

УДК 538.945

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ  
КРИОГЕННОГО МАЛОШУМЯЩЕГО SiGe УСИЛИТЕЛЯ  
ПРИ СУБКЕЛЬВИНОВЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ****Б.И. Иванов<sup>1</sup>, И.Л. Новиков<sup>1</sup>, Д.В. Пономарев<sup>1</sup>,  
А.Н. Султанов<sup>1</sup>, А.Г. Вострецов<sup>1</sup>, Е.В. Ильичев<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет<sup>2</sup>Лейбниц, Институт фотонных технологий

В данной работе представлен результат экспериментального исследования малошумящего криогенного двухкаскадного усилителя на основе гетероструктурных биполярных SiGe транзисторов. Показаны амплитудно-частотные характеристики усилителя при различных температурных режимах работы и различных режимах питания усилителя при фиксированных температурах. Приведены основные характеристики такого типа усилителя при температурах от 4,2 К до 300 мК. Приводятся характеристики коэффициента усиления при температуре менее 300 мК. Экспериментально показано, что разработанный усилитель обеспечивает  $|S_{21}|$ , соответствующий 15 дБ в диапазоне частот от 100 МГц до 4 ГГц при температуре эксперимента 350 мК.

*Ключевые слова:* криогенный усилитель, малошумящий усилитель, усилитель с малой мощностью рассеяния, измерение слабых сигналов, измерение квантовых устройств.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-62-72

**Введение**

Современный уровень производства устройств твердотельной электроники позволяет разрабатывать структуры с предельно низкими шумовыми характеристиками. Такие устройства являются основой при проектировании малошумящих систем измерений. Они особо актуальны при измерении твердотельных структур с квантовой чувствительностью. Примером таких структур являются сверхпроводниковые квантовые биты [1–3], которые явно демонстрируют квантовые свойства. Известно, что квантовые свойства наблюдаемы при сверхнизких температурах. Поэтому требуется использовать глубокое охлаждение. Так как собственные характерные частоты кубитов, как правило, лежат в микроволновом диапазоне частот, то для их измерения необходимы температуры ниже 100 мК. Уровень мощности сигнала на выходе таких структур не детектируется современными комнатными измерительными устройствами, и задача разработки криогенных малошумящих усилителей (МШУ) является актуальной для квантовых измерений. Более того, микроволновый тракт имеет прямые потери, в связи с этим уровень измеряемого сигнала снижается линейно в зависимости от длины тракта [4]. Появляется потребность в размещении малошумящих усилителей мощности в непосредственной близости от исследуемого сверхпроводникового образца, расположенного при субкельвиновых температурах. С другой стороны, минимальная

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания, проект № 8.337.2014/К и РФФИ, проект 14-02-31601 мол\_а.

© 2016 Б.И. Иванов, И.Л. Новиков, Д.В. Пономарев, А.Н. Султанов, А.Г. Вострецов,  
Е.В. Ильичев

рабочая температура усилителя ограничена его тепловыделением и физическими свойствами его активных элементов. Развитие технологии изготовления таких устройств и особенности их работы при субкельвиновых температурах формируют новые задачи по развитию считывающей криогенной электроники.

Особый интерес в криогенной электронике представляют транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ, от англ. HEMT). Уникальные характеристики HEMT и его улучшенного варианта PHEMT (псевдоморфного HEMT) вытекают из свойств двумерного электронного газа. Благодаря своим особенностям эти устройства способны работать на сверхвысоких частотах, обеспечивая линейный коэффициент усиления в широкой полосе частот, а также сохраняют свою работоспособность при криогенном охлаждении. Немаловажной особенностью HEMT-транзисторов является малая шумовая температура, что делает выгодным их использование в экспериментах, требующих высокой чувствительности.

В статье [5] авторами был разработан криогенный трехкаскадный усилитель на коммерческих PHEMT GaAs-транзисторах ATF-35143 фирмы Agilent Technologies, предназначенный для мегагерцового частотного диапазона и функционирующий при температуре окружающей среды около 380 мК. Его минимальная шумовая температура  $T_{ш}$  составляет значение около 100 мК при частотах 1...4 МГц с минимумом в 90 мК при 2,5 МГц. Потребляемая мощность усилителя находится в диапазоне 100...300 мкВт. Однако, как и ожидалось авторами статьи, HEMT-транзисторы оказались непригодны для чувствительных измерений на частотах ниже 1 МГц вследствие высокого значения точки спада  $1/f$  шума (около 300 кГц), вызванного фликкер-шумом GaAs-транзисторов. Повышение шумовой температуры на частотах выше 4 МГц происходит вследствие рассогласования между входным импедансом транзистора и импедансом входной цепи.

В статье [6] авторы использовали арсенид-галлиевые полевые транзисторы (GaAs JFETs) фирмы SONY в качестве основы для разработки емкостного трансимпедансного усилителя, используемого в качестве считывающего устройства с детекторов на основе сверхпроводящих туннельных переходов. Была продемонстрирована работоспособность усилителя при криогенных температурах вплоть до 0,3 градусов Кельвина с уровнем энергопотребления в несколько микроватт, без криогенных аномалий и низким уровнем шума.

В статье [7] авторами был разработан криогенный усилитель, основанный на PHEMT-транзисторах ATF-36077 фирмы Agilent Technologies, имеющий шумовую температуру около 200 мК при внешней температуре охлаждения 300 мК. Таким образом, HEMT-транзисторы обоснованно могут считаться подходящими кандидатами для использования в криогенных МШУ при работе в субкельвиновом диапазоне температур.

Параллельно с HEMT-технологией, за последние 20 лет значительно улучшилась биполярная технология на гетеропереходах. Созданные по такой технологии SiGe-транзисторы способны так же, как и HEMT-транзисторы, работать при криогенных температурах и обеспечивать постоянный коэффициент усиления на частотах до десятков ГГц. 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. В отличие от HEMT-усилителей у них меньше коэффициент усиления, однако этот недостаток компенсируется лучшей стабильностью и меньшим фазовым шумом. В частности, в статье [8] приводится экспериментальное подтверждение работы криогенного усилителя на основе SiGe ГБТ при температуре эксперимента 4,2 К, шумовая температура которого составляет менее 2 К, а эквивалентное шумовое сопротивление – 50 Ом.

Преимуществом SiGe ГБТ является возможность их использования для низкочастотных применений вплоть до нескольких единиц герц. До недавнего времени криогенные усилители на основе SiGe ГБТ применялись только для температур от 4,2 градуса Кельвина (температура жидкого гелия) и выше, и не было данных о работоспособности схем на SiGe ГБТ при более низких температурах. Первые результаты их работоспособности в субкельвиновом диапазоне температур были опубликованы в статье [9], авторы которой использовали транзисторы первого поколения SiGe БиКМОП технологии IBM SiGe 5AM. Представленные в статье выходные вольт-амперные характеристики для температур 4 К, 1,4 К и 252 мК при токах базы 40...100 нА показывают стабильную работу транзисторов при субкельвиновых температурах, тем не менее конечного применения этих транзисторов в схемах криогенных МШУ не показано.

В статье [10] экспериментально подтверждена работа широкополосного криогенного усилителя мощности на основе SiGe ГБТ при 800 мК в составе считывающей системы для измерения свойств сверхпроводниковых кубитов. Основу усилителя составили транзисторы BFP 640 фирмы Infineon. Полученные в ходе эксперимента данные показали, что в полосе от 100 МГц до 4 ГГц коэффициент усиления составил 35 дБ при температуре эксперимента 800 мК. Таким образом, показано, что SiGe ГБТ могут использоваться в качестве широкополосных криогенных усилителей наряду с НЕМТ-технологией при охлаждении до субкельвиновых температур для считывания информации квантовых структур.

В данной работе мы демонстрируем работоспособность криогенного МШУ на основе SiGe ГБТ при температурах охлаждения ниже 800 мК. Приводятся его основные параметры для различных температурных режимов работы усилителя. Данный усилитель предназначен для экспериментального исследования свойств сверхпроводниковых кубитов и сверхпроводящих структур на их основе в полосе частот 100 МГц...4 ГГц. Проводится экспериментальное исследование двухкаскадного криогенного усилителя. Целью данной работы является исследование работоспособности представленного криогенного усилителя при различных рабочих температурах и различных режимах питания усилителя.

### 1. Экспериментальное исследование SiGe МШУ

Основным требованием для обеспечения высокой чувствительности усилителя мощности, предназначенного для работы со сверхпроводниковыми квантовыми битами и другими квантовыми структурами на их основе, является низкий шум первого каскада усиления. По этой причине выбор транзистора является очень важной задачей. В результате сравнительного анализа за основу усилителя был выбран гетероструктурный биполярный транзистор BFP640 фирмы Infineon, характеризующийся максимальной частотой перехода  $f_t = 42$  GHz и минимальным коэффициентом шума  $NF_{min} = 0,65$  дБ. Схема усилителя выбрана аналогично схеме из работы [8], которая показала стабильные характеристики усилителя с малым уровнем собственных шумов и малой мощностью рассеяния.

В экспериментах по измерению слабых сигналов от сверхпроводникового кубита использовался измерительный стенд, описанный в статье [4]. Основным оборудованием для проведения экспериментов были векторный анализатор цепей ZVL13 фирмы Rohde & Schwarz и рефрижератор растворения. Было выполнено измерение передаточных параметров двухкаскадного МШУ при фиксированной температуре 4,2 К и при пошаговом понижении температуры рефрижератора охлаждения от 4,2 К до 140 мК.

Экспериментальная зависимость матрицы рассеяния  $|S_{21}|$  от частоты в рабочем диапазоне частот при различных напряжениях питания  $V_s$  представлена на

рис. 1. Как видно из рисунка, диапазон коэффициентов усиления по напряжению при фиксированной температуре 4,2 К для различных режимов питания мощностей рассеивания составляет от 10 до 15 дБ в полосе частот от 100 МГц до 4 ГГц. При увеличении  $V_s$  более 1,3 В наблюдается спад коэффициента усиления усилителя, что характерно и для питания ниже 1,2 В. Напряжения питания выбраны из условия максимального и минимального усиления и являются оптимальными. В связи с этим для данного усилителя выбран этот диапазон рабочих напряжений. Для всех экспериментов уровень входной мощности усилителя соответствовал – 80 дБм ( $10^{-11}$  Вт) и является на несколько порядков ниже динамического диапазона усилителя.

Было проведено экспериментальное исследование усилителя при температурах ниже 400 мК. Для этого диапазона температур диапазон коэффициентов усиления по напряжению для различных режимов питания мощностей рассеивания составляет в среднем от 7 до 15 дБ для полосы частот от 100 МГц до 4 ГГц. Мощность охлаждения в рефрижераторе растворения ограничена: чем ниже температура эксперимента, тем ниже мощность охлаждения. При наличии источника тепловой энергии конечная рабочая температура рефрижератора может отличаться от номинальной. На рис. 2 показана характеристика усилителя при различных пяти напряжениях питания и фиксированной мощности охлаждения криостата (фиксированной температуре в 100 мК). В данном случае температура рефрижератора увеличивалась при увеличении напряжения питания до 1,3 В (максимальный коэффициент усиления). Таким образом, коэффициент усиления для разработанного усилителя слабо зависит от рабочей температуры в температурном диапазоне ниже 4,2 К.

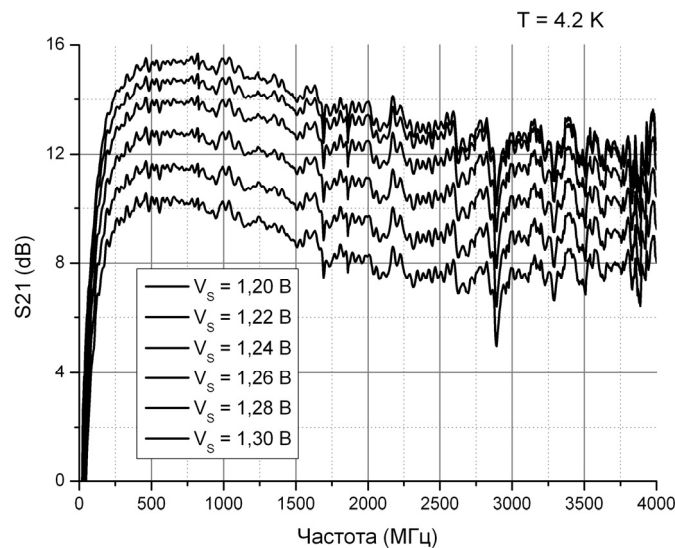


Рис. 1 – Зависимость коэффициента матрицы рассеяния  $|S_{21}|$  криогенного усилителя от частоты для различных напряжений питания  $V_s$  при температуре 4,2 К. Верхняя кривая соответствует напряжению питания 1,3 В; нижняя кривая соответствует напряжению питания 1,2 В

Fig. 1 – Transmission curve  $|S_{21}|$  of the cryogenic amplifier for different power supply voltages at 4,2 K. The upper curve corresponds to power supply voltage of 1,3 V, downer curve corresponds to power supply voltage of 1,2 V

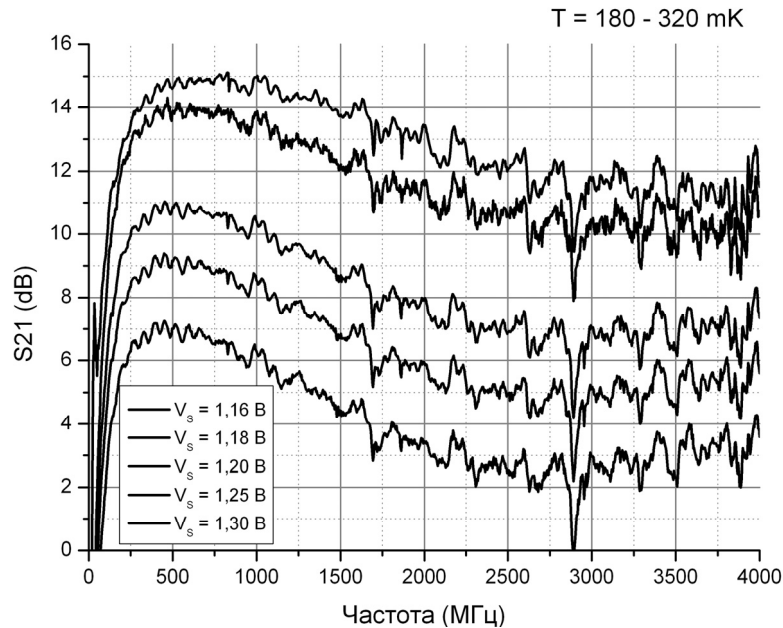


Рис. 2 – Зависимость коэффициента  $|S_{21}|$  криогенного усилителя от частоты для различных напряжений питания. Температура рефрижератора установлена на отметку 100 мК. Верхняя кривая соответствует напряжению питания 1,3 В; нижняя кривая соответствует напряжению питания 1,16 В

Fig. 2 – Transmission curve  $|S_{21}|$  of the cryogenic amplifier for different power supply voltages. The dilution unit temperature was set to 100 mK. The upper curve corresponds to power supply voltage of 1,3 V, downer curve corresponds to power supply voltage of 1,16 V

Сравнительный анализ зависимости коэффициента матрицы рассеяния  $|S_{21}|$  от рабочей температуры усилителя в области субкельвиновых температур при фиксированной частоте 2,5 ГГц показан на рис. 3. В ходе данного эксперимента варьировалось напряжение питания (диапазон показан на рис. 4), что изменяло мощность рассеяния и рабочую температуру рефрижератора. Сравнительный анализ экспериментальных кривых коэффициента  $|S_{21}|$ , полученный при фиксированной частоте 2,5 ГГц от напряжения питания показан на рис. 4. Рабочая температура рефрижератора показана на рис. 3.

Как видно из приведенной характеристики, коэффициент  $|S_{21}|$  слабо меняется в зависимости от рабочей температуры в диапазоне ниже 4,2 К. Это показывает, что разработанный усилитель с данным типом транзисторов оказывается работоспособным в субкельвиновом диапазоне температур, что до настоящего момента не представлено в научных работах ведущих мировых групп.

Была проведена оценка выделяемой мощности криогенного усилителя. При каждом значении напряжения питания фиксировалась рабочая температура рефрижератора. После проведения шумовых измерений криогенный усилитель был отключен и выполнялось измерение значения мощности охлаждения рефрижератора в стандартном режиме мощности испарения смеси PSTILL = 12 мВт при разных рабочих температурах. Для задания разных рабочих температур использовался нагреватель рабочей панели камеры смешивания и при достижении рефрижератором установленной рабочей температуры регистрировался ток, протекающий через известное сопротивление нагревателя. Полученная зависимость

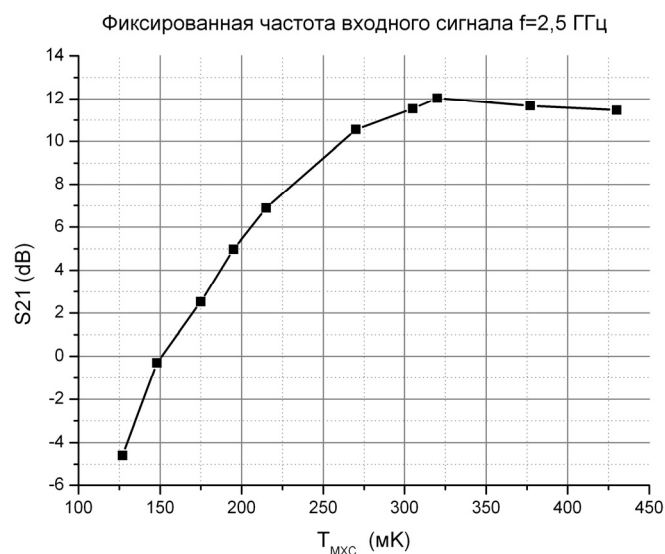


Рис. 3 – Зависимость коэффициента матрицы рассеяния  $|S_{21}|$  от рабочей температуры усилителя на фиксированной частоте 2,5 ГГц

Fig. 3 – Transmission curve  $|S_{21}|$  dependence on operating temperature at the fixed signal frequency 2,5 GHz

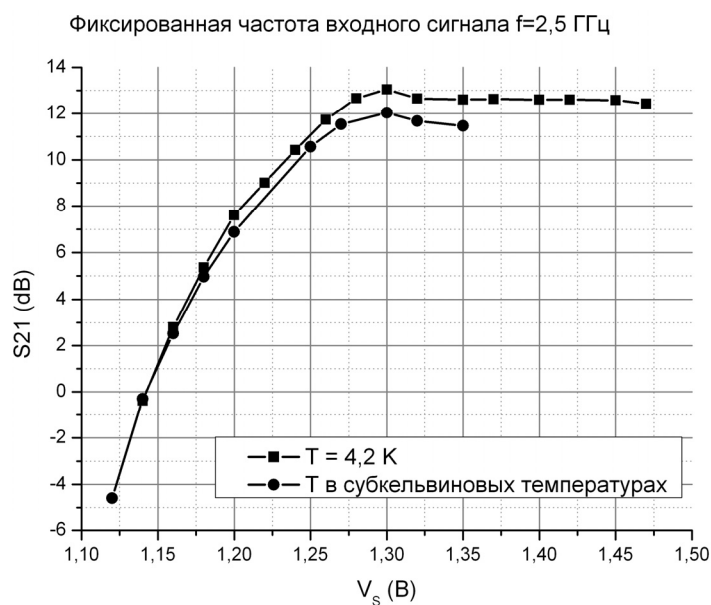


Рис. 4 – Зависимость коэффициента матрицы рассеяния  $|S_{21}|$  от напряжения питания для разных температурных режимов работы усилителя на фиксированной частоте 2,5 ГГц

Fig. 4 – Transmission curve  $|S_{21}|$  dependence on power supply voltage for different temperature regimes at the fixed signal frequency of 2,5 GHz

мощности охлаждения от рабочей температуры представлена на рис. 5. На рис. 6 показана линейная аппроксимирующая функция, по которой определялось значение мощности охлаждения рефрижератора при разных его рабочих температурах в моменты, когда криогенный усилитель находился в активном состоянии.

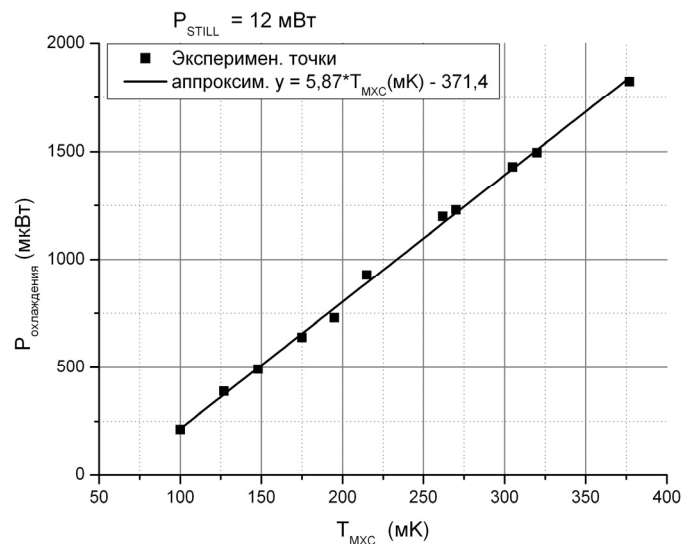


Рис. 5 – Зависимость мощности охлаждения рефрижератора от рабочей температуры

Fig. 5 – Refrigerator cooling power dependence on a working temperature

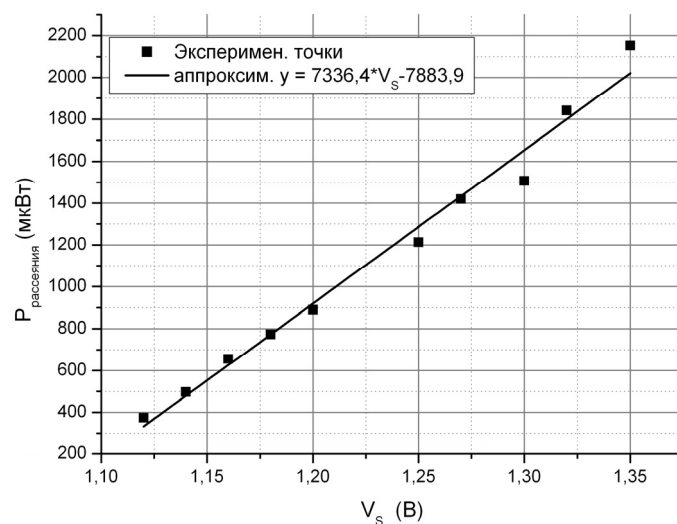


Рис. 6 – Зависимость мощности рассеяния усилителя от напряжения питания при субкельвиновых температурах

Fig. 6 – Amplifier power consumption dependence on power supply voltage at subKelvin temperatures

Таким образом, удалось получить выделяемую мощность усилителя при разных напряжениях питания. Эта зависимость представлена на рис. 6, где также указана аппроксимирующая функция, связывающая напряжение питания усилителя и выделяемую мощность. Данная зависимость показывает сильное возрастание мощности рассеивания криогенного усилителя от приложенного напряжения питания, что потребовало оценки охлаждающей возможности рефрижератора при максимальных его рабочих параметрах.

Проведенное измерение максимальной мощности охлаждения рефрижератора при рабочей температуре 100 мК показало 500 мкВт при максимальной мощности испарения смеси PSTILL = 30 мВт. Эта максимальная величина мощности охлаждения соответствует низкому значению напряжения питания  $V_s = 1,14$  В, при котором транзисторы находятся в резистивном состоянии и усилитель имеет высокий уровень шума и малое усиление. В рабочем режиме усилителя при минимальном уровне шума и максимальном коэффициенте усиления выделяемая мощность составляет 1,5 мВт, что приводит к температуре рефрижератора выше 100 мК. Поэтому возможность работы данного усилителя непосредственно рядом со сверхпроводниковым кубитом при рабочих температурах кубита ниже 100 мК нежелательна из-за высокой выделяемой мощности усилителя. Следовательно, для проведения экспериментов со сверхпроводниковыми структурами при температурах ниже 100 мК предполагается поместить усилитель на близлежащих панелях, имеющих более высокое значение мощности охлаждения. Такой панелью может быть панель испарения смеси с мощностью охлаждения несколько мВт и рабочей температурой 800 мК [10].

### Заключение

В данной работе проведено экспериментальное исследование МШУ мощности при различных субкельвиновых температурах. Для данного диапазона температур получены максимальные и минимальные мощности рассеяния при положительном коэффициенте усиления. Для минимального коэффициента усиления, равного 3 дБ, на фиксированной частоте 2,5 ГГц была достигнута минимальная рабочая температура 175 мК при мощности рассеяния 650 мкВт. Максимальный коэффициент  $|S_{21}|$  на фиксированной частоте 2,5 ГГц, равный 12 дБ, соответствует минимальной рабочей температуре 320 мК при мощности рассеяния 1,5 мВт. Приведенные данные подтверждают целесообразность использования представленного усилителя для экспериментов со сверхпроводниковыми структурами, а также возможность установки криогенных МШУ на более низких этапах охлаждения, чем обычная температура 4,2 К. Более того, 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.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Josephson persistent-current qubit / J.E. Mooij, T.P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C.H. van der Wal, S. Lloyd // *Science*. – 1999. – Vol. 285, N 5430. – P. 1036–1039. – doi: 10.1126/science.285.5430.1036.
2. Weak continuous monitoring of a flux qubit using coplanar waveguide resonator / G. Oelsner, S.H.W. van der Ploeg, P. Macha, U. Hübner, D. Born, E. Il'ichev, H.-G. Meyer, M. Grajcar, S. Wünsch, M. Siegel, A.N. Omelyanchouk, O. Astafiev // *Physical Review B*. – 2010. – Vol. 81, iss. 17. – Art. 172505. – doi: 10.1103/PhysRevB.81.172505.



3. 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. van den Brink, A.M. Zagorskin // *Physical Review Letters*. – 2004. – Vol. 93, iss. 3. – Art. 037003. – doi: 10.1103/PhysRevLett.93.037003.
4. Экспериментальное исследование шумовых свойств измерительного микроволнового тракта сверхпроводящих квантовых цепей / И.Л. Новиков, Б.И. Иванов, А.В. Кривецкий, П.С. Щекин, Е.В. Ильичев, А.Г. Вострецов // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2015. – № 1 (26). – С. 52–65. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-52-65.
5. 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 // *Review of Scientific Instruments*. – 2003. – Vol. 74, iss. 2. – Art. 1145. – doi: 10.1063/1.1532539.
6. Cryogenic GaAs readout circuits for low temperature detectors / H. Nagata, J. Kobayashi, H. Matsuo, M. Akiba, M. Fujiwara // *Proceedings of the XXVIII<sup>th</sup> URSI General Assembly in New Delhi (October 2005)*. – JB-P. 9. – Art. 0257.
7. **Korolev A.M., Shnyrkov V.I., Shulga V.M.** Note: Ultra-high frequency ultra-low dc power consumption HEMT amplifier for quantum measurements in millikelvin temperature range // *Review of Scientific Instruments*. – 2011. – Vol. 82. – Art. 016101. – doi: 10.1063/1.3518974.
8. **Иванов Б.И.** Экспериментальное исследование криогенных усилителей на основе SiGe биполярных транзисторов при температуре 4,2 К // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2014. – № 1 (22). – С. 73–82.
9. Sub-1-K Operation of SiGe transistors and circuits / L. Najafizadeh, J.S. Adams, S.D. Phillips, K.A. Moen, J.D. Cressler, S. Aslam, T.R. Stevenson, R.M. Meloy // *IEEE Electron Device Letters*. – 2009. – Vol. 30, N 5. – P. 508–510. – doi: 10.1109/LED.2009.2016767.
10. Микроволновый криогенный малошумящий гетероструктурный SiGe усилитель / Б.И. Иванов, М. Грайцар, И.Л. Новиков, А.Г. Вострецов, Е.В. Ильичев // *Письма в ЖТФ*. – 2016. – Т. 42, № 7. – С. 90–97.

## THE EXPERIMENTAL STUDY OF CRYOGENIC LOW NOISE SiGe AMPLIFIER AT SUBKELVIN TEMPERATURES

**Ivanov B.I.<sup>1</sup>, Novikov I.L.<sup>1</sup>, Ponomarev D.V.<sup>1</sup>,  
Sultanov A.N.<sup>1</sup>, Vostretsov A.G.<sup>1</sup>, Il'ichev E.V.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany*

In this paper we demonstrate experimental study of cryogenic two stage low noise amplifier based on SiGe bipolar transistors for subkelvin temperature ranges. We show gain curves for different cryogenic temperatures from 4,2 K down to 300 mK. The detailed transmission curves for a temperature range from 300 mK down to 150 mK is presented. The maximum gain at the 350 mK temperature corresponds to 15 dB for 100 MHz- 4GHz frequency range.

**Keywords:** cryogenic amplifier, low noise amplifier, low power dissipation amplifier, weak signal amplification, quantum circuits measurements.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-62-72

## REFERENCES

1. Mooij J.E., Orlando T.P., Levitov L., Tian L., Wal C.H. van der, S. Lloyd. Josephson persistent-current qubit. *Science*, 1999, vol. 285, no. 5430, pp. 1036–1039. doi: 10.1126/science.285.5430.1036
2. Oelsner G., Ploeg S.H.W. van der, Macha P., Hübner U., Born D., Il'ichev E., Meyer H.-G., Grajcar M., Wunsch S., Siegel M., Omelyanchouk A.N., Astafiev O. Weak continuous monitoring of a flux qubit using coplanar waveguide resonator. *Physical Review B*, 2010, vol. 81, iss. 17, art. 172505. doi: 10.1103/PhysRevB.81.172505

3. Izmalkov A., Grajcar M., Il'ichev E., Wagner Th., Meyer H.-G., Smirnov A.Yu., Amin M.H.S., Brink A.M. van den, Zagoskin A.M. Evidence for entangled states of two coupled flux qubits. *Physical Review Letters*, 2004, vol. 93, iss. 3, art. 037003. doi: 10.1103/PhysRevLett.93.037003
4. Novikov I.L., Ivanov B.I., Krivetskii A.V., Schekin P.S., Il'ichev E.V., Vostretsov A.G. Eksperimental'noe issledovanie shumovykh svoystv izmeritel'nogo mikrovolnovogo trakta sverkhprovodyashchikh kvantovykh tsepei [Experimental study of noise parameters in a microwave measurement system for flux qubit readout]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 1 (26), pp. 52–65. doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-52-65
5. 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. *Review of Scientific Instruments*, 2003, vol. 74, iss. 2, art. 1145. doi: 10.1063/1.1532539
6. Nagata H., Kobayashi J., Matsuo H., Akiba M., Fujiwara M. Cryogenic GaAs readout circuits for low temperature detectors. *Proceedings of the XXVIII<sup>th</sup> URSI General Assembly in New Delhi*, 2005, JB-P. 9, art. 0257.
7. Korolev A.M., Shnyrkov V.I., Shulga V.M. Note: Ultra-high frequency ultra-low dc power consumption HEMT amplifier for quantum measurements in millikelvin temperature range. *Review of Scientific Instruments*, 2011, vol. 82, art. 016101. doi: 10.1063/1.3518974
8. Ivanov B.I. Eksperimental'noe issledovanie kriogennykh usilitelei na osnove SiGe bipolyarnykh tranzistorov pri temperature 4,2 K [Experimental study of cryogenic SiGe bipolar transistors at 4.2 K]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 1 (22), pp. 73–82.
9. Najafizadeh L., Adams J.S., Phillips S.D., Moen K.A., Cressler J.D., Aslam S., Stevenson T.R., Meloy R.M. Sub-1-K Operation of SiGe transistors and circuits. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, vol. 30, no. 5, pp. 508–510. doi: 10.1109/LED.2009.2016767
10. Ivanov B.I., Graitsar M., Novikov I.L., Vostretsov A.G., Il'ichev E.V. Mikrovolnovyi kriogennyi maloshumyashchii geterostrukturnyi SiGe usilitel' [The microwave low-noise cryogenic heterostructure SiGe amplifier]. *Pis'ma v ZhTF – Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 7, pp. 90–97.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Иванов Борис Игоревич** – родился в 1986 году, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: to\_ivanov\_boris@yahoo.com).

**Ivanov Boris** (b. 1986) – PhD (Eng.), senior research worker in the cryogenic quantum electronics laboratory, Novosibirsk State Technical University. He is author of 12 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: to\_ivanov\_boris@yahoo.com).



**Новиков Илья Леонидович** – родился в 1969 году, канд. техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники, научный сотрудник межфакультетской лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: ilya\_novikov@mail.ru).

**Novikov Ilya** (b. 1969) – PhD (Eng.), associate professor, department of semiconductor devices and microelectronics, senior research worker in the cryogenic quantum electronics laboratory, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on applied superconductivity, superconducting quantum. He is author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ilya\_novikov@mail.ru).



**Пономарев Дмитрий Викторович** – родился в 1993 году, младший научный сотрудник лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: dmitry-ponomarev93@mail.ru).

**Ponomarev Dmitry** (b. 1993) – junior scientist of cryogenic quantum electronics laboratory in Novosibirsk State Technical University. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: dmitry-ponomarev93@mail.ru).



**Султанов Айдар Наильевич** родился в 1991 году, лаборант кафедры прикладной и теоретической физики, м.н.с. лаборатории квантовой криогенной электроники НГТУ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: sultanov.aydar@ngs.ru).

**Sultanov Aydar** (b.1991) lab assistant in NSTU, Department of Applied and Theoretical Physics (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sultanov.aydar@ngs.ru).



**Вострецов Алексей Геннадьевич** – родился в 1955 году, д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: методы статистической обработки сигналов. Опубликовано свыше 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vostretsov@adm.nstu.ru).

**Vostretsov Aleksey G.** (b. 1955) – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, the vice-rector for research at Novosibirsk State Technical University. His main field of research is the statistical theory of signal processing in conditions of a priori uncertainty. He has been working in this field since 1980. He has over 150 publications, including 3 monographs (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vostretsov@adm.nstu.ru).



**Ильичев Евгений Вячеславович** – родился в 1957 году, д-р физ.-мат. наук, профессор лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. Руководитель группы «Макроскопические квантовые системы» в Институте фотонных технологий, г. Йена, Германия. (E-mail: evgeni.ilichev@ipht-jena.de).

**Il'ichev Evgeniy V.** (b. 1957) – Ph.D., professor, cryogenic quantum electronics laboratory in NSTU; group leader in the macroscopic quantum systems laboratory at the Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany. He is author of over 50 publications cited to Web of Science, including 2 monographs. His research interests are currently focused on macroscopic quantum systems and superconducting quantum bits. (E-mail: evgeni.ilichev@ipht-jena.de)

Статья поступила 09 декабря 2015 г.

Received December 09, 2015

#### To Reference:

Ivanov B.I., Novikov I.L., Ponomarev D.V., Sultanov A.N., Vostretsov A.G., Il'ichev E.V. Eksperimental'noe issledovanie svoystv kriogenogo maloshumyashchego SiGe usilitelya pri subkel'vinovykh temperaturakh [The experimental study of cryogenic low noise SiGe amplifier at subkelvin temperatures]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 62–72. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-62-72