

Влияние двухуровневых дефектов в открытой копланарной линии на передачу микроволнового сигнала

Е.А. Муценик¹, А.Н. Султанов¹, И.Л. Новиков¹, Б.И. Иванов¹,
А.Г. Вострецов^{1,2}, Е.В. Ильичев^{1,3}

¹Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

²Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН
Красный пр., 54, г. Новосибирск, 630091, Россия

³Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany
E-mail: mutsenik.e@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29 августа 2018 г., после переработки 21 сентября 2018 г.,
опубликована онлайн 25 февраля 2019 г.

Микроволновые сверхпроводниковые квантовые цепи подвержены сильному влиянию различных дефектов, которые неизбежны в процессе производства. В данной работе представлен новый метод измерения потерь в открытой линии передачи. Эта линия посредством емкостной связи взаимодействует с копланарным четвертьволновым резонатором, который используется для изучения потерь в ней. Исследованы зависимости потерь от мощности и температуры (в милликельвиновом диапазоне). Показано, что основная часть потерь в линии передачи обусловлена взаимодействием микроволнового поля с дефектами, которые эффективно описываются двухуровневыми системами.

Ключевые слова: сверхпроводниковый четвертьволновый резонатор, двухуровневые дефекты, добротность связи.

Введение

В 1970-х годах прошлого столетия началось систематическое изучение различных неупорядоченных материалов, таких как аморфные кристаллы, различные виды стекол и т.д. при температурах ниже 1 К [1]. В дефектных структурах несовершенства атомной решетки могут определять характер теплопроводности и электромагнитных потерь, что является важным аспектом для различных приложений. Как правило, такие дефекты могут рассматриваться как многоуровневые квантовые системы. При низких температурах, когда $\hbar\Omega \gg k_B T_{\text{env}}$ (здесь \hbar — постоянная Планка, Ω — характерная частота возбуждения квантовой системы, k_B — постоянная Больцмана и T_{env} — температура окружающей среды), подобного рода систему можно упрощенно рассматривать как двухуровневую. Поэтому часто такие несовершенства называют двухуровневыми дефектами.

Для современного, бурно развивающегося направления, называемого микроволновой квантовой инже-

нерией, исследование таких дефектов имеет особое значение. Их взаимодействие с несущими информацией микроволновыми сигналами существенно влияет не только на параметры элементов микроволновых (СВЧ) структур, но и на расположенные на чипе твердотельные квантовые биты (кубиты). В микроволновых квантовых приборах эти кубиты могут быть связаны как с открытой копланарной линией [2], так и с микроволновыми резонаторами различной конструкции [3–8]. Было показано, что время жизни квантового состояния кубита в значительной степени определяется влиянием двухуровневых дефектов [9–12]. Если ранее влияние таких дефектов на квантовые структуры уменьшалось за счет конфигураций последних (например, трансмонный кубит, x -тон и т.д., которые менее чувствительны к взаимодействиям с дефектами и потому обладают большими временами жизни) и использования материалов подложки с улучшенными свойствами, то сейчас усилия направлены на уменьшение плотности таких дефектов в образцах. С общей точки зрения двухуровневые дефекты служат нерadiационными каналами распада, кото-

рые феноменологически определяют время жизни квантового состояния [13]. В детекторах микроволновых одиночных фотонов двухуровневые дефекты вносят вклад в шумы резонансной частоты, где в качестве считывающего элемента используется микроволновый резонатор [14–17]. Таким образом, двухуровневые дефекты представляют собой значительный источник шума в квантовых электромагнитных цепях.

В частности, большая часть исследований была направлена на изучение двухуровневых дефектов в структурах с высокой добротностью нагруженного резонатора [18–23], что обусловлено поиском материала с наименьшими потерями (наибольшей добротностью), и, как следствие, максимальной чувствительностью в однофотонных детекторах, а также большим временем жизни кубитов, размещенных в резонаторах. Добротность нагруженного резонатора определяется как внутренними потерями Q_{int} (внутренняя добротность), так и степенью его связи с сигнальной линией (Q_{coup}) или, иными словами, добротностью связи. Известно, что для любого резонатора возможны три различных режима работы: слабосвязанный режим $Q_{\text{int}} < Q_{\text{coup}}$, сильно связанный режим $Q_{\text{int}} > Q_{\text{coup}}$ и критический режим $Q_{\text{int}} = Q_{\text{coup}}$ [24]. В работах [18–23] исследовали сверхпроводниковые резонаторы в режиме слабой связи, при котором наибольший вклад в добротность нагруженного резонатора определяется его потерями.

В настоящей работе будет показано, что двухуровневые дефекты, в силу того, что они имеют общую природу для всей исследуемой структуры, могут оказывать влияние не только на добротность потерь, но и на сопротивление линии передачи (открытый копланарный волновод) и, как следствие, на добротность связи. Для этого был подготовлен образец четвертьволнового копланарного алюминиевого резонатора в режиме, близком к сильно связанному, при котором примерно одинаков вклад в добротность нагруженного резонатора от двух механизмов. Показано, что влияние двухуровневых дефектов, взаимодействующих с открытой линией передачи, проявляется в виде зависимости добротности связи от мощности входного сигнала и температуры окружающей среды. Предложенный метод может быть полезен при анализе механизмов релаксации и декогеренции кубитов в структурах с открытой микроволновой линией (например, реализация мультиплексируемого манипулирования в цепочке с кубитами [25,26]).

Описание эксперимента

В качестве исследуемого образца был использован сверхпроводниковый копланарный четвертьволновый резонатор, изготовленный по стандартной промышленной технологии с помощью термовакуумного напыления с остаточным вакуумом $6 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Толщина подложки $H = 1$ мм, значения тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 10^{-4}$ и диэлектрической

проницаемости $\epsilon = 9,7$ приведены для комнатной температуры; толщина металлизированного слоя (алюминий) $h = 1,5$ мкм. Значение h выбрано таким, чтобы исключить влияние дефектов поверхности пленки, которые являлись основными источниками потерь в ранних работах (см. [23] и ссылки в ней). Двухуровневые дефекты являются паразитными каналами утечки электромагнитной энергии из резонатора (так как электромагнитная энергия тратится на их возбуждение). Схематичное изображение четвертьволнового копланарного резонатора представлено на рис. 1(а) со следующими геометрическими размерами: длина резонатора 11,58 мм (соответствующая резонансная частота $f_{\text{res}} = 2,803$ ГГц), длина ответвителя $l_0 = 440$ мкм, ширина резонатора $w_{\text{res}} = 50$ мкм, величина емкостного зазора резонатора $g_{\text{res}} = 30$ мкм. Параметры линии передачи: ширина центральной линии $w = 150$ мкм, величина емкостного

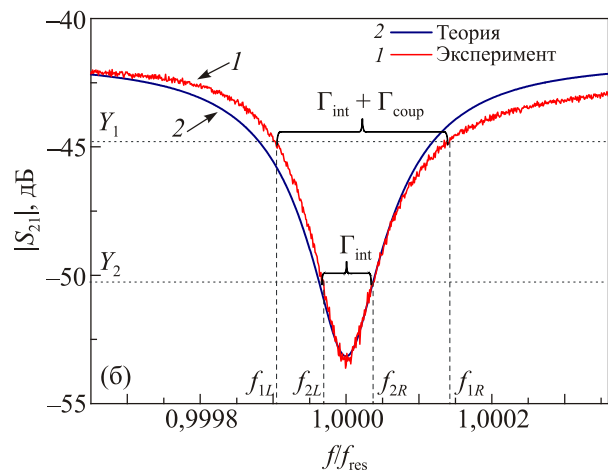
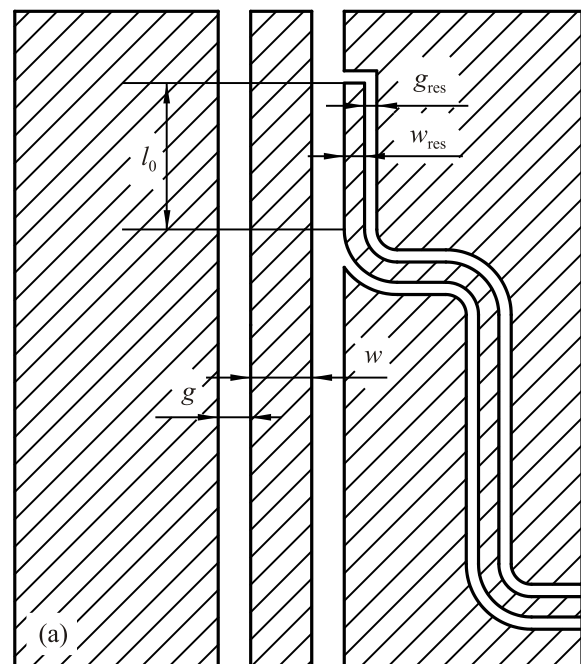


Рис. 1. (Онлайн в цвете) Схематичное изображение четвертьволнового копланарного резонатора (а); зависимость модуля передаточной характеристики от частоты сигнала и пример аппроксимации экспериментальной АЧХ (б).

зазора $g = 80$ мкм. Измеренная критическая температура пленки $T_c = 1,273$ К, а отношение остаточного сопротивления (residual-resistance ratio) $RRR = \frac{R_{300\text{К}}}{R_{1,4\text{К}}} = 7,5$,

где $R_{300\text{К}}(R_{1,4\text{К}})$ — сопротивление при комнатной температуре (при температуре близкой к температуре перехода). Такое значение RRR соответствует длине свободного пробега электрона порядка 0,5 мкм в напыленной пленке алюминия [27]. Это означает, что в полученной пленке влияние поверхностных эффектов минимально, так как ее толщина превышает длину свободного пробега.

Образец копланарного резонатора был помещен в рефрижератор растворения с базовой температурой 10 мК, суммарное ослабление входного сигнала, с учетом потерь криогенного микроволнового тракта, составило порядка 72 дБ. В качестве усилителя использовался двухкаскадный усилитель [28] в связке с еще одним однокаскадным усилителем, спроектированным по такому же принципу. Суммарный коэффициент усиления при этом составил порядка 30 дБ. Для измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) использовался векторный анализатор цепей (ВАЦ). Исследуемый диапазон частот составил 2 МГц, вблизи резонансной частоты, шаг по частоте генератора 2,5 кГц, внутренний фильтр для промежуточной частоты ВАЦ был установлен на 10 Гц.

Из экспериментальной АЧХ четвертьволнового резонатора могут быть определены добротность связи и добротность нагруженного резонатора (см. рис. 1(б)) [24,29]. Комплексная передаточная характеристика для такого резонатора определяется следующим уравнением:

$$S_{21} = \frac{(f - f_{\text{res}}) + 0,5j\Gamma_{\text{int}}}{(f - f_{\text{res}}) + 0,5j(\Gamma_{\text{coup}} + \Gamma_{\text{int}})}, \quad (1)$$

где Γ_{int} — скорость утечки фотонов в нерадиационные каналы распада (потери), Γ_{coup} — скорость утечки фотонов из резонатора в волновод (радиационный канал), резонансная частота f_{res} определяется погонными параметрами резонатора ($L_{\text{res}}, C_{\text{res}}$), f — частота входного сигнала, j — мнимая единица. Полная добротность нагруженного резонатора определяется как $\frac{1}{Q_{\text{load}}} =$

$= \frac{1}{Q_{\text{int}}} + \frac{1}{Q_{\text{coup}}}$, где $Q_{\text{int}} = \frac{f_{\text{res}}}{\Gamma_{\text{int}}}$ — внутренняя добротность, обусловленная потерями в диэлектрике, а $Q_{\text{coup}} = \frac{f_{\text{res}}}{\Gamma_{\text{coup}}}$ — добротность связи, характеризующая связь резонатора с волноводом. Исследуемый резонатор находится в режиме, близком к сильно связанному [24], что делает возможным измерение добротности связи с достоверной точностью. Добротность связи определяется следующим выражением [30]:

$$Q_{\text{coup}} = 2\pi f_{\text{res}} \left(C_{\text{eq}} + \frac{2}{\pi} C_{\text{cpw}} L_{\text{res}} \right) R_{\text{eq}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{eq}} = \frac{2C_{\text{coup}}}{1 + (2\pi f_{\text{res}})^2 C_{\text{coup}}^2 R_{\text{load}}}$

и $R_{\text{eq}} = \frac{1 + (2\pi f_{\text{res}})^2 C_{\text{coup}}^2 R_{\text{load}}^2}{(2\pi f_{\text{res}})^2 C_{\text{coup}}^2 R_{\text{load}}}$ — эквивалентные ем-

кость и сопротивление четвертьволнового копланарного резонатора; C_{coup} — емкость между ответвителем резонатора (l_0) и линией передачи; R_{load} — сопротивление нагрузки резонатора, включающее как потери в линии передачи, так и активное сопротивление измерительного тракта.

Данные параметры резонатора определяются комплексной диэлектрической проницаемостью и геометрическими размерами. Влияние двухуровневых дефектов на комплексную диэлектрическую проницаемость в общем виде может быть представлено как [1]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{init}} + \varepsilon_{\text{TLS}} = \varepsilon_{\text{init}}^{\text{Re}} + \varepsilon_{\text{TLS}}^{\text{Re}} - j \left(\varepsilon_{\text{init}}^{\text{Im}} + \varepsilon_{\text{TLS}}^{\text{Im}} \right), \quad (3)$$

здесь $\varepsilon_{\text{init}}^{\text{Re}} + \varepsilon_{\text{TLS}}^{\text{Re}}$ — действительная составляющая диэлектрической проницаемости, которая определяет погонные параметры согласованной копланарной линии и, соответственно, резонансную частоту; $\left(\varepsilon_{\text{init}}^{\text{Im}} + \varepsilon_{\text{TLS}}^{\text{Im}} \right)$ — мнимая часть диэлектрической проницаемости, определяющая потери в копланарной линии. Стоит отметить, что ε_{TLS} зависит как от мощности входного сигнала, так и от температуры, данный момент является ключевым в физике наблюдаемых эффектов.

В общем виде можно записать следующее равенство (см. рис. 1(б)):

$$|S_{21}|, \text{ дБ} = Y_i + \text{Norm},$$

где Y_i — соответствующее измеренное значение амплитуды коэффициента прохождения в дБ (см. рис. 1(б)), Norm — нормировка, учитывающая ослабление и усиление сигнала в измерительном тракте, также определенная в дБ и равная примерно 42 дБ. Используя выражение (1), возможно найти частоты, соответствующие заданному значению коэффициента прохождения $y_i = 10^{\frac{Y_i + \text{Norm}}{20}}$ (безразмерная величина) из следующего уравнения:

$$|S_{21}|^2 = y_i^2,$$

которое приводит к решению в общем виде:

$$f_{iL,iR} - f_{\text{res}} = \pm \frac{1}{2\sqrt{1 - y_i^2}} \sqrt{y_i^2 (\Gamma_{\text{int}} + \Gamma_{\text{coup}})^2 - \Gamma_{\text{int}}^2}. \quad (4)$$

Сопоставляя экспериментально измеренные значения частот, соответствующих уровням Y_i и найденные корни (4), можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{1-y_1^2}} \sqrt{y_1^2 (\Gamma_{\text{int}} + \Gamma_{\text{coup}})^2 - \Gamma_{\text{int}}^2} = \frac{f_{1R} - f_{1L}}{2}; \\ \frac{1}{2\sqrt{1-y_2^2}} \sqrt{y_2^2 (\Gamma_{\text{int}} + \Gamma_{\text{coup}})^2 - \Gamma_{\text{int}}^2} = \frac{f_{2R} - f_{2L}}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

Полученная система уравнений решалась численно. После подстановки найденных решений в качестве параметров в уравнение (1) была получена аппроксимационная кривая для соответствующей экспериментальной АЧХ. На рис. 1(б) изображены экспериментальная (красная I) и аппроксимационная (синяя 2) кривые. Стоит отметить, что аппроксимационная кривая описывает идеальную АЧХ, в то время как экспериментальная кривая имеет асимметрию, что свидетельствует о наличии рассогласований в измерительном тракте. Тем не менее ошибка аппроксимации экспериментальных данных, с помощью (1), составила порядка 6%, со среднеквадратичной ошибкой $RMSE = 0,011$ в абсолютных единицах. Данная ошибка является определяющей при анализе по сравнению с ошибками измерения (примерно 0,1 дБ по амплитуде и 100 Гц по частоте) и дает погрешность определения добротностей: внутренней $\frac{\delta Q_{\text{int}}}{\langle Q_{\text{int}} \rangle} \approx 4\%$ и связи $\frac{\delta Q_{\text{coup}}}{\langle Q_{\text{coup}} \rangle} \approx 5\%$,

где знак $\langle \rangle$ означает среднюю величину по всему набору измеренных значений.

Результаты измерений

Образец сверхпроводникового копланарного резонатора был исследован при температурах 10 и 400 мК. Для выяснения влияния термоциклирования эксперимент был повторен. В каждом цикле были получены зависимости внутренней добротности и добротности связи в зависимости от входной мощности микроволнового сигнала при температурах, указанных выше.

Как и в результатах более ранних работ по исследованию высокодобротных резонаторов [20,31], наблюдаются зависимости резонансной частоты и внутренней добротности от мощности входного сигнала. Из зависимости резонансной частоты, согласно теоретическому расчету [30], можно определить зависимость $\epsilon_{\text{init}}^{\text{Re}} + \epsilon_{\text{TLS}}^{\text{Re}}$. Аналогичным образом из зависимости внутренней добротности можно найти и зависимость тангенса угла диэлектрических потерь (определяется мнимой частью (3)) от мощности входного сигнала.

Насыщение двухуровневых дефектов, связанное с повышением мощности входного сигнала или температуры окружающей среды, приводит к уменьшению потерь в резонаторе и в линии передачи. Последнее утверждение хорошо подтверждает рис. 2, где внутренняя добротность растет и с увеличением мощности входного сигнала при температуре 10 мК, и с ростом температуры. Величины внутренней добротности, изображенные на рис. 2, были нормированы на внутрен-

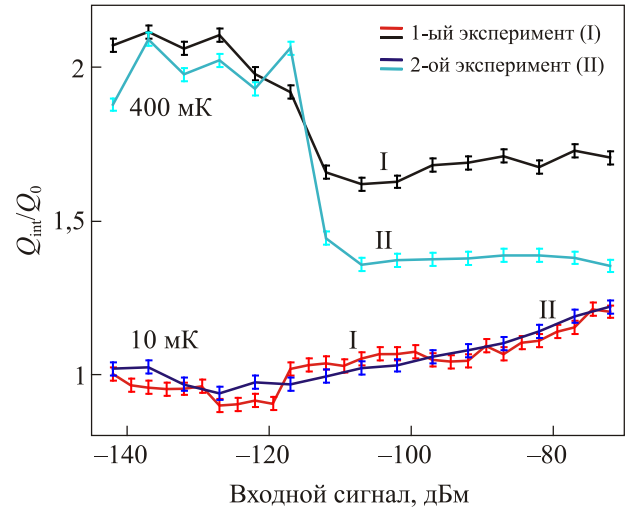


Рис. 2. (Онлайн в цвете) Зависимости внутренней добротности от мощности входного сигнала при различных температурах образца, полученные при двух различных охлаждениях. В качестве нормировочной добротности $Q_0 (\approx 14000)$ была выбрана внутренняя добротность при температуре 10 мК и при минимальной мощности входного сигнала -136 дБм из первого эксперимента.

нюю добротность $Q_0 (\approx 14000)$, выбранную при температуре 10 мК и мощности входного сигнала -136 дБм из первого эксперимента.

На рис. 3 представлены зависимости добротности связи от мощности входного сигнала при различных температурах в двух отдельных экспериментах. Величины добротности связи также были нормированы на добротность связи $Q_1 (\approx 6400)$, выбранную при температуре 10 мК и мощности входного сигнала -136 дБм из первого эксперимента. Видно, что с ростом температуры величина изменения добротности связи уменьшается, что подтверждает влияние двухуровневых дефектов. Более того, исследование при температуре 750 мК показало, что эффект полностью «размывается» и не выходит за пределы ошибки. Повторяемость при двух различных охлаждениях является подтверждением того, что данные дефекты обусловлены технологией изготовления, что полезно с точки зрения ее контроля и характеристики качества.

Полагая, что распределение двухуровневых дефектов однородно по всему исследуемому образцу, можно сделать вывод, что комплексная диэлектрическая проницаемость одинаково зависит от мощности входного сигнала и для резонатора, и для линии передачи. Однако изменение добротности связи количественно не может быть объяснено изменением реальной части диэлектрической проницаемости (3), полученным из зависимости резонансной частоты, как было показано выше. Согласно формуле (2), наблюдаемое поведение Q_{coup} (см. рис. 3 и выражение (2)) объясняется только зависимостью R_{load} . Таким образом, двухуровневые дефекты

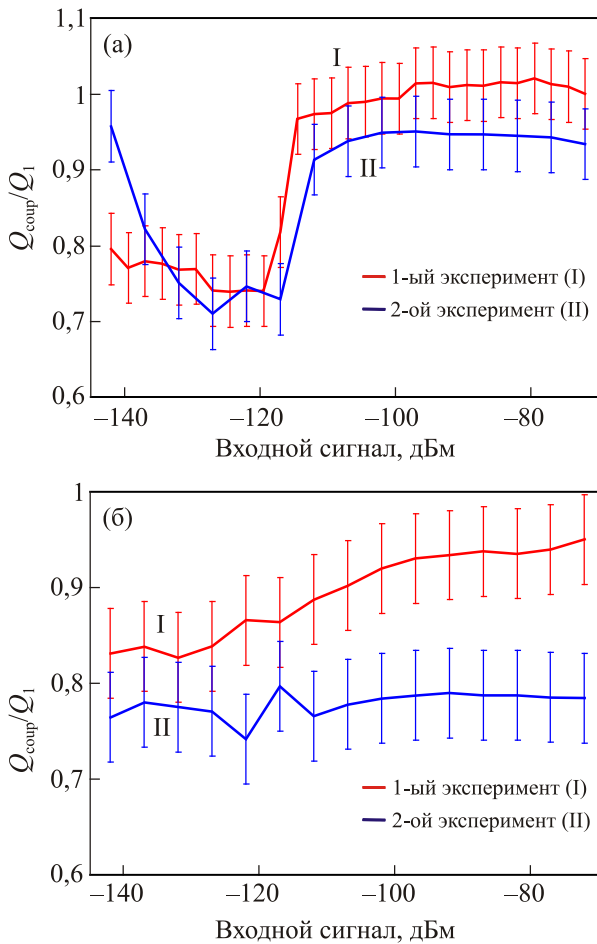


Рис. 3. (Онлайн в цвете) Зависимость добротности связи от мощности входного сигнала: при температуре образца 10 мК (а); при температуре образца 400 мК (б) при двух разных охлаждениях. В качестве нормировочной добротности Q_1 (≈ 6400) была выбрана добротность связи при температуре 10 мК и при минимальной мощности входного сигнала -136 дБм из первого эксперимента.

определяют активные потери входной мощности микроволнового сигнала в линии передачи.

Сравнивая зависимости внутренней добротности и добротности связи, можно заметить резкий переход при некоторой критической мощности. Скачком изменяется внутренняя добротность при 400 мК, как показано на рис. 2 (когда имеется значительное число термически возбужденных двухуровневых дефектов), и добротность связи при 10 мК, как показано на рис. 3 (когда число термически возбужденных двухуровневых дефектов очень мало). Примечательно, что данный скачок происходит при одной и той же мощности сигнала. Этот эффект требует дополнительного изучения, которое не вписывается в рамки текущей работы. Предположительно, он может быть связан с тем, что внешний сигнал вызывает некоторое когерентное перераспределение населенностей уровней двухуровневых дефектов.

Заключение

Таким образом, было показано, что двухуровневые дефекты могут быть исследованы в открытом волноводе, что может быть крайне полезно при изучении механизмов релаксации структур, содержащих кубиты в открытых линиях [2,32]. Например, в качестве измерительного средства в таких структурах может быть размещен специальный тестовый низкодобротный четвертьволновый резонатор, не влияющий на транспорт сигналов в рабочей полосе структуры, для проведения оценок дефектности образца с помощью измерения зависимости добротности связи от мощности сигнала.

Авторы выражают благодарность О.В. Севостьянову за предоставленные образцы резонаторов. А.Н. Султанов выражает благодарность Я.С. Гринбергу и Н.С. Хайло за полезные обсуждения и дискуссии. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, номер проекта № 16-19-10069.

1. W.A. Phillips, *Rep. Phys.* **50**, 1657 (1987).
2. A.A. Abdumalikov, Jr., O. Astafiev, A.M. Zagoskin, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, and J.S. Tsai, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 193601 (2010).
3. A.F. Van Loo, A. Fedorov, K. Lalumière, B.C. Sanders, A. Blais, and A. Wallraff, *Science* **342**, 1494 (2013).
4. E. Il'ichev, Th. Wagner, L. Fritzsche, J. Kunert, V. Schultze, T. May, H.E. Hoenig, H.G. Meyer, M. Grajcar, D. Born, W. Krech, M.V. Fistul, and A.M. Zagoskin, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 4184 (2002).
5. E. Il'ichev, N. Oukhanski, Th. Wagner, H.-G. Meyer, A.Yu. Smirnov, M. Grajcar, A. Izmailov, D. Born, W. Krech, and A. Zagoskin, *J. Low Temp. Phys.* **30**, 620 (2004).
6. D. Born, V.I. Shnyrkov, W. Krech, Th. Wagner, E. Il'ichev, M. Grajcar, U. Hübner, and H.-G. Meyer, *Phys. Rev. B* **70**, 180501(R) (2004).
7. А.Н. Султанов, Д.С. Карпов, Я.С. Гринберг, С.Н. Шевченко, А.А. Штыгашев, *ФНТ* **43**, 1003 (2017) [*Low Temp. Phys.* **43**, 799 (2017)].
8. D.S. Karpov, G. Oelsner, S.N. Shevchenko, Ya.S. Greenberg, and E. Il'ichev, *Fiz. Nizk. Temp.* **42**, 246 (2016) [*Low Temp. Phys.* **42**, 189 (2016)].
9. J.M. Martinis, K.B. Cooper, R. McDermott, M. Steffen, M. Ansmann, K.D. Osborn, K. Cicak, S. Oh, D.P. Pappas, R.W. Simmonds, and C.C. Yu, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 210503 (2005).
10. Yo. Shalibo, Ya'ara Rofe, D. Shwa, F. Zeides, M. Neeley, J.M. Martinis, and N. Katz, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 177001 (2010).
11. C. Wang, C. Axline, Y.Y. Gao, T. Brecht, Y. Chu, L. Frunzio, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 162601 (2015).
12. J. Lisenfeld, G.J. Grabovskij, C. Müller, J.H. Cole, G. Weiss, and A.V. Ustinov, *Nature* **6**, 6182 (2015).
13. Y.S. Greenberg and A.N. Sultanov, *JETP Lett.* **106**, 406 (2017).

14. J. Gao, M. Daal, J.M. Martinis, A. Vayonakis, J. Zmuidzinis, B. Sadoulet, B.A. Mazin, P.K. Day, and H.G. Leduc, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 212504 (2008).
15. O. Noroozian, J. Gao, J. Zmudzinis, H.G. LeDuc, and B.A. Mazin, *AIP Conf. Proc.* **1185**, 148 (2009).
16. L. Faoro and L.B. Ioffe, *Phys. Rev. B* **91**, 014201 (2015).
17. G. Oelsner, C.K. Andersen, M. Reháč, M. Schmelz, S. Anders, M. Grajcar, U. Hübner, K. Mølmer, and E. Il'ichev, *Phys. Rev. Appl.* **7**, 014012 (2017).
18. J. Gao, M. Daal, A. Vayonakis, S. Kumar, J. Zmuidzinis, B. Sadoulet, B.A. Mazin, P.K. Day, and H.G. Leduc, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 152505 (2008).
19. D.S. Wisbey, J. Gao, M.R. Vissers, Fabio C.S. da Silva, J.S. Kline, L. Vale, and D.P. Pappas, *J. Appl. Phys.* **108**, 093918 (2010).
20. D.P. Pappas, M.R. Vissers, D.S. Wisbey, J.S. Kline, and J. Gao, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**, 871 (2011).
21. J. Goetz, F. Deppe, M. Haerberlein, M. Haerberlein, F. Wulschner, C.W. Zollitsch, S. Meier, M. Fischer, P. Eder, E. Xie, K.G. Fedorov, E.P. Menzel, A. Marx, and R. Gross, *J. Appl. Phys.* **119**, 015304 (2016).
22. P. Macha, S.H.W. van der Ploeg, G. Oelsner, E. Il'ichev, H.-G. Meyer, S. Wünsch, and M. Siegel, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 062503 (2010).
23. C. Müller, J.H. Cole, and J. Lisenfeld, *Electronic Preprint*, <https://arxiv.org/pdf/1705.01108.pdf>.
24. M. Göppl, A. Fragner, M. Baur, R. Bianchetti, S. Filipp, J.M. Fink, P.J. Leek, G. Puebla, L. Steffen, and A. Wallraff, *J. Appl. Phys.* **104**, 113904 (2008).
25. M. Jerger, S. Poletto, P. Macha, U. Hübner, A. Lukashenko, E. Il'ichev, and A.V. Ustinov, *EPL* **96**, 40012 (2011).
26. M. Jerger, S. Poletto, P. Macha, U. Hübner, E. Il'ichev, and A.V. Ustinov, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 042604 (2012).
27. A.F. Mayadas, R. Feder, and R. Rosenbeg, *J. Vac. Sci. Technol.* **6**, 690 (1969).
28. B.I. Ivanov, M. Grajcar, I.L. Novikov, A.G. Vostretsov, and E. Il'ichev, *Tech. Phys. Lett.* **42**, 380 (2016).
29. M. Jerger, *Experiments on Superconducting Qubits Coupled to Resonators*, Dissertation (2013) <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000033614/2479290>, pp. 136.
30. Е.А. Муценік, А.Н. Султанов, Б.І. Іванов, *Доклады АН ВШ РФ*, № 1, 85 (2017).
31. J.M. Sage, V. Bolkhovsky, W.D. Oliver, B. Turek, and P.B. Welander, *J. Appl. Phys.* **109**, 063915 (2011).
32. I.C. Hoi, C.M. Wilson, G. Johansson, T. Palomaki, B. Peropadre, and P. Delsing, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 073601 (2011).

Вплив дворівневих дефектів у відкритій копланарній лінії на передачу мікрохвильового сигналу

Е.А. Муценік, А.Н. Султанов, І.Л. Новиков,
Б.І. Іванов, А.Г. Вострецов, Е.В. Ільичев

Мікрохвильові надпровідникові квантові ланцюги підпадають під сильний вплив різноманітних дефектів, які неминучі в процесі виробництва. У цій роботі представлено новий метод вимірювання втрат у відкритій лінії передачі. Ця лінія за допомогою ємнісного зв'язку взаємодіє з копланарним чвертьхвильовим резонатором, який використовується для вивчення втрат у ній. Досліджено залежності втрат від потужності та від температури (в мілікельвіновому діапазоні). Показано, що основну частину втрат у лінії передачі обумовлено взаємодією мікрохвильового поля з дефектами, які ефективно описуються дворівневими системами.

Ключові слова: надпровідниковий чвертьхвильовий резонатор, дворівневі дефекти, добротність зв'язку.

The influence of two-level defects on the microwave signal transmission in the open coplanar waveguide

E.A. Mutsenik, A.N. Sultanov, I.L. Novikov,
B.I. Ivanov, A.G. Vostretsov, and E.V. Il'ichev

The performance of microwave superconducting quantum circuits is strongly influenced by the different types of defects unavoidable during a fabrication. Here we present a new method to quantify a transmission line's losses. The line of interest is capacitively coupled to a superconducting coplanar quarter wavelength resonator which is used as a readout element. Both power and temperature dependencies of the losses (at millikelvin temperature range) have been studied. We demonstrate that a certain part of losses in the transmission line is caused by the interaction of the microwave field with defects which are effectively presented as two-level systems.

Keywords: superconducting quarter wavelength resonator, two-level defects, coupling quality factor.