

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.12>

УДК 621.375.132

GaN МИС МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ X-ДИАПАЗОНА

Е. Кудабай, А. Салих, В.А. Мосейчук, А. Кривцун, Д. С. Брагин, В. Д. Дмитриев
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634045, Томск, ул. Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2020 г., после доработки – 17 февраля 2021 г.

Аннотация. Целью данной работы является проектирование монолитно-интегральной схемы (МИС) малошумящего усилителя (МШУ) X-диапазона (7-12 ГГц) на основе технологии нитрид-галлиевого (GaN) транзистора с повышенной подвижностью электронов (HEMT) с шириной ножки T-образного затвора в 100 нм на кремниевой (Si) полуизолирующей подложке французской компании OMMIC. Усилитель основан на транзисторах с общим истоком с последовательной отрицательной обратной связью (ООС) в виде высокоомного отрезка линии передач, а также с параллельной ООС для согласования коэффициента шума и коэффициента усиления по мощности (КПМ) в соответствии с методикой совмещенного согласования. Ключевыми характеристиками МШУ являются коэффициент шума и коэффициент усиления. В данной статье было принято решение о проектировании МШУ, который должен иметь хороший запас с точки зрения входной и выходной мощности. В результате чего была выбрана GaN технология, которая обладает большим, по сравнению с иными технологиями, коэффициентом шума, но позволяет отказаться от ограничителя мощности на входе, который в значительной степени повышает общий коэффициент шума. В результате разработки и применения метода совмещенного согласования была разработана МИС МШУ со следующими характеристиками: коэффициент шума менее 1.6 дБ, мало-сигнальное усиление более 20 дБ, возвратные потери менее -13 дБ и выходная мощность более 19 дБмВт с компрессией КПМ на 1 дБ в диапазоне от 7 до 12 ГГц в габаритах 2x1.5 мм², который обладает напряжением питания 8 В

и потреблением тока менее 70 мА. На данном этапе реализовано только моделирование МШУ в среде AWR DE.

Ключевые слова: нитрид-галлия (GaN), HEMT, МШУ, X-диапазон, СВЧ МИС, коэффициент шума, метод совмещенного согласования.

Abstract. The purpose of this paper is to design a microwave monolithic integrated circuit (MMIC) for low noise amplifier (LNA) X-band (7-12 GHz) based on technology of gallium nitride (GaN) high electron mobility transistor (HEMT) with a T-gate, which has 100 nm width, on a silicon (Si) semi-insulating substrate of the OMMIC company. The amplifier is based on common-source transistors with series feedback, which was formed by high-impedance transmission line, and with parallel feedback to match noise figure and power gain. The key characteristics of an LNA are noise figure and gain. However, in this paper, it was decided to design the LNA, which should have a good margin in terms of input and output power. As a result, GaN technology was chosen, which has a higher noise figure compared to other technologies, but eliminates the need for an input power limiter, which in turn significantly increases the overall noise figure. As a result LNA MMIC was developed with the following characteristics: noise figure less than 1.6 dB, small-signal gain more than 20 dB, return loss better than -13 dB and output power more than 19 dBm with 1 dB compression in the range from 7 to 12 GHz in dimensions 2x1.5 mm², which has a supply voltage of 8 V and a current consumption of less than 70 mA. However, it should be said that LNA was only modeled in the AWR DE.

Keywords: gallium nitride (GaN), HEMT, low-noise amplifier (LNA), X-band, MMIC, noise figure (NF).

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция все большего возрастания роли активных фазированных антенных решеток (АФАР). Одним из важнейших элементов в АФАР являются малошумящие усилители. В данный момент в МШУ предпочтительнее использовать GaN HEMT, хотя они и обладают большим коэффициентом шума, но могут предложить большую

надежность с точки зрения входной мощности и меньший коэффициент шума ввиду отсутствия ограничителя мощности, который, как правило, сильно увеличивает коэффициент шума [1]. Также в настоящее время существует множество публикаций, которые показывают хорошую надежность [2, 3], мультидиапазонность [1, 4] и хорошую выходную мощность малошумящих усилителей [5, 6, 7], однако мало статей, представляющих сбалансированные параметры малошумящих усилителей с GaN HEMT, с точки зрения усиления, коэффициента шума и надежности. В данной статье представлен МИС МШУ с GaN HEMT X-диапазона с довольно простой структурой, малыми размерами и низким потреблением.

Структура МШУ

Требовалось создать усилитель с коэффициентом усиления 20 дБ, выходной мощностью 20 дБмВт, коэффициентом шума менее 1.6 дБ. МШУ был спроектирован как двухкаскадный усилитель с применением двух GaN HEMT, которые имеют T-образный затвор шириной 100 нм, на полуизолирующей кремниевой подложке толщиной 100 мкм с длиной стока 6x40 и 6x25 мкм в первом и втором каскадах, соответственно.

В первом каскаде помимо ключевых требований МШУ, таких как коэффициент усиления и коэффициент шума, также необходимо было обеспечить хорошее входное согласование. Для приведенных выше требований оптимальным являлся усилитель, у которого условия по максимуму коэффициента передачи по мощности (КПМ) и минимуму коэффициента шума совпадают. По этой причине была применена методика совмещенного согласования, которая заключается в том, что обеспечивая необходимый импеданс или коэффициент отражения на выходе транзистора, сделать минимальным коэффициент шума и максимальным коэффициент передачи по мощности. То есть оптимальный коэффициент (GMN) и входной коэффициенты отражения (S11) должны быть комплексно-сопряженными. На рисунке 1 представлены диаграммы Вольперта-Смита с GMN и S11 с

различными реализациями первого каскада, а именно: отдельно транзистора (диаграмма А), транзистора с последовательной обратной отрицательной связью (ООС) (диаграмма Б), и с транзистором с последовательной ООС, нагруженного на оптимальный импеданс, который позволяет совместить условия по минимуму коэффициента шума и максимуму КПМ (диаграмма В). Данная методика описывается следующей формулой [8]:

$$\Gamma_S = S_{11} + \frac{S_{12} \cdot S_{21} \cdot \Gamma_L}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_L} \quad (1)$$

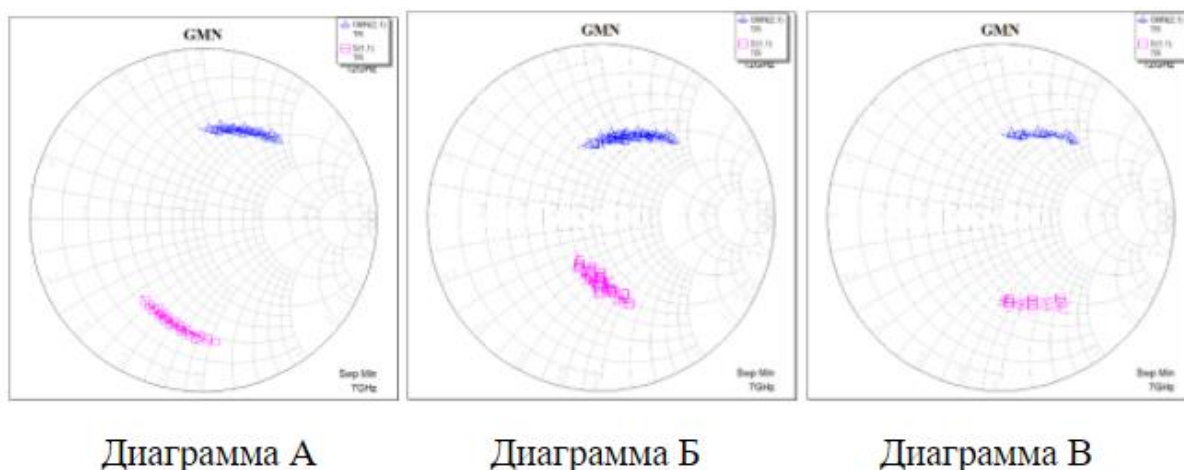


Рис.1. Диаграммы Вольперта Смита с GMN и S11. Диаграмма А: только транзистор, диаграмма Б: при введении последовательной ООС, диаграмма В: при рассогласовании на выходе.

Анализируя данную формулу (1), можно сказать, что помимо изменения импеданса или коэффициента отражения на выходе транзистора, согласование можно выполнить с помощью изменения параметров самого транзистора, то есть при внедрении цепей отрицательных обратных связей, изменением периферии (длины стока транзистора) и рабочей точки транзистора.

В результате варьирования конфигурации и рабочей точки транзистора, глубины отрицательных обратных связей и внедрения входной согласующей цепи получились следующие характеристики для первого каскада: коэффициент шума менее 1 дБ, коэффициент усиления более 8 дБ, входной коэффициент отражения менее -14 дБ в диапазоне от 7 до 12 ГГц. При таком

усилении шумовой вклад последующих каскадов в общий коэффициент шума составил не более 0.3 дБ. Режим работы транзистора первого каскада был выбран следующим: $V_{ds}=8$ В, $V_{gs}=-1.25$ В. Ток стока при такой рабочей точке менее 30 мА.

Далее необходимо было добрать необходимое усиление и обеспечить достаточное согласование с нагрузкой. Для этого был введен второй каскад с типичной выходной цепью, выполненной в другом слое подложки, отличающимся более высоким погонным сопротивлением. Критерием для его проектирования была схожесть входных импедансов второго каскада с выходными импедансами первого каскада, чтобы упростить проектирование межкаскадной цепи. Задача коррекции коэффициента усиления была решена посредством реализации межкаскадной согласующей цепи в виде П-образного звена фильтра высоких частот (ФВЧ). Режим работы транзистора был выбран следующий: $V_{ds}=8$ В, $V_{gs}=-1.25$ В. Ток стока при такой рабочей точке составил менее 40 мА. В результате проектирования неравномерность оказалась менее 2 дБ.

Схема и топология малошумящего усилителя представлена на рисунках ниже.

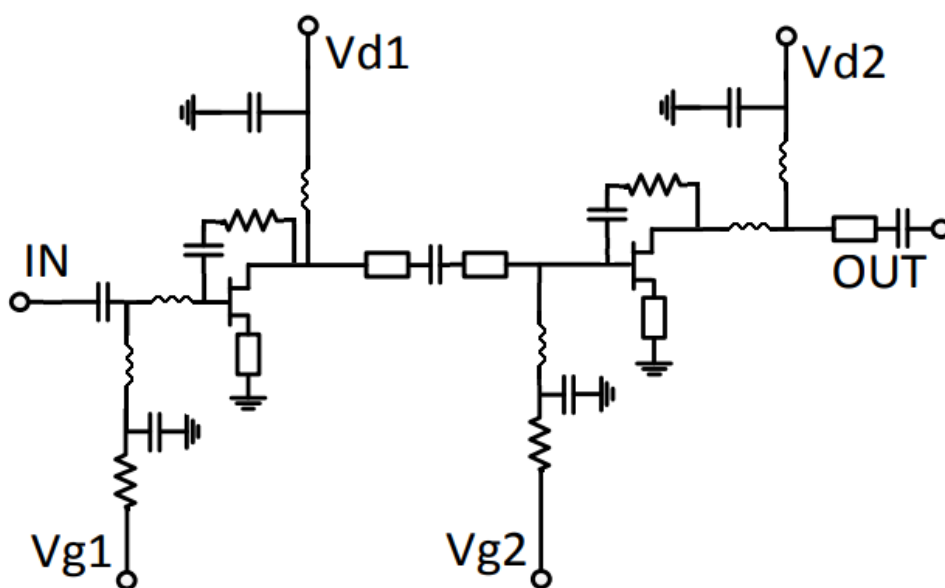


Рис. 2. Электрическая схема малошумящего усилителя.

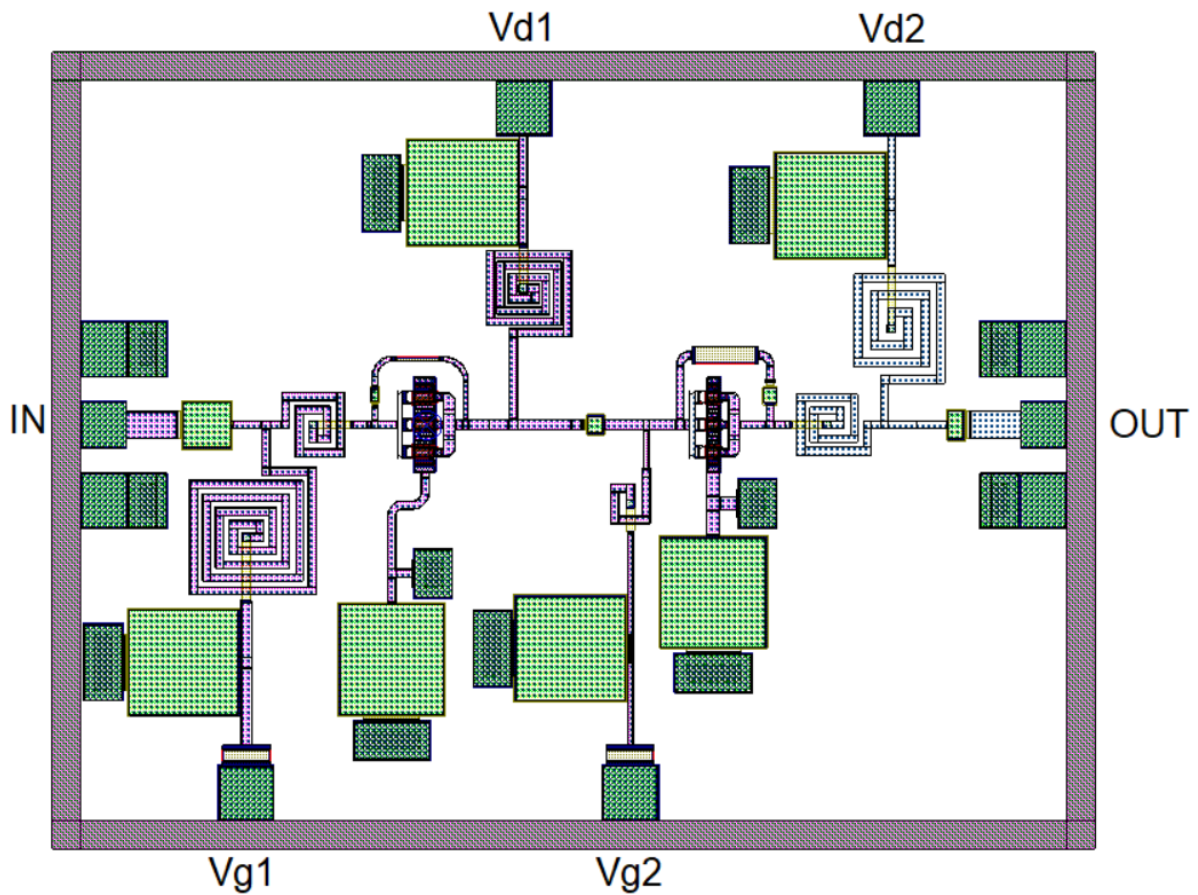


Рис. 3. Топология двухкаскадного усилителя.

Моделирование

В результате моделирования получились следующие параметры: коэффициент шума 1.6 дБ, коэффициент усиления 20 дБ, коэффициенты отражения менее -13 дБ, выходная мощность 19 дБмВт. Все характеристики представлены на рисунках ниже. На рисунке 4 точки m4, m5, m12 показывают значение коэффициента шума. На рисунке 5: точка m1 показывает значение коэффициента усиления по мощности на линейном участке, m4 показывает значение коэффициента усиления по мощности с компрессией в 1 дБ и m3 показывает выходную мощность с компрессией в 1 дБ.

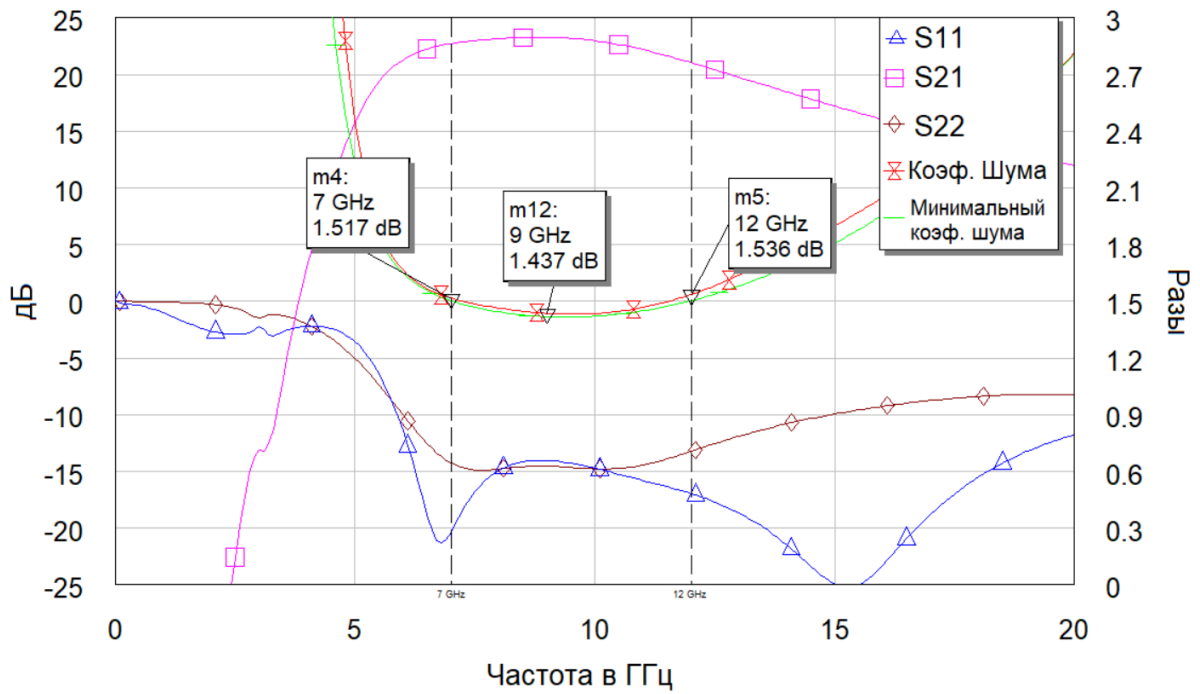


Рис. 4. Коэффициент шума, коэффициент усиления, S11, S22 и коэффициент устойчивости двухкаскадного усилителя.

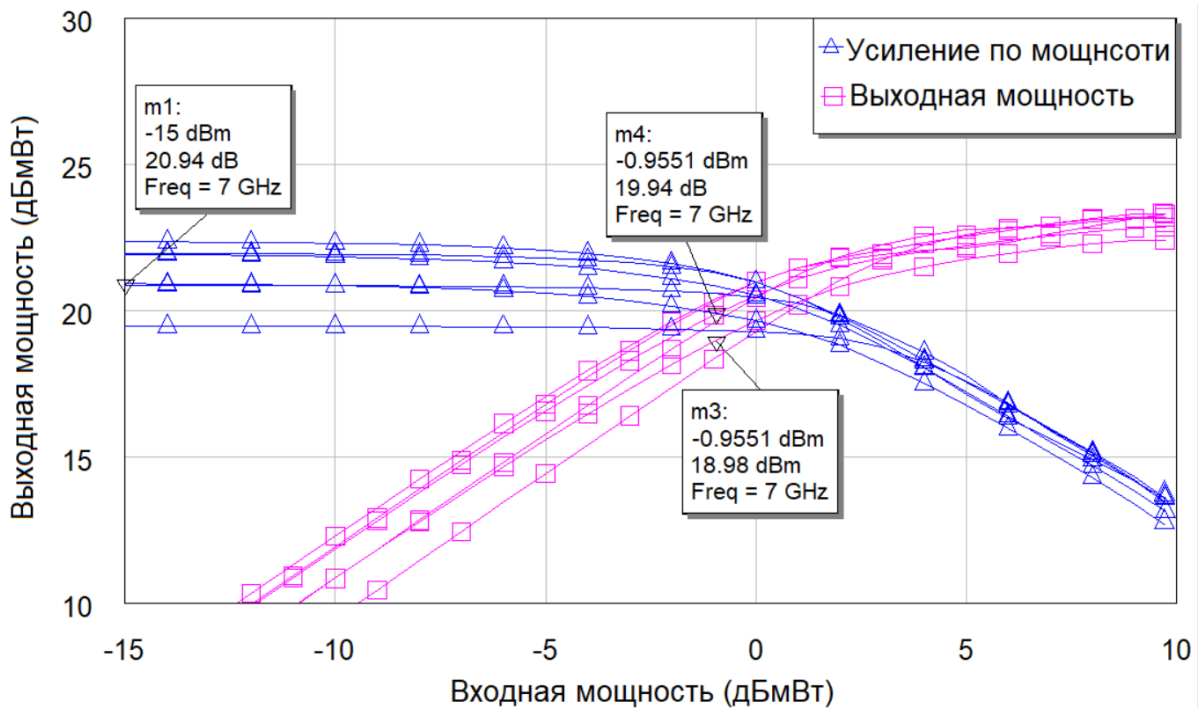


Рис. 5. Выходная мощность с компрессией на 1 дБ и коэффициент усиления по мощности.

Заключение

После выполнения данного исследования можно сказать, что GaN HEMT позволяют выполнять малошумящие усилители с параметрами, схожими по параметрам с кремниевыми технологиями, но обладают лучшими мощностными характеристиками. Данный МШУ обладает следующими характеристиками: коэффициент шума менее 1.6 дБ, коэффициент усиления более 20 дБ, коэффициенты отражения менее -13 дБ, выходная мощность более 19 дБмВт, что сравнимо с современными аналогами, однако значительно снижено потребление тока, которое составляет менее 80 мА.

Литература

1. Mattamana A., Gouty W., Khalil W., Watson P., Patel V.J. Multi-octave and Frequency-agile LNAs Covering S-C Band using 0.25 μm GaN Technology. *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*. 23-26 Oct. 2016.
2. Andrei C., Bengtsson O., Doerner R., Chevchenko S.A., Heinrich W., Rudolph M. Dynamic behaviour of a Low-Noise Amplifier GaN MMIC under input power overdrive. *European Microwave Conference (EuMC)*. 7-10 Sept. 2015.
3. Schmid U, Reber R., Schuh P., Oppermann M. Robust Wideband LNA Designs. *European Microwave Integrated Circuit Conference*. 6-7 Oct. 2014.
4. Kobayashi K.W., Campbell C., Lee C., Gallagher J., Shust J., Botelho A. A Reconfigurable S-/X-band GaN Cascode LNA MMIC. *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*. 22-25 Oct. 2017
5. Chang W., Jeon G.-Y., Park Y.-R., Lee S., Mn J.-K. X-band Low Noise Amplifier MMIC Using AlGaIn/GaN HEMT Technology on SiC Substrate. *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC-2013)*. 5-8 Nov. 2013.
6. Vittori M., Colangeli S., Ciccognani W., Salvucci A., Polli G., Limiti E. High performance X-band LNAs using a 0.25 μm GaN technology. *13th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*. 12-15 June 2017.

7. Zheng P, Zhang S., Xu J., Wang R., Tong X. A 23-31 GHz Robust Low-Noise Amplifier with 1.1 dB Noise Figure and 28 dBm Psat. *49th European Microwave Conference (EuMC)*. 1-3 Oct. 2019.
8. Кондратенко А.В., Баров А.А., Арыков В.С. GaAs МИС малошумящего усилителя X-диапазона. *Микроэлектроника СВЧ: Сборник трудов конференции*. 2012. №1. С.160 – 164.
9. Текшев В.Б. Минимизация изменения коэффициента шума усилителя сканирующей приемной активной фазированной антенной решетки. В сб. *Электронная техника. Сер. СВЧ-техника*. 1994. 462 с.
10. Robertson I.D., Lucyszyn S. *RFIC and MMIC design and technology*. London, IEE. 2001. 582 p.

Для цитирования:

Кудабай Е., Салих А., Мосейчук В.А., Кривцун А., Брагин Д.С., Дмитриев В.Д. GaN МИС малошумящего усилителя X-диапазона. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.12>