

УДК 621.375.026

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ SiGe БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 4,2 К

Б.И. Иванов*Новосибирский государственный технический университет*

Современная микроэлектроника на основе эффектов Джозефсона и сверхпроводимости получает всю большую актуальность за счет сверхвысокой чувствительности к электромагнитному излучению. Соответственно, параллельно развиваются криогенные охлаждаемые системы и считывающая электроника для них. Для экспериментального исследования свойств сверхпроводящих квантовых интерференционных детекторов (СКВИД) и устройств на одиночных быстрых квантах магнитного потока (RSFQ) при криогенных температурах вплоть до 4,2 К в полосе частот 10 кГц...500 МГц были разработаны и экспериментально исследованы криогенные усилители на основе SiGe гетероструктурных биполярных транзисторов. Коэффициент усиления по напряжению составляет 15 дБ при максимальной мощности рассеивания 750 мкВт для представленного диапазона частот. Шумовая температура и эквивалентное шумовое сопротивление составляют менее 2 К и 50 Ом соответственно при температуре эксперимента 4,2 К и спектральной плотности шума напряжения 35 пкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, приведенного ко входу. Малое эквивалентное шумовое сопротивление и малая шумовая температура позволяют использовать предложенные криогенные усилители в системах детектирования сигналов приведенных выше сверхпроводниковых устройств. При этом малая мощность рассеивания позволяет увеличить число измерительных трактов за счет увеличения общего числа усилителей в криостате до нескольких десятков. Это также является актуальным при усилении сигналов в радиоастрономии, где количество каналов определяет качество принимаемого сигнала.

Ключевые слова: криогенный усилитель, усилитель для СКВИД, сверхпроводниковый квантовый бит, устройства на одиночных быстрых квантах магнитного потока, малощумящий усилитель, малая шумовая температура, усилитель для высокочастотных сверхпроводниковых резонаторов.

Введение

Современная технология изготовления твердотельной электроники позволяет создавать сверхпроводниковые и полупроводниковые структуры с предельно малыми собственными шумами. Это приводит к увеличению чувствительности устройств, создаваемых на их основе. Примером сверхчувствительного детектора магнитного поля на основе сверхпроводниковой технологии является сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор (СКВИД). Его чувствительность достигает квантового предела и способности детектировать единицы Φ_0 , где $\Phi_0 = 2.0678 \cdot 10^{-15}$ Вб – квант магнитного потока [1–3]. Более того, на технологической основе СКВИД создаются сверхпроводниковые логические цепи нового типа, известные в литературе как устройства на одиночных быстрых квантах магнитного потока (от англ. Rapid Single Flux Quantum- RSFQ) [4–6], а также разрабатываются новые принципы построения квантового процессора на основе нешунтированных контактов Джозефсона, включенных в замкнутую сверхпроводящую петлю [7–11]. Все эти устройства формируют новые задачи разработки

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ, грант № СП-4988.2013.5, РФФИ, проект № 14-02-31601 мол а, Министерства образования и науки РФ, государственное задание № 2014/138, проект № 1176.

считывающей криогенной электроники как на основе сверхпроводников, так и на основе полупроводников.

Несмотря на высокую чувствительность приведенных устройств, они обладают основным недостатком: напряжение сигналов на их выходе едва достигает единиц микровольт, а следовательно, это снижает способность к получению информации от них напрямую в аналого-цифровой преобразователь. Решением является использование полупроводниковых транзисторных малошумящих усилителей. Они широко используются для усиления сигналов на выходе СКВИД устройств, в том числе при криогенных температурах до 4,2 К.

Большой интерес в криогенных системах вызывают новые типы транзисторов высокой подвижности электронов (ТВПЭ, от англ. HEMT) на основе GaAs [12–17]. Их минимальная шумовая температура едва достигает 5 К. Кроме того, в последнее время широкое применение при криогенных измерениях сверхпроводниковых устройств нашли гетероструктурные транзисторы на основе SiGe [18–24]. Это связано с тем, что в области низких частот транзисторы ВПЭ и гетероструктурные SiGe имеют разные входные характеристические сопротивления. ТВПЭ имеют большое значение входного импеданса и используются для измерений высокочастотных резонансных контуров [25]. С другой стороны, гетероструктурные биполярные транзисторы (ГБТ) имеют малое эквивалентное шумовое сопротивление и могут быть использованы для измерений в сверхпроводящих цепях с низким выходным полным характеристическим сопротивлением, такими как ПТ СКВИД магнетометры или ПТ СКВИД усилители.

Из современной литературы известно, что криогенные усилители, основанные на коммерческих транзисторах, могут иметь шумовую температуру 3,6 К при спектральной плотности шума напряжения 75 пВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ в диапазоне частот 0,01...10 МГц при температуре кипения жидкого гелия [18]. В данной работе получено экспериментальное подтверждение улучшенных параметров шума криогенного усилителя на основе SiGe ГБТ для полосы частот от 10 кГц до 500 МГц.

1. Реализация криогенного усилителя

Для разработки и моделирования основных параметров усилителя на высоких частотах было использовано программное обеспечение SuperMix microwave simulation library [26]. Было проведено компьютерное моделирование низкочастотных параметров схемы, используя SPICE модель в программе iSim компании Intersil [27]. Оно позволило определить оптимальные значения резистивных элементов цепи при условии малого шума и допустимого коэффициента усиления. Схема моделирования исследуемого усилителя показана на рис. 1. Как показано на схеме, базовый ток усилителя задается резистором обратной связи R_{OC} , шунтированным конденсатором C_{OC} .

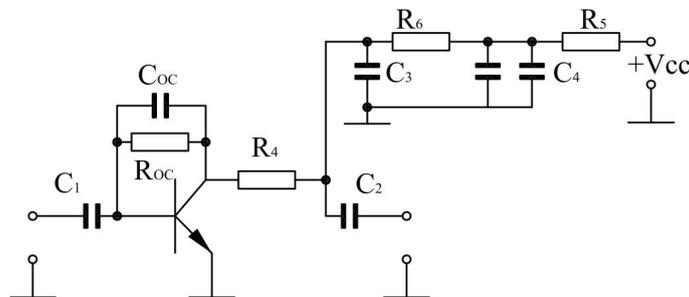


Рис. 1. Упрощенная схема моделирования основных параметров усилителя в низкочастотной области

Режим работы усилителя остается устойчивым без наличия частот осцилляций в рабочей полосе частот и вне ее в диапазоне температур от 300 К до 4,2 К. Подключение к транзистору резистора обратной связи R_{OC} подавляет возможное возбуждение усилителя на высоких частотах. Для транзистора с большой граничной частотой $f_t = 70$ ГГц, выполненной по SiGe технологии, критическим является обеспечение устойчивости на высоких частотах до 10 ГГц. Был проведен анализ схемы усилителя на высокой частоте посредством программы SuperMix, данная схема представлена на рис. 2.

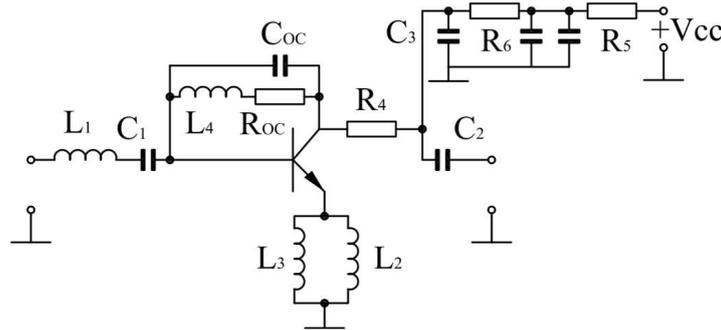


Рис. 2. Схема анализа коэффициента стабильности усилителя в СВЧ диапазоне частот

Анализ частотных свойств показал, что коэффициент устойчивой работы усилителя K зависит от входной индуктивности L_1 и индуктивностей выводов эмиттера L_2 и L_3 , которые были рассчитаны и реализованы в виде проводников тонкой проволоки с диаметром поперечного сечения 100 мкм. Более того, все пассивные ВЧ компоненты, конденсаторы и индуктивности были рассчитаны из условия максимального коэффициента устойчивой работы усилителя на высоких частотах, с условием, что K много больше единицы.

Для этого в схеме моделирования усилителя вместо стандартных параметров конденсаторов использовались заранее экспериментально полученные S -матрицы конденсаторов всех номиналов при температуре 4,2 К. Основу конденсаторов составляет керамический диэлектрик с высоким коэффициентом температурной стабильности. Такие элементы имеют маркировку NP0 или C0G. Усилитель был реализован на подложке, изготовленной из материала FR-4. Для лучшего отвода тепла корпус транзистора был приклеен к подложке с помощью теплопроводящей серебряной пасты.

Линии питания усилителя изготовлены из медного провода в виде витой пары диаметром 100 мкм и протянуты от комнатной температуры внутрь сосуда Дьюара до температуры 4,2 К в металлической измерительной криогенной штанге длиной 1,5 м. В корпусе усилителя по линиям питания были установлены RC-фильтры с малой частотой среза диапазона очень низких частот. Индуктивности входа и выхода усилителя выполнены в виде проволоки толщиной 0,2 мм и длиной 4 мм и подключены к СВЧ разъемам SMA (от англ. – SubMiniature version A). Для уменьшения паразитной индуктивности L_4 в цепи базы и увеличения коэффициента стабилизации резистор обратной связи R_{OC} был припаян напрямую к базовому и коллекторному выводным электродам транзистора. Все элементы усилителя, кроме индуктивностей, выполнены по технологии поверхностного монтажа. Резистивные элементы имеют технологическую маркировку корпуса microMELF. Допуск на разброс сопротивления такой технологии составляет 0,1 %, кроме того, они обладают стабильной величиной сопротивления в зависи-

мости от температуры, равной 250 ppm/K. Размер корпуса таких компонентов имеет маркировку 0603 (2,2 мм × 1,1 мм).

В качестве источника напряжения для усилителя использовался стабилизатор напряжения на основе микросхемы LM 317.

2. Экспериментальное исследование криогенного усилителя

Измерения основных технических характеристик усилителя были проведены при рабочей температуре жидкого гелия 4,2 К в сосуде Дьюара. Схема измерения S -параметров усилителя показана на рис. 3. Коэффициент усиления криогенного усилителя и входное сопротивление были измерены при помощи широкополосного векторного анализатора цепей (ВАЦ) ZVL-6. Для этого входной и выходной порты ВАЦ подключались к медным коаксиальным кабелям, обозначенным 1 на рис. 3, длиной 1,5 м и диаметром 2,2 мм. Далее медные кабели подключались к входным и выходным разъемам исследуемого усилителя. Вся система измерения, включая ВАЦ, коаксиальные кабели и аттенуатор на входе усилителя, была предварительно откалибрована.

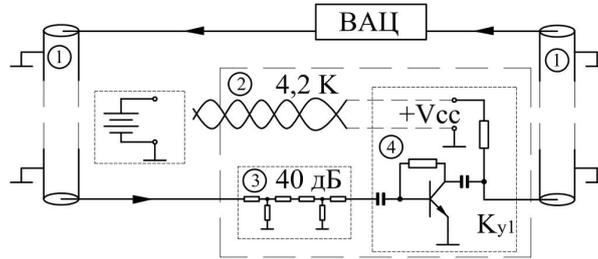


Рис. 3. Схема измерения S -параметров криогенного усилителя при температуре 4,2 К:

1 – негибкие медные коаксиальные кабели диаметром 2,2 мм, материал CuBe; 2 – кабель питания усилителя, витая пара, длина 1,5 м, материал медь; 3 – входной аттенуатор с SMA разъемами; 4 – исследуемый криогенный усилитель

Было проведено определение полного входного характеристического сопротивления, которое необходимо для анализа K_y (в случае большего выходного импеданса источника), шума тока и шумовой температуры. Действительная часть входного импеданса составляет 140 Ом.

Амплитудно-частотная характеристика усилителя, измеренная по представленной выше схеме при температуре 4,2 К, представлена на рис. 4. Коэффициент усиления соответствует 15 дБ в полосе от 10 кГц до 500 МГц.

Для измерения шума усилителей был использован дополнительный комнатный усилитель, приведенный к входу шум напряжения S_{V2} которого выбран меньшим, чем произведение K_y криогенного усилителя на его собственный шум напряжения S_{Va} , приведенный к входу: $S_{V2} \ll K_y S_{Va}$.

Общий шум напряжения криогенного усилителя был измерен по схеме, представленной на рис. 5. Величина полного шума напряжения, приведенного к входу усилителя, определяется как

$$S_{Vin} = S_{Ia} \left(\frac{R_i R_s}{R_i + R_s} \right)^2 + S_{Va} + 4k_B T_s R_s \left(\frac{R_i}{R_s + R_i} \right)^2. \quad (1)$$

Здесь T_s – температура резистора R_s на входе усилителя; S_{Va} – напряжение шума криогенного усилителя и S_{Ia} – шум тока криогенного усилителя; k_B – постоянная Больцмана.

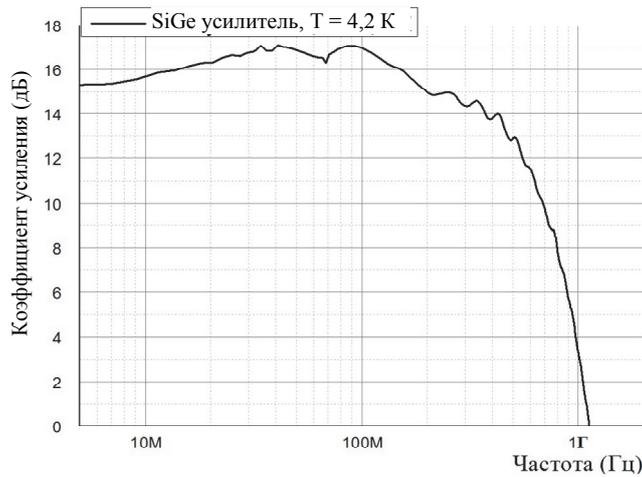


Рис. 4. Экспериментально полученный коэффициент усиления усилителя в полосе до 1,8 ГГц при температуре 4,2 К

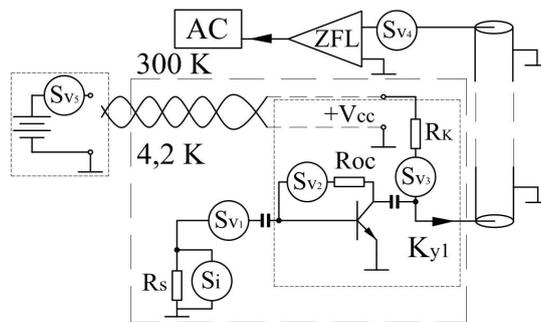


Рис. 5. Схема измерения полного шума криогенного усилителя при температуре 4,2 К

S_{Vin} зависит от R_s , и эта зависимость может быть использована для определения S_{Ia} , S_{Va} из измерений S_{Vin} в зависимости от разных значений R_s , включая короткое замыкание от входа усилителя на землю. Таким образом, решается система уравнений вида (1) и определяются параметры напряжения шума и шумового тока усилителя. Шумовая температура усилителя определяется по формуле

$$T_N = \frac{1}{4k_B} \left(S_{Ia} R_s + \frac{S_{Va}}{R_s} \left(1 + \frac{R_s}{R_i} \right)^2 \right). \quad (2)$$

Минимальная шумовая температура T_N получена для R_s :

$$R_s = \frac{R_n}{\sqrt{1 + \frac{R_n^2}{R_i^2}}},$$

где $R_n = \sqrt{\frac{S_{Va}}{S_{Ia}}}$ – эквивалентное шумовое сопротивление, $R_s = 5$ Ом.

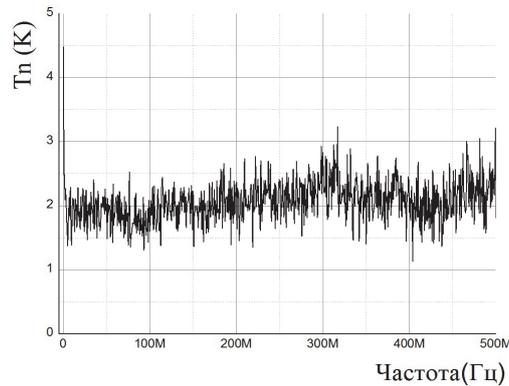


Рис. 6. Восстановленная шумовая температура усилителя в полосе частот до 500 МГц

Подставляя определенные значения плотностей мощности шумов S_{Va} и S_{Ia} в уравнение (2), мы получаем эквивалентное шумовое сопротивление $R_n = 50$ Ом и шумовую температуру $T_{Na} = 1,4$ К. Полученные предельно малые значения мощности рассеяния и шумовой температуры позволяют применять предложенные усилители в рефрижераторах растворения, а также в криогенных измерительных штангах. Более того, данные усилители имеют эквивалентное шумовое сопротивление 50 Ом, что позволяет использовать их на высоких частотах в устройствах на одиночных быстрых квантах магнитного потока, работающих при температуре кипения жидкого гелия.

Заключение

Был разработан и исследован новый тип прецизионного малошумящего криогенного однокаскадного усилителя с низким уровнем собственных шумов. Основу усилителя представляет гетероструктурный SiGe биполярный транзистор BFP 640. Разработанный усилитель имеет предельно низкую шумовую температуру, малую мощность диссипаций и $K_y = 15$ дБ. Основные параметры усилителя приведены в таблице, где $V_{п}$ – напряжение питания усилителя; $I_{к}$ – ток коллектора; ΔF – рабочая полоса частот; R_I – входное сопротивление; K_y – коэффициент усиления по напряжению; $S_{Ia}^{1/2}$ – спектральная плотность шума тока, приведенная к входу усилителя; $S_{Va}^{1/2}$ – спектральная плотность шума напряжения усилителя, приведенная к входу. Отметим, что усилитель обладает предельно малой экспериментально полученной спектральной плотностью шумового напряжения порядка 35 пкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что позволяет использовать его при усилении сигналов в системах, основанных на СКВИД-устройствах и других сверхвысокочувствительных сверхпроводниковых структурах в диапазоне высоких частот.

Основные параметры SiGe биполярного усилителя при температуре 4,2 К

$V_{п}$	$I_{к}$	ΔF	R_I	K_y	$S_{Ia}^{1/2}$	$S_{Va}^{1/2}$	T_n	R_n
V	мкА	МГц	Ом	дБ	фА/ $\sqrt{\text{Гц}}$	пВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$	К	Ом
1,25	572	0,01...500	150	15	800	35	1,4	50

Автор приносит благодарность И.Л. Новикову и М. Грайцеру за продуктивные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Augustine M.P., TonThat D.M., Clarke J.** SQUID detected NMR and NQR // *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*. – 1998. – Vol. 11. – Pp. 139–156.
- [2] **Matlashov A.N., Koshelets V.P., Kalashnikov P.V., Zhuravlev Y.E., Slobodchikov V.Yu., Kovtonyuk S.A., Filippenko L.V.** High sensitive magnetometers and gradiometers based on DC SQUIDs with flux focuser // *IEEE Trans.* – 1991. – Vol. 27. – No. 2. – Pp. 2963–2966.
- [3] **Clarke J., Braginski A.I.** The SQUID Handbook. Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems, Gruenstadt, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. – 2004. – Vol. I. – Pp. 395.
- [4] **Reich T., Ortlepp Th., Uhlmann F.H. and Febvre P.** Experimental analysis of a digital SQUID device at 4.2 K // *Supercond. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 18. – Pp. 1077–1081.
- [5] **Reich T., Ortlepp Th. and Uhlmann F.H.** New approach for a highly sensitive magnetometer utilizing a multi-stage digital SQUID // *Supercond. Sci. Technol.* – 2006. – Vol. 19. – Pp. 276–279.
- [6] **Ortlepp T., Ariando O., Mielke, Verwijs C.J.M., Foo K.F.K., Rogalla H., Uhlmann F.H., Hilgenkamp H.** Flip-Flopping Fractional Flux Quanta // *Science*. – 2006. – Vol. 312. – No. 5779. – Pp. 1495–1497.
- [7] **Mooij J.E., Orlando T.P., Levitov L., Tian Lin, Caspar H. van der Wal, Seth Lloyd.** Josephson Persistent-Current Qubit // *Science*. – 1999. – Vol. 285. – No. 5430. – Pp. 1036–1039.
- [8] **Makhlin Yu., Schoen G., Shnirman A.** Quantum-state engineering with Josephson-junction devices // *Rev. Mod. Phys.* – 2001. – Vol. 73. – No. 2. – Pp. 357–400.
- [9] **Izmalkov A., Grajcar M., Il'ichev E., Wagner Th., Meyer H.-G., Smirnov A.Yu., Amin M.H.S., Alec Maasen van der Brink, and Zagoskin A.M.** Evidence for Entangled States of Two Coupled Flux Qubits // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 93. – No. 3. – Pp. 037003–037006.
- [10] **Izmalkov A., S.H.W. van der Ploeg, Shevchenko S.N., Grajcar M., Il'ichev E., Huebner U., Omelyanchouk A.N. and Meyer H.-G.** Consistency of Ground State and Spectroscopic Measurements on Flux Qubits // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol. 101. – No. 1. – Pp. 017003–017006.
- [11] **Clarke J., Wilhelm Frank K.** Superconducting quantum bits // *Nature*/ – 2008. – Vol. 453. – Pp. 1031–1042.
- [12] **Pospieszalski M.W., Weinreb M., Norrod R.D., Harris R.** FET's and HEMT's at Cryogenic Temperatures- their properties and use in low-noise amplifiers // *IEEE Trans.* – 1988. – Vol. 36. – No. 3. – Pp. 552–560.
- [13] **Risacher Ch. and Belitsky V.** GaAs HEMT Low-Noise Cryogenic Amplifiers from C-Band to X-Band with 0.7-K/GHz noise temperature // *IEEE microwave on.* – 2003. – Vol. 13. – No. 3. – Pp. 96–98.
- [14] **Oukhanski N., Grajcar M., Il'ichev E. and Meyer H.-G.** Low noise, low power consumption high electron mobility transistors amplifier, for temperatures below 1 K // *Rev. Sci. Instrum.* – 2003. – Vol. 74. – No. 2. – Pp. 1145–1146.
- [15] **Oukhanski N., Stolz R. and Meyer H.-G.** High slew rate, ultra stable direct-coupled readout for dc superconducting quantum interference devices // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – No. 6. – Pp. 063502–063502-3.
- [16] **Wuensch S., Ortlepp Th., Crocoll E., Uhlmann F.H. and Siegel M.** Cryogenic semiconductor amplifier for RSFQ-Circuits with high data rates at 4.2 K // *IEEE Trans.* – 2009. – Vol. 19. – No. 3. – Pp. 574–579.
- [17] **Korolev A.M., Shnyrkov V.I. and Shulga V.M.** Ultra-high frequency ultra-low dc power consumption HEMT amplifier for quantum measurements in millikelvin temperature range // *Rev. Sci. Instrum.* – 2011. – Vol. 82. – No. 1. – Pp. 016101–016103.
- [18] **Kiviranta M.** Use of SiGe bipolar transistors for cryogenic readout of SQUIDs // *Supercond. Sci. Technol.* – 2006. – Vol. 19. – No. 2. – Pp. 1297–1302.
- [19] **Weinreb S., Bardin J. and Mani H.** Design of cryogenic SiGe low-noise amplifiers // *IEEE Trans.* – 2007. – Vol. 55. – No. 11. – Pp. 2306–2312.
- [20] **Bardin Joseph C., Weinreb S.** A 0.1–5 GHz Cryogenic SiGe MMIC LNA // *IEEE microwave.* – 2009. – Vol. 19. – No. 6. – Pp. 407–409.
- [21] **Weinreb S., Bardin J., Mani H. and Jones G.** Matched wideband low-noise amplifiers for radio astronomy // *Rev. Sci. Instrum.* – 2009. – Vol. 80. – No. 4. – Pp. 044702–044707.

- [22] **Ivanov B.I., Trgala M., Grajcar M., Il'ichev E. and Meyer H.-G.** Cryogenic ultra-low-noise SiGe transistor amplifier // *Rev. Sci. Instrum.* – 2011. – Vol. 82. – No. 10. – Pp. 104705–104707.
- [23] **Beev N. and Kiviranta M.** Cryogenic low-noise dc-coupled wideband differential amplifier based on SiGe heterojunction bipolar transistors // *Rev. Sci. Instrum.* – 2012. – Vol. 83. – No. 6. – Pp. 066107–066109.
- [24] **Beev N. and Kiviranta M.** Fully differential cryogenic transistor amplifier // *Cryogenics.* – 2013. – Vol. 57. – Pp. 129–133.
- [25] **Shnyrkov V., Wagner T., Born D., Shevchenko S., Krech W., Omelyanchouk A., Il'ichev E. and Meyer H.-G.** Multiphoton transitions between energy levels in a phase-biased Cooper-pair box // *Phys. Rev. B.* – 2006. – Vol. 73. – No. 2. – Pp. 024506–024513.
- [26] **Supermix** simulation library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.submm.caltech.edu/supermix/>
- [27] **iSim 7.00h** electronics circuit simulator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intersil.com/content/intersil/en/tools/isim.html>

EXPERIMENTAL STUDY OF CRYOGENIC SiGe BIPOLAR TRANSISTORS AT 4.2 K

Ivanov B.I.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Modern microelectronics based on Josephson and superconducting effects is becoming more and more popular due to high sensitivity to electromagnetic radiation. Therefore, the modern cryostats and readout systems for superconducting objects are being developed and improved at the moment. To study experimentally superconducting quantum interference devices (SQUIDS) and RSFQ circuits at cryogenic temperatures in a frequency range of 10 kHz – 500 MHz a low noise amplifier based on the SiGe bipolar technology has been designed and characterized at liquid helium temperature. A voltage gain of amplifiers amounts to 15 dB with the maximum power consumption of 720 μ W in the given frequency range. The noise temperature of the amplifier amounts to less than 2 K with a maximum voltage noise spectral density of 35 pV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 4.2 K. A low noise resistance and a low noise temperature make the amplifiers suitable for reading out resistively shunted dc SQUID magnetometers and amplifiers as well as RSFQ circuits. Moreover, low power consumption allows increasing the total number of measuring channels in a cryostat up to several tens. This makes the proposed amplifiers interesting for radio astronomy where the number of channels defines the quality of the incoming signal.

Keywords: cryogenic amplifier; SQUID amplifier read out; superconducting quantum bit; RSFQ amplifier; low noise amplifier; low noise temperature amplifier; high quality superconducting resonator amplifier.

REFERENCES

- [1] **Augustine M.P., TonThat D.M., Clarke J.** SQUID detected NMR and NQR. *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*. 1998, vol. 11, pp. 139–156.
- [2] **Matlashov A.N., Koshelets V.P., Kalashnikov P.V., Zhuravlev Y.E., Slobodchikov V.Yu., Kovtonyuk S.A., Filippenko L.V.** High sensitive magnetometers and gradiometers based on DC SQUIDS with flux focuser. *IEEE Trans*, 1991, vol. 27, no. 2, pp. 2963–2966.
- [3] **Clarke J., Braginski A.I.** The SQUID Handbook. Fundamentals and Technology of SQUIDS and SQUID Systems. Gruenstadt, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004, Vol. I, art. 395.
- [4] **Reich T., Ortlepp Th., Uhlmann F.H. and Febvre P.** Experimental analysis of a digital SQUID device at 4.2 K. *Supercond. Sci. Technol*, 2005, vol. 18, pp. 1077–1081.
- [5] **Reich T., Ortlepp Th. and Uhlmann F.H.** New approach for a highly sensitive magnetometer utilizing a multi-stage digital SQUID. *Supercond. Sci. Technol*, 2006, vol.19, pp. 276–279.

- [6] **Ortlepp T., Ariando O. Mielke, Verwijs C.J.M., Foo K.F.K., Rogalla H., Uhlmann F.H., Hilgenkamp H.** Flip-Flopping Fractional Flux Quanta. *Science*, 2006, vol. 312, no. 5779, pp.1495–1497.
- [7] **Mooij J.E., Orlando T.P., Levitov L., Tian Lin, Caspar H. van der Wal, Seth Lloyd.** Josephson Persistent-Current Qubit. *Science*, 1999, vol. 285, no. 5430, pp. 1036–1039.
- [8] **Makhlin Yu., Schoen G., Shnirman A.** Quantum-state engineering with Josephson-junction devices. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, vol. 73, no. 2, pp. 357–400.
- [9] **Izmalkov A.,Grajcar M., Il'ichev E., Wagner Th., Meyer H.-G., Smirnov A.Yu., Amin M.H.S., Alec Maasen van der Brink, and Zagoskin A.M.** Evidence for Entangled States of Two Coupled Flux Qubits. *Phys. Rev. Lett*, 2004, vol. 93, no. 3, pp. 037003–037006.
- [10] **Izmalkov A., S.H.W. van der Ploeg, Shevchenko S.N., Grajcar M., Il'ichev E., Huebner U., Omelyanchouk A.N. and Meyer H.-G.** Consistency of Ground State and Spectroscopic Measurements on Flux Qubits. *Phys. Rev. Lett*, 2008, vol. 101, no. 1, pp. 017003–017006.
- [11] **Clarke J., Wilhelm Frank K.** Superconducting quantum bits. *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 1031–1042.
- [12] **Pospieszalski M.W., Weinreb M., Norrod R.D., Harris R.** FET's and HEMT's at Cryogenic Temperatures- their properties and use in low-noise amplifiers. *IEEE Trans*, 1988, vol. 36, no. 3, pp. 552–560.
- [13] **Risacher Ch. and Belitsky V.** GaAs HEMT Low-Noise Cryogenic Amplifiers from C-Band to X-Band with 0.7-K/GHz noise temperature. *IEEE microwave on*, 2003, vol. 13, no.3, pp. 96–98.
- [14] **Oukhanski N., Grajcar M., Il'ichev E. and Meyer H.-G.** Low noise, low power consumption high electron mobility transistors amplifier, for temperatures below 1 K. *Rev. Sci. Instrum*, 2003, vol. 74, no. 2, pp. 1145–1146.
- [15] **Oukhanski N., Stolz R. and Meyer H.-G.** High slew rate, ultra stable direct-coupled readout for dc superconducting quantum interference devices. *Appl. Phys. Let.*, 2006, vol. 89, no. 6, pp. 063502–063502-3.
- [16] **Wuensch S., Ortlepp Th., Crocoll E., Uhlmann F.H. and Siegel M.** Cryogenic semiconductor amplifier for RSFQ-Circuits with high data rates at 4.2 K. *IEEE Trans.*, 2009, vol. 19, no. 3, pp. 574–579.
- [17] **Korolev A.M., Shnyrkov V.I. and Shulga V.M.** Ultra-high frequency ultra-low dc power consumption HEMT amplifier for quantum measurements in millikelvin temperature range. *Rev. Sci. Instrum*, 2011, vol. 82, no. 1, pp. 016101–016103.
- [18] **Kiviranta M.** Use of SiGe bipolar transistors for cryogenic readout of SQUIDs. *Supercond. Sci. Techn.*, 2006, vol. 19, no. 2, pp. 1297–1302.
- [19] **Weinreb S., Bardin J. and Mani H.** Design of cryogenic SiGe low-noise amplifiers. *IEEE Trans*, 2007, vol. 55, no. 11, pp. 2306–2312.
- [20] **Bardin Joseph C., Weinreb S.** A 0.1–5 GHz Cryogenic SiGe MMIC LNA. *IEEE microwave*, 2009, vol. 19, no. 6, pp. 407–409.
- [21] **Weinreb S., Bardin J., Mani H. and Jones G.** Matched wideband low-noise amplifiers for radio astronomy. *Rev. Sci. Instrum*, 2009, vol. 80, no. 4, pp. 044702–044707.
- [22] **Ivanov B.I., Trgala M., Grajcar M., Il'ichev E. and Meyer H.-G.** Cryogenic ultra-low-noise SiGe transistor amplifier. *Rev. Sci. Instrum*, 2011, vol. 82, no. 10, pp. 104705–104707.
- [23] **Beev N. and Kiviranta M.** Cryogenic low-noise dc-coupled wideband differential amplifier based on SiGe heterojunction bipolar transistors. *Rev. Sci. Instrum*, 2012, vol. 83, no. 6, pp. 066107–066109.
- [24] **Beev N. and Kiviranta M.** Fully differential cryogenic transistor amplifier. *Cryogenics*, 2013, vol. 57, pp. 129–133.
- [25] **Shnyrkov V., Wagner T., Born D., Shevchenko S., Krech W., Omelyanchouk A., Il'ichev E. and Meyer H.-G.** Multiphoton transitions between energy levels in a phase-biased Cooper-pair box. *Phys. Rev. B*, 2006, vol. 73, no. 2, pp. 024506–024513.
- [26] **Supermix** simulation library. Available at: <http://www.submm.caltech.edu/supermix/> (accessed 01.02.2014).
- [27] **iSim 7.00h** electronics circuit simulator/ Available at: <http://www.intersil.com/content/intersil/en/tools/isim.html> (accessed 01.02.2014).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Иванов Борис Игоревич – родился в 1985 году, канд. техн. наук, научный сотрудник кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: криогенные СВЧ усилители и фильтры, сверхпроводниковые устройства, устройства на основе эффекта Джозефсона. Опубликовано 12 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: boris_ivanov@ngs.ru)

Ivanov Boris Igorevich (b. 1985) – PhD (Eng.) Researcher of Construction and Technology of Radio Electronic Devices Department of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the cryogenic microwave amplifiers and filters, superconducting devices, devices based on the Josephson effect. He is author of 12 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: boris_ivanov@ngs.ru)

Статья поступила 09 февраля 2014 г.

Received 09 Feb. 2014

To Reference:

Ivanov B.I. Eksperimental'noe issledovanie kriogennykh usilitelei na osnove SiGe bipolarnykh tranzistorov pri temperature 4.2 K [Experimental study of cryogenic SiGe bipolar transistors at 4.2 K]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii [Reports of Russian Higher Education Academy of Sciences]*, 2014, no. 1(22), pp. 73–82. (in Russ.).