

УДК 621.372.2

И.В. Хмара, Д.С. Данилов, В.Н. Гребенюк, А.С. Загородний, С.Н. Шарангович

## Сверхширокополосный рin-диодный диплексерный переключатель на GaAs

Предложена схема сверхширокополосного рin-диодного переключателя на два канала с разными диапазонами рабочих частот: 0–18 и 18–26,5 ГГц. Представлена модель топологии монолитной интегральной схемы (МИС), выполненной на основе квазивертикальных GaAs рin-диодов технологии АО «НПФ «Микран». Выполнено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных измерений изготовленных МИС. Использование интегральной схемы переключателя возможно в составе коммутационных узлов измерительной СВЧ-техники.

**Ключевые слова:** переключатель, коммутатор, сверхширокополосный, диплексер, рin-диод, монолитная интегральная схема, арсенид галлия.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-3-27-31

Для коммутации СВЧ-сигналов нередко используют переключатели на основе рin-диодов или транзисторов [1]. Для обеспечения работы на высоких частотах и достижения широкого диапазона частот к нелинейным элементам и схемотехническим решениям предъявляются довольно сложные и противоречивые требования. Требование работы от постоянного тока до десятков гигагерц нередко существенно усложняет задачу.

Работа посвящена разработке схемотехнического решения переключателя СВЧ-сигналов на два канала с обеспечением фильтрации частот разных диапазонов в каждом канале. Другими словами, реализация в одной схеме диплексера и переключателя.

Диплексер – это трехпортовое пассивное устройство, выполняющее мультиплексирование (объединение) и демultipлексирование (разделение) СВЧ-сигнала по частоте. Обычно он имеет два канала: низкочастотный (НЧ) и высокочастотный (ВЧ), которые настраиваются на необходимый диапазон частот. Настройка происходит с помощью установки в тракты каналов селективных устройств – СВЧ-фильтров [2].

Большинство реализаций данных устройств приходится на микрополосковые структуры в различных исполнениях. Используются они в основном для разделения и суммирования сигналов, поступающих с одной приемопередающей антенны. Как правило, их применяют в сотовой связи различного поколения в диапазоне 800–2600 МГц [3]. Более широкополосные схемы представлены в работах [4–6]. Они реализованы на подвесных микрополосковых линиях передач, обеспечивают диапазон частот от 0 до 100 ГГц и предназначены для использования в беспроводных системах и в блоках измерительной аппаратуры.

Стоит отметить о существовании переключаемых диплексеров. В отечественной литературе данные устройства широко не представлены. В зарубежных источниках есть ряд схем, где описывается их основное отличие от пассивного диплексера [7–10]. В данных устройствах применяется встроенный коммутационный элемент, благодаря которому можно включать/отключать дополнительные плечи диплексера, имеющие различные полосы частот.

Диплексерный переключатель схож с типовым коммутатором, в порты которого устанавливаются селективные компоненты. Данная реализация позволяет осуществлять различные полосы пропускания на разных каналах коммутатора. Устройства с такой реализацией в литературе не представлены.

В качестве коммутационного элемента переключатели зачастую используют GaAs-рin-диоды или GaAs-полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ) [11, 12]. По сравнению с ПТШ, рin-диоды обладают значительно меньшей удельной емкостью в закрытом состоянии и меньшим удельным сопротивлением в открытом состоянии, что дает им основное преимущество для эффективной работы на высоких частотах (до 100 ГГц, в то время как коммутаторы на ПТШ, в зависимости от длины затвора, используются на практике в диапазоне до 60 ГГц) [13]. Кроме того, рin-диодные переключатели характеризуются меньшими вносимыми потерями открытого канала и более высокой коммутируемой мощностью в сравнимой полосе частот [11, 12].

Представлены результаты разработки диплексерного переключателя на базе GaAs-рin-диодной технологии, который обеспечивает коммутацию двух диапазонов: НЧ-тракта от постоянного тока до 18 ГГц и ВЧ-тракта от 18 до 26,5 ГГц с минимальными вносимыми потерями.

### Разработка диплексерного переключателя

При разработке диплексерного переключателя за основу была взята схема классического рin-диодного двухканального коммутатора, которая представлена на рис. 1 [12, 14, 15]. Вносимые потери такого переключателя, реализованного в интегральном исполнении, обычно не превышают 1–2 дБ и имеют хорошую изоляцию в широкой полосе частот [11, 12, 16].

В области низких частот около 10 МГц и ниже (зависит от размера I-слоя диода) при прямом прохождении сигнала через последовательно включенный рin-диод возникают нелинейные искажения и большие вносимые потери [1, 15]. Исходя из этого, главным недостатком данной схемы (рис. 1) является невозможность работы на самых низких частотах. Установленные на входах каждого порта конденсаторы также ограничивают нижнюю границу рабочей частоты.

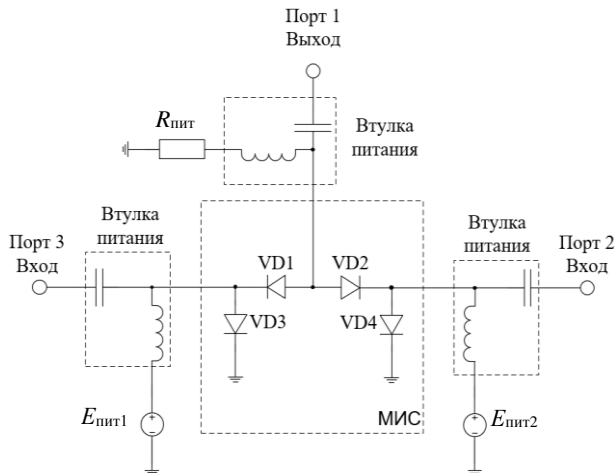


Рис. 1. Принципиальная схема коммутатора на 2 канала

На рис. 2 представлены разработанная схема и модель спроектированной топологии МИС pin-диод-

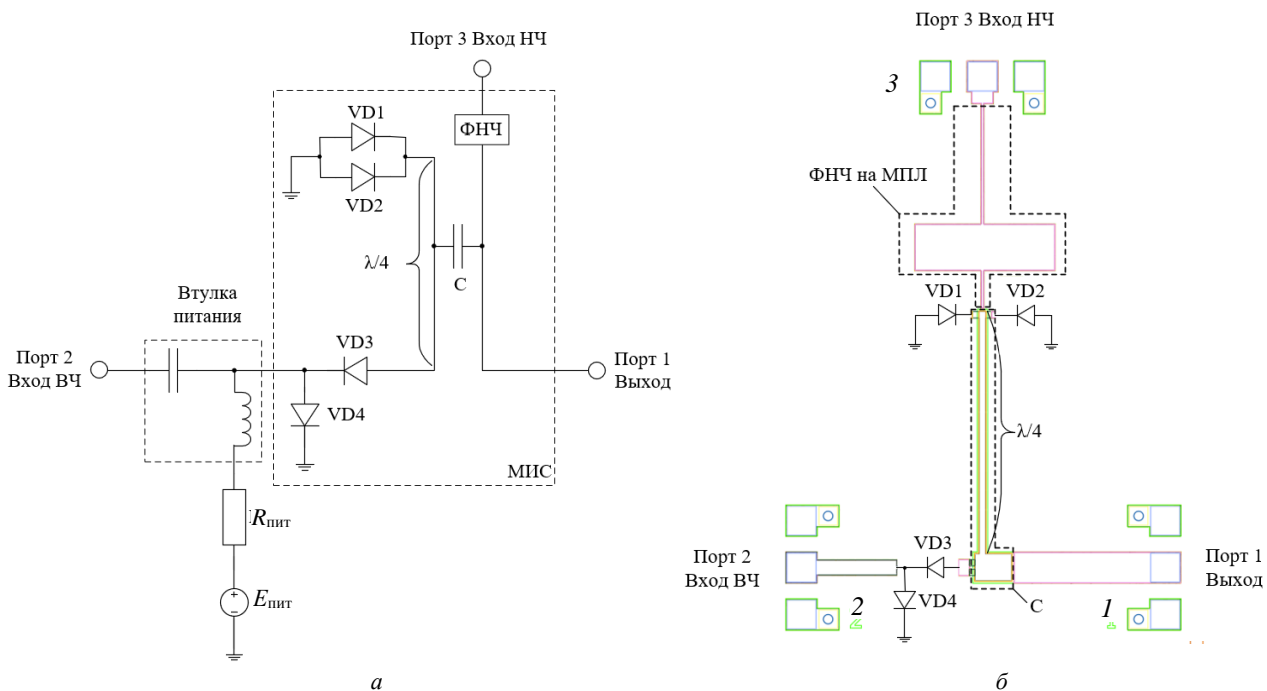


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и модель топологии (б) дуплексного переключателя

Диапазон рабочих частот ВЧ-тракта (18–26,5 ГГц) определяется короткозамкнутым четвертьволновым шлейфом. Оба плеча разделены по постоянному току через топологически реализованный конденсатор  $C$ . По верхней его обкладке протекает управляющий ток диодов, а по нижней распространяются сигналы НЧ-канала. Данная реализация позволяет не использовать блокировочные конденсаторы на портах 1 и 3. Ко всему прочему короткозамкнутый шлейф длиной  $\lambda/4$  (верхняя обкладка конденсатора) обеспечивает изоляцию между портами 3–2 в режиме работы ВЧ-канала по формуле

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_0^2}{Z_{\text{н}}},$$

ного дуплексного переключателя диапазона 0–18–26,5 ГГц [17].

Переключение каналов предложенной схемы осуществляется внешней цепью питания посредством постоянного тока, величина которого ограничивается резистором  $R_{\text{пит}}$ . Подача положительного напряжения через втулку питания обеспечивает режим работы НЧ-канала. В этом случае pin-диод  $VD4$  открыт (смещен в область положительного напряжения вольт-амперной характеристики),  $VD3$  закрыт, что препятствует прохождению сигнала с порта 2 на порт 1.

Отрицательное напряжение, поданное через втулку питания, приведет к обратной ситуации, тем самым обеспечивая режим работы ВЧ-канала. При этом pin-диоды  $VD1, VD2$  будут открыты.

НЧ-канал включает в свой тракт фильтр нижних частот (ФНЧ), который определяет его полосу пропускания (0–18 ГГц).

где  $Z_{\text{вх}}$  – входное сопротивление шлейфа;  $Z_0$  – волновое сопротивление на участке;  $Z_{\text{н}}$  – сопротивление нагрузки шлейфа. Согласно формуле, для увеличения изоляции, которая обеспечивается путем увеличения  $Z_{\text{вх}}$ , следует стремиться к уменьшению  $Z_{\text{н}}$ .

Включение двух pin-диодов  $VD1$  и  $VD2$  на землю и обеспечение их «открытого» состояния путем протекания управляющего тока позволяет достичь близкого к нулю эквивалентного сопротивления и как следствие высокого уровня развязки. Таким образом, нивелируется необходимость pin-диоода на проход в тракте НЧ, как это обычно применимо в классических схемах переключателей (см. рис. 1). Совокупно это решает главную задачу – прохождение через данный канал сигналов низкой частоты вплоть до постоянного тока.

**Результаты и обсуждение**

На основе разработанной модели диплексерного переключателя были изготовлены тестовые образцы МИС. В качестве коммутационного элемента использовался рin-диод с диаметром базы 26 мкм производства АО «НПФ «Микран».

Измерения МИС проводились на пластине при помощи зондовой станции и векторного анализатора цепей. Измерялись данные в двух режимах работы в

диапазоне от 500 МГц до 26,5 ГГц. Переключение каналов обеспечивалось через втулку питания на 2-м порту при значениях тока  $\pm 10$  мА.

Графики сравнения электродинамического моделирования и измерения на кристалле представлены на рис. 3–5: потери на проход (см. рис. 3), возвратные потери (см. рис. 4), изоляция между каналами (см. рис. 5).

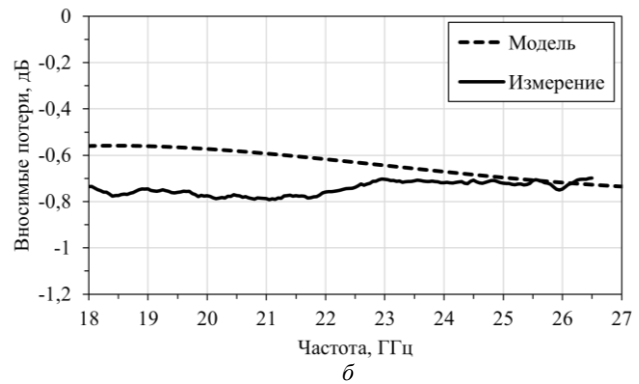
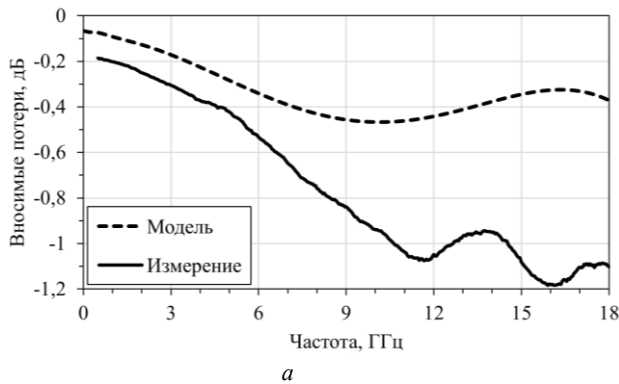


Рис. 3. Вносимые потери каналов: НЧ: 0–18 ГГц (а); ВЧ: 18–26,5 ГГц (б)

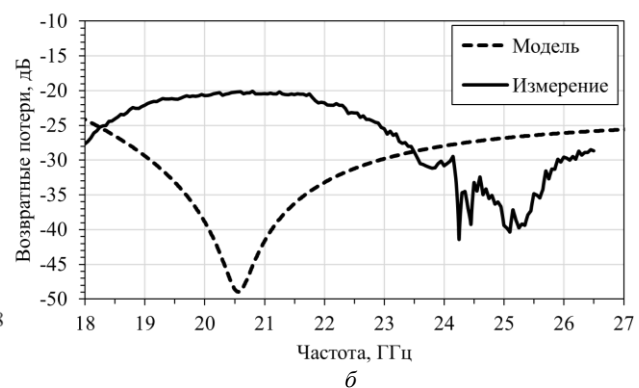
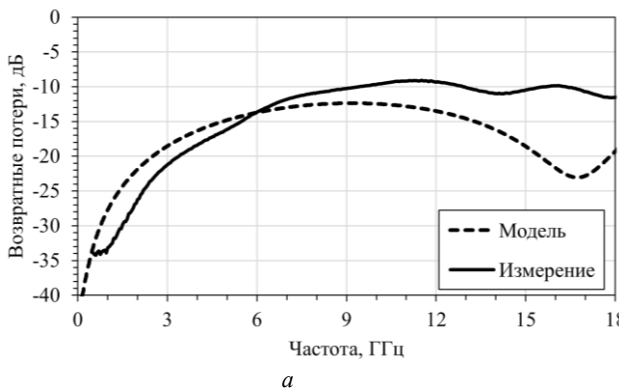


Рис. 4. Возвратные потери порта 1 при работе каналов: а – НЧ: 0–18 ГГц ; б – ВЧ: 18–26,5 ГГц

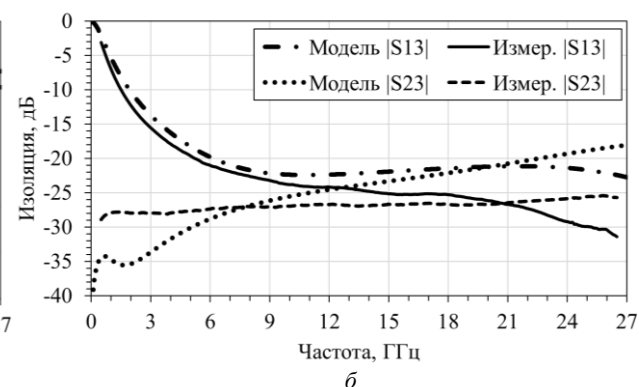
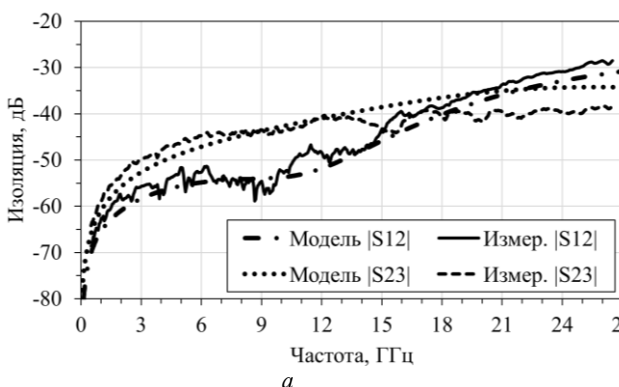


Рис. 5. Изоляция между каналами при работе плеча: а – НЧ: 0–18 ГГц ; б – ВЧ: 18–26,5 ГГц

Исходя из результатов измерений (см. рис. 3–5), можно говорить о работоспособности предложенной схемы в заданном диапазоне частот. Потери на проход для обоих каналов составили не более 1,2 дБ, возвратные потери – не более –9 дБ, благодаря хорошо согласованному тракту как НЧ-, так и ВЧ-канала. Изоляция между портами 2–3 при работе ВЧ-канала составила не менее 25 дБ. Это удалось обеспечить за

счет реализованной короткозамкнутой четвертьволновой линии. Изоляция между портами 1–3 при работе ВЧ-канала не обеспечивается во всем диапазоне частот. Сигналы с частотами менее 3 ГГц будут проходить на выход порта 3 с недостаточным ослаблением. В связи с этим использование данной микросхемы предполагает поочередную подачу сигнала на входы 2 и 3.

### Заключение

В результате предложенного схемотехнического решения, численного моделирования и экспериментального исследования диплексерного переключателя сверхширокополосных сигналов были изготовлены тестовые образцы МИС. Результаты измерения подтвердили работоспособность предложенной схемы. Потери на проход составили не более 1,2 дБ, возвратные потери – не более –9 дБ, изоляция не менее 25 дБ в диапазоне частот от 0 до 26,5 ГГц.

Разработанная МИС используется в коммутационных узлах контрольно-измерительной аппаратуры АО «НПФ «Микран».

### Литература

1. Дзехцер Г.Б. p-i-n-диоды в широкополосных устройствах СВЧ / Г.Б. Дзехцер, О.С. Орлов. – М.: Сов. радио, 1970. – 200 с.
2. Cameron R.J. Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications / R.J. Cameron, C.M. Kudsia, R.R. Mansour. – 2nd ed. – Hoboken: Wiley & Sons, 2018. – 929 p.
3. Хачатрян Л.Х. Проектирование сверхвысокочастотного диплексера с высокой изоляцией выходных каналов / Л.Х. Хачатрян, А.Г. Степанян // Вестник НПУА. – 2022. – № 1. – С. 106–113.
4. Ashiq I. Ultra-broadband contiguous planar DC-35–65 GHz diplexer using softboard suspended stripline technology / I. Ashiq, A.P.S. Khanna // 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). – 2013. – P. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2013.6697689.
5. Ashiq I. A novel ultra-broadband DC-36-to-66-GHz hybrid diplexer using waveguide and SSL technology / I. Ashiq, A. Khanna // 2014 44th European Microwave Conference. – 2014. – P. 1111–1114. DOI: 10.1109/EuMC.2014.6986634.
6. Ashiq I. A novel planar contiguous diplexer DC-67–100 GHz using Organic Liquid Crystal Polymer (LCP) / I. Ashiq, A.P.S. Khanna // 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – 2015. – P. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7167091.
7. Chuang M.-L. Microstrip multiplexer and switchable diplexer with joint T-shaped resonators / M.-L. Chuang, M.-T. Wu // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. – 2014. – P. 309–311. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2309084.
8. Microstrip switchable diplexer based on dual-mode stub-loaded stepped-impedance resonators with three operating states / C.-F. Chen, R.-Y. Chen, K.-W. Zhou, Y.-H. He // Electronics Letters. – 2019. – Vol. 55, No. 22. – P. 1188–1190.
9. Switchable diplexer with high isolation using terminated T-shaped resonator for 5G communications / C. Teng, S.-K. Ho, K.-W. Tam, W.-W. Choi // In IEEE MTT-S Int. Wireless Symposium (IWS). – 2019. – P. 1–3. DOI: 10.1109/IEEE-IWS.2019.8804141.
10. Switchable diplexer based on coupling control / J.-X. Xu, W.-L. Zhan, H.-Y. Li, X.Y. Zhang // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2021. – P. 166–170. DOI: 10.1109/TCSII.2020.3003913.
11. Mizutani H. DC-110-GHz MMIC Traveling-Wave Switch / H. Mizutani, Y. Takayama // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2000. – Vol. 48, No. 5. – P. 840–845. DOI: 10.1109/22.841881.
12. Гушин В.А. СВЧ МИС на основе GaAs-pin-диодов для управления амплитудой сигнала в диапазоне частот 4–27 ГГц / В.А. Гушин, И.В. Юнусов, А.Ю. Плотникова // Доклады ТУСУР. – 2014. – Т. 33, № 3. – С. 70–74.
13. Монолитные интегральные схемы GaAs-pin-диодных коммутаторов СВЧ / И.В. Юнусов, А.М. Ющенко, А.Ю. Плотникова и др. // Сб. докла. Всерос. конф. «Микроэлектроника СВЧ». – СПб., 2012. – С. 93–96.
14. The pin diode circuit designer's handbook. – Microsemi-Corporation, 1998. – 137 p. [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.ieee.li/pdf/essay/pin\\_diode\\_handbook.pdf](https://www.ieee.li/pdf/essay/pin_diode_handbook.pdf), свободный (дата обращения: 12.06.2023).
15. Hiller G. Design with PIN Diodes: Application Note AG312. – M/A-COM. – 18 p. [Электронный ресурс]. – URL: <https://cdn.macom.com/applicationnotes/AG312.pdf>, свободный (дата обращения: 16.06.2023).
16. 10-MHz-to-70-GHz Ultra-Wideband Low-Insertion-Loss SPST and SPDT Switches Using GaAs pin Diode MMIC Process / H.-E. Liu, X. Lin, H.-Y. Chang, Y.-C. Wang // 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). – 2018. – P. 1217–1219. DOI: 10.23919/APMC.2018.8617438.
17. Схемное решение для сверхширокополосных переключаемых GaAs-pin-диодных диплексеров / И.В. Хмара, В.Н. Гребенюк, Д.С. Данилов, А.С. Загородний, С.Н. Шарангович // Научная сессия ТУСУР–2023: сб. избр. статей междунар. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 ч. – Ч. 1. – Томск: ТУСУР; В-Спектр, 2023. – С. 72–77.

#### Хмара Иоанн Владимирович

Аспирант каф. сверхвысоких частот и квантовой радиотехники (СВЧиКР) Томского государственного ун-та систем управления и радиотехники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-870-49-22  
Эл. почта: hmara.iv@micran.ru

#### Данилов Даниил Сергеевич

Аспирант каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-953-923-68-46  
Эл. почта: danilov.ds@micran.ru

#### Гребенюк Владимир Николаевич

Руководитель группы разработки СВЧ-узлов и модулей департамента информационно-измерительных систем АО «НПФ «Микран» Кирова пр-т, 51д, г. Томск, Россия, 634041  
Тел.: +7 (382-2) 90-00-29, внут.: 2333  
Эл. почта: gvn@micran.ru

#### Загородний Андрей Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. СВЧиКР ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 90-00-29, внут.: 2317  
Эл. почта: andreyzag@micran.ru

#### Шарангович Сергей Николаевич

Канд. физ.-мат. наук, проф., с.н.с. каф. СВЧиКР ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-2195-2786  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-18  
Эл. почта: shr@tusur.ru

Khmara I.V., Danilov D.S., Grebenyuk V.N.,  
Zagorodny A.S., Sharangovich S.N.

### Ultra-Wideband pin-diode diplexer switch on GaAs

The article presents a circuit of an ultra-wideband pin-diode switch for two channels with different operating frequency ranges: DC-18 GHz and 18–26.5 GHz. A topology model of a microwave monolithic integrated circuit (MMIC) based on quasi-vertical GaAs pin diode technology of Micran JSC is described. Comparison of simulation results and experimental measurement data of manufactured MMICs is performed. The use of the integrated circuit of the switch is possible as a part of the switching nodes of the measuring microwave equipment.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-3-27-31

### References

1. Dzekhtser G.B., Orlov O.S. *p-i-n diody v shirokopolosnykh ustroystvakh SVCh* [p-i-n diodes in broadband microwave devices]. Moscow, Sov. radio, 1970, 200 p. (in Russ.).
2. Cameron R.J., Mansour R.R. *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications*. 2nd ed, Hoboken: Wiley & Sons, 2018, 929 p.
3. Khachatryan L.Kh., Stepanyan A.G. *Proektirovanie sverkhvysokochastotnogo dipleksera s vysokoi izolyatsiei vykhodnykh kanalov* [Designing an ultrahigh frequency diplexer with high isolation of output channels]. *Proceedings of NPUA*, 2022, no. 1, pp. 106–113 (in Russ.).
4. Ashiq I., Khanna A.P.S. Ultra-broadband contiguous planar DC-35–65 GHz diplexer using softboard suspended stripline technology. *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2013, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2013.6697689.
5. Ashiq I., Khanna A. A novel ultra-broadband DC-36-to-66-GHz hybrid diplexer using waveguide and SSL technology. *2014 44th European Microwave Conference*, 2014, pp. 1111–1114. DOI: 10.1109/EuMC.2014.6986634.
6. Ashiq I., Khanna A.P.S. A novel planar contiguous diplexer DC-67-100 GHz using Organic Liquid Crystal Polymer (LCP) *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7167091.
7. Chuang M.-L., Wu M.-T. Microstrip multiplexer and switchable diplexer with joint T-shaped resonators *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, pp. 309–311. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2309084.
8. Chen C.-F., Chen R.-Y., Zhou K.-W., He Y.-H. Microstrip switchable diplexer based on dual-mode stub-loaded stepped-impedance resonators with three operating states *Electronics Letters*, 2019, vol. 55, no. 22, pp. 1188–1190.
9. Teng C., Ho S.-K., Tam K.-W., Choi W.-W. Switchable diplexer with high isolation using terminated T-shaped resonator for 5G communications *In IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, 2019, pp. 1–3. DOI: 10.1109/IEEE-IWS.2019.8804141.8.
10. Xu J.-X., Zhan W.-L., Li H.-Y., Zhang X.6Y. Switchable diplexer based on coupling control *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, pp. 166–170. DOI: 10.1109/TCSII.2020.3003913.
11. Mizutani H., Takayama Y. DC–110-GHz MMIC Traveling-Wave Switch *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, vol. 48, no. 5. pp. 840–845. DOI: 10.1109/22.841881.
12. Yunusov I.V., Yushchenko A.M., Plotnikova A.Yu., Arykov V.S., Barov A.A. *SVCh MIS na osnove GaAs-pin-diodov dlya upravleniya amplitudoi signala v diapazone chastot 4–27 GGts* [MMIC based on GaAs-pin diodes for controlling the signal amplitude in the frequency range 4–27 GHz]. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 3, pp. 70–74 (in Russ.).

13. Gushchin V.A., Yunusov I.V., Plotnikova A.Yu. *Monolitnye integral'nye skhemy GaAs-pin-diodnykh kom-mutatorov SVCh* [Monolithic integrated circuits of GaAs-pin-diode microwave switches]. *Scientific and Technical Conference «Microwave microelectronics»*, St. Petersburg, 2012, pp. 93–96 (in Russ.).

14. The pin diode circuit designer's handbook. *Microsemi-Corporation*, 1998. 137 p. Available at: [https://www.ieee.li/pdf/essay/pin\\_diode\\_handbook.pdf](https://www.ieee.li/pdf/essay/pin_diode_handbook.pdf), free (Accessed: June 12, 2023).

15. Hiller G. Design with PIN Diodes: Application Note AG312. *M/A-COM*. 18 p. Available at: <https://cdn.macom.com/applicationnotes/AG312.pdf>, free (Accessed: June 16, 2023).

16. Liu H.-E., Lin X., Chang H.-Y., Wang Y.-C. 10-MHz-to-70-GHz Ultra-Wideband Low-Insertion-Loss SPST and SPDT Switches Using GaAs-pin-Diode MMIC Process. *2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2018, pp. 1217–1219. DOI: 10.23919/APMC.2018.8617438.

17. Khmara I.V., Grebenyuk V.N., Danilov D.S., Zagorodny A.S., Sharangovich S.N. *Skhemo reshenie dlya sverkhshirokopolosnykh pereklyuchaemykh GaAs pin-diodnykh diplekserov* [Circuit solution for ultra-wideband switchable GaAs pin-diode diplexers] *Scientific and Technical Conference «TUSUR Scientific Session»*, in 3 parts, part 1, Tomsk: TUSUR; V-Spectr, 2023, pp. 72–77 (in Russ.).

### Ioann V. Khmara

Postgraduate student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-870-49-22  
E-mail: hmara.iv@micran.ru

### Daniil S. Danilov

Postgraduate student, Department of Design of Units and Components for Radioelectronic Systems, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-953-923-68-46  
Email: danilov.ds@micran.ru

### Vladimir N. Grebenyuk

Head of the Development group of microwave nodes and modules, Micran JSC  
51d, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634041  
Phone: +7 (382-2) 90-00-29, ext.: 2333  
Email: gvn@micran.ru

### Andrey S. Zagorodny

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 90-00-29, ext.: 2317  
Email: andreyzag@micran.ru

### Sergey N. Sharangovich

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Senior Researcher, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-2195-2786  
Phone: +7 (382-2) 70-15-18  
Email: shr@tusur.ru