

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОВОЛОЧНОЙ И ЛЕНТОЧНОЙ РАЗВАРКИ, А ТАКЖЕ КОМПАУНДА НА ПАРАМЕТРЫ ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА PIN-ДИОДАХ

Э.В. Кяримов

Ф.В. Тарасенко

Д.В. Андреев

kyarimov.e@ya.ru

fedor.vl.taras@gmail.com

dmitrii\_andreev@bmstu.ru

SPIN-код: 3507-5569

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрены различные виды реализации и производительность высокочастотного однополюсного четырехнаправленного переключателя на основе данных, полученных путем измерений его основных параметров, а именно коэффициента стоячей волны по напряжению и обратного затухания или развязки, с учетом конструктивных особенностей. В конструкции переключателя используются бескорпусные pin-диоды, разваренные к печатной плате проволокой или лентой и покрытые компаундом, который позволяет существенно повысить надежность и сроки эксплуатации прибора. Диапазон рабочих частот четырехканального переключателя на pin-диодах составляет 1...30 МГц, что позволяет применять его для изменения режима работы высокочастотных устройств связи.

### Ключевые слова

Четырехканальный переключатель, pin-диод, коэффициент стоячей волны по напряжению, компаунд, проволочная разварка, ленточная разварка, двухпортовые измерения, высокочастотный диапазон

Поступила в редакцию 29.05.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

---

Переключатели на основе дискретных pin-диодов нашли широкое применение при решении многих практических задач. Такие диоды идеально подходят для переключателей передачи-приема по причине благоприятного сочетания стоимости, размера и скорости переключения [1].

Разварка бескорпусных элементов проволокой или лентой, а также применение компаунда для увеличения срока службы устройства актуальны для производства сверхвысокочастотных (СВЧ) и высокочастотных (ВЧ) устройств по сей день.

*Цель исследований* — выявление наличия/отсутствия паразитных отклонений основных параметров ВЧ-переключателя для каналов с диодами с проволочной или ленточной разваркой, а также с применением или без применения компаунда.

В процессе исследований были решены следующие задачи:

– реализован четырехканальный переключатель для проведения исследований путем подбора компонентов: конденсаторов и индуктивностей;

– выполнен сравнительный анализ основных параметров переключателя для каналов с проволочной и ленточной разваркой;

– проведен сравнительный анализ основных параметров переключателя для каналов с компаундом и без него.

Объектом исследований служит четырехканальный переключатель на рiп-диодах.

В процессе исследований проведены эксперименты и выполнен анализ полученных данных.

Экспериментальный стенд состоит из двухканального источника питания GW Instek GPS-72303, измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения «Обзор-304/1», внешнего персонального компьютера и набора соединительных принадлежностей.

Источник GW Instek GPS-74303 обеспечивает внешнее питание для открытия/закрытия каналов переключателя.

Измеритель «Обзор-304/1» предназначен для подачи на канал переключателя от соединителя одного из портов испытательного сигнала на заданной частоте, последующего измерения амплитуды и фазы, прошедших и отраженных исследуемым устройством сигналов, и сравнения их с амплитудой и фазой испытательного сигнала.

Расчеты по результатам измерения выполнены на внешнем управляющем персональном компьютере, индикация осуществляется на его экране. Измеритель «Обзор-304/1» работает под управлением программы S2VNA, с помощью которой построены графики зависимостей в процессе исследований.

Электрическая принципиальная схема экспериментальной модели четырехканального переключателя на рiп-диодах показана на рис. 1. Работа схемы основана на перемене сопротивления рiп-диодов от 5 кОм (отрицательное смещение) до 0,5 Ом (положительное смещение) при изменении напряжения смещения.

Плата переключателя была собрана в виде экспериментальной модели. Она представлена на рис. 2.

Подводка прямого и обратного смещения обозначены как «+» и «-» соответственно. Канал открывается прямым смещением — током примерно 30 мА (напряжение около 0,9 В на диоде). В это время закрываются остальные каналы обратным смещением около 30 В (с нулевым током). На неиспользуемых выходах обеспечивается согласование 50 Ом. С помощью джамперов (миниатюрных коммутационных элементов-перемычек) устанавливается канал для измерения, например, на рис. 2 канал 2 открыт, а каналы 1, 3, 4 заперты.

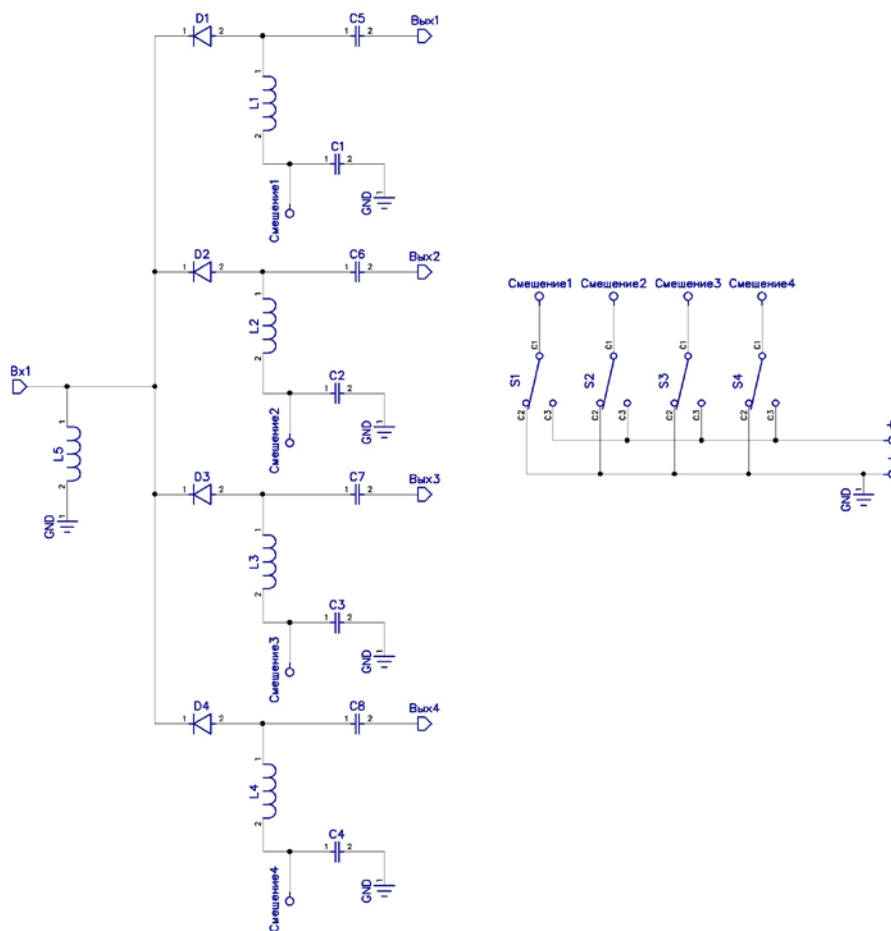


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема четырехканального переключателя на pin-диодах

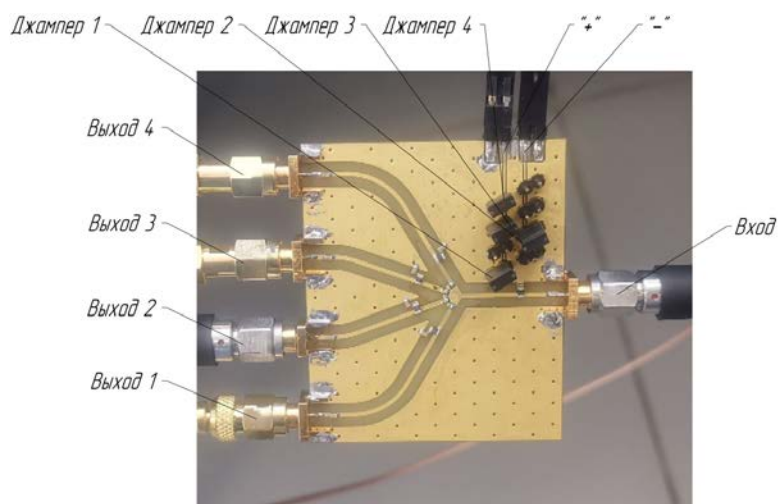


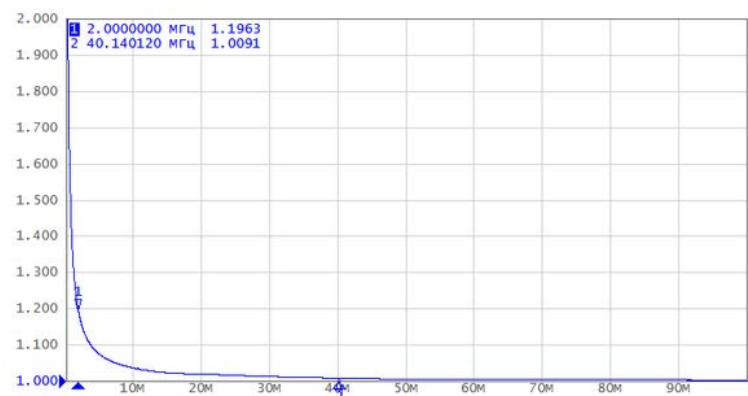
Рис. 2. Экспериментальная модель платы переключателя



*a*



*б*



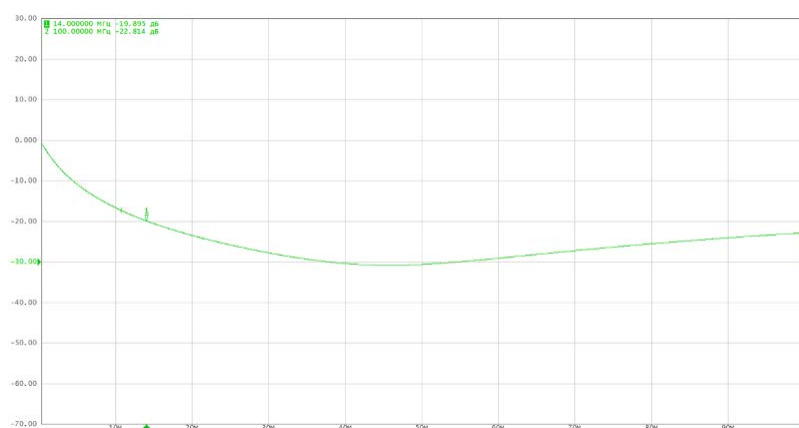
*в*

**Рис. 3.** Результаты измерений КСВН конденсаторов различной емкости:  
*a* — 33 нФ; *б* — 22 нФ; *в* — 10 нФ

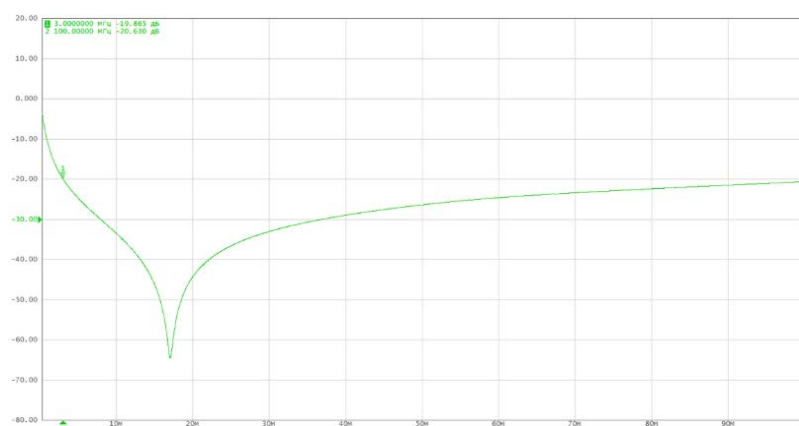
Для реализации переключателя необходим подбор компонентов, чтобы обеспечить на выходе стабильные значения основных параметров [2–4]. В частности, к экспериментальной модели производился подбор конденсаторов

и индуктивностей. Было выбрано три варианта конденсаторов: емкостью 33 и 22 нФ в корпусе 1206 и 10 нФ в корпусе 0603. Подбор осуществлялся посредством просмотра параметров компонентов в ВЧ-диапазоне на измерителе комплексных коэффициентов передачи и отражения «Обзор-304/1», который позволяет проводить двухпортовые измерения [5–7]. Результаты измерений КСВН конденсаторов 33, 22 нФ и 10 нФ представлены на рис. 3.

Для всех конденсаторов коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) не превышает 1,2 в диапазоне 2...100 МГц. Для переключателя будет использоваться конденсатор емкостью 10 нФ, поскольку он показал лучшие результаты измерений. Далее необходим подбор катушек индуктивности из выбранных трех вариантов: индуктивностью 10 мкГн в корпусе 0603, 47 мкГн в корпусе 0805 и 100 мкГн в корпусе 1210. Результаты измерений развязки катушек индуктивностью 10, 47 и 100 мкГн представлены на рис. 4.

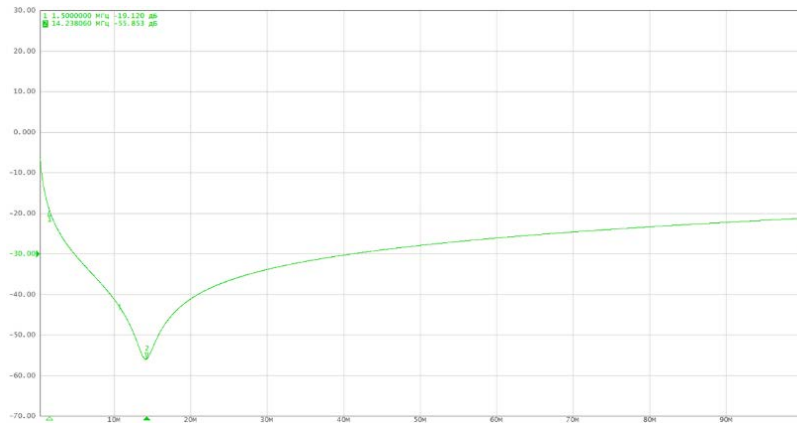


а



б

**Рис. 4 (начало).** Результаты измерений развязки катушек с различной индуктивностью:  
а — 10 мкГн; б — 47 мкГн

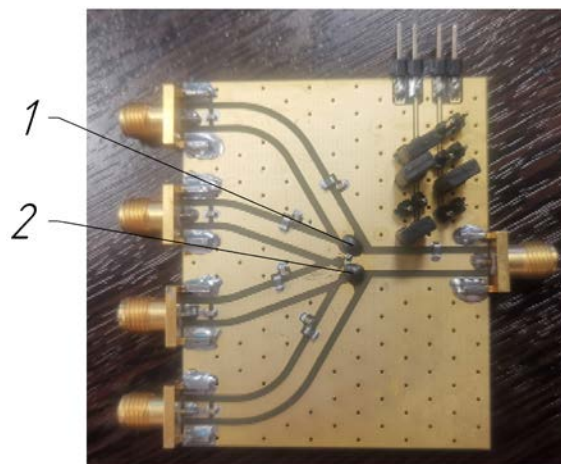


в

**Рис. 4 (окончание).** Результаты измерений развязки катушек с различной индуктивностью:  
 в — 100 мкГн

Выбранные катушки индуктивности имеют развязку более 19 дБ в диапазоне 3...100 МГц. Катушка индуктивностью 47 мкГн является лучшим вариантом из трех представленных компонентов, поскольку обладает большей развязкой, она будет использоваться в переключателе.

Кристаллы, катушки индуктивности и конденсаторы запаивают в конвейерной печи с помощью паяльной пасты NC-SMQ-90. Два кристалла на переключателе разваривают золотой проволокой 20 мкм, а два других кристалла — золотой лентой 20 мкм. В процессе измерений по мере надобности кристаллы заливают компаундом марки LOCTITE ECCOBOND EO1016. Экспериментальная модель во время измерений представлена на рис. 5.

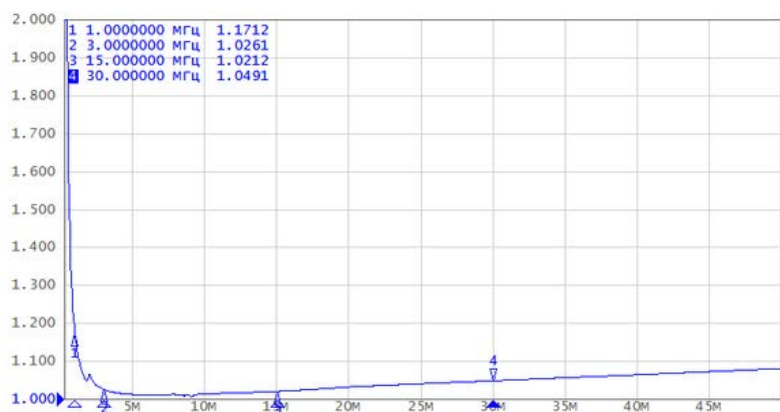


**Рис. 5.** Экспериментальная модель во время измерений:

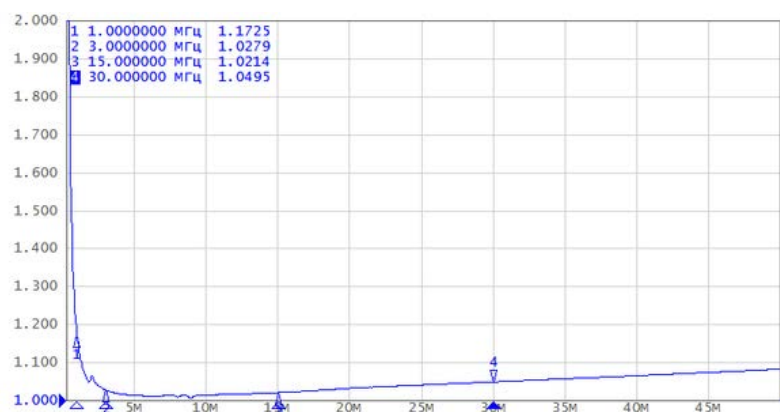
1 — компаунд на кристалле рin-диода, канал 4; 2 — компаунд на кристалле рin-диода, канал 1

Одним из ключевых моментов перед измерениями является калибровка прибора «Обзор-304/1». Полная двухпортовая калибровка была проведена с использованием набора механических мер JNKU в диапазоне 0,3...50 МГц, количество точек калибровки: 1000 [8–11].

Измерения КСВН проводили отдельно для каждого канала при запертых остальных каналах. На рис. 6 представлены результаты измерений КСВН открытых каналов 1 и 4 с наличием компаунда и без него. Результаты измерений КСВН каждого канала приведены в табл. 1.

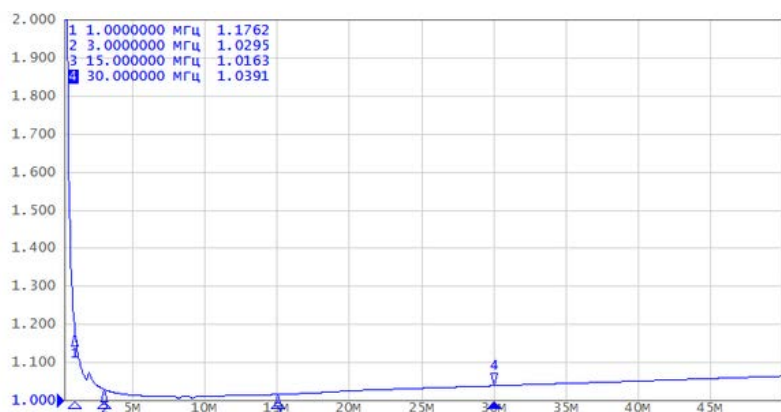


*а*

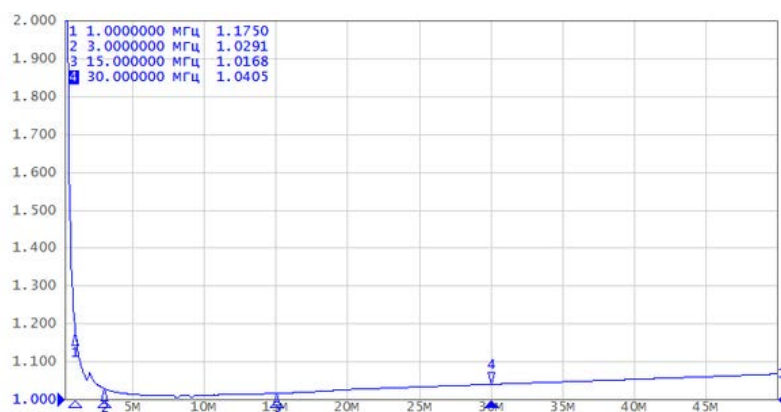


*б*

**Рис. 6 (начало).** Результаты измерений КСВН открытых каналов 1 и 4:  
*а* — канал 1 без компаунда; *б* — канал 1 с компаундом



б



з

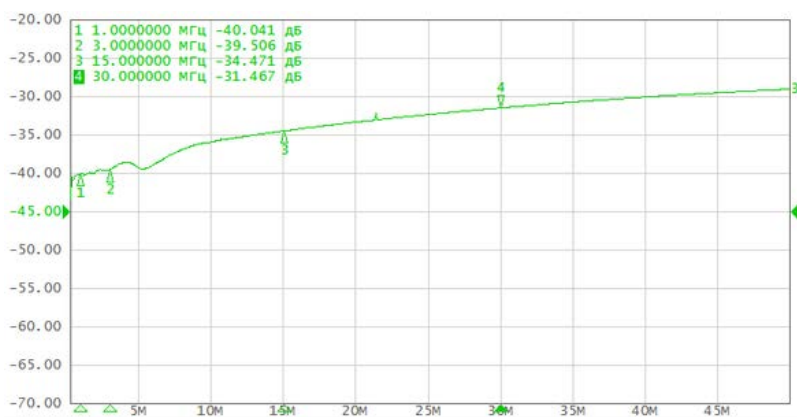
Рис. 6 (окончание). Результаты измерений КСВН открытых каналов 1 и 4:  
 б — канал 4 без компаунда; з — канал 4 с компаундом

Таблица 1

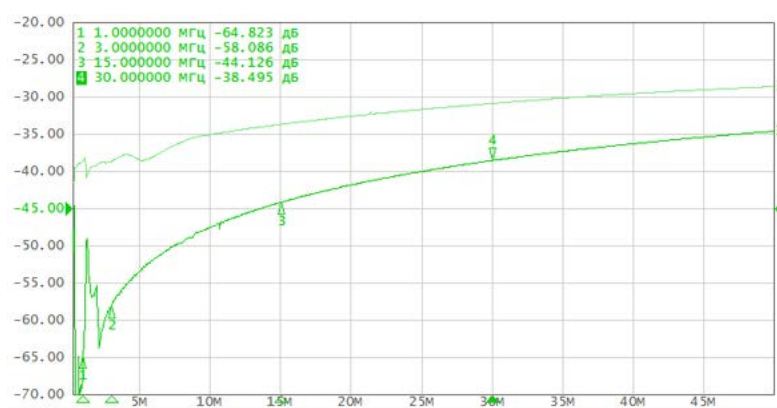
Результаты измерений КСВН

Номер канала	Способ разварки	Значение КСВН при частоте, МГц, при наличии (+) и отсутствии (-) компаунда							
		1		3		15		30	
		-	+	-	+	-	+	-	+
1	Проволока	1,17	1,17	1,03	1,03	1,02	1,02	1,05	1,05
2	Проволока	1,19	1,18	1,03	1,03	1,02	1,02	1,04	1,04
3	Лента	1,18	1,18	1,03	1,03	1,02	1,02	1,04	1,04
4	Лента	1,17	1,17	1,02	1,03	1,02	1,02	1,04	1,04

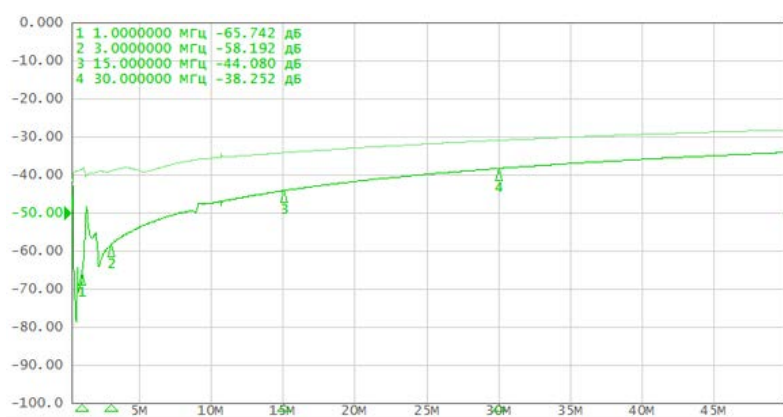




*a*



*b*



*v*

**Рис. 7.** Результаты измерений развязки канала 1:  
*a* — без подачи напряжения и тока; *b* — при открытом канале 2  
 (без компаунда); *v* — при открытом канале 4 (с компаундом)

По полученным в табл. 1 значениям не выявлено существенного различия между способами разварки кристаллов золотой проволокой и лентой, а также между параметрами переключателя с компаундом и без него.

Результаты измерений развязки первого канала представлены на рис. 7. Результаты измерений развязки каждого из каналов с компаундом и без него приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты измерений развязки

Номер канала	Способ разварки	Развязка, дБ, при частоте, МГц, при наличии (+) и отсутствии (-) компаунда							
		1		3		15		30	
		-	+	-	+	-	+	-	+
1	Проволока	65	66	58	58	44	44	38	38
2	Проволока	66	65	60	60	45	45	39	40
3	Лента	65	65	59	59	45	45	39	39
4	Лента	65	65	58	58	44	44	38	38

Развязка на других каналах идентична первому каналу; существенного различия между разваркой кристаллов золотой проволокой и лентой нет, также нет различий между параметрами переключателя с компаундом и без него.

По результатам исследований можно сделать следующие обобщения.

В работе реализован и испытан четырехканальный переключатель, работающий в ВЧ-диапазоне. Переключатель имеет КСВН не выше 1,2 и развязку 38...65 дБ в диапазоне частот 1...30 МГц. Различия между каналами с разваркой золотой проволокой и лентой составляют не более 0,02 для параметра КСВН, а также в пределах 0,1...1 дБ для параметра развязки, что не оказывает существенного влияния на работу переключателя. Различия между каналами без компаунда и каналами после нанесения компаунда составляют не более 0,01 для параметра КСВН и находятся в пределах 0,1...1 дБ для параметра развязки, что также не оказывает существенного влияния на работу переключателя.

Таким образом, не выявлено существенных различий между каналами с разваркой золотой проволокой и лентой, а также после нанесения на кристаллы с разваркой компаунда, следовательно, тип разварки и наличие компаунда не вносят паразитных отклонений на параметры ВЧ-переключателя на рпн-диодах.

Результаты исследований будут полезны при проектировании переключателей с применением бескорпусных рпн-диодов в ВЧ-диапазоне. Дальнейшие исследования следует вести в СВЧ-диапазоне.

## Литература

- [1] Doherty W.E., Joos R.D. *The PIN diode circuit designers' handbook*. Microsemi Corporation, Watertown, MA, 1998.
- [2] Boles T., Brogle J., Rozbicki A. A Monolithic, 1000 Watt SPDT Switch. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Atlanta, GA, USA, IEEE, 2008. <http://doi.org/10.1109/MWSYM.2008.4633297>
- [3] Вайсблат А.В. *Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах*. Москва, Радио и связь, 1987, 120 с.
- [4] Бова Н.Т., Стукало П.А., Храмов В.А. *Управляющие устройства СВЧ*. Киев, Техніка, 1973, 164 с.
- [5] Виненко В.Г., Гулейков Ю.М., Карамзина В.В. и др. *СВЧ переключатели на PIN-диодах: обзоры по электронной технике*. Москва, ЦНИИ «Электроника», 1990, 76 с.
- [6] Бова Н.Т., Ефремов Ю.Г., Конин В.В. *Микроэлектронные устройства СВЧ*. Киев, Техніка, 1984, 184 с.
- [7] Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Use of High-Field Electron Injection into Dielectrics to Enhance Functional Capabilities of Radiation MOS Sensors. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 8, pp. 2382(1–11). <https://doi.org/10.3390/s20082382>
- [8] Andreev D.V., Maslovsky V.M., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modified Ramped Current Stress Technique for Monitoring Thin Dielectrics Reliability and Charge Degradation. *Phys. Status Solidi A*, 2022, vol. 219, iss. 9, pp. 2100400(1–5). <https://doi.org/10.1002/pssa.202100400>
- [9] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., Tkachenko A.L. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high fields. *Vacuum*, 2002, vol. 67, no. 3–4, pp. 617–621. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00262-2](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00262-2)
- [10] Мазин А.В., Ткаченко А.Л. Моделирование распределения легирующих примесей в полупроводнике при различных значениях температуры и времени при термической диффузии. *Известия Института инженерной физики*, 2022, № 3 (65), с. 60–63.
- [11] Kuznetsov V. HBM, MM, and CBM ESD Ratings Correlation Hypothesis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 107–114. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2700492>

**Кяримов Эльшан Видадиевич** — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов», КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация.

**Тарасенко Федор Владимирович** — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов», КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация.

**Андреев Дмитрий Владимирович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов», КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Кяримов Э.В., Тарасенко Ф.В., Андреев Д.В. Исследование влияния проволочной и ленточной разварки, а также компаунда на параметры четырехканального переключателя на pin-диодах. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 06 (83).

<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-6-907>

**STUDY OF INFLUENCE OF THE WIRE AND TAPE WELDINGS,  
AS WELL AS OF THE COMPOUND, ON THE PARAMETERS  
OF A FOUR-CHANNEL SWITCH ON THE PIN DIODES**

**E.V. Kyarimov**

kyarimov.e@ya.ru

**F.V. Tarasenko**

fedor.vl.taras@gmail.com

**D.V. Andreev**

dmitrii\_andreev@bmstu.ru

SPIN-code: 3507-5569

**Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation**

---

**Abstract**

*The paper considers various types of implementation and performance of the high-frequency single-pole four-way switch based on the data obtained by measuring its main parameters, namely the voltage standing wave ratio and reverse attenuation or decoupling taking into account the design features. The switch design is using the unpackaged pin diodes welded to the printed circuit board with wire or tape and coated with a compound, which is able to significantly increase reliability and service life of the device. The operating frequency range of the four-channel pin-diode switch is 1...30 MHz making it possible to use it to change the operating mode of the high-frequency communication devices.*

**Keywords**

*Four-channel switch, pin diode, voltage standing wave ratio, compound, wire welding, tape welding, two-port measurements, high frequency range*

Received 29.05.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

---

**References**

- [1] Kochemasov V.N., Kirpichenkov A.I. Solid-state microwave switches. Part 1. Part 2. Part 3. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2017, no. 10, 2018, no. 1–2. (In Russ.).
- [2] Boles T., Brogle J., Rozbicki A. A Monolithic, 1000 Watt SPDT Switch. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Atlanta, GA, USA, IEEE, 2008. <http://doi.org/10.1109/MWSYM.2008.4633297>
- [3] Vaysblat A.V. *Kommutatsionnye ustroystva SVCh na poluprovodnikovyykh diodakh* [Microwave switching devices on semiconductor diodes]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987, 120 p. (In Russ.).
- [4] Bova N.T., Stukalo P.A., Khramov V.A. *Upravlyayushchie ustroystva SVCh* [Microwave control devices]. Kiev, Tekhnika Publ., 1973, 164 p. (In Russ.).
- [5] Vinenko V.G., Guleykov Yu.M., Karamzina V.V. et al. *SVCh pereklyuchateli na PIN-diodakh: obzory po elektronnoy tekhnike* [Microwave switches on PIN-diodes: reviews on electronic technology]. Moscow, Elektronika Publ., 1990, 76 p. (In Russ.).
- [6] Vaysblat A.V. *Kommutatsionnye ustroystva SVCh na poluprovodnikovyykh diodakh* [Microwave switching devices on semiconductor diodes]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987, 120 p. (In Russ.).
- [7] Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Use of High-Field Electron Injection into Dielectrics to Enhance Functional Capabilities of Radiation MOS Sensors. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 8, pp. 2382(1–11). <https://doi.org/10.3390/s20082382>

- [8] Andreev D.V., Maslovsky V.M., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modified Ramped Current Stress Technique for Monitoring Thin Dielectrics Reliability and Charge Degradation. *Phys. Status Solidi A*, 2022, vol. 219, iss. 9, pp. 2100400(1–5).  
<https://doi.org/10.1002/pssa.202100400>
- [9] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., Tkachenko A.L. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high fields. *Vacuum*, 2002, vol. 67, no. 3–4, pp. 617–621. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00262-2](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00262-2)
- [10] Mazin A.V., Tkachenko A.L. Simulation of the distribution of dopants in a semiconductor at various temperatures and times during thermal diffusion. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2022, no. 3 (65), pp. 60–63. (In Russ.).
- [11] Kuznetsov V. HBM, MM, and CBM ESD Ratings Correlation Hypothesis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 107–114.  
<https://doi.org/10.1109/TEM.2017.2700492>

**Kyarimov E.V.** — Student, Department of Design and Technology of Electronic Devices Production, Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation.

**Tarasenko F.V.** — Student, Department of Design and Technology of Electronic Devices Production, Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation.

**Andreev D.V.** — Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Technology of Electronic Devices Production, Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Kyarimov E.V., Tarasenko F.V., Andreev D.V. Study of influence of the wire and tape weldings, as well as of the compound, on the parameters of a four-channel switch on the pin-diodes. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 06 (83). (In Russ.).  
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-6-907>