МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ ПО ТЕХНОЛОГИИ КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ С ТОПОЛОГИЧЕСКИМИ НОРМАМИ 0,18 мкм

LOW NOISE AMPLIFIER BASED ON 0.18 μm SILICON-ON-INSULATOR TECHNOLOGY

УДК 621.37, ВАК 05.27.01, DOI:10.22184/1993-8578.2017.71.1.88.94

Д.Концев*, О.Кузнецова*, Н.Шеленин* / dkoptsev@mikron.ru, olkuznetsova@mikron.ru, nchelepin@mikron.ru
D.Koptsev*, O.Kuznetsova*, N.Shelepin*

Проведено экспериментальное исследование возможности реализации МШУ на основе КМОП КНИ-технологии с проектными нормами 0,18 мкм. Рассматриваются преимущества КНИ-технологии для изготовления СВЧ ИС. Разработан и изготовлен МШУ с использованием КМОП КНИ-технологии, характеризуемой граничной частотой n -канального транзистора 48 ГГц, напряжением питания ядра 1,8 В и имеющей шесть уровней алюминиевой металлизации. Измерения, проведенные непосредственно на пластине с помощью зондовой станции, показали следующие основные характеристики МШУ: значение параметра S_{21} не менее 11 дБ в диапазоне частот от 500 МГц до 1,5 ГГц; коэффициент шума не более 4 дБ на частоте 2 ГГц.

Experimental study of implementation of the LNA based on 0.18 μm CMOS SOI technology is conducted. The advantages of the SOI technology for the manufacture of microwave IC are discussed. LNA with six levels of aluminum metallization, which is characterized by boundary frequency of the n -channel transistor of 48 GHz, the core voltage of 1.8 V, has been designed and manufactured using CMOS SOI technology. The measurements performed directly on wafer using probe stations showed the following main characteristics of the LNA: the value of the parameter S_{21} is not less than 11 dB in the frequency range from 500 MHz to 1.5 GHz; the noise factor is not more than 4 dB at a frequency of 2 GHz.

Системы связи и радары L- и S-диапазонов длин волн стремительно развиваются в настоящее время во многом благодаря технологическому прогрессу субмикронных кремниевых технологий, обеспечивающих низкую стоимость устройств при массовом изготовлении и высокую степень интеграции. Для проектирования приемопередающих устройств необходима разработка соответствующей электронной компонентной базы, включающей усилители, смесители, умножители и другие функциональные элементы. Создание интегральных схем (ИС) с улучшенными характеристиками по помехозащищенности, энергопотреблению, быстродействию и "разумной" мощности требует разработки и применения новых технологических процессов [1].

Малошумящий СВЧ-усилитель – одно из основных устройств СВЧ-техники, которое применяется в устройствах радиосвязи и радиолокации, радиовещания и телевидения, автоматики, вычислительной техники, бытовой техники и т.п. Основное назначение МШУ – обеспечение минимального коэффициента шума при усилении, достаточном чтобы шумами последующих трактов можно было пренебречь. Для современных МШУ особенно актуальны минимизация вносимых потерь, повышение усилительных характеристик и расширение рабочего частотного диапазона.

Целью настоящей работы является исследование применения КНИ-технологии для разработки МШУ.

* Научно-исследовательский институт молекулярной электроники / Research institute for molecular electronics.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КНИ-ТЕХНОЛОГИИ

Структуры КНИ обладают существенными преимуществами по сравнению с обычным монокристаллическим кремнием и применяются для разработки радиационно-стойких ИС (и аппаратуры на их основе), ИС с низким энергопотреблением, а также для создания МЭМС. Существенным достоинством КНИ-технологии является полная диэлектрическая изоляция п- и р-карманов, ввиду чего отсутствуют паразитные четырехслойные п-р-п-п-структуры, а значит, отсутствует свойственная объемной КМОП-технологии возможность тиристорного защелкивания [2-4].

КНИ-технология позволяет реализовывать сложные аналого-цифровые схемы и добиться существенного повышения быстродействия микросистемных устройств при одновременном снижении потребляемой мощности и габаритных размеров [5].

Следует отметить, что применение технологии КНИ не гарантирует получения высокой радиационной стойкости. Для технического уровня 180 нм изменения пороговых напряжений транзисторов при дозовом воздействии ионизирующих излучений (ИИ) становятся несущественными вследствие очень малой толщины подзатворного диэлектрика. Хотя в КНИ

Рис.1. Интегральная структура МОП-транзисторов, изготовленных по технологии КМОП КНИ: И – исток; С – сток; З – затвор; W – вольфрам

Fig.1. Structure of MOS transistors fabricated using CMOS SOI technology: S – source; D – drain; G – gate; W – tungsten

автоматически исключаются межтранзисторные утечки, возникает проблема внутритранзисторной утечки в п-МОП-приборах вследствие накопления в скрытом окисле положительного заряда и инверсии типа проводимости в области, прилегающей

Communication systems, L- and S-band radars are developing rapidly at present, largely due to the advances of submicron silicon technologies, providing low cost of devices at mass production and high IC density. For the design of transmitter-receiver systems the development of an appropriate electronic components, including amplifiers, mixers, multipliers and other functional elements is necessary. Creation of IC with improved noise immunity, power consumption, speed, and "smart" power requires the development and application of new manufacturing processes [1].

Low-noise microwave amplifier is one of the main devices of microwave technology, which is used in radio communication

systems and radars, broadcasting, automation, computers, household appliances, etc. The main purpose of the LNA is the minimum noise figure in the amplification, which should be sufficient to ignore noise of subsequent paths. Minimization of losses, improving of amplification characteristics and expansion of operating frequency range are particularly relevant for modern LNA.

The aim of this work is to study the application of the SOI technology for the development of LNA.

JUSTIFICATION OF CHOICE OF SOI

SOI structures have significant advantages compared to conventional monolithic silicon, and are used to develop

radiation-resistant IC (and devices based on them), IC with low power consumption, and to create MEMS. The essential advantage of the SOI technology is a full dielectric isolation of the n- and p-wells, thanks to what there are no parasitic four layer n-p-n-p structures, and no latch-up that is inherent in the bulk CMOS technology [2-4].

SOI technology allows to implement complex analog-to-digital circuits and to significantly improve the performance of microelectronic devices while reducing power consumption and dimensions [5].

It should be noted that the SOI technology do not guarantee a high radiation resistance. For 180 nm process the change of the threshold voltages

Рис.2. Электрическая схема разработанного МШУ:
 w_{fing} – ширина единичного канала; $nfing$ – количество параллельных затворов; m – количество параллельных транзисторов
 Fig.2. Electric diagram of the designed LNA: w_{fing} – width of single channel; $nfing$ – number of parallel gates; m – number of parallel transistors

к скрытому окислу, что приводит к недопустимому увеличению токов утечки [6]. Проблемам моделирования этих эффектов для КМОП КНИ-технологии посвящена, в частности, работа [7].

Рис.3. Топология МШУ
 Fig.3. Topology of LNA

РАЗРАБОТКА МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

МШУ является универсальным блоком и может найти применение в приеме-передающих трактах, измерительных установках, в составе активных фильтров и пр. Этот класс устройств во многих случаях определяет важнейшие тактико-технические параметры радиотехнических систем, такие как чувствительность приемного тракта, ширину полосы рабочих частот, надежность и стоимость.

Разработанный МШУ построен по каскодной схеме на п-МОП транзисторах [8]. Длина каналов

of transistors at dose ionizing radiation become insignificant due to the very small thickness of the gate dielectric. Although SOI automatically excludes inter-transistor leakages, there is a problem of intra-transistor leakage in n-MOS-devices due to the accumulation in the hidden oxide of positive charge and inversion of conductivity type in a region adjacent to the hidden oxide that leads to unacceptable increase in leakage currents [6]. In particular, the paper [7] is dedicated to the problems of modeling these effects in CMOS SOI.

DEVELOPMENT OF LOW-NOISE AMPLIFIER

LNA is a versatile device and can be used in the receiving and transmitting paths, measuring installations, as a part of the active filters, etc. This class of devices, in many cases, determines the most important performance parameters of radio systems, such as the sensitivity of the receiving path, the bandwidth of operating frequencies, reliability and cost.

Designed LNA is based on cascode scheme and n-MOS transistors [8]. The length of the channels of the transistors is 0.18

μm and the total width is 435 and 496 μm for transistors in circuits with a common-source and common-gate respectively. Topologically devices are divided into eight parallel connected transistors, each of which contains 8 and 10 parallel channels, 6.8 and 6.2 μm long, respectively. This design was developed to minimize the noise figure. The integrated structure of the MOS-transistor manufactured using CMOS SOI process is shown in Fig.1.

The device was designed in Cadence Virtuoso and Agilent GoldenGate CAD using the

Рис.4. Сравнение результатов измерений (пунктирные линии) и моделирования S-параметров

Fig.4. Comparison of measurement results (dotted lines) and simulation of S-parameters

транзисторов составляет 0,18 мкм, а суммарная ширина – 435 и 496 мкм для транзисторов, включенных по схемам с общим истоком и общим затвором соответственно. Топологически приборы разделены на восемь параллельно включенных транзисторов, содержащих по 8 и 10

параллельных каналов, длиной по 6,8 и 6,2 мкм соответственно. Данная конструкция разработана для минимизации коэффициента шума. Интегральная структура МОП-транзисторов, изготовленных по технологии КМОП КНИ, представлена на рис.1.

models included in the set of design tools. Electric diagram of LNA is shown in Fig.2. In the next stage of design the topology of microwave LNA was developed (Fig.3).

EXPERIMENTAL STUDY OF CHARACTERISTICS OF LNA

Experimental samples were manufactured by Mikron. Fig.4 shows the comparison of simulation results of S-parameters of LNA in GoldenGate CAD using the models built into a set of design tools and experimental data obtained in the measurement on the Cascade probe

station using Agilent vector network analyzer.

The diagram of the S21 parameter does not contain significant irregularities in the considered range, and curves S11 and S12 do not contain emissions in the form of peaks and intermodulation distortions. Discrepancy regarding the measurement and modeling suggests that the used physical-mathematical models are of limited usefulness for the design of microwave devices, and more accurate modeling requires refinement of high-frequency parameters of the models.

The results of measurements of the frequency dependence of the noise figure of LNA are shown in Fig.5. The noise factor is consistent with the theoretical expectations. The simulation results of the noise factor are not presented, due to the fact that existing SPICE models of transistors do not include characterization of noise parameters.

The measured current consumption of low noise amplifier is 26 mA.

Interest in the development of MMIC of broadband LNA is supported by the opportunity to create IP core on a single chip,

Рис.5. Результаты измерения МШУ (частотная зависимость коэффициента шума)

Fig.5. Measurement results of LNA (frequency dependence of noise factor)

Устройство разрабатывалось с помощью САПР Cadence Virtuoso и Agilent GoldenGate с использованием моделей, входящих в состав комплекта средств проектирования. Электрическая схема МШУ показана на рис.2. На следующем этапе проектирования была разработана топология СВЧ ИС МШУ (рис.3).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МШУ

Экспериментальные образцы изготовлены в ОАО "НИИМЭ и Микрон". На рис.4 приведено сравнение результатов моделирования S-параметров МШУ в САПР GoldenGate с использованием моделей, встроенных в комплект средств

проектирования, и экспериментальных данных, полученных при измерении МШУ на зондовой станции Cascade с помощью векторного анализатора цепей Agilent.

На графике параметра S21 не наблюдается значительных неравномерностей в рассматриваемом диапазоне, на кривых S11 и S12 отсутствуют выбросы в форме пиков и интермодуляционных искажений. Расхождение показателей моделирования и измерения говорит о том, что используемые физико-математические модели ограничено пригодны для проектирования СВЧ-устройств, и для более точного моделирования требуется уточнение высокочастотных параметров моделей.

Результаты измерений частотной зависимости коэффициента шума МШУ приведены на рис.5. Коэффициент шума соответствует теоретическим ожиданиям. Результаты моделирования коэффициента шума не приводятся, в связи с тем, что в существующих SPICE-моделях транзисторов отсутствует характеристика шумовых параметров.

Измеренный ток потребления малошумящего усилителя – 26 мА.

Интерес к разработке СВЧ МИС широкополосного МШУ подкреплён возможностью создания сложно-функциональной схемы СВЧ на одном кристалле, а также экономической целесообразностью при масштабном применении в производстве идентичных изделий. Для сравнения были рассмотрены основные параметры аналогов МШУ, разработанных по другим технологиям (см. таблицу).

as well as by the economic feasibility for large-scale application in the production of identical products. For comparison, the main parameters of the analogues developed by other technologies were considered (see table).

Designed LNA can be used as an IP core for L-band transceivers.

CONCLUSION

LNA MMIC based on 0.18 μm SOI technology is designed and manufactured. The gain is at least of 11 dB in the frequency range from 500 MHz to 1.5 GHz, the noise figure is of 4 dB.

According to the obtained characteristics, the designed LNA inferior to similar devices built on a GaAs, however, it should be noted that the device is manufactured using domestic commercial CMOS SOI technology without adjustments of the process. This means that you can use this LNA as IP core in the complex device such as a transceiver that includes both a microwave analog devices and digital signal processing circuits. This will significantly reduce the cost of end products as well as its weight and dimensions.

It should be noted that the task of the creation of a library

containing characterized IP cores, which are similar to developed LNA, is urgent. This will greatly shorten the development time of complex devices under the requirements of the customer. ■

The project was supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation in the framework of the Federal Targeted Programme for Research and Development in Priority Areas of Development of the Russian Scientific and Technological Complex for 2014 – 2020 according to the agreement No. 14.579.21.0072 dated November 24, 2014 (unique identifier of applied research RFMEFI57914X0072).