



УДК 621.396

В. В. Березин, А. М. Щитов

## Оптимизация параметров диодов широкополосного утроителя частоты 75...110 ГГц

Проведена оптимизация параметров диодов широкополосного утроителя частоты 75...110 ГГц на основе предложенной методики расчета и проектирования с целью повышения эффективности преобразования. *Ключевые слова:* утроитель частоты, СВЧ-устройство, вольт-фарадная характеристика, выходная мощность.

### Введение

Широкополосные диодные умножители частоты используются в источниках СВЧ- и КВЧ-сигналов в качестве выходных формирующих каскадов. Принцип умножения частоты положен в основу построения большинства современных отечественных и зарубежных твердотельных измерительных генераторов и синтезаторов в диапазоне частот выше 20 ГГц.

Целью работы является повышение эффективности преобразования утроителя частоты 75...110 ГГц, поскольку именно этот параметр определяет уровень выходной мощности источника сигналов при отсутствии выходного усилителя.

Одной из проблем проектирования СВЧ- и КВЧ-устройств на нелинейных элементах является отсутствие эффективных методик автоматизированного расчета на базе системы автоматизированного проектирования (САПР), объединяющих электродинамические методы анализа волноведущих структур с результатами расчета характеристик нелинейных полупроводниковых элементов.

Несмотря на обилие различных методов (аналитических и численных) анализа нелинейных СВЧ-устройств (смесителей, умножителей частоты и др.), задача их проектирования достаточно сложна, обычно решается итеративно, при этом важную роль играют экспериментальные исследования и практическая «доводка» реализованной схемы.

Эффективность работы умножителей частоты СВЧ- и КВЧ-диапазонов зависит как от оптимально выбранных схемно-конструктивных элементов устройства, так и в значительной степени от параметров используемых нелинейных элементов (диодов). В первую очередь

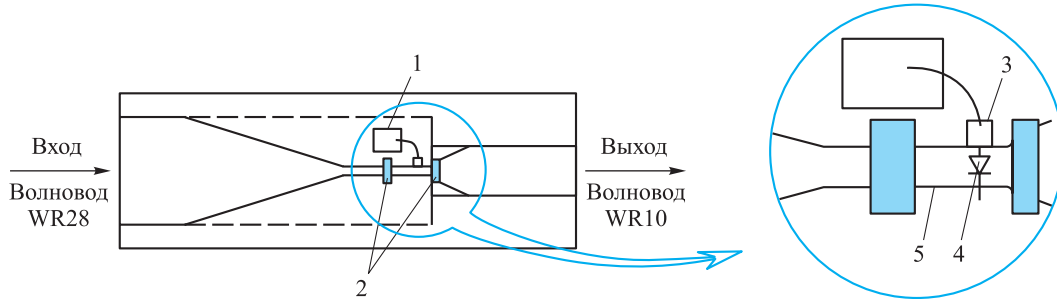
от величины паразитных параметров, степени неидентичности, характера нелинейности вольт-амперной (ВАХ) и вольт-фарадной (ВФХ) характеристик, габаритных размеров и др.

Предложенная в работе [1] методика расчета и проектирования диодного утроителя частоты позволяет с достаточной для практики точностью определить требования к основным параметрам умножительных диодов для обеспечения заданных характеристик устройства. **Конструктивные особенности утроителя частоты**

Утроитель частоты, для которого проводилась оптимизация параметров диодов, конструктивно выполнен в виде двух последовательно соединенных волноводов различного сечений: входного WR-28 и выходного WR-10 [2]. В разрезе по центру широких стенок волноводов вставлены металлические пластины толщиной 0,2 мм, образующие H-образный волновод (рис. 1).

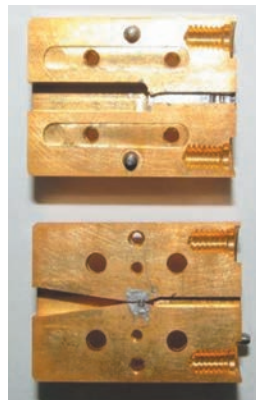
Сечение выходного волновода на начальном участке заужено до  $2,14 \times 1,27$  мм для того, чтобы сделать его запредельным для диапазона частот второй гармоники входного сигнала. Диоды с цепями автосмещения установлены с разных сторон пластины строго симметрично, примерно в месте соединения волноводов различного сечения. Со стороны входа на расстоянии  $\lambda_{\text{вых.ср}}/4$  установлена полиимидная пластина ( $1 \times 0,5 \times 0,05$  мм с односторонней металлизацией), выполняющая роль согласующего элемента и короткозамыкателя для третьей гармоники. Непосредственно за диодами установлена пластина ( $0,5 \times 0,25 \times 0,05$  мм), осуществляющая согласование по выходу (рис. 1). На рис. 2 показан внешний вид утроителя.

Наиболее приоритетными техническими характеристиками широкополосных умножителей частоты являются: эффективность (поте-



**Рис. 1.** Эскиз утроителя частоты 75...110 ГГц:

1 – резистор; 2 – полиимидная пластина; 3 – конденсатор; 4 – диод; 5 – регулярный участок



**Рис. 2.** Внешний вид утроителя частоты 75...110 ГГц

ри) преобразования, максимально достижимая выходная мощность, неравномерность выходной мощности в диапазоне частот и уровень паразитных составляющих в спектре выходного сигнала.

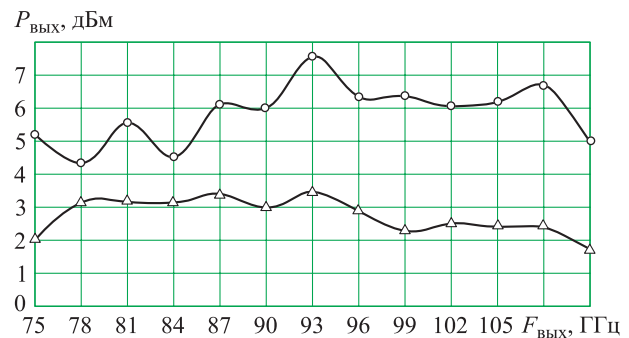
Экспериментально установлено, что наилучшие характеристики широкополосного 75...110 ГГц утроителя (минимальные потери преобразования, максимальная выходная мощность ~2...3 мВт) обеспечиваются при использовании бескорпусных умножительных диодов Шоттки с балочными выводами типа А92220-2 (НПО «Салют», г. Нижний Новгород) [3, 4].

Типичные характеристики диодов: емкость при нулевом смещении  $C_0 = 0,07$  пФ; сопротивление потерь  $R_s = 5$  Ом.

Диоды могут быть подобраны в пары с неидентичностью характеристик по ВАХ и ВФХ порядка 10 %.

### Результаты расчета

С помощью методики расчета и проектирования широкополосного утроителя [1] оптимизирована конструкция умножителя с использованием диодов типа А92220-2 с идентичными характеристиками.



**Рис. 3.** Уровень выходной мощности утроителя частоты при  $P_{вх} = 100$  мВт:

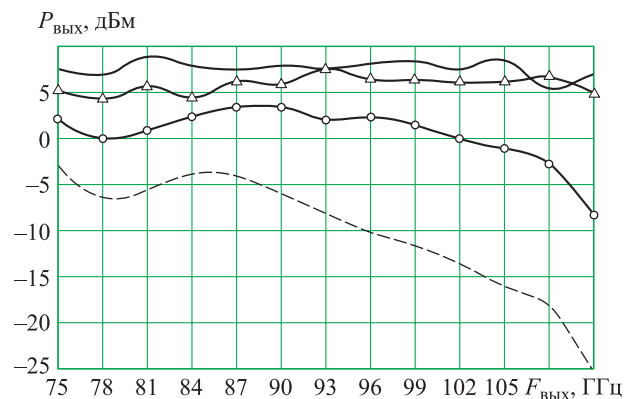
—○— расчет; —△— эксперимент

Полученные результаты представлены на рис. 3.

Экспериментальная характеристика, усредненная по 10 образцам утроителей, отличается от расчетной не более чем на 1...4 дБ.

Проанализируем зависимость уровня выходной мощности утроителя от вариации основных параметров диодов.

На рис. 4 приведены расчетные характеристики уровня выходной мощности для различных значений  $C_0$  диодов при фиксирован-

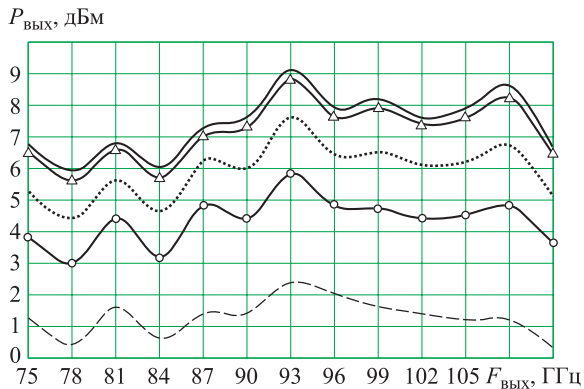


**Рис. 4.** Уровень выходной мощности при  $P_{вх} = 100$  мВт,  $R_s = 5$  Ом и различных  $C_0$ , пФ:

—○— 0,01; —△— 0,07; —□— 0,15; ----◇---- 0,25

ном  $R_s = 5 \text{ Ом}$ , а на рис. 5 – для различных  $R_s$  при  $C_0 = 0,07 \text{ пФ}$ .

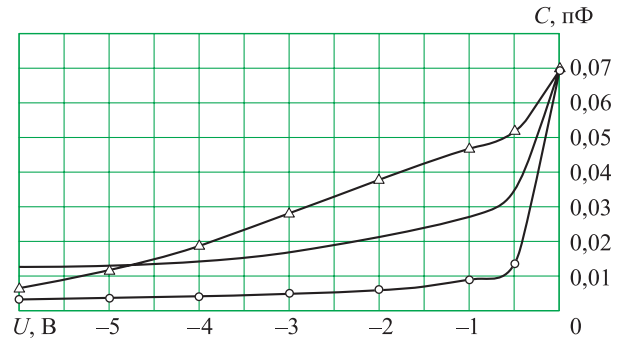
Очевидно, что одновременное уменьшение  $C_0$  и  $R_s$  для повышения эффективности преобразования умножителя невозможно без снижения допустимой мощности рассеяния диодов, поэтому оптимальные значения  $C_0$  и  $R_s$  для данного диапазона частот утроителя и максимального уровня входной мощности 100 мВт выбирают из компромисса:  $C_0 = 0,07 \text{ пФ}$  и  $R_s = 5 \text{ Ом}$ .



**Рис. 5.** Уровень выходной мощности при  $P_{\text{вх}} = 100 \text{ мВт}$ ,  $C_0 = 0,07 \text{ пФ}$  и различных  $R_s$ , Ом:  
 — — 0,1; —△— 1,0; ..... — 5,0; —○— 10;  
 ---- 20

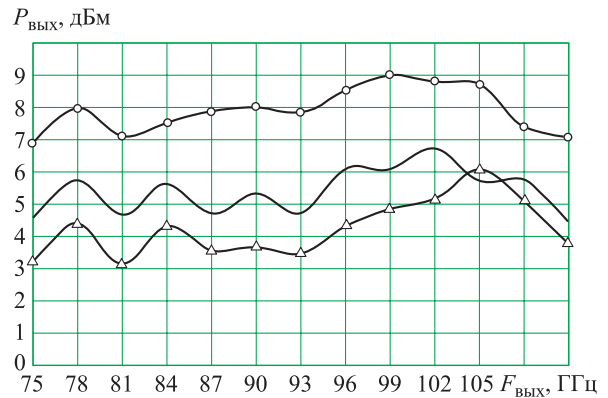
Требования к неидентичности параметров диодов по  $C_0$  и  $R_s$ , вызывающей паразитные составляющие в спектре выходного сигнала утроителя, подробно проанализированы в работе [1]. Показано, что при минимально достижимой на практике неидентичности  $C_0$  и  $R_s$  в 10 % вторая гармоника относительно третьей подавлена на 25 дБ, а четвертая – на 35 дБ. Уровень второй гармоники более критичен к неидентичности диодов по  $R_s$ , а четвертой – по  $C_0$ . Заметим, что в широкополосном утроителе частоты 75...110 ГГц вторая и четвертая гармоники не могут быть отфильтрованы, поскольку находятся в рабочем диапазоне частот или в непосредственной близости, поэтому требования к неидентичности параметров диодов весьма высоки.

Эффективность преобразования в значительной степени зависит от характера изменения крутизны ВФХ умножительных диодов. Рассмотрены три различные ВФХ: номинальная, которая соответствует реальным диодам A92220-2, пологая и крутая (рис. 6).



**Рис. 6.** Семейство ВФХ-диодов:  
 — — номинальная; —△— — пологая; —○— — крутая

На рис. 7 приведены характеристики уровня выходной мощности в зависимости от крутизны ВФХ.



**Рис. 7.** Уровень выходной мощности в зависимости от крутизны ВФХ:  
 —○— — крутая; — — номинальная; —△— — пологая

Сравнение результатов показывает, что более крутая ВФХ позволяет повысить эффективность преобразования примерно на 2 дБ.

### Заключение

Проведенные расчеты показали существенное влияние параметров диодов и степени нелинейности их ВФХ на уровень выходной мощности утроителя частоты. При оптимальном выборе параметров диодов можно реализовать утроитель частоты 75...110 ГГц с выходной мощностью не менее 5 мВт при  $P_{\text{вх}} = 100 \text{ мВт}$  (потери преобразования не более 13 дБ с неравномерностью  $\pm 1 \text{ дБ}$ ) и уровнем подавления побочных составляющих в спектре выходного сигнала не менее 25 дБс.

Сравнивая полученные результаты расчета с параметрами аналогичной модели утроителя частоты WR10X3, реализуемой одной из ведущих зарубежных фирм Virginia



Diodes, Inc., отметим, что в диапазоне частот 75...110 ГГц она имеет потери преобразования 12...15 дБ.

Учитывая хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов по всем основным характеристикам утроителя частоты, можно констатировать, что предложенная методика позволяет априорно определить потенциально возможные характеристики нелинейного устройства без проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментальных исследований.

#### Список литературы

1. Березин В. В., Щитов А. М., Оболенский С. В. Методика расчета и проектирования волнового диодного утроителя частоты 75–110 ГГц // Материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные системы и технологии

(ИСТ-2015)», 17 апреля 2015 г. Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2015. С. 62–63.

2. Щитов А. М., Серебряков А. Е. Широкополосные умножители частоты миллиметрового диапазона (26,5–110 ГГц) // Вестник ВВО АТН РФ. Серия «Высокие технологии в радиоэлектронике». 1997. № 1 (3). С. 91–96.

3. Щитов А. М. Диодные умножители частоты // Системы и средства связи телевидения и радиовещания. 2002. № 1, 2. С. 45–51.

4. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / А. М. Кудрявцев И. Г. Мальтер, А. Е. Львов и др.; под ред. А. М. Кудрявцева. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.

Поступила 22.11.16

**Березин Виталий Витальевич** – аспирант кафедры электроники Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, инженер 1 категории АО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Нижний Новгород. Область научных интересов: широкополосные преобразователи частоты СВЧ- и КВЧ-диапазонов.

**Щитов Аркадий Максимович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» имени А. П. Горшкова», г. Нижний Новгород. Область научных интересов: преобразование частоты в приеме-передающей и радиоизмерительной аппаратуре СВЧ- и КВЧ-диапазонов.

### Optimization parameters of broadband tripler diodes of 75...110 GHz frequency

We optimized the parameters of the broadband tripler diodes of 75...110 GHz frequency according to the proposed method of calculation and design in order to increase the conversion efficiency

*Keywords:* frequency tripler, microwave device, capacitance-voltage curve, power output.

**Berezin Vitaliy Vitalievich** – postgraduate student of the Department of Electronics, Lobachevsky University of Nizhny Novgorod (UNN), first rank engineer of Joint-stock company “Federal Research and Production Centre “Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering (NNIIRT)”, Nizhny Novgorod.

Science research interests: microwave and extremely high frequency band converters.

**Schitov Arkadiy Maksimovich** – Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of Open joint-stock company “Federal Research and Production Centre “Institute of Electronic Measurements “Kvartz”, Nizhny Novgorod.

Science research interests: the frequency conversion in the receiving and transmitting equipment and radio measuring devices of microwave and extremely high frequency band.