.71 мм (кривая 4). Здесь f_{max} и P_{max} – максимальные значения частоты и мощности, которые для указанных величин a имели место в случае, когда КЗ поршень с узлом крепления диода касался ОКЛ. Как видно из рис. 4, а, для всех выбранных условий изменение частоты в зависимости от L

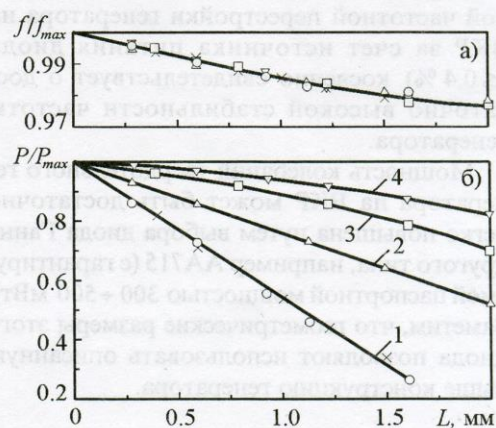


Рис. 4. Зависимости нормированных частоты (а) и мощности генератора (б) от положения КЗ поршня для ряда значений радиуса внутреннего проводника коаксиала: кривая 1 – $a = 0$ (крестики), $a = 0.75$ мм (светлые кружки); кривая 2 – $a = 1.02$ мм; кривая 3 – $a = 2.09$ мм; кривая 4 – $a = 2.71$ мм

происходит по одному и тому же закону, причем частота уменьшается на величину $< 3\%$. В то же время характер изменения мощности зависит от параметра a – чем больше a , тем меньше изменение мощности с удалением КЗ поршня.

Заключение

В работе представлена конструкция твердотельного генератора СВЧ на основе волноводно-коаксиального резонатора с запердельным волноводом, который характеризуется малыми габаритами и весом. Приведены соотношения, позволяющие рассчитать геометрические размеры резонансной структуры по заданной частоте генерации и выбранным размерам и значению диэлектрической проницаемости материала ОКЛ.

Получены зависимости частоты и мощности генератора 3-см диапазона на диоде Ганна от напряжения питания и положения КЗ поршня. Точная настройка генератора на заданную частоту, компенсирующая небольшое влияние генерирующего диода, может быть осуществлена перемещением КЗ поршня. Небольшой интервал электронной частотной перестройки генератора на ВКР за счет источника питания диода ($\leq 0.4\%$) косвенно свидетельствует о достаточно высокой стабильности частоты генератора.

Мощность колебаний твердотельного генератора на ВКР может быть достаточно легко повышена путем выбора диода Ганна другого типа, например АА715 (с гарантируемой паспортной мощностью $300 \div 500$ мВт). Заметим, что геометрические размеры этого диода позволяют использовать описанную выше конструкцию генератора.

Литература

1. С. А. Зинченко, Е. А. Мачусский. Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1986, **29**, №10, с. 43-49.
2. Н. Ф. Карушкин, Л. В. Касаткин. Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1999, **42**, №10, с. 3-10.

3. С. П. Ракитин, Н. Ф. Карушкин, Ю. А. Цвирко, Л. В. Касаткин, Н. С. Болтовец, В. Н. Иванов, С. В. Хоменко. Труды 10й конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь. Крым. Украина. 2000, т. 1, с. 33-36.
4. A. V. Daydchenko, A. A. Mishnev, E. D. Prohorov. Proc. of 3th Int. Symp. "Physics and engineering. Millimeter and submillimeter waves". Kharkov. Ukraine. 1998, vol. 1, pp. 163-165.
5. А. И. Фисун, О. И. Белоус. Зарубежная радиоэлектроника. 1999, №4, с. 41-64.
6. С. Н. Харьковский, А. Е. Когут, В. В. Кутузов. Письма в ЖТФ. 1997, **23**, №15, с. 25-29.
7. Yu. G. Makeev, A. P. Motornenko. Proc. of 4th Int. Symp. "Physics and engineering. Millimeter and submillimeter waves". Kharkov. Ukraine. 2001, vol. 2, pp.708-709.
8. И. А. Астионенко, А. П. Моторненко. Радиоэлектроника и электроника. 1991, **36**, №7, с. 1398-1401.
9. Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко, А. А. Зоркин. Радиоэлектроника. 1995, №10, с. 73-76.
10. Ю. Г. Макеев, А. П. Моторненко. ЖТФ. 2003, **73**, вып. 4, с. 113-116.

Solid-State Microwave Oscillator Employing a Waveguide Coaxial-Resonator

Yu. G. Makeev, S. P. Martynyuk, A. P. Motornenko and I. G. Skuratovskiy

A solid-state microwave oscillator employing a waveguide-coaxial resonator is described. The key features of the K-band oscillator – based on a commercial Gunn diode – operating magnetic wave modes are investigated. The characteristics obtained are compared against those of the generator based on a waveguide-dielectric resonator.

