

# МОНОЛИТНЫЕ ИС ПАССИВНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ДИОДОВ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

В статье представлены результаты разработки, моделирования и измерения широкополосных умножителей частоты, созданных на основе диодов с барьером Шоттки, с выходными диапазонами частот 10–26 ГГц (удвоитель), 22,5–51 ГГц (утроитель), 20–60 ГГц (удвоитель). Микросхемы реализованы на основе монокристаллической интегральной технологии на подложке из арсенида галлия (GaAs).

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема формирования сверхширокополосного СВЧ-сигнала наиболее актуальна при разработке современных систем связи, радиолокационных и измерительных систем.

Устройства масштабирования СВЧ-сигнала (умножители частоты) являются важным компонентом сверхширокополосных систем. Актуальность подобных устройств обусловлена тем, что первичные источники сигнала (генераторы на фундаментальной гармонике), как правило, имеют очень узкий диапазон перестройки частоты, и для обеспечения широкой полосы частот требуется масштабирование исходного сигнала в несколько раз [1]. Эту функцию выполняют умножители частоты. Главной частью любого умножителя частоты является нелинейный элемент. Традиционно в пассивных умножителях в качестве такового используются диоды с барьером Шоттки, поскольку они имеют высокую скорость переключения, что обеспечивает работоспособность в диапазоне СВЧ [2].

Известны умножители частоты на 2 и на 3 как в монокристаллическом, так и в гибридном исполнении, например НМС-ХТВ110 [3], TGC1430G [4], D-0840 [5]. В [6] предложен утроитель в монокристаллическом исполнении для диапазона выходных частот 3–30 ГГц. К недостатку упомянутой топологии можно отнести отсутствие фильтрующих элементов на входе и выходе схемы, а также сравнительно высокие потери преобразования.

В этой работе представлены результаты моделирования и измерения трех умножителей частоты с диапазонами выходных частот 10–26 ГГц (удвоитель), 22,5–51 ГГц (утроитель), 20–60 ГГц (удвоитель). Микросхемы реализованы на основе монокристаллической интегральной технологии на подложке из арсенида галлия (GaAs).

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ УДВОИТЕЛЕЙ И УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Уровень фазовых шумов, вызванный умножением частоты в  $N$  раз, рассчитывается по формуле:

$$\Delta\text{СNR} = 20\lg(N), \text{ дБ. (1)}$$

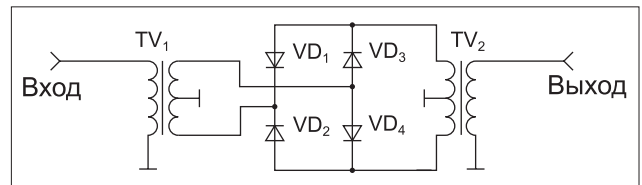
Очевидно, что в случаях, когда необходимо обеспечить минимальный уровень фазовых шумов, пассивные умножители имеют преимущество, т. к. их схема не добавляет собственных фазовых шумов.

Таким образом, в качестве базовой схемы для удвоителей частоты была выбрана классическая двойная балансная схема из диодного кольца и балансных трансформаторов на входе и выходе [1]. Схема представлена на рис. 1.

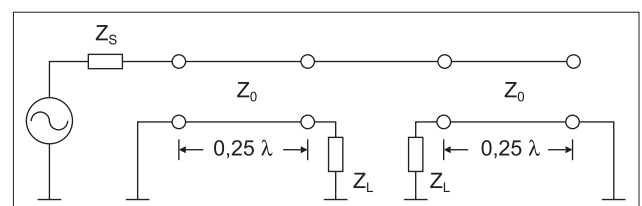
Преимущество этой схемы заключается в высоком уровне подавления нечетных гармоник выходного сигнала и в простоте физической реализации трансформаторов, которые имеют низкие потери и низкий дисбаланс по амплитуде и фазе выходного сигнала, особенно при перекрытии диапазона частот, не превышающего октаву.

Важной частью схемы являются входные и выходные трансформаторы  $TV_1$  и  $TV_2$ . При использовании планарной технологии наиболее удобным способом реализации этого элемента является трансформатор Маршанда. На рис. 2 показана его схема.

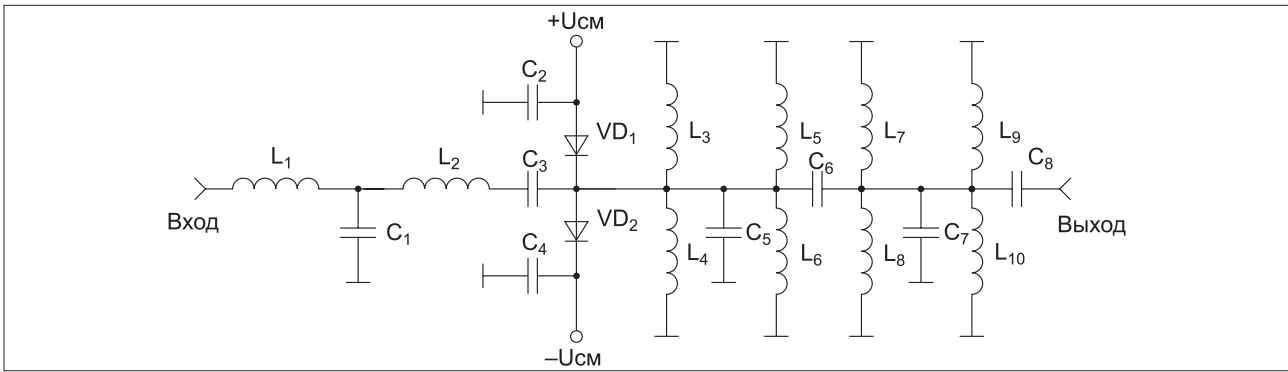
Схему можно представить как отрезок линии передачи, которая является четвертьволновым трансформатором между



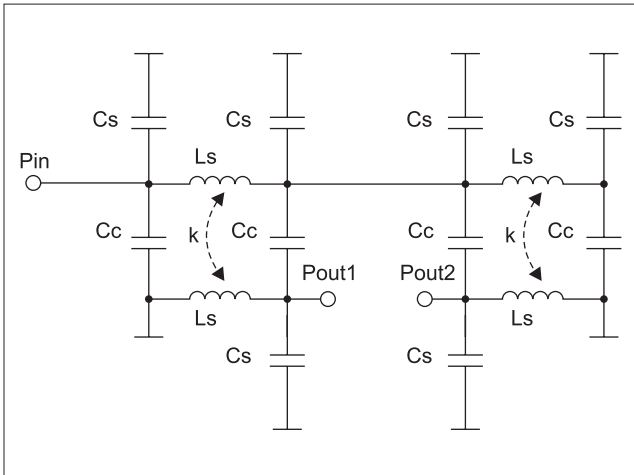
▲ Рис. 1. Схема пассивного удвоителя частоты



▲ Рис. 2. Схема трансформатора Маршанда



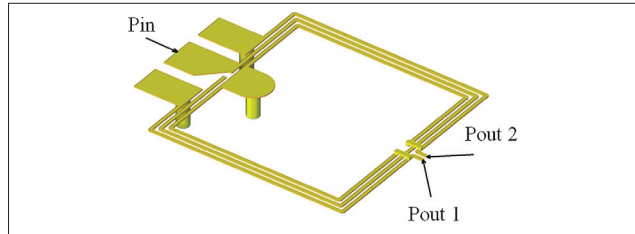
▲ Рис. 3. Электрическая принципиальная схема утрителя частоты



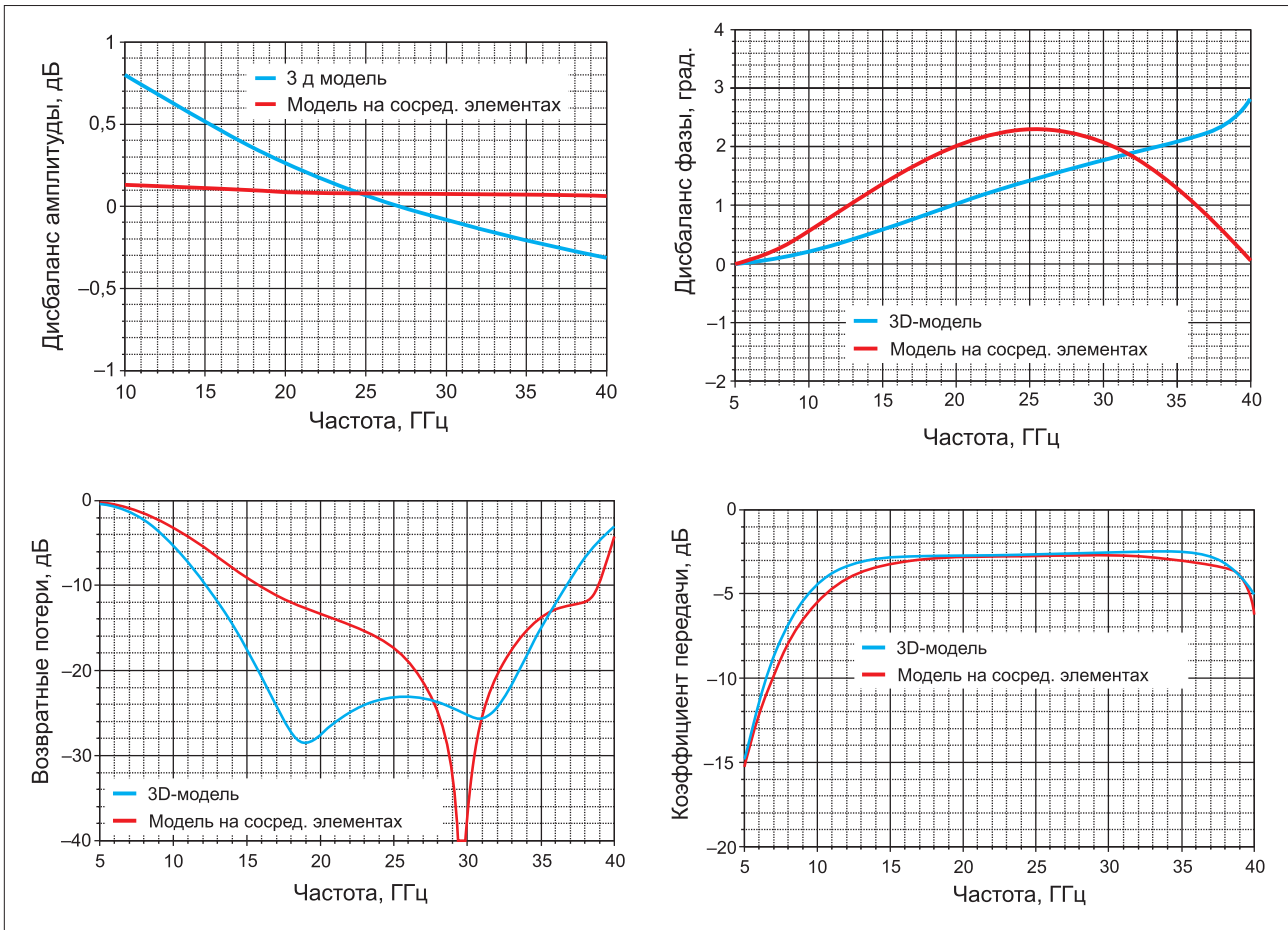
▲ Рис. 4. Модель моста Маршанда на сосредоточенных элементах

Таблица. Расчетные параметры входных и выходных трансформаторов

	Трансформатор 5–13 ГГц	Трансформатор 10–26 ГГц	Трансформатор 10–30 ГГц	Трансформатор 20–60 ГГц
k	0,7	0,7	0,7	0,7
$C_c, \text{фФ}$	147	102	74	55
$C_s, \text{фФ}$	65	43	31	23
$L_s, \text{нГн}$	1,5	0,66	0,54	0,32



▲ Рис. 5. Полученная структура трансформатора с полосой 10–30 ГГц



▲ Рис. 6. Сравнение характеристик электродинамической модели и модели на сосредоточенных элементах

источником с волновым сопротивлением 50 Ом и входным сопротивлением диода.

Для обеспечения оптимальных параметров утроителя частоты предлагается использовать схему с двумя встречно-параллельными диодами и фильтрующими элементами на входе и выходе. Коэффициент преобразования можно корректировать с помощью двуполярного смещения, заводимого на нелинейные элементы. На рис. 3 представлена электрическая принципиальная схема утроителя частоты.

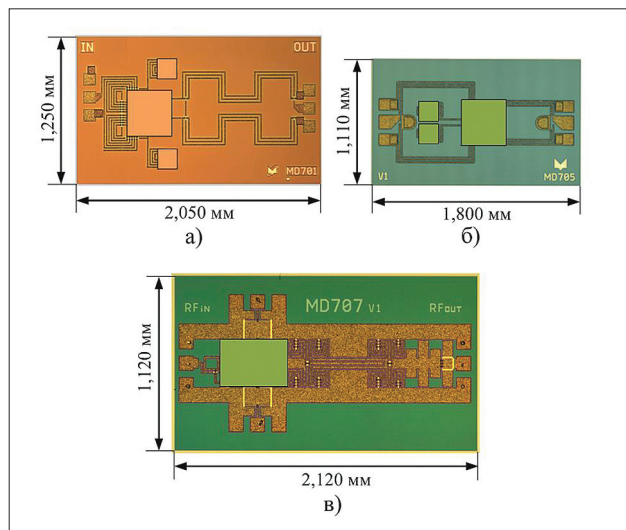
По указанным схемам были смоделированы МИС с использованием серийной технологии GaAs-диодов с барьером Шоттки АО «НПФ «Микран».

Балансные схемы включения диодов являются оптимальным решением для пассивных утроителей частоты, поскольку обеспечивают подавление четных гармоник выходного сигнала [7]. Модель диода, использованная для расчетов, рассмотрена в [8].

### СИНТЕЗ ТОПОЛОГИИ И ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МИС УМНОЖИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Электродинамическое моделирование топологий было проведено с помощью системы ADS от Keysight Technologies. Первоначально для разработки топологии входных и выходных балансных трансформаторов была построена модель на сосредоточенных элементах [6] (рис. 4).

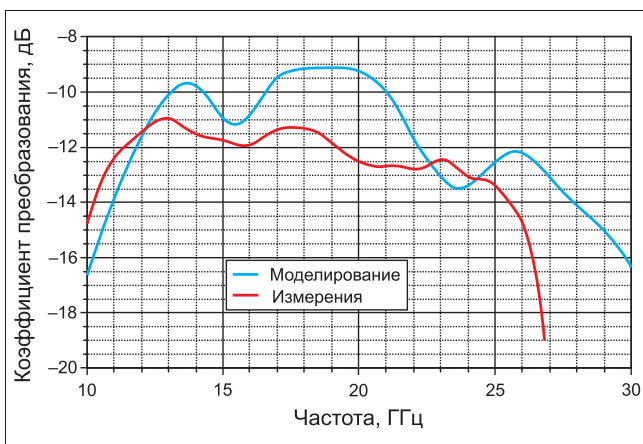
Поскольку для микрополосковой линии соотношение  $C_s/L_s$  является постоянным, максимально возможная полоса трансформатора равна двум октавам. Расчетные значения параметров элементов требуемых входных и выходных мостов для



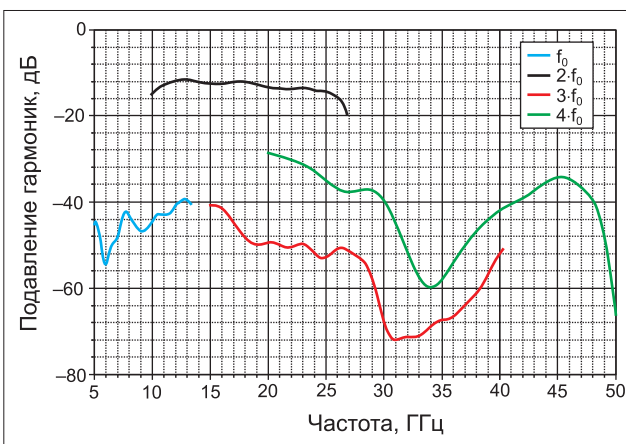
▲ Рис. 7. Фотографии изготовленных МИС умножителей: а) 10–26 ГГц (удвоитель); б) 20–60 ГГц (удвоитель); в) 22,5–51 ГГц (утроитель)

удвоителей с входными диапазонами 5–13 и 10–30 ГГц показаны в таблице.

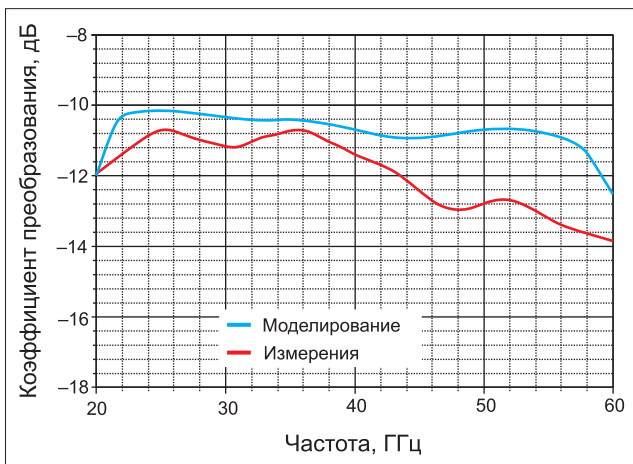
Затем был проведен электродинамический расчет, оптимизация и настройка топологий входных и выходных трансформаторов с использованием средств ADS Momentum. В соответствии с использованием GaAs-технологии диодов Шоттки АО «НПФ «Микран» использовались два слоя металла. Первый — для организации



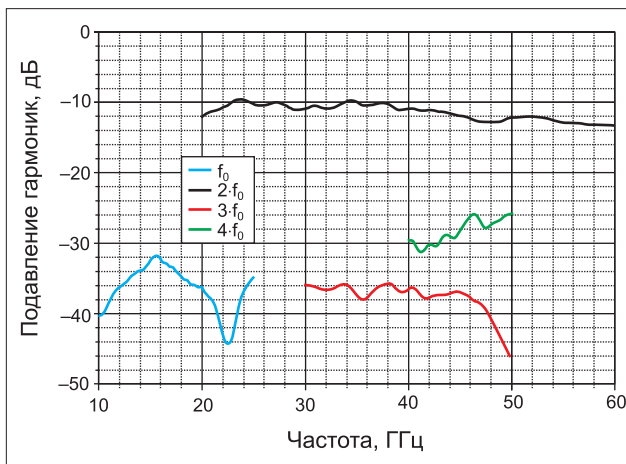
▲ Рис. 8. Сравнение расчетных и измеренных коэффициентов преобразования удвоителя



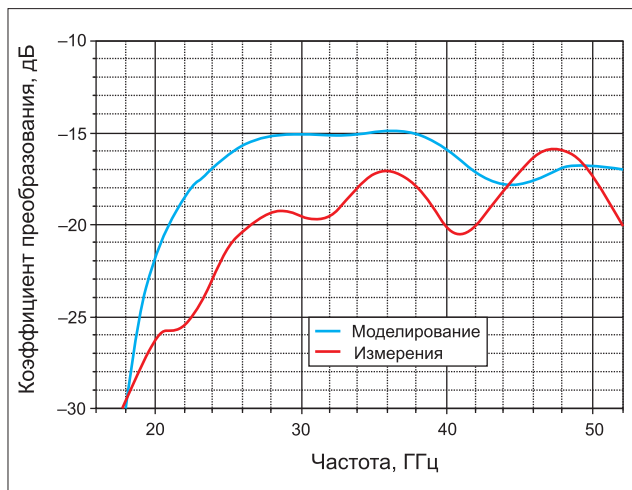
▲ Рис. 9. Результаты измерений подавления гармоник удвоителя



▲ Рис. 10. Сравнение расчетных и измеренных коэффициентов преобразования удвоителя



▲ Рис. 11. Результаты измерений подавления гармоник удвоителя



▲ Рис. 12. Сравнение расчетных и измеренных коэффициентов преобразования утроителя

основных проводящих линий, а второй — для воздушных мостиков в местах пересечения проводящих линий. Финальная толщина подложки — 100 мкм. Минимальный зазор и ширина линии равны 8 и 10 мкм, соответственно. Контактные площадки были разработаны для стандартных СВЧ-зондов с расстоянием между контактами 150 мкм. Заземления были выполнены с помощью стандартных переходных отверстий.

Пример полученной структуры трансформатора с полосой 10–30 ГГц показан на рис. 5.

Сравнение характеристик модели на сосредоточенных элементах и электродинамической модели показаны на рис. 6.

Реальная достигнутая полоса трансформатора — 30 ГГц (от 10 до 40 ГГц), но заметим, что такой частотный диапазон достигим только в случае хорошего согласования по входу и выходу трансформатора. В реальной схеме, когда трансформатор нагружен на диодное кольцо, согласование на высоких частотах заметно ухудшается, и, соответственно, характеристики самого трансформатора также ухудшаются. Чтобы уменьшить влияние этого негативного фактора, полосу трансформатора необходимо рассчитать с 20-% запасом по верхней граничной частоте, а в некоторых случаях применяются дополнительные цепи согласования.

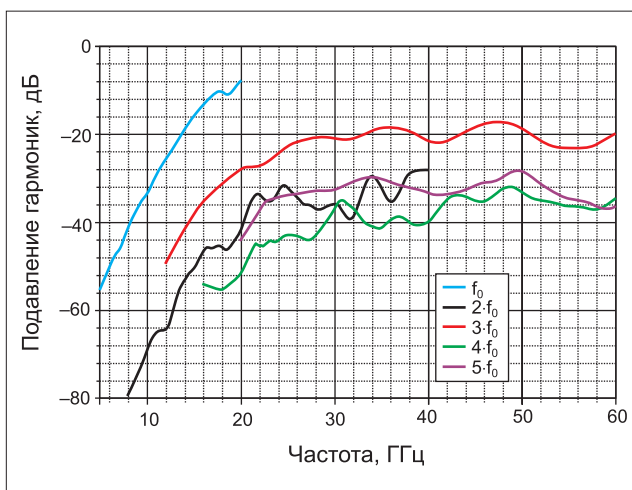
Особенностью топологии утроителя является использование дополнительных топологических фильтров и разделительных емкостей топологического типа, выполняющих роль цепей согласования. Схожие решения с топологическими емкостями на основе холостых либо короткозамкнутых отрезков линий приведены в [9]. Для реализации элементов была выбрана копланарная структура топологии МИС.

Был проведен полный электродинамический расчет, на основе полученных топологий изготовлены монолитно-интегральные схемы умножителей частоты с выходными диапазонами частот 10–26 ГГц (удвоитель), 22,5–51 ГГц (утроитель), 20–60 ГГц (удвоитель). Фотографии изготовленных МИС представлены на рис. 7.

Расчетные и измеренные зависимости коэффициента преобразования в зависимости от входной частоты для удвоителя в диапазоне 10–26 ГГц представлены на рис. 8.

Расчет и измерения уровня подавления 1-й, 3-й, 4-й гармоник и коэффициент преобразования в зависимости от частоты при входной мощности 15 дБм представлены на рис. 9.

Расчетные и измеренные зависимости коэффициента преобразования в зависимости от входной частоты для удвоителя в диапазоне 20–60 ГГц представлены на рис. 10.



▲ Рис. 13. Результаты измерений подавления гармоник удвоителя

Расчет и измерения уровня подавления 1-й, 3-й, 4-й гармоник и коэффициент преобразования в зависимости от частоты при входной мощности 15 дБм представлены на рис. 11.

Расчетные и измеренные зависимости коэффициента преобразования в зависимости от входной частоты для утроителя в диапазоне 22,5–51 ГГц представлены на рис. 12.

Расчет и измерения уровня подавления 1-й, 2-й, 4-й, 5-й гармоник и коэффициент преобразования в зависимости от частоты при входной мощности 15 дБм представлены на рис. 13.

#### ВЫВОДЫ

Проведен полный электродинамический расчет и измерения тестовых топологий МИС умножителей с диапазонами выходных частот 10–26 ГГц (удвоитель), 22,5–51 ГГц (утроитель), 20–60 ГГц (удвоитель). В качестве нелинейных элементов использовались GaAs-диоды с барьером Шоттки (АО «НПФ Микран»). Диоды изготовлены на основе полупроводниковой структуры, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полужолирующей подложке арсенида галлия.

#### Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.577.21.0188 от 27.10.2015 г., идентификатор RFMEFI57715X0188.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S.A. Maas. *Microwave Mixers (SecondEd.)*. Artech House. Norwood, MA. 1993.
2. S.A. Maas, Y. Ryu. *A Broadband, Planar, Monolithic Resistive Frequency Doubler*. *Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium*. 1994.
3. *GaAs MMIC passive x3 frequency multiplier*, HMC-XTB110//www.analog.com.
4. *20–40 GHz Frequency Tripler*. TGC1430G//www.qorvo.com.
5. *Frequency Doublers*, D-0840//www.markimicrowave.com.
6. Груша А. В., Крутов А. В., Ребров А. С. *Пассивный утроитель частоты на встречно-параллельных диодах с барьером Шоттки*//Материалы 27-й Международной Крымской конференции. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии — КрыМуКо2017».
7. M. T. Faber, J. Chramiec, and M. E. Adamski. *Microwave and Millimeter-Wave Diode Frequency Multipliers*. Artech House. Norwood, MA. USA. 1995.
8. Дроздов А. В. *Моделирование диодов с барьером Шоттки для применения в монолитных интегральных схемах СВЧ/А. В. Дроздов и др.*//Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21. № 1.
9. G. E. Ponchak, L. B. Katehi, *Open- and short-circuit terminated series stubs in finite-width coplanar waveguide on silicon*. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* Vol. 45. No. 6. June 1997.