

УДК 621.372.543

Компактный многоканальный криогенный фильтр нижних частот с широкой полосой заграждения для систем детектирования высокочувствительных сверхпроводящих устройств на основе эффекта Джозефсона*

Б.И. ИВАНОВ¹, G. OELSNER²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, к. т. н., доцент, e-mail: boris_ivanov@mail.ru

² 07745, Германия, г. Йена, А.-Эйнгейт-штр. 9, Лейбниц Институт Фотонных Технологий, аспирант, e-mail: gregor.oelsner@ipht-jena.de

Разработана и экспериментально исследована новая компактная конструкция криогенного многоканального фильтра нижних частот СВЧ-диапазона с широкой полосой заграждения до 50 ГГц и отсутствием паразитных полос пропускания. Приводятся результаты экспериментальных исследований S21-матриц фильтра при криогенных температурах 77 К и 4,2 К на частотах от 10 МГц до 50 ГГц. Экспериментально полученная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) данной фильтрующей структуры показывает эффективность предложенного фильтра в улучшении уровня внеполосного подавления более 60 дБ в широком частотном спектре, отсутствие паразитных полос пропускания, способность работать при криогенных температурах до 10 мК. Основой предложенных фильтров является комбинированная структура дифференциальной линии передачи и мелкодисперсных металлических порошков. Разработанный фильтр обладает малыми размерами и легко монтируется в рефрижератор растворения. Фильтр предназначен для высокочувствительных измерений характеристик состояний трехконтактных сверхпроводниковых квантовых битов, индуктивно связанных с высокочастотным резонатором, работающих при температурах ниже 50 мК на частотах 1–50 ГГц, а также может быть использован для любых физических измерений, требующих высокую помехозащищенность в линиях передачи и измерений низкочастотных сигналов.

Ключевые слова: криогенный фильтр, порошковый фильтр, сверхширокополосный фильтр гармоник, многоканальный фильтр нижних частот, считывание сверхпроводящих устройств, цепи на основе контактов Джозефсона, потоковый квантовый бит, измерение ПТ СКВИД, широкая полоса заграждения, фильтр для НЧ-измерений

1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С УСТРОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ДЖОЗЕФСОНА

Современная технология изготовления электронных устройств развивается стремительными темпами. В настоящее время возможности изготовления различных микроэлектронных узлов могут быть реализованы в масштабах нескольких атомарных слоев. Примером применения такой технологии является изготовление макроскопических квантовых устройств, таких как Джозефсоновские сверхпроводниковые квантовые биты (кубит), которые являются потенциальным решением создания квантового компьютера. Основу кубитов составляет сверхпроводящее кольцо с тремя контактами Джозефсона с разными геометрическими размерами [1–6].

* Статья получена 14 февраля 2014 г.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента РФ, грант № СП-4988.2013.5, проекта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-02-31601 мол_а. В частности, авторами рассматривается система измерения состояний сверхпроводниковых квантовых битов, а также однофотонных детекторов микроволнового диапазона, выполненных на основе переходов Джозефсона.

Размеры потокового кубита соответствуют единицам микрометров, тогда как размер барьерного слоя в контакте Джозефсона составляет единицы нанометров. Тем не менее, современная технология позволяет изготавливать несколько кубитов в один технологический процесс с минимальными параметрами разброса критического тока и геометрии [7]. Это позволяет создавать квантовую систему со сложными запутанными состояниями между несколькими кубитами. В связи с тем, что характеристическая частота кубита лежит в гигагерцовом диапазоне, становится возможным манипулирование микроволновым сигналом на уровне энергии одного фотона в структурах типа микроволновый резонатор-кубит. Это приводит к тому, что появляется возможность создать новые типы параметрических усилителей [8, 9], источников однофотонного излучения, однофотонных детекторов и, как следствие, квантовой криптографии.

Увеличение числа кубитов на одном чипе [10–13] вводит дополнительные требования для их систем детектирования и манипулирования. Появляется необходимость в манипулировании и контроле кубитов одновременно с высокой временной стабильностью сигнала менее 1 нс и отсутствием шумов в подведенных трактах, которые напрямую влияют на время декогеренции в кубитах. Поэтому необходимо использовать высокоточную аппаратуру с малыми временными искажениями и высокоизбирательными частотно-селективными свойствами во всех трактах детектирования и управления кубитов. Важно снижение уровня собственных шумов в измеряемом частотном спектре [14–19].

Рабочая температура устройств на основе сверхпроводниковых кубитов лежит в диапазоне до десятков градусов милликельвинов. Такую температуру можно получить, используя криостаты растворения, основным охлаждающим агентом которых являются изотопы гелия, He_3 и He_4 .

Установка измерения характеристик потоковых кубитов представляет собой систему микроволновых трактов и магнитных линий постоянного тока, подключенных к исследуемому образцу [20, 21]. Для обеспечения предельно малой величины шумового сигнала фильтры, установленные в данную измерительную систему, должны иметь при низкой температуре незначительные прямые потери и низкое характеристическое сопротивление. В качестве фильтрующих цепей при исследовании кубитов используют различные решения, выполненные в виде сосредоточенных элементов или распределенных элементов [21, 22]. Однако в последнее время было установлено, что в криогенной среде значительное улучшение фильтрующих свойств обеспечивают сверхпроводящие распределенные структуры [22–27] и порошковые фильтры [20, 28, 29].

В данной работе был разработан и исследован многоканальный фильтр нижних частот, выполненный на основе дифференциально-коаксиальной структуры с применением металлических порошковых материалов для систем детектирования потоковых квантовых битов. Особенности данного фильтра являются широкая полоса заграждения, компактность и способность работать при криогенных температурах вплоть до единиц милликельвинов.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ШИРОКОЙ ПОЛОСОЙ ЗАГРАЖДЕНИЯ

Общий способ конструирования криогенного порошкового фильтра сводится к подготовке тонкого внутреннего проводника, который свивается в катушку с определенным количеством витков, и такая катушка помещается в заранее подготовленный корпус, образуя коаксиальную конструкцию. Далее вся конструкция заполняется металлическим порошком и закрывается с обеих сторон соединительными разъемами. В отличие от классических конструктивных решений, представленных в работах [22, 28, 29], мы использовали дифференциальную схему включения с металлическим сердечником.

Основой разработанного фильтра является представленная ранее коаксиальная конструкция [22, 28, 29]. Конструкционные размеры и диаметр внутреннего проводника рассчитывается из условий согласования фильтра с волновым сопротивлением 50 Ом. Материал внутреннего проводника – медь. Диаметр сечения проводника $d = 100$ мкм. Конструктивной особенностью данного фильтра является использование дифференциальной линии. В отличие от клас-

сических медно-порошковых фильтров, выполненных в коаксиальной конструкции, представленный фильтр имеет дифференциальную линию в виде витой пары. Шаг заправки витой пары соответствует 1 мм. Внутри конструкции витая пара свивается в катушку индуктивности с большим числом витков, диаметр витков $D = 4$ мм, количество витков $n = 10$. Для увеличения числа каналов манипулирования кубитов и лучшей термической проводимости между фильтром и криостатом была использована конструкция типа «револьвер», приведенная на рис. 1. Такая конструкция позволяет увеличить число фильтрованных каналов, не занимая большего места в криостате.

Длина фильтра соответствует 30 мм. Габаритные размеры фильтра ограничиваются основным требованием – возможностью размещения фильтра в криостат. Габаритные размеры фильтра представлены на рис. 1, а. Конструкция фильтра выполнена из меди и представлена на рис. 2, б.



Рис. 1. Конструкция многоканального коаксиального фильтра типа «револьвер» со сменными шайбами для установки соединительных разъемов:

а – чертеж с габаритными размерами фильтра; б – реализация фильтра

Основным элементом, обеспечивающим затухание на высоких частотах, в особенности в СВЧ-диапазоне, является металлический порошок. Мы использовали два типа металлических порошков: порошок оксида меди и бронзовый порошок. Диаметр зерен дисперсионного порошка варьируется от двух до 10 мкм. Микрограф медного металлического порошка, полученный растровым электронным микроскопом, представлен на рис. 2.

Отличительной особенностью представленного фильтра является стержневая конструкция вместо классического заполнения порошком. Такое конструктивное решение позволяет более плотно упаковать металлические частицы и тем самым увеличивать внеполосное затухание. Металлические стержни изготавливаются из смеси бронзового или медного порошка с эпоксидным клеем Stycast в пропорции 70 % металлического порошка и 30 % эпоксидного клея. Далее формировался цилиндрический стержень и отправлялся на сушку в печь при температуре 70 К на 24 часа. Диаметр стержня составляет 3,5 мм, длина – 27 мм. После сушки стержни необходимо было термализовать, для этого они были циклически охлаждены до температуры жидкого гелия и нагреты до комнатной температуры несколько раз. На подготовленный сердечник навивается провод витой пары, и вся конструкция помещается в медный корпус. Внутреннее пространство конструкции между стержнем с намоткой и корпусом заполняется металлическим порошком. В результате мы получили четыре фильтра нижних час-

тот с бронзовыми сердечниками и один фильтр с медным сердечником. Далее конструкция закрывается соединительными разъемами, и провод витой пары припаивается к выводным разъемам оловянно-свинцовым припоем.

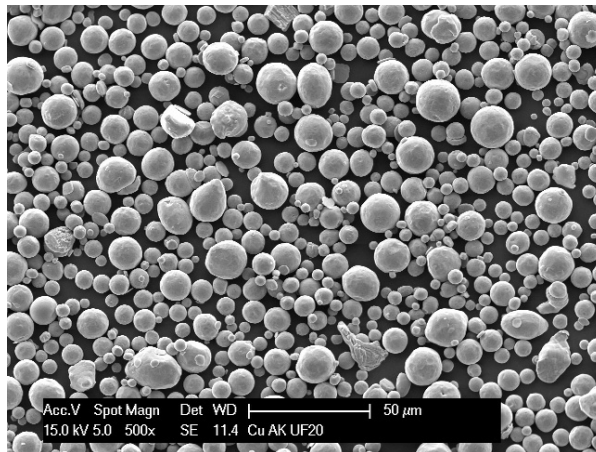


Рис. 2. Микрограф частиц медного порошка, полученный растровым электронным микроскопом

3. СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для полной характеристики фильтра были произведены измерения S -матриц S_{21} и S_{12} при температуре кипения жидкого азота 77 К. Измерительной системой является векторный анализатор цепей (В.А.Ц.) компании *Rohde & Schwarz*, модели *ZVA-50*, позволяющий одновременно производить измерения S -матрицы в полосе от 10 МГц до 50 ГГц в различных режимах мощности и согласованный с 50-омным волновым сопротивлением. Для подключения исследуемого фильтра к анализатору цепей использовались 50-омные гибкие коаксиальные кабели малых омических потерь общей длиной 0,5 м. Далее производилась калибровка измерительной системы с учетом этой длины линий передачи. Калибровка производилась в два этапа: калибровка каждого кабеля с открытым концом, с закороченным концом и 50-омной нагрузкой и калибровка линии передачи с учетом потерь. В первом случае калибровка необходима для точного определения параметров отражения S_{11} , S_{22} , во втором – для параметров передачи S_{21} , S_{12} . В случае измерения фильтра при температуре кипения жидкого азота и гелия использовалась измерительная штанга со встроенными медными коаксиальными полугибкими кабелями (*semi-rigid coaxial cable*) общей длиной 2,6 м, которая помещалась в сосуд Дьюара с жидким азотом и гелием. Калибровка криогенной системы проходила аналогично комнатной. В обоих случаях мощность сигнала, на которой происходили измерения и калибровка, составляет -40 dBm (0,1 мкВт).

Мы провели измерения S_{21} -матриц фильтров двумя типами подключений: синфазное и дифференциальное (рис. 3, 4, 5). Такой тип подключений обуславливается необходимостью исследования затухания помех и шумов в трактах смещения потокового кубита постоянным магнитным полем. Были произведены измерения в диапазоне частот от 10 МГц до 50 ГГц при температуре 4,2 К для четырех фильтров, размещенных в одном корпусе, три из которых на основе бронзового порошка и один из порошка меди. На рис. 3 представлены АЧХ разработанных криогенных фильтров нижних частот при дифференциальном способе измерений. Прямые потери на постоянном токе отсутствуют. Потери в полосе частот от 5 ГГц до 50 ГГц составляют более 60 дБ. Как видно из рисунка, в области более высоких частот лучшими фильтрующими свойствами обладают фильтры на основе порошка бронзы (нижние экспериментальные кривые), чем меди (верхняя экспериментальная кривая).

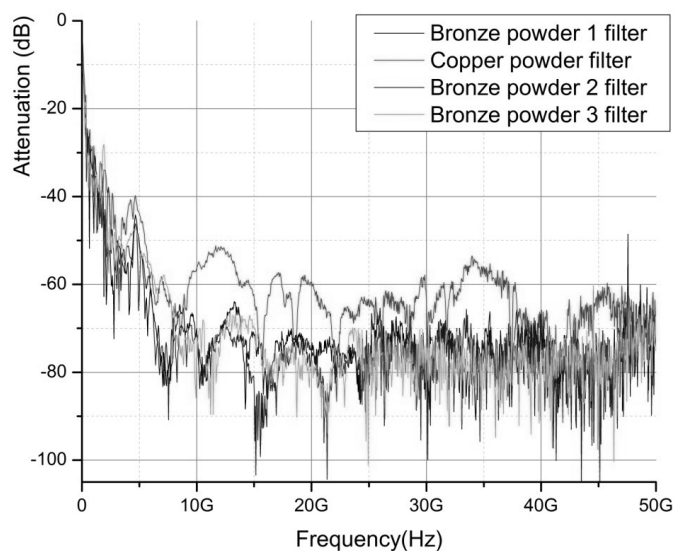


Рис. 3. Экспериментально измеренная амплитудно-частотная характеристика криогенного фильтра нижних частот в полосе до 50 ГГц при 77 К. Верхняя экспериментальная характеристика соответствует фильтру с медным сердечником, нижние кривые соответствуют фильтру на основе бронзовых сердечников. Тип измерительного подключения дифференциальный

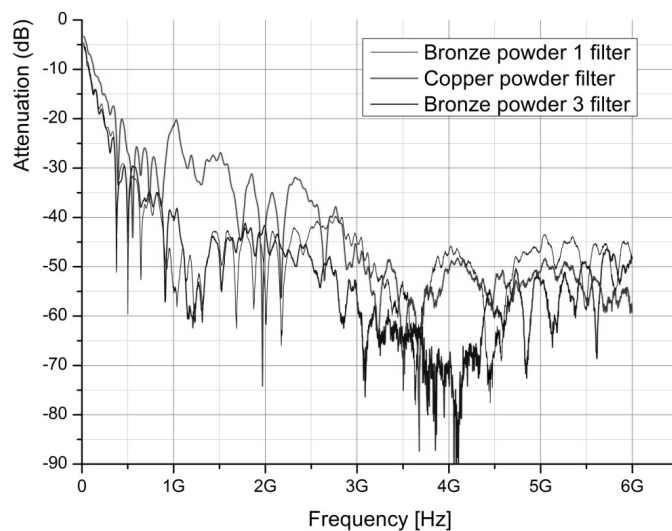


Рис. 4. Экспериментально измеренная амплитудно-частотная характеристика криогенного фильтра нижних частот в полосе до 6 ГГц при 77 К. Верхняя экспериментальная кривая соответствует фильтру с медным порошком, нижние кривые соответствуют фильтрам с бронзовыми сердечниками. Тип измерительного подключения дифференциальный

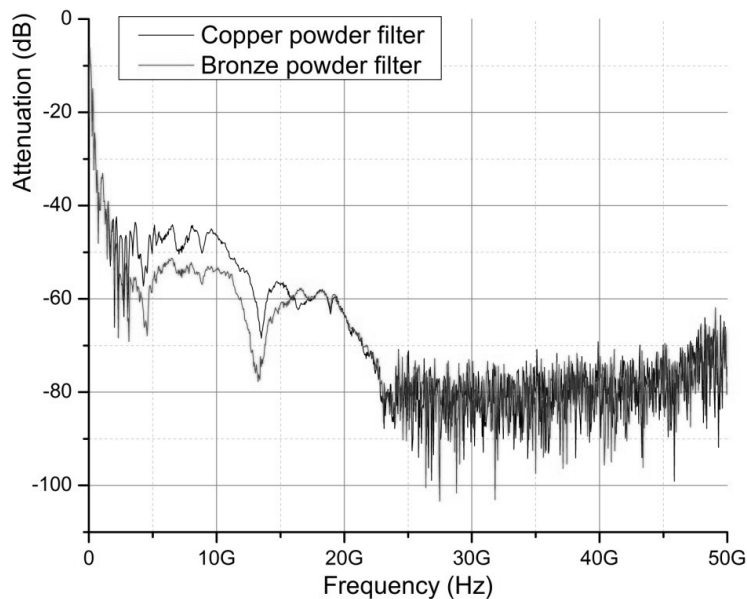


Рис. 5. Экспериментально измеренная амплитудно-частотная характеристика криогенного фильтра нижних частот в полосе до 50 ГГц при 77 К при синфазном измерении. Верхняя линия характеристики соответствует фильтру с медным сердечником, нижняя линия соответствует бронзовому сердечнику

В случае измерения затухания в синфазном включении экспериментальные характеристики полученных фильтров показывают отсутствие потерь на постоянном токе и значительное затухание шумов и помех по уровню 40 дБ на частоте от 1 ГГц до 12,5 ГГц и затухание по уровню 60 дБ в полосе частот от 12,5 ГГц до 50 ГГц и выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый криогенный многоканальный фильтр нижних частот СВЧ-диапазона с широкой полосой заграждения до 50 ГГц и выше. Представлены результаты экспериментальных исследований S_{21} -матриц четырех фильтров при температурах 77 К на частотах от 10 МГц до 50 ГГц. Экспериментально полученная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) данной фильтрующей структуры показывает эффективность предложенного фильтра в улучшении уровня внеполосного подавления более 60 дБ в широком частотном спектре, отсутствие паразитных полос пропускания во всей полосе заграждения, отсутствие прямых потерь на постоянном токе, способность работать при криогенных температурах до 10 мК. Предложенный фильтр предназначен для подавления как синфазной, так и дифференциальной составляющей помехи. Основой предложенных фильтров является комбинированная структура дифференциальной линии передачи и металлических порошков двух типов. Разработанный фильтр обладает малыми размерами и легко монтируется в криостат растворения. Фильтр предназначен для высокочувствительных измерений характеристик состояний трехконтактных сверхпроводниковых квантовых битов, индуктивно связанных с высокочастотным резонатором, работающих при температурах ниже 50 мК на частотах 1-20 ГГц, а также может быть использован для любых физических измерений, требующих высокую помехозащищенность в линиях постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Josephson Persistent-Current Qubit / J.E. Mooij, T.P. Orlando, L. Levitov, Lin Tian, C.H. Wal van der, S. Lloyd // *Science*. – 1999. – Vol. 285. – P. 1036–1039.
- [2] Evidence for Entangled States of Two Coupled Flux Qubits / A. Izmailkov, M. Grajcar, E. Il'ichev, Th. Wagner, H.-G. Meyer, A.Yu. Smirnov, M.H.S. Amin, A.M. Brink van der, A.M. Zagorskin // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 93. – P. 037003-1–037003-4.
- [3] Consistency of Ground State and Spectroscopic Measurements on Flux Qubits / A. Izmailkov, S.H.W. Ploeg van der, S.N. Shevchenko, M. Grajcar, E. Il'ichev, U. Huebner, A.N. Omelyanchouk, H.-G. Meyer // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol. 101. – P. 017003-1–017003-4.
- [4] **Clarke J., Wilhelm F.K.** Superconducting quantum bits // *Nature*. – 2008. – Vol. 453. – P. 1031–1042.
- [5] Weak continuous monitoring of a flux qubit using coplanar waveguide resonator / G. Oelsner, S.H.W. Ploeg van der, P. Macha, U. Hübner, D. Born, S. Anders, E. Il'ichev, H.-G. Meyer, M. Grajcar, S. Wuensch, M. Siegel, A.N. Omelyanchouk, O. Astaviev // *Phys. Rev. B*. – 2010. – Vol. 81. – P. 172505-1–172505-4.
- [6] Quantum Nondemolition Measurement of a Superconducting Qubit / T. Picot, R. Schouten, C.J.P.M. Harmans, J.E. Mooij // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – Vol. 105. – P. 040506-1–040506-4.
- [7] The morphology of Al-based submicron Josephson junction / V.V. Roddatis, U. Hübner, B.I. Ivanov, E. Il'ichev, H.-G. Meyer, M.V. Koval'chuk, A.L. Vasiliev // *J. of Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 110, № 12. – P. 123903-1–123903-4.
- [8] A wideband, low-noise superconducting amplifier / Ho Eom Byeong, P.K. Day, H.G. LeDuc, J. Zmuidzinas // *Nature Phys.* – 2012. – Vol. 8, № 8. – P. 623–627.
- [9] Intermodulation and parametric amplification in a superconducting stripline resonator integrated with a dc-SQUID / B. Abdo, O. Suchoi, E. Segev, O. Shtempluck, M. Blencowe, E. Buks // *Europhys. Lett.* – 2009. – Vol. 85, № 6. – P. 68001-1–68001-6.
- [10] Flux qubits and readout device with two independent flux lines / B.L.T. Plourde, T.L. Robertson, P.A. Reichardt, T. Hime, S. Linzen, C.-E. Wu, J. Clarke // *Phys. Rev. B*. – 2005. – Vol. 72. – P. 060506-1–060506-4.
- [11] Readout of a qubit array via a single transmission line / M. Jerger, S. Poletto, P. Macha, U. Huebner, A. Lukashenko, E. Il'ichev, A.V. Ustinov // *Europhys. Lett.* – 2011. – Vol. 96. – P. 40012-1–40012-4.
- [12] Frequency division multiplexing readout and simultaneous manipulation of an array of flux qubits / T.M. Jerger, S. Poletto, P. Macha, U. Huebner, E. Il'ichev, A.V. Ustinov // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – P. 042604-1–042604-4.
- [13] Multiplexed dispersive readout of superconducting phase qubits / Yu Chen, D. Sank, P. O'Malley, T. White, R. Barends, B. Chiaro, J. Kelly, E. Lucero, M. Mariantoni, A. Megrant, C. Neill, A. Vainsencher, J. Wenner, Y. Yin, A.N. Cleland, J.M. Martinis // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – P. 182601-1–182601-4.
- [14] Low noise, low power consumption high electron mobility transistors amplifier, for temperatures below 1 K / N. Oukhanski, M. Grajcar, E. Il'ichev, H.-G. Meyer // *Rev. of Sci. Instruments*. – 2003. – Vol. 74, № 2. – P. 1145–1146.
- [15] **Kiviranta M.** Use of SiGe bipolar transistors for cryogenic readout of SQUIDS // *Superconductor Science and Technology*. – 2006. – Vol. 19, № 12. – P. 1297–1302.
- [16] **Oukhanski N., Stolz R., Meyer H.-G.** High slew rate, ultra stable direct-coupled readout for dc superconducting quantum interference devices // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – P. 063502-1–063502-3.
- [17] **Drung D., Hinnrichs C. and Barthelmess H.-J.** Low-noise ultra-high-speed dc SQUID readout electronics // *Superconductor Science and Technology*. – 2006. – Vol. 19, № 5. – P. 235–241.
- [18] Cryogenic Semiconductor Amplifier for RSFQ-Circuits With High Data Rates at 4.2 K / S. Wuensch, Th. Ortlev, E. Crocoll, F.H. Uhlmann, M. Siegel // *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 574–579.
- [19] Cryogenic ultra-low-noise SiGe transistor amplifier / B.I. Ivanov, M. Trgala, M. Grajcar, E. Il'ichev, H.-G. Meyer // *Rev. of Sci. Instruments*. – 2001. – Vol. 82, № 10. – P. 104705-1–104705-3.
- [20] **Иванов Б.И.** Фильтры гармоник для систем измерения характеристик сверхпроводниковых квантовых битов // *Науч. вестн. НГТУ*. – 2010. – № 2 (39). – С. 81–90.
- [21] **Иванов Б.И., Клименко Д.Н.** Микрополосковые фильтры шпильчатого типа для комнатных и криогенных высокочувствительных систем измерений // *Науч. вестн. НГТУ*. – 2011. – № 4 (45). – С. 155–160.
- [22] Narrow bandpass cryogenic filter for microwave measurements / B.I. Ivanov, D.N. Klimenko, A.N. Sultanov, E. Il'ichev, H.-G. Meyer // *Rev. of Sci. Instruments*. – 2013. – Vol. 84, № 5. – P. 054707-1–054707-4.
- [23] Low- and high-temperature superconducting microwave filters / S.H. Talisa, A. Janocko, Ch. Moskowitz, J. Talvacio, J.F. Billing, R. Brown, D.C. Buck, C.K. Jones, B.R. McAvoy, G.R. Wagner, D.H. Watt // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. – 1991. – Vol. 39, № 9. – P. 1448–1454.
- [24] **Matthaei G.L.** Narrow-band, fixed-tuned, and tunable bandpass filters with zig-zag hairpin-comb resonators // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. – 2003. – Vol. 51, № 4. – P. 1214–1219.
- [25] **Larkins G.L., Socorregut R., Vlasovthaei Yu.A.** Superconducting microstrip hairpin filter with BaTiO₃ patches // *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*. – 2003. – Vol. 13, № 2. – P. 724–726.
- [26] A 9 pole bandpass filter at 2.7 GHz with Y1Ba2Cu3O7- δ coplanar wave guides on a sapphire substrate / S. Wuensch, E. Crocoll, M. Neuhaus, T.A. Scherer, A. Stassen, H.-J. Wermund, W. Jutzi, O. Lochner // *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*. – 2003. – Vol. 13, № 2. – P. 276–279.
- [27] **Zhang G. and Lancaster M.J.** Dual-band microstrip bandpass filter using stepped-impedance resonators with new coupling schemes // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. – 2006. – Vol. 54, № 10. – P. 3779–3785.
- [28] Comparison of cryogenic filters for use a single electronics experiments / K. Bladh, D. Gunnarsson, E. Hurfeld, S. Devi, C. Kristofferson, B. Smålander, S. Pehrson, T. Claeson, P. Delsing and M. Taslakov // *Rev. of Sci. Instruments*. – 2003. – Vol. 74, № 3. – P. 1323–1327.
- [29] **Lukashenko A., Ustinov A.V.** Improved powder filters for qubit measurements // *Rev. of Sci. Instruments*. – 2008. – Vol. 79, № 1. – P. 014701-1–014701-4.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор приносит благодарность д-ру физ.-мат. наук, научному сотруднику Лейбниц Института фотонных технологий Детлефу Борну за продуктивные дискуссии.

Иванов Борис Игоревич, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры КТПС Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – измерительные электронные устройства для систем детектирования слабых сигналов на фоне шумов. Имеет 10 печатных трудов, 6 из которых индексируются в базе Web of Science. E-mail: boris_ivanov@ngs.ru.

Gregor Oelsner, аспирант Лейбница института фотонных технологий города Йена. Основное направление научных исследований – сверхпроводниковые квантовые биты, технология изготовления контактов Джозефсона, квантовые неразрушающие измерения. Имеет 7 печатных трудов, индексируемых в базе Web of Science. E-mail: gregor.oelsner@ipht-jena.de.

A compact multichannel wide stopband cryogenic low-pass filter for superconducting Josephson circuit readout*

B.I. IVANOV¹, G. OELSNER²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Ph.D., e-mail: boris_ivanov@ngs.ru

² Leibniz Institute of Photonic Technology, A.-Einstein-str. 9, Jena, 07745, Germany, Ph.D. student, e-mail: gregor.oelsner@ipht-jena.de

A new type of the multichannel cryogenic low-pass filter with ultra-high stopband suppression up to 50 GHz has been designed and experimentally characterized. The filter transmission curve has no spurious passbands. The experimental results for the frequency range from 9 MHz up to 50 GHz are presented for two different cryogenic temperatures 77 K and 4.2 K. The filter experimental frequency response shows more than 60 dB of attenuation in a wide stopband frequency range and temperatures down to tens of millikelvin. Moreover, the filter provides more than 60 dB signal and noise suppression for both differential and common mode type of applied signals. The designed filter has significantly small sizes and is based on the coaxial construction with two metallic powders filled inside and is combined with a differential twisted pair coil. The filter is designed to be used as a part of low noise and low frequency measurement equipment e.g. superconducting circuit readout in a frequency range from DC up to 50 GHz or any other analog and digital noise free readout measurement systems.

Keywords: Cryogenic DC filter, low frequency powder filter, wide stop band harmonic filter, multichannel low-pass filter, superconducting circuit readout, Josephson circuit readout, persistent current flux qubit, Josephson junction, DC SQUID readout, wide stop band suppression

REFERENCES

- [1] Mooij J.E., Orlando T.P., Levitov L., Lin Tian, Wal C.H. van der, Lloyd S. Josephson Persistent-Current Qubit. *Science*, 1999, vol. 285, pp. 1036-1039.
- [2] Izmalkov A., Grajcar M., Il'ichev E., Wagner Th., Meyer H.-G., Smirnov A.Yu., Amin M.H.S., Brink A.M. van der, Zagoskin A.M. Evidence for Entangled States of Two Coupled Flux Qubits. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, vol. 93, pp. 037003-1-037003-4.
- [3] Izmalkov A., Ploeg S.H.W. van der, Shevchenko S.N., Grajcar M., Il'ichev E., Huebner U., Omelyanchouk A.N., Meyer H.-G. Consistency of Ground State and Spectroscopic Measurements on Flux Qubits. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 101, pp. 017003-1-017003-4.
- [4] Clarke J., Wilhelm Frank K. Superconducting quantum bits. *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 1031-1042.
- [5] Oelsner G., Ploeg S.H.W. van der, Macha P., Hübner U., Born D., Anders S., Il'ichev E., Meyer H.-G., Grajcar M., Wuensch S., Siegel M., Omelyanchouk A.N., Astaviev O. Weak continuous monitoring of a flux qubit using coplanar waveguide resonator. *Phys. Rev. B*, 2010, vol. 81, pp. 172505-1-172505-4.
- [6] Picot T., Schouten R., Harmans C.J.P.M., Mooij J.E. Quantum Nondemolition Measurement of a Superconducting Qubit. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 105, pp. 040506-1-040506-4.
- [7] Roddatis V.V., Hübner U., Ivanov B.I., Il'ichev E., Meyer H.-G., Koval'chuk M.V., Vasiliev A.L. The morphology of Al-based submicron Josephson junction. *J. of Appl. Phys.*, 2011, vol. 110, no. 12, pp. 123903-1-123903-4.
- [8] Byeong Ho Eom, Day P.K., LeDuc H.G., Zmuidzinas J. A wideband, low-noise superconducting amplifier. *Nature Phys.*, 2012, vol. 8, no. 8, pp. 623-627.
- [9] Abdo B., Suchoi O., Segev E., Shtempluck O., Blencowe M., Buks E. Intermodulation and parametric amplification in a superconducting stripline resonator integrated with a dc-SQUID. *Europhys. Lett.*, 2009, vol. 85, no. 6, pp. 68001-1-68001-6.
- [10] Plourde B.L.T., Robertson T.L., Reichardt P.A., Hime T., Linzen S., Wu C.-E., Clarke J. Flux qubits and readout device with two independent flux lines. *Phys. Rev. B*, 2005, vol. 72, pp. 060506-1-060506-4.
- [11] Jerger M., Poletto S., Macha P., Huebner U., Lukashenko A., Il'ichev E., Ustinov A.V. Readout of a qubit array via a single transmission line. *Europhys. Lett.*, 2011, vol. 96, pp. 400121-400124.
- [12] Jerger T.M., Poletto S., Macha P., Huebner U., Il'ichev E., Ustinov A.V. Frequency division multiplexing readout and simultaneous manipulation of an array of flux qubits. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 101, pp. 0426041-0426044.

* Manuscript received on February 14, 2013.

The work was supported by grants of the President of the Russian Federation, grant № SP-4988.2013.5, Russian Foundation for basic research project no 14-02-31601 Mol_a.

- [13] Chen Yu, Sank D., O'Malley P., White T., Barends R., Chiaro B., Kelly J., Lucero E., Mariantoni M., Megrant A., Neill C., Vainsencher A., Wenner J., Yin Y., Cleland A.N., Martinis J.M. Multiplexed dispersive readout of superconducting phase qubits. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 101, pp. 182601-1-182601-4.
- [14] Oukhanski N., Grajcar M., Il'ichev E., Meyer H.-G. Low noise, low power consumption high electron mobility transistors amplifier, for temperatures below 1 K. *Rev. of Sci. Instruments*, 2003, vol. 74, no. 2, pp. 1145-1146.
- [15] Kiviranta M. Use of SiGe bipolar transistors for cryogenic readout of SQUIDS. *Superconductor Science and Technology*, 2006, vol. 19, no. 12, pp. 1297-1302.
- [16] Oukhanski N., Stolz R., Meyer H.-G. High slew rate, ultra stable direct-coupled readout for dc superconducting quantum interference devices. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, pp. 063502-1-063502-3.
- [17] Drung D., Hinnrichs C., Barthelmess H.-J. Low-noise ultra-high-speed dc SQUID readout electronics. *Superconductor Science and Technology*, 2006, vol. 19, no. 5, pp. 235-241.
- [18] Wuensch S., Ortlepp Th., Crocoll E., Uhlmann F.H., Siegel M. Cryogenic Semiconductor Amplifier for RSFQ-Circuits With High Data Rates at 4.2 K. *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, 2009, vol. 19, no. 3, pp. 574-579.
- [19] Ivanov B.I., Trgala M., Grajcar M., Il'ichev E., Meyer H.-G. Cryogenic ultra-low-noise SiGe transistor amplifier. *Rev. of Sci. Instruments*, 2001, vol. 82, no. 10, pp. 104705-1-104705-3.
- [20] Ivanov B.I. Filtry garmonich dlya system izmereniya characteristic sverhprovodnikovyyh kvantovyh bitov [Harmonic filter for superconducting quantum bit measurements]. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2010, no. 2 (39), pp. 81-90.
- [21] Ivanov B.I., Klimenko D.N. Mikropoloskovyye filtry spilechnogo tipa dlya komnatnyh i kriogennyh vysokochuvstvitelnyh system izmereniy [Microstrip hair-pin filters for high frequency sensitive measurement systems]. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2011, no. 4 (45), pp. 155-160.
- [22] Ivanov B.I., Klimenko D.N., Sultanov A.N., Il'ichev E., Meyer H.-G. Narrow bandpass cryogenic filter for microwave measurements. *Rev. of Sci. Instruments*, 2013, vol. 84, no. 5, pp. 054707-1-054707-4.
- [23] Talisa S.H., Janocko A., Moskowitz Ch., Talvacio J., Billing J.F., Brown R., Buck D.C., Jones C.K., McAvoy B.R., Wagner G.R., Watt D.H. Low- and high-temperature superconducting microwave filters. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1991, vol. 39, no. 9, pp. 1448-1454.
- [24] Matthaei G.L. Narrow-band, fixed-tuned, and tunable bandpass filters with zig-zag hairpin-comb resonators. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2003, vol. 51, no. 4, pp. 1214-1219.
- [25] Larkins G.L., Socorregut R., Vlasovthaei Yu.A. Superconducting microstrip hairpin filter with BaTiO₃ patches. *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, 2003, vol. 13, no. 2, pp. 724-726.
- [26] Wuensch S., Crocoll E., Neuhaus M., Scherer T.A., Stassen A., Wermund H.-J., Jutzi W., Lochner O. A 9 pole bandpass filter at 2.7 GHz with Y1Ba2Cu3O7- δ coplanar wave guides on a sapphire substrate. *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, 2003, vol. 13, no. 2, pp. 276-279.
- [27] Zhang G., Lancaster M.J. Dual-band microstrip bandpass filter using stepped-impedance resonators with new coupling schemes. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2006, vol. 54, no. 10, pp. 3779-3785.
- [28] Bladh K., Gunnarsson D., Hurfeld E., Devi S. Comparison of cryogenic filters for use a single electronics experiments. *Rev. of Sci. Instruments*, 2003, vol. 74, no. 3, pp. 1323-1327.
- [29] Lukashenko A., Ustinov A.V. Improved powder filters for qubit measurements. *Rev. of Sci. Instruments*, 2008, vol. 79, no. 1, pp. 014701-1-014701-4.