

13;15

Микроволновой делитель для квантовых сверхпроводящих цепей

© P. Neilinger^{1,2}, G. Oelsner³, M. Grajcar^{1,2}, Б.И. Иванов⁴,
И.Л. Новиков⁴, Е.В. Ильичев^{3,4}

¹ Department of Experimental Physics, Comenius University, SK-84248 Bratislava, Slovakia

² Institute of Physics, Slovak Academy of Science, 845 11 Bratislava, Slovakia

³ Leibniz Institute of Photonic Technology, P.O. Box 100239, D-07702 Jena, Germany

⁴ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: Boris_ivanov@ngs.ru

Поступило в Редакцию 24 октября 2014 г.

Применения современной криоэлектроники, особенно в квантовой микроволновой инженерии, требуют наличие приборов, работающих аналогично оптическим делителям луча. Используя ниобиевую технологию нанесения тонкопленочных структур, мы изготовили делитель мощности микроволнового сигнала с центральной частотой $f_0 = 7.2$ GHz. Мы экспериментально показали, что в полосе 1 GHz вокруг центральной частоты f_0 второй и третий выходные порты имеют характеристики -3 ± 0.8 dB от входной мощности сигнала. Затухание при передаче мощности в изоляционный порт от сигнальных портов составляет 10 dB. Приведенные характеристики получены при рабочей температуре ниже температуры сверхпроводящего перехода.

Сверхпроводниковые квантовые биты (кубиты), являющиеся, по сути, нелинейными квантовыми осцилляторами, активно используются в настоящее время для изучения особенностей взаимодействия света с веществом. Подобно экспериментам с ридберговскими атомами [1], такие кубиты связываются со сверхпроводящими резонаторами различных конструкций [2–5] и изучается динамика электромагнитного поля в полученных структурах. Здесь, как правило, эксперименты проводятся для малого числа фотонов, поэтому квантовые эффекты имеют определяющее значение.

Характерные частоты кубитов лежат в диапазоне сверхвысоких частот (1–10 GHz), что позволяет говорить о квантовой оптике в микроволновом диапазоне [6] или о квантовой микроволновой инженерии. Проведение квантово-оптических экспериментов в этой области частот требует наличия некоторого набора приборов, таких как источники, детекторы и т.п. В частности, для различного рода корреляционных и интерференционных измерений необходим микроволновой аналог оптического делителя луча.

Как правило, микроволновые делители изготавливаются из нормальных металлов. Однако для квантовой микроволновой инженерии минимизация потерь является важной задачей, поэтому сверхпроводящие делители имеют серьезные преимущества [7]. В данной работе мы представляем результаты экспериментального исследования тонкопленочного ниобиевого делителя, изготовленного на кремниевой подложке.

Схема и фотография изготовленного прибора изображены на рис. 1. Делитель представляет собой четырехплечевое устройство, выполненное в виде копланарной линии передач, вершины которого являются сигнальными портами. Длина плеча составляет четверть длины волны на частоте 7 GHz. Для той части линии передачи, у которой ширина $W_1 = 20 \mu\text{m}$ и расстояние до полигона заземленной пленки составляет $S_1 = 11 \mu\text{m}$ (рис. 1), соответствующий импеданс равен 50Ω . Соответственно для линии передачи, у которой ширина $W_2 = 32 \mu\text{m}$ и расстояние до заземленной пленки $S_2 = 5 \mu\text{m}$ (рис. 1), импеданс составляет 35Ω .

Делитель изготовлен из ниобиевой пленки толщиной 200 nm, полученной стандартным магнетронным распылением на высокорезистивную кремневую подложку с изолирующим подслоем SiO_2 . Структурирование проводилось с помощью электронной литографии и реактивного ионного травления, с использованием SF_6 . Выбор ниобия в качестве материала обусловлен его механической прочностью и относительно высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние 9.2 K. Изготовленная ниобиевая структура представлена на рис. 1, b.

Для уменьшения влияния помех и наводок подложка с делителем помещалась в металлический корпус. Входные и выходные порты соединялись с высокочастотными разъемами SMA (SubMiniature version A). Гальваническое соединение между центральным полигоном и общим заземлением было выполнено при помощи ультразвуковой сварки алюминиевыми проводниками толщиной $20 \mu\text{m}$.

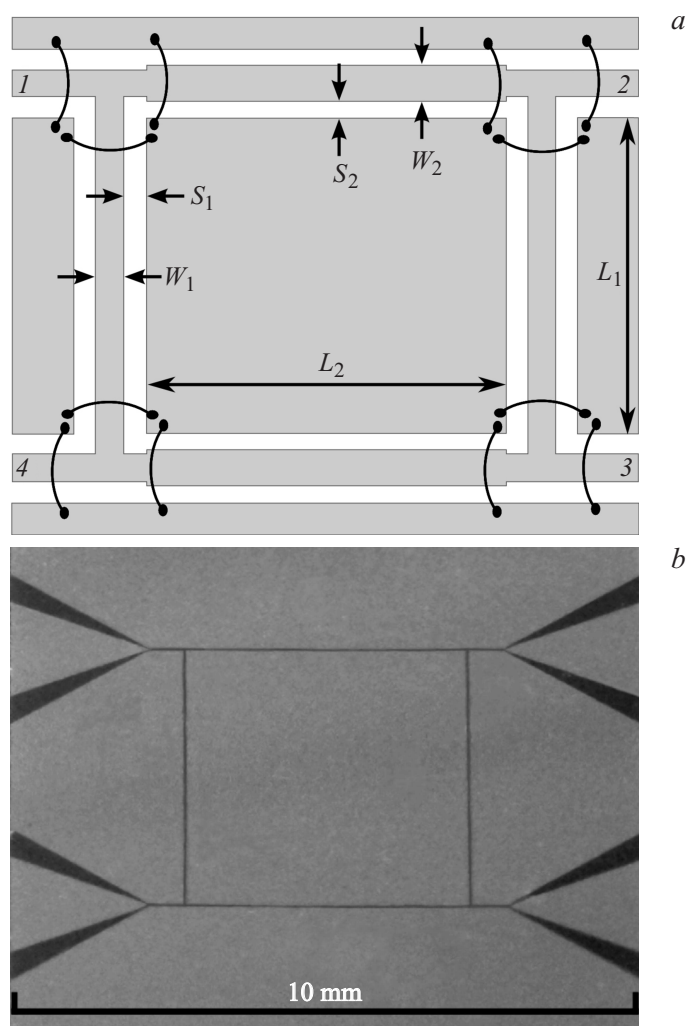


Рис. 1. *a* — характерные размеры делителя: $W_1 = 20 \mu\text{m}$, $S_1 = 11 \mu\text{m}$, $W_2 = 32 \mu\text{m}$, $S_2 = 5 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = 3980 \mu\text{m}$. Белым цветом обозначены места удаленной ниобиевой пленки, сплошные кривые — соединения заземленных участков структуры. *b* — фотография делителя. Серый цвет соответствует ниобиевой пленке, темные места — отсутствие пленки.

Свойства делителя изучались с помощью стандартного векторного анализатора цепей (ВАЦ). Измерялись коэффициенты прохождения S_{21} , S_{31} и S_{41} (здесь первый индекс обозначает выходной порт, с которого снимается сигнал, второй индекс — это номер порта, на который подается сигнал) в зависимости от частоты сигнала. При этом, если для определения $S_{i,j}$ порты i и j подключались к ВАЦ, то два других порта подключались через широкополосную нагрузку, сопротивлением 50Ω на землю. Все измерения проводились в рефрижераторе при температуре 3 К.

Результаты измерений представлены на рис. 2, *a*. Для удобства измеренные коэффициенты прохождения S_{31} и S_{41} нормированы на S_{21} . Это означает, что при таких частотах, что $S_{21} \approx S_{31}$, мощность входного сигнала делится пополам. Из рис. 2 (слева) видно, что в полосе 7.2 ± 0.5 GHz выходная мощность на портах 2 и 3 лежит в пределах -3 ± 0.8 dB от входной мощности. Ослабление сигнала на 3 dB соответствует уменьшению амплитуды микроволнового сигнала в два раза.

На рис. 2, *b* представлены расчетные зависимости коэффициентов $S_{i,j}$ от частоты, полученные с помощью компьютерного моделирования программным обеспечением фирмы SONNET. Из сравнения экспериментальных и теоретических результатов видно, что на практике не удалось избежать нежелательных резонансов. Для коэффициента S_{21} это приводит к заметному сужению экспериментально наблюдаемой рабочей полосы (примерно в 2.5 раза) по сравнению с рассчитанным значением. Еще более заметно влияние этих резонансов на значение коэффициента S_{41} , который в отличие от расчетных значений имеет локальный максимум в рабочей полосе делителя. Тем не менее даже в точке локального максимума ослабление входного сигнала по мощности больше 10 dB (рис. 2, *a*), так как уровень S_{21} (0 по оси ординат) соответствует уровню -3 dB от входной мощности.

В данной работе разработан, изготовлен и исследован сверхпроводящий микроволновой делитель мощности на основе тонкопленочного ниобия на кремниевой подложке. Экспериментальные данные показали, что в полосе 1 GHz вокруг центральной частоты 7.2 GHz выходная мощность на портах делителя лежит в пределах -3 ± 0.8 dB от входной мощности. Более того, затухание при передаче мощности в изоляционный порт от сигнальных портов составляет более 10 dB.

2* Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 7

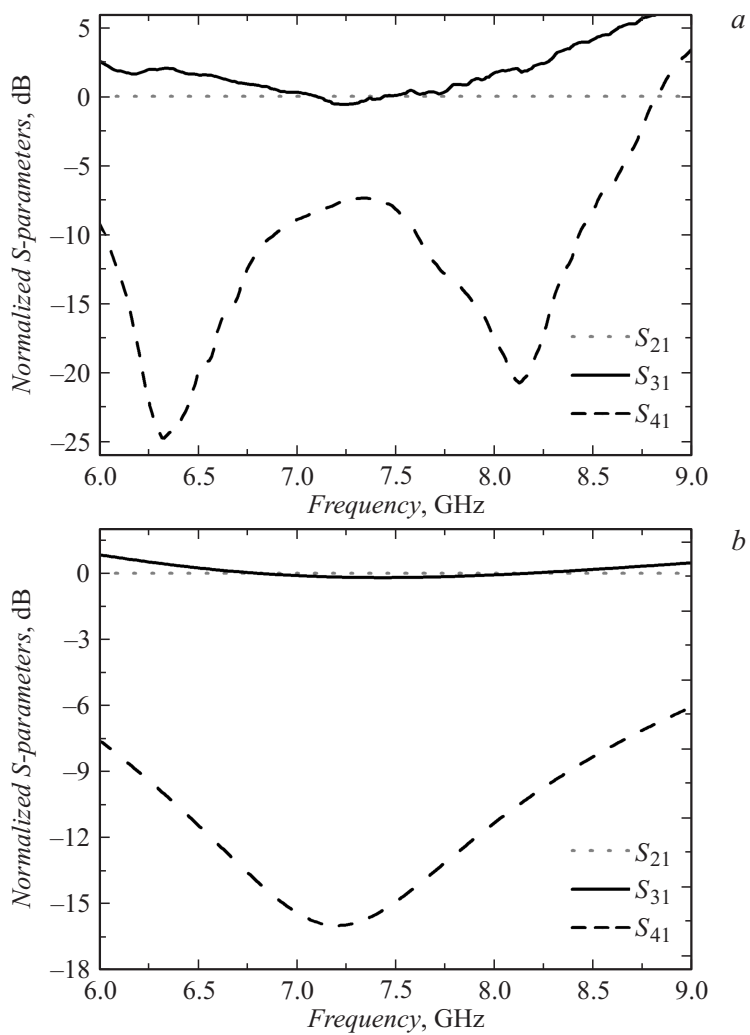


Рис. 2. *a* — экспериментально полученные коэффициенты прохождения, нормированные на S_{21} (см. текст). *b* — расчетные значения коэффициентов прохождения, полученные компьютерным моделированием.

Результаты моделирования данного делителя показывают возможность улучшения его рабочих характеристик и подавления нежелательных паразитных резонансов и отражений. Однако уже продемонстрированные свойства позволяют использовать делитель в интегральных криоэлектронных схемах, в частности для квантовой микроволновой инженерии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, в рамках государственного задания номер 8.337.2014/К, а также была частично поддержана в рамках 7-й научной программы, организованной Европейским сообществом (FP7/2007–2013), грант № 270843 (iQIT).

Б.И. Иванов благодарит Российский Фонд Фундаментальных Исследований за частичную поддержку по проекту № 14-02-31601 мол_а.

Список литературы

- [1] *Raimond J.M., Brune M., Haroche S.* // Rev. Mod. Phys. 2001. V. 73. P. 565.
- [2] *Il'ichev E., Wagner Th., Fritzsche L.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 4184.
- [3] *Wallraff A., Schuster D., Blais A.* et al. // Nature (London). 2004. V. 431. P. 162.
- [4] *Il'ichev E., Oukhanski N., Wagner Th.* et al. // Fiz. Nizk. Temp. 2004. V. 30. P. 823 [Low Temp. Phys. 2004. V. 30. P. 620].
- [5] *Born D., Shnyrkov V.I., Krech W.* et al. // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 180 501(R).
- [6] *Lang C., Eichler C., Steffen L.* et al. // Nature Physics. 2013. V. 9. P. 345.
- [7] *Hoffmann E., Deppe F., Niemczyk T., Wirth T.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. P. 222 508.