

Анализ схемных решений интегральных СВЧ цифровых ступенчатых аттенуаторов, изготавливаемых по различным технологическим процессам

Л.В. Кореков, А.А. Метель, А.С. Сальников

Лаборатория автоматизации разработки микроэлектронных устройств "50ohm Lab",
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,
korekov.l.327@e.tusur.ru

Аннотация – Представлен анализ и систематизация используемых схемных решений цифровых ступенчатых аттенуаторов (ЦСА). Исследованы основные технологические процессы, на основе которых разрабатываются ЦСА и выполнен анализ существующих аналогов.

Ключевые слова – анализ схемных решений, аттенуатор, СВЧ.

I. ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является анализ используемых схемотехнических решений и требований, предъявляемых к цифровым ступенчатым аттенуаторам (ЦСА), с возможностью его последующей интеграции на одном кристалле монолитной интегральной схемы (МИС) с различными функциональными блоками.

ЦСА является устройством, предназначенным для ослабления сигнала, без существенного изменения его формы или спектрального состава [1].

ЦСА нашли свое применение во многих сферах СВЧ микроэлектроники, например, в кабельных и беспроводных системах связи, где мощность входного сигнала может меняться на порядки, следовательно, эти системы требуют точной регулировки усиления в тракте сигнала для ограничения падающей мощности на схему приемника, что обеспечивают ЦСА. Также, в настоящее время новые стандарты связи и внедрение 5G сетей требуют строгого контроля мощности передаваемого сигнала [2]. В качестве основных параметров устройства стоит выделить рабочий диапазон частот, диапазон и шаг вносимого ослабления, разрядность, уровень начальных потерь, коэффициенты отражения по входу и выходу, вносимый фазовый сдвиг, динамические характеристики и габаритные размеры [3].

ЦСА представляет собой каскадное соединение ряда ослабляющих секций (рис. 1), переключение между которыми осуществляется посредством подачи управляющего сигнала на переключатели, роль которых могут выполнять как диоды [4], [5], так и транзисторы [3], [6], [7].

К основным достоинствам PIN-диодов в качестве переключателей стоит отнести высокую температурную стабильность, однако, собственные вносимые потери в таких аттенуаторах весьма велики [1], поскольку в опорном состоянии ослабление определяется сопротивлением PIN-диодов, число которых составляет, как правило, более двух на одну секцию. Ключевым недостатком переключателей на PIN-диодах является высокий уровень потребляемой мощности за счет управления током. Однако, в зависимости от технологии изготовления, PIN-диоды могут иметь меньше потери и лучше развязку, чем транзисторы, что непосредственно сказывается на характеристиках конечного устройства.

Переключатели на основе полевых транзисторов занимают значительную часть рынка. В качестве ключевых преимуществ стоит выделить малые габариты, возможность работы начиная с нулевой частоты и малая потребляемая мощность, что позволяет упрощать схемные решения при разработке драйверов управления, за счет малых протекающих токов, интегрированных на одном кристалле с ЦСА.

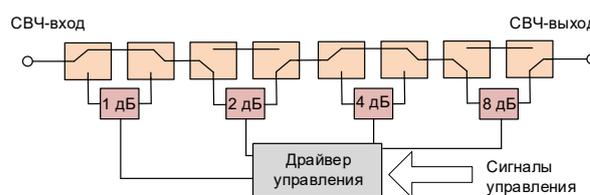


Рис. 1. Блок – схема ЦСА

Далее в настоящей работе будут рассмотрены цепи коммутации на основе полевых транзисторов.

II. ОБЗОР ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ЦСА могут изготавливаться по Si, SiGe, SOS/SOI, GaAs, GaN технологическим процессам. В ЦСА ключевыми электрическими параметрами, определяемыми технологией изготовления, вносящими ключевой вклад в характеристики устройства, являются сопротивление транзистора в открытом состоянии (R_{on}) и его емкость в закрытом состоянии (C_{off}). Значения

параметров транзистора для различных технологий изготовления представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические характеристики транзисторов

Технология	$C_{off} \times R_{on}$, фс
GaAs JpHEMT [8]	160
GaAs [10]	300
0,15 мкм GaAs pHEMT [9]	435
0,5 мкм pHEMT [9]	360
SOI [8]	200
SOS [10]	450
SOS [8]	270
0,5 мкм SOS [9]	756
0,25 мкм SOS [9]	448
GaN [11]	180

Анализируя представленные выше данные видно, что для получения качественных коммутаторов наиболее предпочтительно использование технологических процессов SOI/SOS. SOS технология позволяет реализовывать переключатели, имеющие низкие вносимые потери и высокую развязку. К недостаткам данной технологии можно отнести низкие напряжения пробоя, характерные для Si, увеличенное паразитное сопротивление транзисторов, пониженная устойчивость к электростатическому разряду. На данный момент SOI коммутаторы активно применяются в беспроводных технологиях, таких как Wi-Fi и телефонная связь [12]. Преимущества

рассматриваемой технологии демонстрируют такие производители, как Peregrine Semiconductor и Analog Devices, чьи устройства будут рассмотрены далее [13], [14].

Однако, в зависимости от требований, и другие технологии находят свое применение. В случаях, когда к ЦСА предъявляются высокие требования по выходной мощности и необходима интеграция с различными функциональными блоками, стоит отдать предпочтение GaN технологии [15]. Необходимо отметить, что GaN технология в настоящий момент является наиболее молодой и как следствие, менее обработанной.

При разработке приемопередающих модулей ключевое значение имеет интеграция различных функциональных блоков на одном кристалле. Наиболее подходящим вариантом с точки зрения стоимости, стабильности и электрических характеристик устройств является технология GaAs. ЦСА на основе GaAs разрабатываются такими производителями как Analog Devices, Qorvo, Mini-Circuits и ViperRF [14], [16]-[18].

Анализируя результаты, представленные в таблице 2, видно, что достаточно большое число аттенуаторов разрабатываются сверхширокополосными, а наилучшие электрические характеристики обеспечиваются при разработке ЦСА на основе SOS технологии. Стоит отметить, что в ЦСА достаточно часто на одном кристалле интегрируется драйвер управления.

Таблица 2

Характеристики имеющихся ЦСА

Тех. процесс	Модель/Статья	Δf , ГГц	$ S_{21} $ в опорном состоянии, дБ	$ S_{21} _{\max}$, дБ	Шаг ослабления / количество секций, дБ	P_{in} , дБм	$IP3$, дБм	$P_{0,1dB}$, дБм
SOI	ADRF5740 [19]	0,1 - 60	2,4	22	2	24	44	-
	ADRF5720 [20]	0,09 - 40	4,5	31,5	0,5 / 6	27	50	30
	0,18 мкм SOI [7]	0,1 - 3,5	4,5	31,75	0,25 / 7	-	53	35
GaAs	HMC939ALP4E [21]	0,1 - 33	5,5	31	1 / 5	25	40	24
	HMC939A-Die [22]	0,1 - 40	7	31	1 / 5	21	40	24
	CMD280C3 [23]	DC - 18	3	15,5	0,5 / 5	27	42	24
	TGL2223-SM [24]	1 - 31	4,8	15,5	0,5 / 5	30	32	-
Si	HMC1119 [25]	0,1 - 6	1,5	32,2	0,25 / 7	24	54	30
	HMC8073 [26]	0,6 - 3	2,2	31,5	0,5 / 6	30	52	28
GaN	[27]	0,1 - 6	2,7	35	5 / 4	-	56	40
	[28]	5 - 20	3	31,5	0,5 / 6	-	-	-
SOS	PE4312 [29]	0,01 - 4	2,3	31,5	0,5 / 6	30	53	30
	PE4314 [30]	0,01 - 2,5	1,9	31,5	0,5 / 6	30	30	69
	PE43713 [31]	DC - 6	2,8	31	1 / 7	31	31	57

Отдельное внимание стоит обратить на взаиморасположение секций. Как правило, ведущие проектировщики преследуют две глобальные задачи – это получение лучших электрических характеристик и малые габариты устройства. Однако, обеспечение двух

условий одновременно невозможно. При интеграции ЦСА с различными функциональными блоками расположение секций выбирается наиболее выгодным с точки зрения места, занимаемого на кристалле и удобства интеграции. При разработке ЦСА на

отдельном кристалле проектировщику гораздо проще выбрать оптимальную компоновку секций с точки зрения электрических характеристик устройства. Также имеет место расположение секций с наилучшими коэффициентами отражения на входе и выходе устройства [4].

III. СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

На основе анализа публикаций, диссертаций и коммерческих аналогов были выделены ключевые схемотехнические решения, используемые при разработке ЦСА (рис. 2).

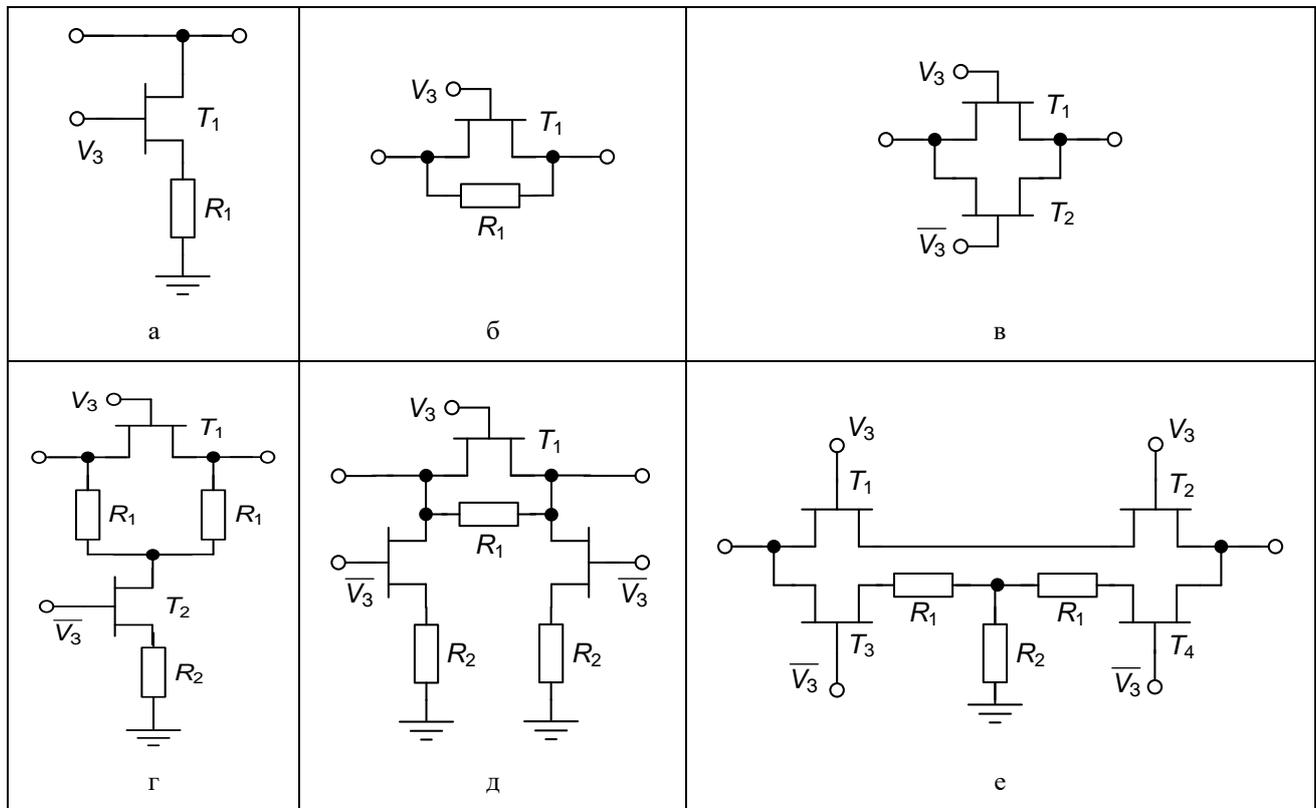


Рис. 2. Основные схемные решения

Вырожденные структуры секций (рис. 2а) и (рис. 2б) используются при реализации ослаблений в диапазоне $0 \div 1$ дБ. Данные схемные решения обладают простотой и малыми габаритами [32], [33].

Рассматриваемое схемное решение может быть улучшено путем добавления дополнительного переключателя для увеличения развязки (рис. 3) [34].

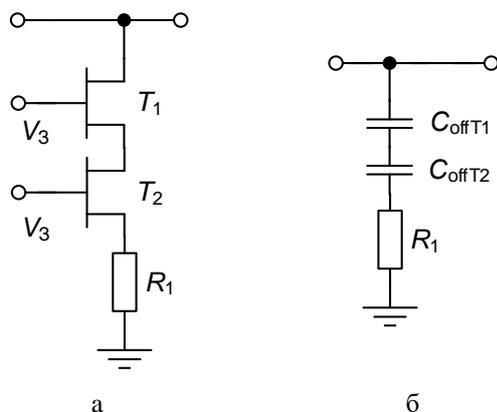


Рис. 3. Схемное решение с использованием дополнительного транзистора

Поскольку утечка сигнала в большей степени вызвана паразитной емкостью, в рассматриваемом схемном решении емкость уменьшена вдвое за счет последовательного включения транзисторов (рис. 2б).

Для схемного решения (рис. 2в) также характерны малые габариты и простота схемной реализации. Схемное решение получило распространение при реализации ослаблений в диапазоне $0 \div 0,5$ дБ [35].

Схемное решение, рассматриваемое далее, наиболее известно, как Т-образная секция (рис. 2г). Данное схемное решение получило распространение для реализации ослаблений в диапазоне $1 \div 4$ дБ. Схемное решение обеспечивает низкие вносимые потери и широкую рабочую полосу частот, а также низкие коэффициенты отражения по входу и выходу [36].

Базовое схемное решение может быть усовершенствовано путем включения дополнительной емкости (рис. 4а) или увеличением количества переключателей (рис. 4б) [37].

Основной целью является увеличение развязки и уменьшение фазового сдвига. Также, фазовый сдвиг может быть выбран оптимальных периферий транзисторов T_2 и T_3 .

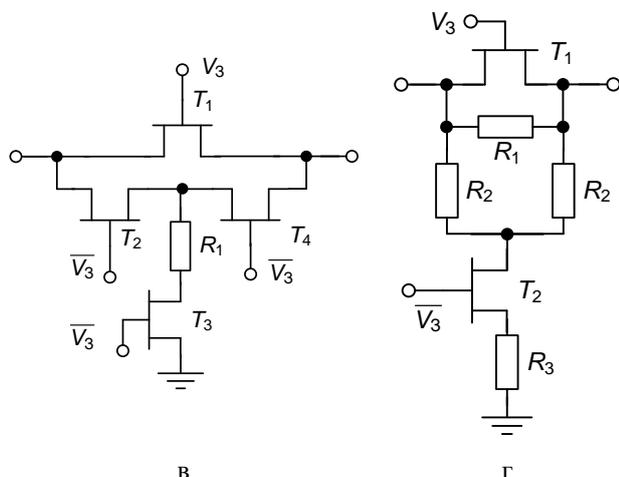
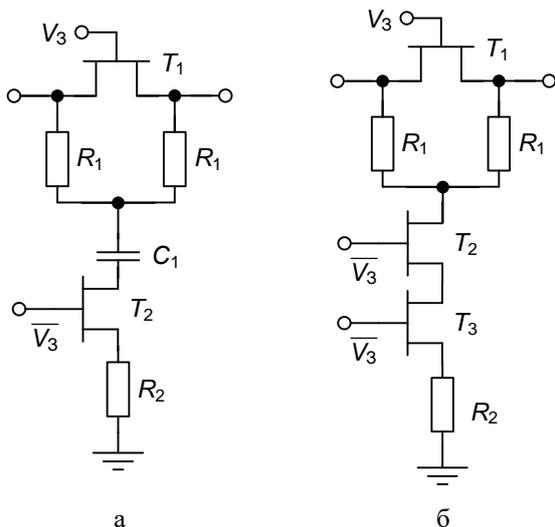


Рис. 4. Модификации классических схемных решений

Резисторы R_1 могут быть реализованы при помощи транзисторов (рис. 4в), однако при использовании данного схемного решения модели транзисторов должны быть достаточно точными, а технологический разброс – минимален [35].

В схемном решении мостовой Т-образной секции (рис. 4г) позволяет добиться существенного уменьшения коэффициентов отражения по входу и выходу секции [5].

Схемные решения на основе П-образных секций (рис. 2д), получили широкое распространение для реализации ослаблений $2 \div 16$ дБ. Для рассматриваемого типа секций характерно хорошее соотношение между потерями и коэффициентами отражения. Они наиболее широко применяются для реализаций секций с большим ослаблением, так как позволяют добиться высокого уровня развязки и как следствие – высокой точности обеспечиваемого ослабления [32].

Стоит выделить схемное решение с использованием двух дополнительных емкостей, позволяющее добиться

лучших электрических характеристик, однако усложняющее электрическую схему секции (рис. 5) [35].

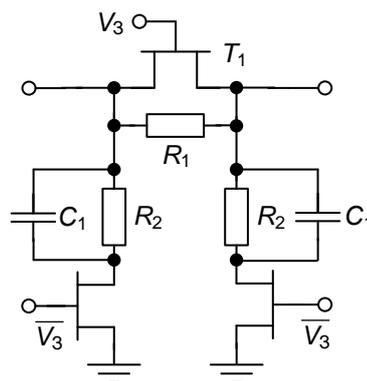


Рис. 5. Схемное решение с дополнительными емкостями

Стоит отметить, что с целью простоты схемной реализации достаточно часто встречаются решения, где высокие уровни ослабления, порядка 16 дБ, достигаются путем каскадного соединения секций с меньшей разрядностью ослабления [38].

Схемное решение для реализации высоких уровней ослабления, порядка $8 \div 16$ дБ, представлено на рис. 2е. Данное схемное решение может быть усовершенствовано использованием дополнительных переключателей (рис. 6) [32].

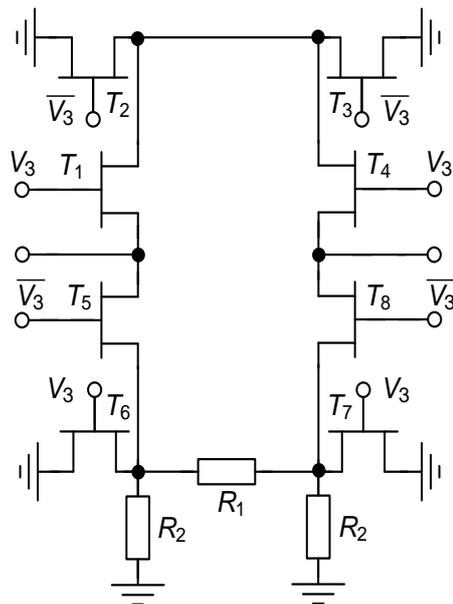


Рис. 6. Модификация схемного решения для обеспечения высоких уровней ослабления

Использование большего числа переключателей позволяет обеспечить низкий фазовый сдвиг и увеличить развязку. Данное схемное решение для секций с большим шагом ослабления позволяет избежать каскадирования ячеек, что влечет к уменьшению ошибки ослабления во всей полосе частот [39].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены основные технологические процессы, на основе которых разрабатываются ЦСА. Проведен обзор и анализ используемых схемных решений и аналогов ЦСА.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кочемасов В., Белов Л. Аттenuаторы с электронным управлением – производители и характеристики // СВЧ-электроника. 2017. №4. С. 82–95.
- [2] Iannacci J., Huhn M., Tschoban C., Pötter H. RF-MEMS Technology for 5G: Series and Shunt Attenuator Modules Demonstrated up to 110 GHz // IEEE electron device letters, V. 37. № 10. P. 1336–1339.
- [3] Zhao J., Zhang B., Yang X. A 25-30 GHz 6-bit Digital Attenuator with High Accuracy and Low Insertion Loss // IEEE MTT-S International Wireless Symposium. 2016.
- [4] Hyunchul E., Sejun H., Kyoungsoon Y. A 6-30 GHz Compact 3-bit Digital Attenuator MMIC using InP/InGaAs PIN Diodes // 2008 Global Symposium on Millimeter Waves. 2008.
- [5] Hyunchul E., Kyoungsoon Y. A 6-20 GHz Compact 3-bit Digital Attenuator MMIC using InP/InGaAs PIN Diodes // 2008 Global Symposium on Millimeter Waves. 2008.
- [6] Prolay V., Puja S., Dinesh K S., Apurba N B.. Low Error Ku-band 5-bit Digital Attenuator MMIC // IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), V. 7. № 17. P. 128–131.
- [7] Ebrahimi Jarihani A., Fatih K. A Phase Coherent 7-bit Digital Step Attenuator on 0.18m SOI // European Microwave Integrated Circuits Conference. 2017. P. 167–170.
- [8] Takeuchi K., Taniguchi S., Yanagita M., Sasaki Y., Nakamura M., Wada S. High Performance GaAs RF Switch with a P-Type Capping Layer // CS MANTECH Conference. 2014. P. 223–226.
- [9] Kelly D., Brindle C., Kemerling C., Stuber M. The State-of-the-Art of Silicon-on-Sapphire CMOS RF Switches // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, V. 7. № 5. P. 200–203.
- [10] Raynaud C. Technology pathfinders for low cost and highly integrated RF Front End Modules // IEEE International Electron Devices Meeting, V. 18. № 4. P. 1–4.
- [11] Zheng X, C., Tremblay J, E., Huettner S., P Ip K., T Papale., L. Lange K. Ka-Band High Power GaN SPDT Switch MMIC // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2013.
- [12] McKay T., Carroll M., Kerr D., Costa J. Advances in silicon-insulator cellular antenna switch technology // IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, V. 1. № 9. P. 1–4.
- [13] URL: <https://www.analog.com/en/index.html> (дата обращения: 13.05.2020)
- [14] URL: <https://www.psemi.com/> (дата обращения: 16.05.2020)
- [15] Ross T.N., Hettak K., Cornier G., Wight J.S. Design of X-Band GaN Phase Shifters // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2010. V. 63. № 1. P. 244–255.
- [16] URL: <https://www.qorvo.com/> (дата обращения: 29.05.2020)
- [17] URL: <https://www.minicircuits.com/> (дата обращения: 02.06.2020)
- [18] URL: <https://www.viper-rf.com/> (дата обращения: 02.06.2020)
- [19] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADRF5740.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [20] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adrf5720.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [21] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc939alp4e.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [22] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc939aCHIPS.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [23] URL: <https://www.custommmic.com/resources/cmd280c3-datasheet.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [24] URL: <https://www.qorvo.com/search?key=ttl2223-sm&mode=1> (дата обращения: 04.06.2020)
- [25] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc1119.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [26] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc8073.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [27] Tsushimã T., Takeuchiã H., Kimishimã M. A 10 MHz - 6 GHz High Power High Linearity 35 dB Digital Step Attenuator MMIC Using GaN HEMTs with TaON Passivation // IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology. V. 34. № 2. P. 247–249.
- [28] Swaroop Sharma S., Sharma S., Kumar Pandey A. Design and Simulation of 6-bit MMIC Digital Attenuator using GaN pHEMT // 6th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). 2019. P. 616–620.
- [29] URL: <https://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe4312ds.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [30] URL: <https://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe4314ds.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [31] URL: <https://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe43713ds.pdf> (дата обращения: 04.06.2020)
- [32] Dai Y-S., Li P., Han Q-F., Chen S-B., Chen X., Wang L-J., Xu L., Chen R-Q. Research on a novel 2~18 GHz PHEMT MMIC digital attenuator with low insertion phase shift // 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2012. P. 1–4.
- [33] Jeong J-C., Shin D-H., Ju I-K., Yom I-B. A GaAs MMIC Multi-Function Chip with a Digital Serial-to-Parallel Converter for an X-band Active Phased Array Radar System // The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. 2011. V. 22. № 6. P. 613–624.
- [34] Wang K., Wang Z., Wang G., Chen H., Zheng Q., Yu F. Design of a low-insertion-phase-shift MMIC attenuator integrated with a serial-to-parallel converter // IEICE Electronics Express. 2017. V. 14. № 20. P. 1–7.
- [35] Graaf M.W., Wanum M., Maas A.P.M., Suijker E.M. Knight A., Ludwig M. L-Band MMICs for Space-based SAR system // 11th Gallium Arsenide applications symposium. 2003. P.173–178.
- [36] Liu C., Zou W., Wang G. Wideband 5-bit MMIC Digital Attenuator With High Precision // International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT. 2013. V. 1. № 2. P. 40–43.
- [37] Giannini F., Limiti E., Longhi P., Serino A. X-band multi function GaAs MMIC for T/R modules in smart antenna applications // Microwave and Optical Technology Letters. 2008. V. 50. № 6. P. 1667–1673.
- [38] Ju I., Noh Y-S., Yom I-B. Ultra Broadband DC to 40 GHz 5-Bit pHEMT MMIC Digital Attenuator // 2005 European Microwave Conference. 2005. V. 2. P. 995–998.

Analysis of Circuit Solutions for Integrated Microwave Digital Step Attenuators Manufactured by Various Technologies

L.V. Korekov, A.A. Metel, A.S. Salnikov

50ohm Lab, Tomsk state university of control systems and radioelectronics, Tomsk, Russia,

korekov.l.327@e.tusur.ru

Abstract – A review of digital step attenuators (DSA) manufactured by various technological processes is carried out. DSA can be manufactured by Si, SiGe, SOS / SOI, GaAs, GaN technological processes. RF designers compare switch technology with on state resistance and off state capacitance of a transistor.

Based on a review of commercial DSA, the main requirements for DSA were defined. Also typical DSA characteristics were considered. Based on the analysis, the typical DSA section typologies were found.

Keywords – circuit analysis, attenuator, microwave.

REFERENCES

- [1] Kochemasov V., Belov L. Attenyuatory s elektronnyim upravleniyem – proizvoditeli i kharakteristiki (Attenuators with electronic control - manufacturers and characteristics)// SVCH-elektronika. 2017. No.4. S. 82–95. (In Russian).
- [2] Iannacci J., Huhn M., Tschoban C., Pötter H. RF-MEMS Technology for 5G: Series and Shunt Attenuator Modules Demonstrated up to 110 GHz // IEEE electron device letters, V. 37. No. 10. P. 1336–1339.
- [3] Zhao J., Zhang B., Yang X. A 25-30 GHz 6-bit Digital Attenuator with High Accuracy and Low Insertion Loss // IEEE MTT-S International Wireless Symposium. 2016.
- [4] Hyunchul E., Sejun H., Kyoungsoon Y. A 6-30 GHz Compact 3-bit Digital Attenuator MMIC using InP/InGaAs PIN Diodes // 2008 Global Symposium on Millimeter Waves. 2008.
- [5] Hyunchul E., Kyoungsoon Y. A 6-20 GHz Compact 3-bit Digital Attenuator MMIC using InP/InGaAs PIN Diodes // 2008 Global Symposium on Millimeter Waves. 2008.
- [6] Prolay V., Puja S., Dinesh K S., Apurba N B.. Low Error Ku-band 5-bit Digital Attenuator MMIC // IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), V. 7. No. 17. P. 128–131.
- [7] Ebrahimi Jarihani A., Fatih K. A Phase Coherent 7-bit Digital Step Attenuator on 0.18m SOI // European Microwave Integrated Circuits Conference. 2017. P. 167–170.
- [8] Takeuchi K., Taniguchi S., Yanagita M., Sasaki Y., Nakamura M., Wada S. High Performance GaAs RF Switch with a P-Type Capping Layer // CS MANTECH Conference. 2014. P. 223–226.
- [9] Kelly D., Brindle C., Kemerling C., Stuber M. The State-of-the-Art of Silicon-on-Sapphire CMOS RF Switches // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, V. 7. No. 5. P. 200–203.
- [10] Raynaud C. Technology pathfinders for low cost and highly integrated RF Front End Modules // IEEE International Electron Devices Meeting, V. 18. No. 4. P. 1–4.
- [11] Zheng X. C., Tremblay J. E., Huettner S., P Ip K., T Papale., L. Lange K. Ka-Band High Power GaN SPDT Switch MMIC // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2013.
- [12] McKay T., Carroll M., Kerr D., Costa J. Advances in silicon-on-insulator cellular antenna switch technology // IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, V. 1. No. 9. P. 1–4.
- [13] URL: <https://www.analog.com/en/index.html> (access date: 13.05.2020)
- [14] URL: <https://www.psemi.com/> (access date: 16.05.2020)
- [15] Ross T.N., Hettak K., Cornier G., Wight J.S. Design of X-Band GaN Phase Shifters // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2010. V. 63. No. 1. P. 244–255.
- [16] URL: <https://www.qorvo.com/> (access date: 29.05.2020)
- [17] URL: <https://www.minicircuits.com/> (access date: 02.06.2020)
- [18] URL: <https://www.viper-rf.com/> (access date: 02.06.2020)
- [19] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADRF5740.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [20] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adrf5720.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [21] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc939alp4e.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [22] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc939aCHIPS.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [23] URL: <https://www.custommmic.com/resources/cmd280c3-datasheet.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [24] URL: <https://www.qorvo.com/search?key=ttl2223-sm&mode=1> (access date: 04.06.2020)
- [25] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc1119.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [26] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc8073.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [27] Tsushimã T., Takeuchiã H., Kimishimã M. A 10 MHz - 6 GHz High Power High Linearity 35 dB Digital Step Attenuator MMIC Using GaN HEMTs with TaON Passivation // IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology. V. 34. No. 2. P. 247–249.

- [28] Swaroop Sharma S., Sharma S., Kumar Pandey A. Design and Simulation of 6-bit MMIC Digital Attenuator using GaN pHEMT // 6th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). 2019. P. 616–620.
- [29] URL: <https://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe4312ds.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [30] URL: <https://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe4314ds.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [31] URL: <https://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe43713ds.pdf> (access date: 04.06.2020)
- [32] Dai Y-S., Li P., Han Q-F., Chen S-B., Chen X., Wang L-J., Xu L., Chen R-Q. Research on a novel 2~18 GHz PHEMT MMIC digital attenuator with low insertion phase shift // 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2012. P. 1–4.
- [33] Jeong J-C., Shin D-H., Ju I-K., Yom I-B. A GaAs MMIC Multi-Function Chip with a Digital Serial-to-Parallel Converter for an X-band Active Phased Array Radar System // The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. 2011. V. 22. No. 6. P. 613–624.
- [34] Wang K., Wang Z., Wang G., Chen H., Zheng Q., Yu F. Design of a low-insertion-phase-shift MMIC attenuator integrated with a serial-to-parallel converter // IEICE Electronics Express. 2017. V. 14. No. 20. P. 1–7.
- [35] Graaf M.W., Wanum M., Maas A.P.M., Suijker E.M. Knight A., Ludwig M. L-Band MMICs for Space-based SAR system // 11th Gallium Arsenide applications symposium. 2003. P.173–178.
- [36] Liu C., Zou W., Wang G. Wideband 5-bit MMIC Digital Attenuator With High Precision // International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT. 2013. V. 1. No. 2. P. 40–43.
- [37] Giannini F., Limiti E., Longhi P., Serino A. X-band multi function GaAs MMIC for T/R modules in smart antenna applications // Microwave and Optical Technology Letters. 2008. V. 50. No. 6. P. 1667–1673.
- [38] Ju I., Noh Y-S., Yom I-B. Ultra Broadband DC to 40 GHz 5-Bit pHEMT MMIC Digital Attenuator // 2005 European Microwave Conference. 2005. V. 2. P. 995–998.
- [39] Sun P., Liu H., Geng M., Zhang R., Wang Q., Luo W. An X-band 22.5°/45° digital phase shifter based on switched filter networks // Journal of Semiconductors. 2017. V. 38. No. 6. P. 1–4.