

Н.И. Гоголев, А. Салих, Д.С. Брагин, В.Д. Дмитриев

## Исследование характеристик усилителя распределенного усиления на основе GaAs-полевых транзисторов

Усилитель распределенного усиления является актуальным решением при реализации широкополосных усилителей в системах беспроводной связи, импульсной и измерительной техники. В настоящей работе было проведено исследование усилителя распределенного усиления на основе GaAs-полевых транзисторов. В работе представлен расчет оптимального количества ячеек усиления, расчет каскадного усилителя распределенного усиления и получена его принципиальная схема, работающая в диапазоне от 2 до 20 ГГц. Также был выполнен предварительный расчет основных характеристик усилителя, на базе которого модель усилителя распределенного усиления была построена и промоделирована в САПР. Помимо этого, в работе были проанализированы изменения коэффициента передачи и уровня выходной мощности в точке сжатия на 1 дБ от количества используемых ячеек усиления. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании усилителей распределенного усиления для различных систем в современной электронике.

**Ключевые слова:** арсенид галлия (GaAs), НЕМТ, каскод, УРУ, широкая полоса частот.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-3-32-40

Увеличение быстродействия современных устройств – одна из ключевых тенденций развития современной радиотехники. Одним из таких устройств является широкополосный усилитель, к которому относят схему усилителя распределенного усиления (УРУ), работающую по принципу направленного сложения высокочастотных сигналов. Усилители данного типа применяются как в спутниковых и радиолокационных системах, так и в системах мобильной связи третьего (3G), четвертого (4G) и пятого (5G) поколений [1].

С развитием полупроводниковых технологий архитектуры распределенных усилителей мощности постоянно улучшались, чтобы соответствовать постоянно растущим к ним требованиям. По своей сути усилитель распределенного усиления является управляющим устройством и определяет такие характеристики системы, как коэффициент полезного действия (КПД), линейность и коэффициент усиления (КУ) [2].

С момента изобретения распределенного усилителя Персивалем в 1936 г. были приложены значительные усилия для улучшения коэффициента усиления

[3–7], полосы пропускания (ПП) [8–12], эффективности [13], мощности [14–19] и шумовых характеристик [20, 21]. Однако все еще важным является вопрос разработки метода, позволяющего с достаточной точностью и достоверностью определять как оптимальное количество ячеек усиления, так и уровень выходной мощности в точке сжатия на 1 дБ, т.е. при таком ее уменьшении из-за нелинейных искажений.

В отличие от обычного каскадного или балансного усилителя распределенный усилитель (рис. 1) использует несколько иной подход к широкополосному усилению, а именно параллельное расположение транзисторов. Полевые транзисторы с последовательно включенными катушками индуктивности ведут себя как эффективный фильтр нижних частот. При замыкании этих линий резистивными нагрузками отраженные сигналы поглощаются в балансной нагрузке, а полезные сигналы суммируются синфазно на выходе усилителя. Входные и выходные емкости транзисторов, так называемые паразитные, входят в состав LC-фильтров нижних частот (ФНЧ). Подобная структура позволяет расширить полосу пропускания усилителя [22].

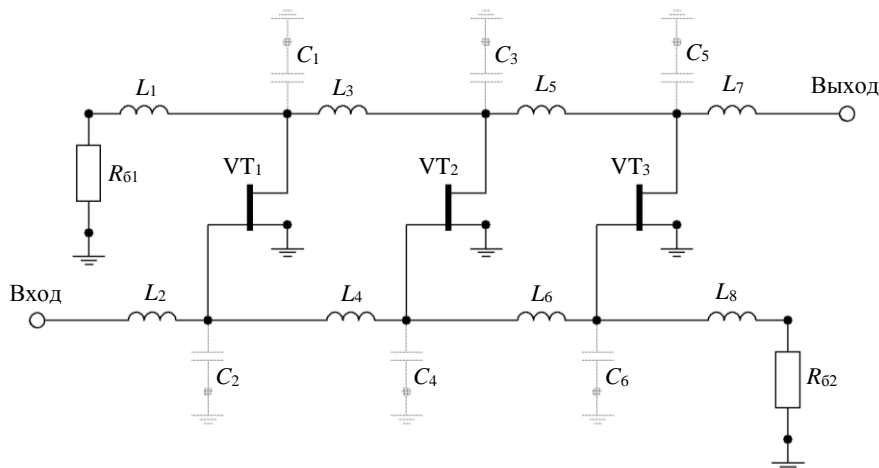


Рис. 1. Принципиальная схема УРУ с общим истоком (ОИ)

Для получения высокой выходной мощности часто применяют схему с общим истоком и неоднородной структурой УРУ [23]. Недостатком такого вида схем является низкая развязка между входом и выходом, что приводит к режиму самовозбуждения особенно на высоких частотах.

Наиболее распространенный вид схемы усилителя с распределенным усилением, а именно каскод (рис. 2). Широко используется схема каскода общий исток – общий затвор (ОИ – ОЗ). Подобная структура характеризуется высоким максимально достижимым коэффициентом усиления, широкой полосой пропускания и улучшенной развязкой вход-выход.

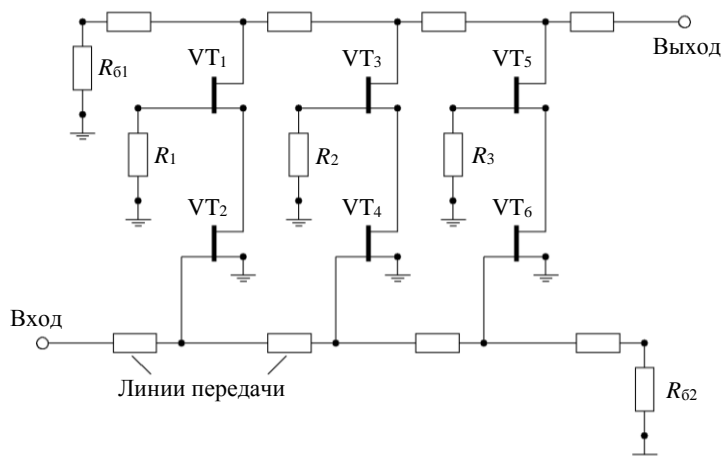


Рис. 2. Электрическая схема каскодного УРУ

По сравнению с классической схемой УРУ реализация каскодной схемы усложняется, в связи с чем необходимо оценивать дополнительные аспекты, такие как увеличение потребления мощности на постоянном токе, стабильность каскодной ячейки и увеличение напряжения на стоке, которое делится между собой общим затвором и общим истоком транзисторов. Тем не менее каскодная схема может обеспечить максимально возможный коэффициент усиления в широкой полосе пропускания. Основными проблемами при использовании каскодной структуры являются нестабильность усилителя из-за индуктивных паразитных элементов, а также ухудшение линейности УРУ [24–26].

Исходя из работы [27], можно сказать, что техпроцесс GaAs-pHEMT является самой часто используемой технологией. Связано это как с дороговизной производства таких УРУ, так и с тем, что не у всех производителей имеется стабильная GaN-HEMT-технология. Такие компании, как АО «Светлана-Рост» и МАСОМ, ведут активные исследования в области применения GaN-HEMT-технологии в УРУ для последующей реализации полученных решений.

Усилитель распределенного усиления является актуальным решением для реализации широкополосных усилителей. Усилители на основе GaAs получили широкое распространение на рынке микроэлек-

троники за счет оптимального компромисса с точки зрения стоимости, электрических характеристик и стабильности.

Для обеспечения уровня коэффициента усиления и выходной мощности, сравнимого с аналогами на рынке, выбор был сделан в пользу каскодной схемы УРУ.

#### Расчет основных параметров УРУ

Для питания всей микросхемы усилителя необходимы 3,5 В, а потребляемый ток каждой ячейки усиления составляет 13 мА. Реализация высокочастотных схем на полевых МОП-транзисторах (рис. 3) затруднена из-за множества факторов. Например, элементы, которые могут уменьшить коэффициент усиления или полосу пропускания усилителя на основе полевого транзистора, – это паразитные емкости и сопротивления (см. рис. 3). Паразитные сопротивления  $R_s$ ,  $R_g$ ,  $R_d$  рассеивают мощность, в то время как паразитные емкости  $C_{gd}$ ,  $C_{ds}$  образуют пути с низким импедансом на высоких частотах, тем самым уменьшая достижимый коэффициент усиления. Основная проблема кроется в паразитной емкости  $C_{gs}$ .

Предварительный расчет усилителя распределенного усиления необходим для определения основных параметров, таких как оптимальное количество ячеек усиления и предполагаемая максимальная выходная мощность усилителя.

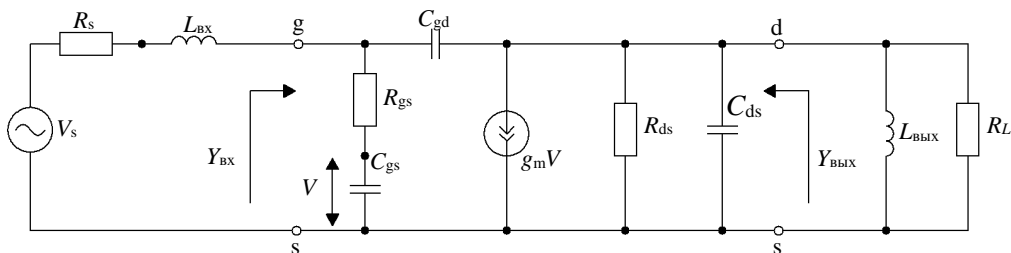


Рис. 3. Эквивалентная схема GaAs-полевого транзистора: s – исток; g – затвор; d – сток

Помимо этого, предварительный расчет помогает определить индуктивность стоковой и затворной линии, которую необходимо учитывать при проектировании схемы на  $LC$ -элементах, а также длину линии передачи, необходимую при проектировании топологии УРУ.

Данные, необходимые для предварительного расчета, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Входные данные для предварительного расчета УРУ**

Параметр	Значение	Ед. изм.
Крутизна транзистора, $g_m$	0,02632	См
Граничная частота транзистора, $\omega$	125	ГГц
Паразитная емкость затвор-исток, $C_{gs}$	0,05114	пФ
Паразитная емкость затвор-сток, $C_{gd}$	0,01497	пФ
Паразитная емкость сток-исток, $C_{ds}$	0,01432	пФ
Паразитное сопротивление затвор-исток, $R_{gs}$	16,34	Ом
Паразитное сопротивление сток-исток, $R_{ds}$	590,4	Ом

Основные электрические свойства транзистора, такие как паразитные емкости и сопротивления (см. рис. 3), могут быть охарактеризованы его  $Y$ -параметрами, которые рассчитываются по формулам (1)–(4) [28]:

$$Y_{11} = \frac{j \cdot \omega \cdot C_{gs}}{1 + j \cdot \omega \cdot C_{gs} \cdot R_{gs}} + j \cdot \omega \cdot C_{gd}, \quad (1)$$

$$Y_{12} = -j \cdot \omega \cdot C_{gd}, \quad (2)$$

$$Y_{21} = \frac{g_m \cdot e^{-j \cdot \omega \tau}}{1 + j \cdot \omega \cdot C_{gs} \cdot R_{gs}} - j \cdot \omega \cdot C_{gd}, \quad (3)$$

$$Y_{22} = 1/R_{ds} + j \cdot \omega \cdot (C_{ds} + C_{gd}), \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f,$$

где  $g_m$  – крутизна транзистора;  $f$  – частота, на которой измеряются параметры;  $C_{gs}$  – паразитная емкость затвор-исток;  $C_{gd}$  – паразитная емкость затвор-сток;  $C_{ds}$

– паразитная емкость сток-исток;  $R_{gs}$  – паразитное сопротивление затвор-исток;  $R_{ds}$  – паразитное сопротивление сток-исток.

В условиях уменьшения длины перекрытия канала стока и истока транзистора и уменьшения паразитного сопротивления, за счет изменений в процессах или материалах, действует следующее условие – пока имеются два проводящих материала, разделенных на входе затвора транзистора, будет образовываться паразитная емкость затвор-исток. Эта емкость шунтирует вход полевого транзистора на высоких частотах и является одной из основных причин, по которым коэффициент усиления устройства падает на высоких частотах [29].

Согласно работам [30–32], для рНЕМТ основными нелинейными параметрами, оказывающими наибольшее влияние на сжатие коэффициента передачи, являются нелинейности крутизны зависимого источника ( $g_m$ ) и выходной проводимости ( $G_0$ ).

В УРУ ячейки усиления расположены не последовательно, как в классических каскадных усилителях, а параллельно. Параллельные ячейки усиления размещены вдоль двух линий передачи (см. рис. 1).

Входы ячеек подключаются к входной линии передачи, выходы, соответственно, – к выходной через равные промежутки времени. Сигнал во время прохождения по входной линии передачи слева направо последовательно возбуждает каждую ячейку усиления и рассеивается в правом согласующем резисторе.

Расчет оптимального количества ячеек усиления

$$n = \frac{2 \cdot A}{g_m \cdot Z_0}, \quad (5)$$

где  $A$  – коэффициент усиления по напряжению;  $Z_0$  – 50 Ом.

Зная оптимальное количество ячеек усиления, можно провести расчет максимального коэффициента усиления по мощности (6):

$$G_{\max}(\omega) = \frac{g_m^2 \cdot Z_{0d} \cdot Z_{0g} \cdot \left( \sin \left( \frac{n \cdot (A_d(\omega) - A_g(\omega))}{2} \right) \right)^2 \cdot e^{(-n \cdot (A_d(\omega) + A_g(\omega)))}}{4 \cdot \left( 1 + \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right) \cdot \left( \sinh \left( \frac{A_d(\omega) - A_g(\omega)}{2} \right) \right)^2}, \quad (6)$$

Результаты предварительного расчета УРУ отображены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты предварительного расчета УРУ**

Параметр	Значение	Ед. изм.
Оптимальное число ячеек усиления $n$	10	–
Максимальный коэффициент усиления по мощности $G_{\max}$ на частоте 20 ГГц	16,07	дБ
Максимальная выходная мощность $P_{\text{вых, max}}$ на частоте 20 ГГц	18,74	дБм

**Результаты моделирования**

Как было определено в предварительном расчете, 10 ячеек усиления являются актуальным количеством для проектирования УРУ на выбранном арсенид галлиевом транзисторе. Для одиночного транзистора произведение коэффициента усиления на

$$P_{\text{вых}} = \frac{g_m^2 \cdot V_{\text{вх}}^2 \cdot e^{-n(A_g + A_d)} \cdot \sinh^2 \left[ \frac{n}{2} \cdot (A_g - A_d) \right]}{\left( 1 + \frac{\omega^2}{\omega_g^2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \right) \cdot \sinh^2 \left[ \frac{1}{2} \cdot (A_g + A_d) \right]}, \quad (7)$$

где  $g_m$  – крутизна транзистора;  $Z_{0d}$  – характеристическое сопротивление стоковой линии, Ом;  $Z_{0g}$  – характеристическое сопротивление затворной линии, Ом;  $n$  – количество ячеек усиления;  $A_d(\omega)$  – потери в стоковой искусственной линии передачи;  $A_g(\omega)$  – потери в затворной искусственной линии передачи;  $\omega$  – циклическая частота, Гц;  $\omega_c$  – циклическая частота среза, Гц.

Выходная мощность УРУ с учетом потерь в стоковой и затворной линии передачи рассчитывается по формуле (7) [33].

полосу пропускания в основном фиксировано. При увеличении ширины стока транзистора (периферии транзистора) его коэффициент усиления увеличивается, но полоса пропускания уменьшается из-за роста паразитной емкости.

В УРУ количество ячеек усиления можно увеличивать без ухудшения полосы пропускания. Это связано с тем, что паразитные емкости ячеек усиления

разделены секциями линий передачи, из-за чего происходит рост времени распространения сигнала от входа к выходу. Кроме того, источник и нагрузка подключаются к оконечным линиям передачи, благодаря чему УРУ присуще отличное широкополосное согласование. Из-за потерь в линиях передачи количество ячеек усиления нельзя увеличивать бесконечно.

Модель УРУ на сосредоточенных элементах из 10 ячеек усиления показана на рис. 4.

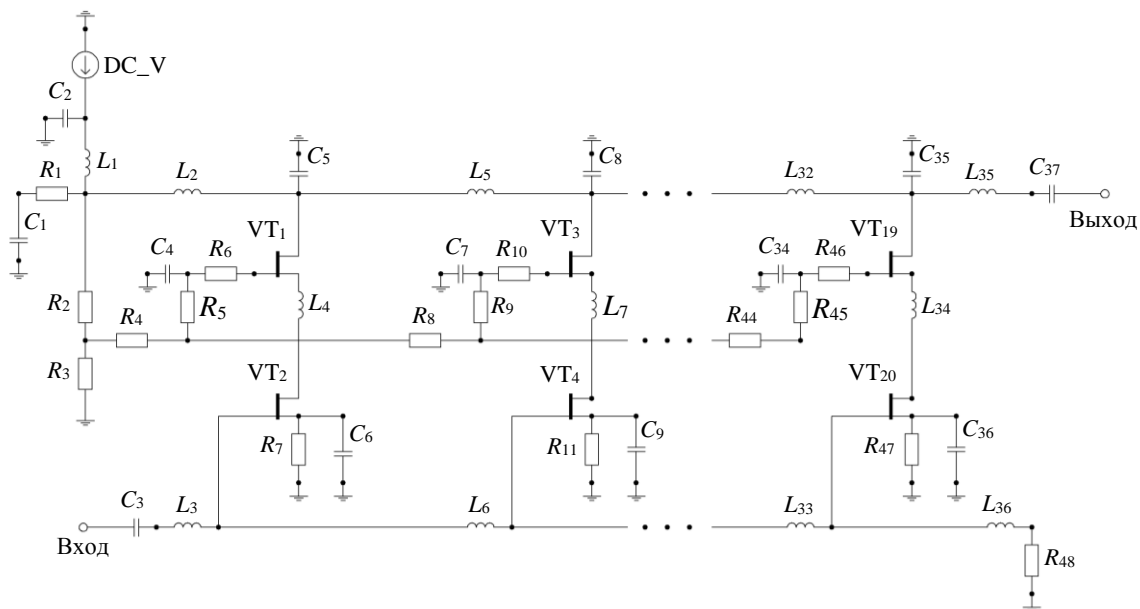


Рис. 4. Принципиальная схема УРУ с 10 ячейками усиления

Результаты моделирования коэффициента передачи, коэффициентов отражения по входу и выходу показаны на рис. 5, а выходной мощности УРУ в точке сжатия на 1 дБ показаны на рис. 6. Моделирование производилось при помощи САПР.

Оценим изменение коэффициента передачи, коэффициентов отражения по входу и выходу, а также выходной мощности в точке сжатия на 1 дБ с исполь-

зованием от 8 до 12 ячеек усиления. Для сравнения параметров УРУ при разном количестве ячеек усиления будем использовать принципиальную схему каскодного усилителя (см. рис. 4).

Рассмотрим результаты моделирования коэффициента передачи с разным количеством ячеек усиления (рис. 7). Моделирование производилось при помощи САПР.

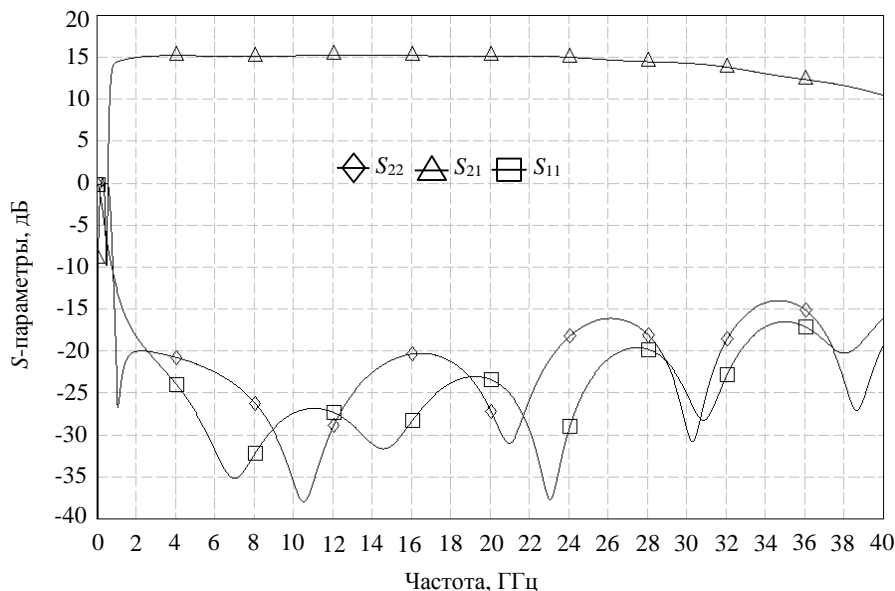


Рис. 5. S-параметры усилителя

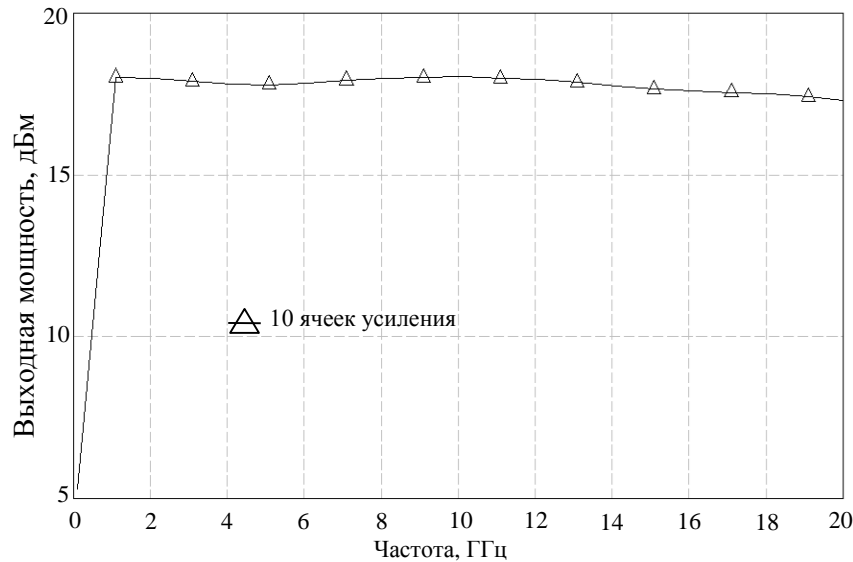
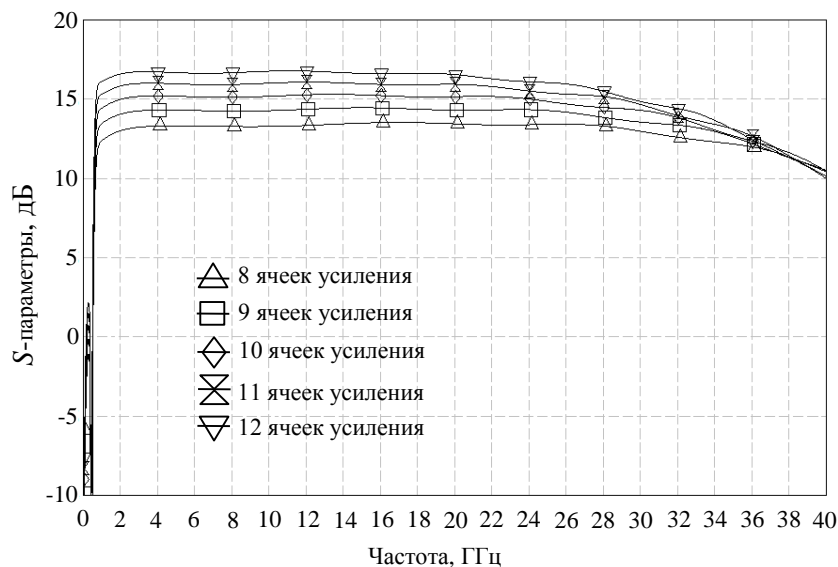


Рис. 6. Выходная мощность в точке сжатия на 1 дБ

Рис. 7. Коэффициент передачи ( $S_{21}$ )  $n$  ячеек усиления

Исходя из рисунка, видно, что с увеличением количества ячеек усиления происходит рост коэффициента передачи во всем диапазоне рабочих частот. Результаты, полученные на частоте от 2 до 20 ГГц, отображены в табл. 3.

Таблица 3  
Результаты моделирования коэффициента передачи в САПР

Количество ячеек усиления	Коэффициент передачи на частоте		Ед. изм.
	2 ГГц	20 ГГц	
8	13	13,44	дБ
9	14,04	14,3	дБ
10	15,01	15,2	дБ
11	15,81	15,93	дБ
12	16,58	16,54	дБ

По полученным данным можно сказать, что увеличение количества ячеек усиления не приводит к значительному увеличению коэффициента передачи, в особенности с использованием 11 и 12 ячеек уси-

ния, где прирост на частоте 20 ГГц составил 0,73 и 0,61 дБ соответственно.

На рис. 8 представлен результат моделирования выходной мощности в точке сжатия на 1 дБ.

Увеличение количества ячеек усиления приводит к росту выходной мощности во всем рабочем диапазоне частот. Стоит отметить, что для случая с использованием 12 ячеек виднеется резкий спад характеристики на частотах от 18 до 20 ГГц. Помимо этого, возрастает неравномерность характеристики. Полученные результаты отображены в табл. 4.

Исходя из результатов, представленных в табл. 3, можно сказать, что увеличение количества ячеек усиления незначительно увеличивает выходную мощность УРУ. Прирост от использования оптимального количества ячеек усиления (10) по сравнению с 11 ячейками составил 0,34 дБм на частоте 2 ГГц и 0,22 дБм на частоте 20 ГГц. Дальнейшее увеличение ячеек усиления не даст ощутимого роста выходной мощности, так как за каждую добавленную ячейку

прирост будет составлять примерно от 0,15 до 0,1 дБм, но приведет к ухудшению коэффициентов

отражения по входу и выходу, ухудшению стабильности, увеличению размера и удорожанию микросхемы.

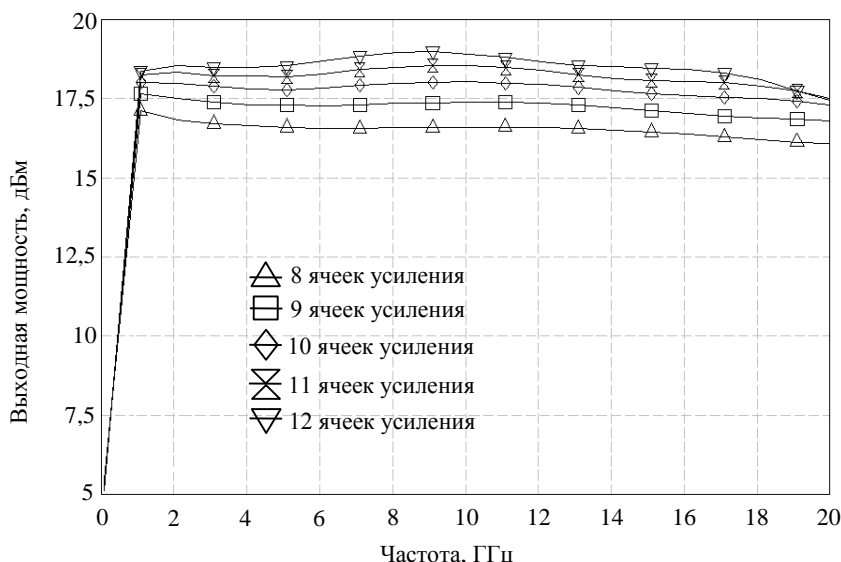


Рис. 8. Выходная мощность в точке сжатия на 1 дБ для  $n$  ячеек усиления

Таблица 4

**Результаты моделирования  
выходной мощности в САПР**

Количество ячеек усиления	Выходная мощность на частоте		Ед. изм.
	2 ГГц	20 ГГц	
8	16,86	16,07	дБм
9	17,52	16,79	дБм
10	17,98	17,3	дБм
11	18,32	17,2	дБм
12	18,52	17,2	дБм

**Заключение**

В настоящей работе было проведено исследование усилителя распределенного усиления на основе GaAs полевых транзисторов. В ходе работы были оценены основные параметры транзистора GaAs pHEMT025D, был произведен расчет оптимального количества ячеек усиления, а также расчет каскадного усилителя распределенного усиления, получена его принципиальная схема, работающая в диапазоне от 2 до 20 ГГц. По результатам работы можно отметить следующее:

- Использование 10 ячеек усиления для транзистора GaAs pHEMT025D является оптимальным.
- Дальнейшее увеличение числа ячеек не приводит к увеличению коэффициента передачи и уровня выходной мощности. Превышение оптимального количества приводит к снижению уровня выходной мощности на верхних частотах. Результаты исследования будут полезны при проектировании усилителей распределенного усиления в монолитно-интегральном исполнении.
- Полученные характеристики усилителя распределенного усиления с использованием оптимального количества ячеек усиления (10) полностью соответствуют аналогам на рынке.

Работа выполнена с использованием библиотеки проектирования, предоставленной АО «Светлана-Рост» для научно-образовательных целей.

*Литература*

1. Схемотехника аналоговых электронных устройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wm-help.net/lib/b/book/1865579333/52>, свободный (дата обращения: 04.04.2023).
2. Husna Hamza K. A review of GaN HEMT broadband power amplifiers / K. Husna Hamza, D. Nirmal // International Journal of Electronics and Communications. – 2020. – Vol. 2, No. 116. – P. 1–11.
3. Ginzton E.L. Distributed Amplification / E.L. Ginzton, W.R. Hewlett, J.H. Jasberg, J.D. Noe // Proceedings of the IRE. – 1948. – Vol. 8, No. 36. – P. 956–969.
4. Arbabian A. A Broadband Distributed Amplifier with Internal Feedback Providing 660 GHz GBW in 90 nm CMOS / A. Arbabian, A.M. Nikejad // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2008. – P. 196–197.
5. Tsai M.-D. A 70 GHz Cascaded Multi-Stage Distributed Amplifier in 90 nm CMOS Technology / M.-D. Tsai, H. Wang, J.-F. Kuan, C.-S. Chang // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2008. – P. 402–403.
6. Chien L. 40-Gb/s High-Gain Distributed Amplifiers with Cascaded Gain Stages in 0.18- $\mu$ m CMOS / L. Chien, L. Lu // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2007. – Vol. 42, No. 12. – P. 2715–2725.
7. Jahanian A. A CMOS Distributed Amplifier with Distributed Active Input Balun Using GBW and Linearity Enhancing Techniques / A. Jahanian, P. Heydari // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60, No. 5. – P. 1331–1341.
8. Poluchart J. A 4–91-GHz Traveling-Wave Amplifier in a Standard 0.12- $\mu$ m SOI CMOS Microprocessor Technology // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2004. – Vol. 39, No. 9. – P. 1445–1461.
9. Kim J. A 92 GHz Bandwidth Distributed Amplifier in a 45 nm SOI CMOS Technology / J. Kim, J.F. Buckwalter // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2011. – Vol. 21, No. 6. – P. 329–331.
10. Liu R. An 80 GHz Travelling-Wave Amplifier in a 90 nm CMOS Technology / R. Liu, T. Wang, L. Lu, H. Wang, S. Wang, C. Chao // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2005. – P. 154–155.

11. Arbabian A. Design of a CMOS Tapered Cascaded Multistage Distributed Amplifier / A. Arbabian, A.M. Niknejad // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2009. – Vol. 57, No. 4. – P. 938–947.
12. Yazdi A. A 1.8 V Three-Stage 25 GHz 3 dB-BW Differential Non-Uniform Downsized Distributed Amplifier / A. Yazdi, D. Lin, P. Heydari // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2005. – P. 156–157.
13. Fang K. Supply-Scaling for Efficiency Enhancement in Distributed Power Amplifiers / K. Fang, C.S. Levy, J.F. Buckwalter // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2016. – Vol. 51, No. 9. – P. 1994–2005.
14. Afshari E. Electrical Funnel: A Broadband Signal Combining Method / E. Afshari, H. Bhat, A. Hajimini // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2006. – P. 751–760.
15. Chen J. Design and Analysis of a Stage-Scaled Distributed Power Amplifier / J. Chen, A.M. Niknejad // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011. – Vol. 59, No. 5. – P. 1274–1283.
16. Zhang Y. A 2–22 GHz CMOS Distributed Power Amplifier with Combined Artificial Transmission Lines / Y. Zhang, K. Ma // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2017. – Vol. 27, No. 12. – P. 1122–1124.
17. Gao L. A 1–17 GHz Stacked Distributed Power Amplifier with 19–21 dBm Saturated Output Power in 45 nm CMOS SOI Technology / L. Gao, Q. Ma, G.M. Rebeiz // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2018. – P. 454–456.
18. Tarar M.M. Design and Implementation of Wideband Stacked Distributed Power Amplifier in 0.13- $\mu$ m CMOS Using Uniform Distributed Topology / M.M. Tarar, R. Negra // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2017. – Vol. 65, No. 12. – P. 5212–5222.
19. Fang K. Efficient Linear Millimeter-Wave Distributed Transceivers in CMOS SOI / K. Fang, J.F. Buckwalter // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Vol. 67, No. 1. – P. 295–307.
20. Kobayashi K.W. A Novel 100 MHz–45 GHz Input-Termination-Less Distributed Amplifier Design with Low-Frequency Low-Noise and High Linearity Implemented with a 6 Inch 0.15  $\mu$ m GaN-SiC Wafer Process Technology / K.W. Kobayashi, D. Denninghoff, D. Miller // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2016. – Vol. 51, No. 9. – P. 2017–2026.
21. Heydari P. Design and Analysis of a Performance-Optimized CMOS UWB Distributed LNA // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2007. – Vol. 42, No. 9. – P. 1892–1905.
22. Distributed Amplification in CMOS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.mos6581.org/files/Brecht\\_Machiels\\_Distributed\\_Amplification\\_in\\_CMOS.pdf](https://www.mos6581.org/files/Brecht_Machiels_Distributed_Amplification_in_CMOS.pdf), свободный (дата обращения: 15.05.2023).
23. Campbell C.A. Wideband Power Amplifier MMIC Utilizing GaN on SiC HEMT Technology // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2009. – Vol. 44, No. 10. – P. 2640–2647.
24. Banyamin B. The Gain Advantages of Four Cascaded Single Stage Distributed Amplifier Configurations / B. Banyamin, M. Berwick // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2000. – P. 1325–1328.
25. Chirala M.K. Design of an Ultra-Small Distributed Low-Noise-Amplifier for Ultra-Wideband Applications / M.K. Chirala, C. Huynh, C. Nguyen, X. Guan // IEEE Proceedings of APSURSI. – 2011. – P. 3361–3364.
26. Banyamin B.Y. Analysis of the Performance of Four-Cascaded Single-Stage Distributed Amplifiers / B.Y. Banyamin, M. Berwick // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2000. – P. 2657–2663.
27. Гоголев Н.И. Усилители с распределенным усилением / Н.И. Гоголев, А. Салих, Д.С. Брагин, В.Д. Дмитриев //

Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2022. – Вып. 4. – С. 155–162.

28. Grebennikov A. Distributed Power Amplifiers for RF and Microwave Communications / A. Grebennikov, N. Kumar. – Artech, 2015. – 439 p.
29. Broadband Microwave Amplifiers in Deep Submicron CMOS-Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/13084/1/fulltext.pdf>, свободный (дата обращения: 29.05.2023).
30. Beibei Wang. Advances in Cognitive Radio Networks: A survey / Beibei Wang, K.J. Ray Liu // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. – 2011. – Vol. 5, No. 1. – P. 5–23.
31. Дмитриев В. Оценка параметров pHEMT-СВЧ-полевого транзистора по нелинейным критериям / В. Дмитриев, В. Коротаев, Д. Шишкин. – Доклады ТУСУР. – 2011. – Т. 24, вып. 2. – С. 46–50.
32. Алексеев О.В. Усилители мощности с распределенным усилением. – Л.: Энергия, 1968. – 221 с.
33. A 70-GHz Bandwidth and 9-dB Gain Travelling Wave Amplifier Using 0.15- $\mu$ m Gate InGaP/InGaAs HEMTs with Coplanar Transmission Line Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/224691658\\_A\\_70GHz\\_Bandwidth\\_and\\_9dB\\_Gain\\_Travelling\\_Wave\\_Amplifier\\_Using\\_015mm\\_Gate\\_In-GaPInGaAs\\_HEMTs\\_with\\_Coplanar\\_Transmission\\_Line\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/224691658_A_70GHz_Bandwidth_and_9dB_Gain_Travelling_Wave_Amplifier_Using_015mm_Gate_In-GaPInGaAs_HEMTs_with_Coplanar_Transmission_Line_Technology), свободный (дата обращения: 9.06.2023).

#### Гоголев Никита Игоревич

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-15  
Эл. почта: [gni@fb.tusur.ru](mailto:gni@fb.tusur.ru)

#### Салих Аятулла

Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-15  
Эл. почта: [sak@csp.tusur.ru](mailto:sak@csp.tusur.ru)

#### Брагин Дмитрий Сергеевич

Ст. преп. каф. ТОР ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29  
Эл. почта: [bds@csp.tusur.ru](mailto:bds@csp.tusur.ru)

#### Дмитриев Владимир Дмитриевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-98  
Эл. почта: [dvd51@mail.ru](mailto:dvd51@mail.ru)

Gogolev N.I., Salikh A., Bragin D.S., Dmitriev V.D.  
**Study of the characteristics of a distributed gain amplifier based on GaAs field-effect transistors**

The distributed amplifier is an effective solution for creating broadband amplifiers in wireless communication, pulse and measurement technology. In this study, a distributed amplification amplifier based on GaAs field-effect transistors was deve-

loped. The optimal number of amplification cells was determined and a cascaded distributed amplification amplifier with a schematic diagram operating in the range of 2 to 20 GHz was designed. Preliminary calculations of the main characteristics of the amplifier were also performed, and based on them, a model of the distributed amplification amplifier was constructed, which was simulated in CAD. The changes in the gain and output power when compressed by 1 dB depending on the number of amplification cells were analyzed. The results of the study can be used in designing distributed amplification amplifiers for various systems in modern radio electronics.

**Keywords:** gallium arsenide (GaAs), HEMT, cascode, DA, wideband.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2023-26-3-32-40

### References

1. *Skhemitekhnika analogovykh elektronnykh ustrojstv* [Analog Electronics Circuit Design]. Available at: <https://wm-help.net/lib/b/book/1865579333/52>, free (Accessed: April 04, 2023) (in Russ.).
2. Husna Hamza K., Nirmal D. A review of GaN HEMT broadband power amplifiers. *International Journal of Electronics and Communications*, 2020, vol. 2, no. 116, pp. 1–11.
3. Ginzton E.L., Hewlett W.R., Jasberg J.H., Noe J.D. Distributed Amplification. *Proceedings of the IRE*, 1948, vol. 8, no. 36, pp. 956–969.
4. Arbabian A., Nikejad A.M. A Broadband Distributed Amplifier with Internal Feedback Providing 660 GHz GBW in 90 nm CMOS. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2008, pp. 196–197.
5. Tsai M.-D., Wang H., Kuan J.-F., Chang C.-S. A 70 GHz Cascaded Multi-Stage Distributed Amplifier in 90 nm CMOS Technology. *International Solid-State Circuits Conference*, 2008, pp. 402–403.
6. Chien L., Lu L. 40-Gb/s High-Gain Distributed Amplifiers with Cascaded Gain Stages in 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2007, vol. 42, no. 12, pp. 2715–2725.
7. Jahanian A., Heydari P. A CMOS Distributed Amplifier with Distributed Active Input Balun Using GBW and Linearity Enhancing Techniques. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, vol. 60, no. 5, pp. 1331–1341.
8. Poluchart J. A 4–91-GHz Traveling-Wave Amplifier in a Standard 0.12- $\mu\text{m}$  SOI CMOS Microprocessor Technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2004, vol. 39, no. 9, pp. 1445–1461.
9. Kim J., Buckwalter J.F. A 92 GHz Bandwidth Distributed Amplifier in a 45 nm SOI CMOS Technology. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2011, vol. 21, no. 6, pp. 329–331.
10. Liu R., Wang T., Lu L., Wang H., Wang S., Chao C. An 80 GHz Travelling-Wave Amplifier in a 90 nm CMOS Technology. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2005, pp. 154–155.
11. Arbabian A., Nikejad A.M. Design of a CMOS Tapered Cascaded Multistage Distributed Amplifier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, vol. 57, no. 4, pp. 938–947.
12. Yazdi A., Lin D., Heydari P. A 1.8 V Three-Stage 25 GHz 3 dB-BW Differential Non-Uniform Downsized Distributed Amplifier. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2005, pp. 156–157.
13. Fang K., Levy C.S., Buckwalter J.F. Supply-Scaling for Efficiency Enhancement in Distributed Power Amplifiers. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, vol. 51, no. 9, pp. 1994–2005.
14. Afshari E., Bhat H., Hajimimi A. Electrical Funnel: A Broadband Signal Combining Method. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2006, pp. 751–760.
15. Chen J., Niknejad A.M. Design and Analysis of a Stage-Scaled Distributed Power Amplifier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, vol. 59, no. 5, pp. 1274–1283.
16. Zhang Y., Ma K. A 2–22 GHz CMOS Distributed Power Amplifier with Combined Artificial Transmission Lines. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, vol. 27, no. 12, pp. 1122–1124.
17. Gao L., Ma Q., Rebeiz G.M. A 1–17 GHz Stacked Distributed Power Amplifier with 19–21 dBm Saturated Output Power in 45 nm CMOS SOI Technology. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2018, pp. 454–456.
18. Tarar M.M., Negra R. Design and Implementation of Wideband Stacked Distributed Power Amplifier in 0.13- $\mu\text{m}$  CMOS Using Uniform Distributed Topology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, vol. 65, no. 12, pp. 5212–5222.
19. Fang K., Buckwalter J.F. Efficient Linear Millimeter-Wave Distributed Transceivers in CMOS SOI. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, vol. 67, no. 1, pp. 295–307.
20. Kobayashi K.W., Denninghoff D., Miller D. A Novel 100 MHz–45 GHz Input-Termination-Less Distributed Amplifier Design with Low-Frequency Low-Noise and High Linearity Implemented with A 6 Inch 0.15  $\mu\text{m}$  GaN-SiC Wafer Process Technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, vol. 51, no. 9, pp. 2017–2026.
21. Heydari P. Design and Analysis of a Performance-Optimized CMOS UWB Distributed LNA. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2007, vol. 42, no. 9, pp. 1892–1905.
22. Distributed Amplification in CMOS. Available at: [https://www.mos6581.org/files/Brecht\\_Machiels\\_Distributed\\_Amplification\\_in\\_CMOS.pdf](https://www.mos6581.org/files/Brecht_Machiels_Distributed_Amplification_in_CMOS.pdf), free. (Accessed: May 15, 2023).
23. Campbell C.A. Wideband Power Amplifier MMIC Utilizing GaN on SiC HEMT Technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, vol. 44, no. 10, pp. 2640–2647.
24. Banyamin B., Berwick M. The Gain Advantages of Four Cascaded Single Stage Distributed Amplifier Configurations. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2000, pp. 1325–1328.
25. Chirala M.K., Huynh C., Nguyen C., Guan X. Design of an Ultra-Small Distributed Low-Noise-Amplifier for Ultra-Wideband Applications. *IEEE Proceedings of APSURSI*, 2011, pp. 3361–3364.
26. Banyamin B.Y., Berwick M. Analysis of the Performance of Four-Cascaded Single-Stage Distributed Amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, pp. 2657–2663.
27. Gogolev N.I., Salih A., Bragin D.S., Dmitriev V.D. *Usiliteli s raspredelennym usileniem* [Distributed Gain Amplifiers]. *Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2022, no. 4, pp. 155–162. (In Russ.).
28. Grebennikov A., Kumar N. Distributed Power Amplifiers for RF and Microwave Communications. Artech, 2015, 439 p.
29. Broadband Microwave Amplifiers in Deep Submicron CMOS Technology. Available at: <https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/13084/1/fulltext.pdf>, free (Accessed: May 29, 2023).
30. Beibei Wang, Liu K.J.R. Advances in Cognitive Radio Networks: Asurvey. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 5–23.



31. Dmitriev V., Korotaev V., Shishkin D. *Ocenka Parametrov pHEMT SVCH Polevogo Tranzistora po Nelinejnym Kriteriyam* [Evaluation of pHEMT Microwave Field Effect Transistor Parameters by Nonlinear Criteria]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, vol. 24, no. 2, pp. 46–50 (in Russ.).

32. Alekseev O.V. *Usiliteli moshchnosti s raspredelenym usileniem* [Distributed power amplifier]. Leningrad, Energiya Publ., 1968. 221 p. (in Russ.).

33. A 70-GHz Bandwidth and 9-dB Gain Travelling Wave Amplifier Using 0.15- $\mu$ m Gate InGaP/InGaAs HEMTs with Coplanar Transmission Line Technology. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/224691658\\_A\\_70GHz\\_Bandwidth\\_and\\_9dB\\_Gain\\_Travelling\\_Wave\\_Amplifier\\_Using\\_015mm\\_Gate\\_InGaPInGaAs\\_HEMTs\\_with\\_Coplanar\\_Transmission\\_Line\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/224691658_A_70GHz_Bandwidth_and_9dB_Gain_Travelling_Wave_Amplifier_Using_015mm_Gate_InGaPInGaAs_HEMTs_with_Coplanar_Transmission_Line_Technology), free (Accessed: June 9, 2023).

---

**Nikita I. Gogolev**

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 (382-2) 70-15-15  
Email: gni@fb.tusur.ru

**Ayatulla Salikh**

Postgraduate student, Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 70-15-15  
Email: sak@csp.tusur.ru

**Dmitry S. Bragin**

Senior Lecturer, Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-0875-3301  
Phone: +7 (382-2) 70-15-29  
Email: bds@csp.tusur.ru

**Vladimir D. Dmitriev**

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor at the Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-33-98  
Email: dvd51@mail.ru