

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

УДК 621.374.4: 621.382.233

DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-3-285-291

Умножитель частоты высокой кратности с СВЧ-ключом, интегрированным в полосно-пропускающие фильтры

Д.А. Усанов¹, А.В. Скрипаль¹, В.Н. Посадский²,
В.С. Тяжлов², Д.В. Григорьев²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

²АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов, Россия

UsanovDA@info.sgu.ru

Умножители частоты в настоящее время получили широкое распространение в самых разных видах радиоэлектронной аппаратуры.

Рассмотрена возможность создания СВЧ-умножителя частоты высокой кратности со встроенным СВЧ-ключом на $n-i-p-i-n$ -диодах. Для выделения из спектра умноженного сигнала использован настроенный на необходимую 24-ю гармонику выходной полосно-пропускающий многозвенный фильтр, выполненный в виде последовательно расположенных встречных шпильковых резонаторов в микрополосковом исполнении.

Наибольший эффект запираения достигается при включении $n-i-p-i-n$ -диода следующим образом: одна n -область диода гальванически соединена с входным элементом микрополоскового фильтра, другая n -область – с первым шпильковым резонатором полосно-пропускающего фильтра. При одновременном включении $n-i-p-i-n$ -диодов в первый и центральный резонаторы полосно-пропускающего фильтра суммарное относительное изменение выходного сигнала превышает 70 дБ при изменении напряжения смещения на каждом из $n-i-p-i-n$ -диодов от 0 до 1,7 В.

Ключевые слова: СВЧ-умножитель частоты высокой кратности; встречно-включенные полупроводниковые диоды; полосно-пропускающий фильтр; СВЧ-ключ на $n-i-p-i-n$ -диодах.

Для цитирования: Умножитель частоты высокой кратности с СВЧ-ключом, интегрированным в полосно-пропускающие фильтры / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, В.Н. Посадский и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №3. – С. 285–291.

High Multiplicity Frequency Multiplier with Microwave-Switch Integrated into Bandpass Filters

D.A. Usanov¹, A.V. Skripal¹, V.N. Posadsky²,
V.S. Tyazhlov², D.V. Grigoriev²

¹FSBEI HE «Saratov national research state university named after
N.G. Chernyshevsky», Saratov, Russia

²JSC «SPC «Almaz-Fazotron», Saratov, Russia

UsanovDA@info.sgu.ru

The most important units of the frequency formers are the frequency multipliers.

The possibility of creating a microwave high multiplicity frequency multiplier with the built-in microwave switch on $n-i-p-i-n$ -diode has been considered. For allocating the multiplied signal from spectrum the output multisection bandpass filter in the form of a sequentially counter stud microstrip resonators, tuned to the required 24th harmonic, has been used.

The highest switch off effect is achieved when the $n-i-p-i-n$ -diode is turned on so that one n -region of the diode has been galvanically coupled to the input element of the microstrip filter, the other n -region has been connected to the first stud resonator of the bandpass filter. When $n-i-p-i-n$ -diodes are simultaneously switched to the first and central resonators of the band-pass filter, the total relative change of the output signal exceeds 70 dB under the bias voltage changing on each of the $n-i-p-i-n$ -diodes from 0 to 1.7 V.

Keywords: microwave high multiplicity multiplier; back-to-back semiconductor diodes; bandpass filters; microwave switch on $n-i-p-i-n$ -diodes

For citation: High Multiplicity Frequency Multiplier with Microwave-Switch Integrated into Bandpass Filters / D.A. Usanov, A.V. Skripa, V.N. Posadsky et al. // Proc. of universities. Electronics. – 2017. – Vol.22. – №3. – P. 285–291.

Введение. Важными узлами формирователей (синтезаторов) частот являются умножители частоты. В качестве активных элементов в этих синтезаторах используются полупроводниковые диоды или транзисторы [1]. Схема умножителя частоты может строиться как многокаскадное устройство, состоящее из нескольких умножителей частоты с небольшой кратностью на основе GaAs-HEMT [2], или как однокаскадная схема с умножителем частоты высокой кратности на основе СВЧ-диодов с накоплением заряда [3].

Для коммутации выходного сигнала умножителей частоты применяются выключатели на $p-i-n$ -диодах [4, 5]. В одноканальных схемах коммутация выходного сигнала умножителя частоты обеспечивает запираение сигнала на выходе устройства. В многоканальных схемах в одном формирователе имеется несколько каналов умножения частоты, причем каждому каналу соответствует своя частота, а на выходе устройства требуется сигнал с частотой определенного канала. Поэтому возникает необходимость запираения сигнала на выходе каждого канала. Уровень ослабления в выключателях на $p-i-n$ -диодах или на GaAs монолитных СВЧ интегральных схемах варьируется в пределах 20–40 дБ в зависимости от конструктивного исполнения [6 – 8] и количества диодов в схеме. При этом использование в схемах умножителя частоты СВЧ-ключей, выполненных в виде отдельных законченных узлов и обеспечивающих развязку между переключаемыми каналами до 90 дБ, существенно увеличивает габаритные размеры устройства [9] и требует применения широкополосных согласующих элементов для их подключения.

В настоящей работе рассматривается возможность создания СВЧ-умножителя частоты высокой кратности с интегрированным в схему СВЧ-ключом на бескорпусных $n-i-p-i-n$ -диодах.

Разработка умножителя частоты высокой кратности с СВЧ-ключом. Схема СВЧ-умножителя частоты высокой кратности приведена на рис.1 [10].

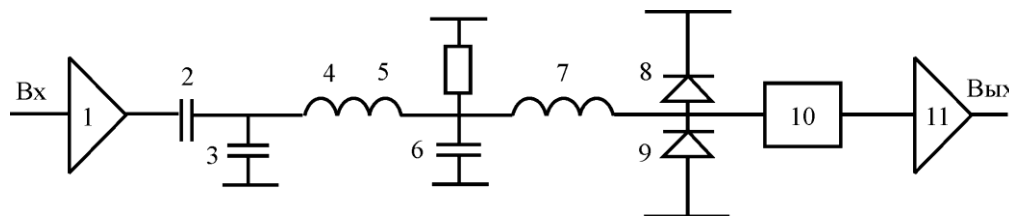


Рис.1. Схема СВЧ-умножителя частоты высокой кратности: 1 – входной усилитель; 2, 3, 6 – конденсаторы $C1$, $C2$, $C3$ соответственно; 4, 7 – переменные индуктивности $L1$, $L2$ соответственно; 5 – резистор $R1$; 8, 9 – умножительные диоды; 10 – полосно-пропускающий многозвенный фильтр; 11 – выходной усилитель [10]

Схема содержит конденсаторы с диэлектриком типа NPO номиналами $C1 = 82$ пФ, $C2 = 20$ пФ, $C3 = 20$ пФ, резистор $R1$, перестраиваемый в диапазоне 0–1288 Ом, переменные индуктивности $L1$ и $L2$, перестраиваемые в диапазоне 0–48 и 0–10 нГн соответственно. Умножительные диоды, в качестве которых применялись серийно выпускаемые планарно-эпитаксиальные диоды 2A604A, включены встречно и параллельно [10]. Это обеспечивает повышение коэффициента преобразования и снижение КСВН системы по сравнению с используемой схемой с одним умножительным диодом [11]. Входной сигнал с частотой 112 МГц поступает на входной усилитель. Последний обеспечивает достижение подаваемого на умножитель требуемого уровня опорного сигнала. Умножитель выполнен на диодах с накоплением зарядов 2A604A.

Для выделения из спектра умноженного сигнала используется настроенный на необходимую 24-ю гармонику выходной полосно-пропускающий многозвенный фильтр, выполненный в виде последовательно расположенных встречных шпильковых резонаторов в микрополосковом исполнении [12]. В полосно-пропускающий фильтр интегрированы $n-i-p-i-n$ -диоды типа 2A505A [13] для коммутации выходного сигнала умножителя частоты высокой кратности в качестве СВЧ-ключа. Усиленный выходным усилителем сигнал с умноженной частотой поступает на выход. Конструкция полосно-пропускающего фильтра с включенными $n-i-p-i-n$ -диодами представлена на рис.2.

В зависимости от расположения интегрированной в полосно-пропускающий фильтр $n-i-p-i-n$ -диодной структуры можно добиться различной степени запираения. При включении $n-i-p-i-n$ -диода с гальванической развязкой от умножительных диодов в один из центральных резонаторов полосно-пропускающего фильтра (см. правый $n-i-p-i-n$ -диод на рис.2) обеспечивается изменение выходной мощности 24-й гармоники ($f = 2,688$ ГГц) в диапазоне от –14,48 до –28,82 дБм при подаче напряжения на $n-i-p-i-n$ -диод 1,7 В. Таким образом достигается относительное изменение мощности выходного сигнала, равное 14 дБ.

При включении $n-i-p-i-n$ -диода наибольший эффект запираения достигается, когда одна n -область диода на входе гальванически соединена с входным элементом микрополоскового фильтра, другая – с первым шпильковым резонатором полосно-пропускающего фильтра и на p -область $n-i-p-i-n$ -диода через нагрузочное сопротивление подается положительное напряжение V_{nirpin} (см. левый $n-i-p-i-n$ -диод на рис.2). При таком включении выходная мощность 24-й гармоники изменяется в диапазоне от –16,5 до –70,3 дБм (см. маркеры $M1$ на рис.3). Таким образом, относительное изменение мощности выходного сигнала составляет ~54 дБ.

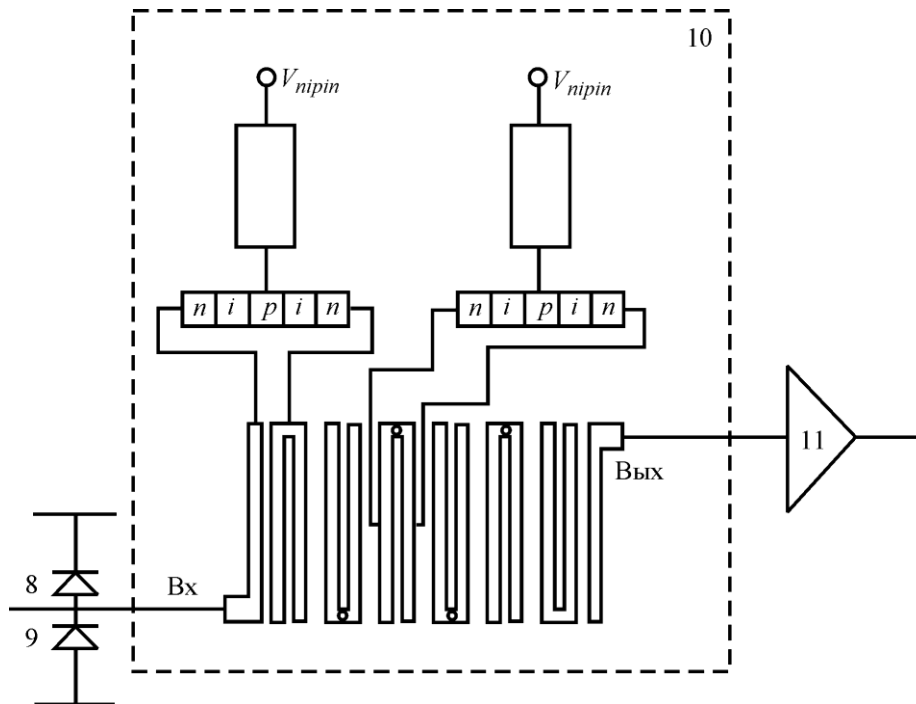
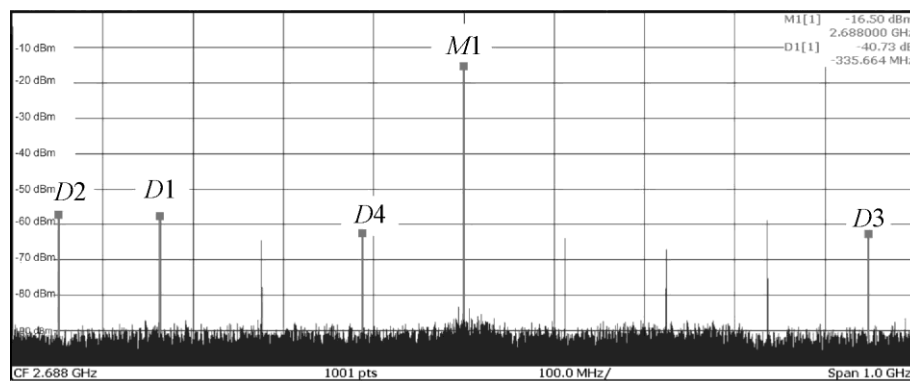
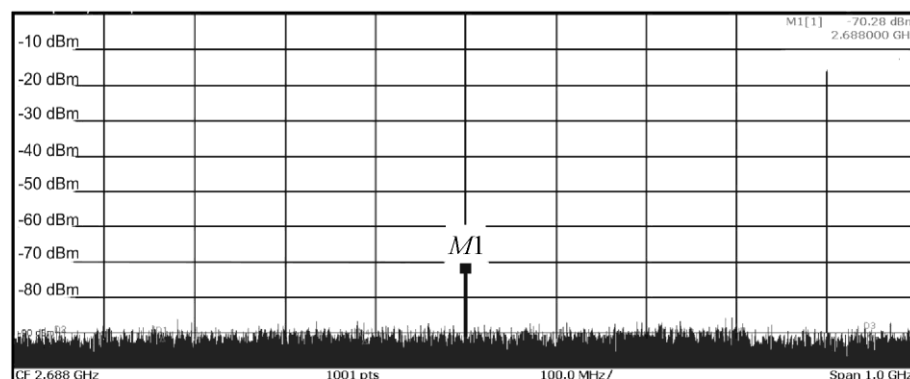


Рис.2. Конструкция полосно-пропускающего фильтра с включенными $n-i-p-i-n$ -диодами



а



б

Рис.3. Спектр выходного сигнала умножителя частоты высокой кратности при включении $n-i-p-i-n$ -диода в первый резонатор полосно-пропускающего фильтра: а – $V_{nipin} = 0$; M1 – 24-я, D4 – 23-я, D1 – 21-я, D2 – 20-я, D3 – 28-я гармоники; б – $V_{nipin} = 1,7$ В; M1 – 24-я гармоника

Для того чтобы достичь технически значимого уровня подавления дискретных составляющих выходного сигнала в умножителях частоты высокой кратности ~60 дБ, необходимо включение нескольких $n-i-p-i-n$ -диодных структур. При одновременном включении $n-i-p-i-n$ -диодов в первый и центральный резонаторы полосно-пропускающего фильтра (см. рис.2) суммарное относительное изменение выходного сигнала превышает 70 дБ при изменении напряжения смещения на каждом из $n-i-p-i-n$ -диодов от 0 до 1,7 В.

Закключение. Значительное изменение мощности выходного сигнала при подаче напряжения на $n-i-p-i-n$ -диод обусловлено двумя причинами. Первая причина – изменение уровня сигнала, прошедшего через полосно-пропускающий фильтр вследствие поглощения или отражения электромагнитной волны от $n-i-p-i-n$ -диодной структуры. Полосно-пропускающий фильтр в данном случае можно рассматривать как разновидность фотонного кристалла [14, 15]. Вторая причина – изменение положения рабочей точки на вольт-амперной характеристике встречно-включенных умножительных диодов (см. рис. 1) при их гальваническом контакте с $n-i-p-i-n$ -диодной структурой.

Включение $n-i-p-i-n$ -диола в полосно-пропускающий фильтр вследствие рассогласования периодической структуры (фильтра) приводит к уменьшению выходной мощности 24-й гармоники от -13,17 до -16,5 дБм при отсутствии смещения на $n-i-p-i-n$ -диодной структуре.

Отметим, что способ увеличения динамического диапазона регулировки уровня выходного умноженного сигнала за счет одновременной подачи соответствующего напряжения на $n-i-p-i-n$ -диодную структуру и умножительные диоды ранее в такого рода устройствах не использовался.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание № 8.7628.2017/8.9) и предприятия АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон».

Литература

1. **Манаев Е.И.** Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и Связь, 1990. – 512 с.
2. **Белов Л.** Новые компоненты СВЧ-устройств фирмы Hittite Microwave //Электроника НТБ. – 2008. – Вып. 5. – С. 63–68.
3. **Кувшинов В., Кочемасов В., Горбачев В.** Устройства на основе ЖИГ-резонаторов – продукция компании Micro Lambda Wireless. Ч. 1. // Электроника НТБ. – 2014. – Вып. 6. – С. 157–160.
4. **Вайсблат А.А.** Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
5. **Тихонюк В., Бражник В.** Быстродействующие бескорпусные $p-i-n$ -диоды. Новая технология изготовления// Электроника НТБ. – 1997. – Вып. 1. – С. 25–27.
6. GaAs MMIC SPDT (Single Pole Double Throw). – URL: <http://www.cel.com/parts.do?command=load&idRootPart=2602> (дата обращения: 16.01.2017).
7. MP202 GaAs МИС двухпозиционного СВЧ-коммутатора 0,1-6 ГГц. – URL: <http://www.micran.ru/productions/MIS/switches/MP202/> (дата обращения: 19.01.2017).
8. Модуль СВЧ М 34216-1. – URL: <http://www.oao-tantal.ru/tovar.php?id=3196> (дата обращения: 19.01.2017).
9. Keysight Technologies 85331B/85332B. Solid State Switches. Technical Overview. – URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-4960EN.pdf?id=823356> (дата обращения: 16.01.2017).
10. СВЧ-умножители высокой кратности / **Д.А. Усанов, В.Н. Посадский, А.В. Скрипаль и др.** // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2014. – Вып. 4. – С. 48–50.
11. **Михайлов А.И., Тяжлов В.С., Григорьев Д.В.** Разработка и экспериментальное исследование СВЧ-умножителя частоты высокой кратности на полупроводниковом диоде//Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2013. – № 3 (518). – С. 76–80.

12. Беляев Б.А., Волошин А.С., Морозов Н.В., Галеев Р.Г. Широкополосная микрополосковая антенна с полосно-пропускающим фильтром на шпильковых резонаторах // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – Вып.5. – С. 65–73.
13. Диоды полупроводниковые СВЧ переключательные 2A505A–2A505B. – URL: <http://www.eandc.ru/pdf/diod/2a505.pdf> (дата обращения: 23.01.2017).
14. Фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2008. – №5. – С. 25–32.
15. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов и др. // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – Вып. 8. – С. 143–148.

Поступила после доработки 25.01.2017 г.; принята к публикации 21.03.2017 г.

Усанов Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83), UsanovDA@info.sgu.ru

Скрипаль Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83), SkripalA_V@info.sgu.ru

Посадский Виктор Николаевич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» (Россия, 410033, г. Саратов, ул. им. Панфилова И.В., д.1), заведующий базовой кафедрой твердотельной электроники СВЧ Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83), afazotron@volgaline.ru

Тяжлов Виталий Семёнович – кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора по научной работе АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» (Россия, 410033, г. Саратов, ул. им. Панфилова И.В., д.1), доцент базовой кафедры твердотельной электроники СВЧ Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83), afazotron@volgaline.ru

Григорьев Дмитрий Владимирович – начальник сектора АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» (Россия, 410033, г. Саратов, ул. им. Панфилова И.В., д.1), аспирант кафедры физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83), Grigorievdy@bk.ru

References

1. Manaev E.I. *Osnovy radioelektroniki* [Fundamentals of Radioelectronics]. Moscow, Radio i Svyaz', 1990. 512 p. (In Russian).
2. Belov L. Novye komponenty SVCH-ustrojstv firmy Hittite Microwave [Hittite Microwave's New Microwave Systems Components]. *Elektronika NTB – Electronics: science, technology, business*, 2008, iss. 5, pp. 63–68. (In Russian).
3. Kuvshinov V., Kochemasov V., Gorbachev V. Ustrojstva na osnove ZHIG-rezonatorov – produktsiya kompanii Micro Lambda Wireless. Ch. 1 [Systems on the YIG resonator base. Micro Lambda Wireless' products. Part 1]. *Elektronika NTB – Electronics: science, technology, business*, 2014, iss. 6, pp. 157–160. (In Russian).

4. Vajsblat A.A. *Kommutatsionnye ustrojstva SVCH na poluprovodnikovyykh diodakh* [Switching microwave devices on semiconductor diodes]. Moscow, Radio i Svyaz' 1987. 120 p. (In Russian).
5. Tikhonyuk V., Brazhnik V. Bystrodejstvuyushhie beskorpusnye p–i–n-diody. *Novaya tekhnologiya iz-gotovleniya* [High Speed Packageless PIN Diodes. New Manufacturing Technology]. *Elektronika NTB – Electronics: science, technology, business*, 1997, iss.1, pp. 25–27. (In Russian).
6. GaAs MMIC SPDT (Single Pole Double Throw). Available at: <http://www.cel.com/parts.do?command=load&idRootPart=2602> (accessed:16.01.2017).
7. *MP202 GaAs MIS dvukhpozitsionnogo SVCH-kommutatora 0,1-6 GGts* [MP202 GaAs Monolithic integrated circuits of a two-position microwave switch of 0.1-6 GHz]. Available at: <http://www.micran.ru/productions/MIS/switches/MP202/> (accessed: 19.01.2017). (In Russian).
8. *Modul' SVCH M 34216-1* [Microwave module M 34216-1]. Available at: <http://www.oao-tantal.ru/tovar.php?id=3196> (accessed: 19.01.2017). (In Russian).
9. Keysight Technologies 85331B/85332B. Solid State Switches. Technical Overview. Available at: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-4960EN.pdf?id=823356> (accessed: 16.01.2017).
10. Usanov D.A., Posadskij V.N., Skripal' A.V., Tyazhlov V.S., Grigor'ev D.V. SVCH-umnozhiteli vysokoj kratnosti [High ratio microwave frequency multipliers]. *Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika – Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics*, 2014, iss. 4, pp. 48–50. (In Russian).
11. Mikhajlov A.I., Tyazhlov V.S., Grigor'ev D.V. Razrabotka i ehksperimental'noe issledovanie SVCH-umnozhitelya chastoty vysokoj kratnosti na poluprovodnikovom diode [Development and experimental study of a high ratio microwave multiplier on a semiconductor diode]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCH-tehnika – Electronic engineering. Series 1: Microwave technology*, 2013, no. 3 (518), pp. 76–80.
12. Belyaev B.A., Voloshin A.S., Morozov N.V., Galeev R.G. SHirokopolosnaya mikropoloskovaya antenna s polosno-propuskayushhim fil'trom na shpil'kovykh rezonatorakh [A new design of a miniature filter on microstrip resonators with an interdigital structure of conductors]. *Pis'ma v ZHTF – Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, iss.5, pp. 65–73. (In Russian).
13. *Diody poluprovodnikovye SVCH pereklyuchatel'nye 2A505A–2A505V* [Microwave switching semiconductor diodes 2A505A–2A505V]. Available at: <http://www.eandc.ru/pdf/diod/2a505.pdf> (accessed: 3.01.2017). (In Russian).
14. Usanov D.A., Skripal' A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Kulikov M.YU. Fotonnye struktury i ikh ispol'zovanie dlya izmereniya parametrov materialov [Photon Structures and Their Use]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronic*, 2008, no.5, pp. 25–32. (In Russian).
15. Usanov D.A., Skripal' A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Kulikov M.YU., Ponomarev D.V. Mikropoloskovye fotonnye kristally i ikh ispol'zovanie dlya izmereniya parametrov zhidkostey [Microstrip photonic crystals used for measuring parameters of liquids]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 80, iss. 8, pp. 143–148. (In Russian).

Submitted 25.01.2017; accepted 21.03.2017.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2014 гг. доступны на сайте
Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru