

Улучшение добротности сверхпроводящего микрополоскового резонатора на основе анализа спектра мод резонансных колебаний

Н. А. Волчков, А. И. Головашкин, А. Л. Карузский, А. Н. Лыков, В. Н. Мурзин, А. В. Пересторонин

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

На основе анализа спектра пространственных мод резонансных колебаний сверхпроводящего микрополоскового резонатора (СМПР) обнаружено присутствие в спектре СМПР паразитных мод, энергия которых сосредоточена в основном вне резонатора в области подводящих линий. Показано, что подавление взаимодействия основной моды СМПР с паразитными может приводить к существенному (более, чем два порядка величины) увеличению максимальной добротности резонатора. При определенных условиях в подложках, на которых монтируется СМПР, могут возбуждаться диэлектрические резонансы, которые также взаимодействуют с основной модой и приводят к понижению добротности.

Микрополосковые СВЧ-резонаторы представляют собой важное применение ВТСП^{1,2}. Полосковые СВЧ резонаторы весьма привлекательны для микроэлектроники в виду их технологичности и возможности применения пленок из ВТСП. Для успешного применения полосковых СВЧ резонаторов, необходимо решить проблему повышения добротности (Q) таких резонаторов. Чтобы составить конкуренцию применяемым в настоящее время диэлектрическим резонаторам, СМПР должен иметь $Q > 50000$ на частотах ~ 10 ГГц. Трудности разработки и создания высокодобротных микрополосковых СВЧ резонаторов обусловлены тем, что МПР являются полуоткрытыми резонаторами (волноводными резонаторами открытого типа), вопрос о частотном спектре которых не является столь подробно разработанным, как задача о спектре собственных колебаний обычного СВЧ резонатора закрытого типа. Поскольку спектр резонатора тесно связан с потерями в нем и определяет, в конечном счете, добротность Q , исследование спектра резонансных частот микрополосковых резонаторов важно с точки зрения получения СВЧ СМПР с максимальными добротностями. В связи с отсутствием замкнутой металлической границы резонатора, строгое электродинамическое рассмотрение предельно достижимых добротностей, вообще говоря, требует отыскания спектра резонансных колебаний всей волноводной системы, объединяющей резонатор и подводящие волноводы, что может оказаться весьма затруднительным. Ранее было обнаружено^{3,4}, что рабочая мода колебаний СМПР связана с другими, неидентифицированными модами, имеющими заметную амплитуду электромагнитного поля вне резонатора, т.е. в системе подводящих волноводов, что обусловлено принадлежностью СВЧ СМПР к

волноводным резонаторам открытого типа. В данной работе будет показано, что подавление взаимодействия основной моды СМПР с паразитными может приводить к существенному (более, чем два порядка величины) увеличению максимальной добротности резонатора.

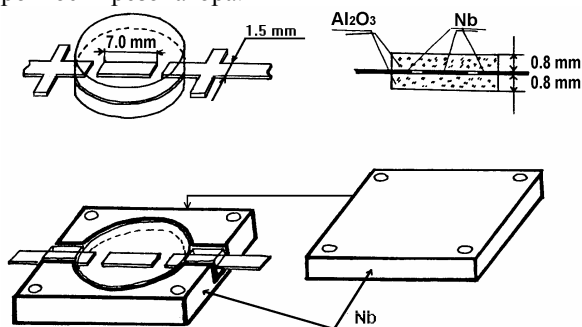


Рис. 1. Конструкция сборного ниобиевого микрополоскового резонатора. Внизу слева: вид на цилиндрическую полость в Nb экране со снятой крышкой (показана внизу справа)

Изучались характеристики микрополосковых резонаторов из Nb. Типичный исследуемый резонатор представлял собой отрезок сверхпроводящей полоски длиной $l_0 = 6,9$ мм $\sim \lambda/2$ (где λ — длина волны СВЧ излучения в диэлектрике), нанесенный на диэлектрик (Рис. 1). В качестве диэлектрика использовались диски из сапфира толщиной 0,7–0,8 мм и диаметром ~ 15 мм. В исследуемом интервале частот диэлектрическая проницаемость сапфира $\epsilon_{\text{сапф}} \approx 9,6$, $\text{tg} \delta \leq 10^{-6} \div 10^{-9}$. В качестве экрана использовался цилиндрический держатель из Nb. Между дисками к полоске подводились микрополосковые линии передачи, изготовленные также из фольги Nb или из фольги Cu. В предположении, что возбуждается только одна рабочая мода резонатора, коэффициент связи микрополоскового резонатора с внешней цепью β зависел бы только от расстояния между концами линии передачи и полоски, т.е. от зазора связи d (Рис. 2). С целью исследования вопроса о наличии других “паразитных” мод в резонаторе, медные МП линии имели закорачивающие шлейфы, выступающие вбок до касания с экраном и расположенные на расстоянии b от концов линий. Шлейфы были электрически замкнуты на заземленный экранирующий проводник. Помещая их в пучность электрического колебания можно селективно подавлять выбранную пространственную моду (Рис. 2с).

Добротность резонатора в отсутствие закорачивающих шлейфов на частотах $8,68 \div 8,86$ ГГц не пре-

вышла 10^3 . Измерения производились при различных зазорах емкостной связи d (см. Рис. 2). При этом расстояние L между замыкающими шлейфами также менялось таким образом, чтобы размер b от шлейфа до конца полоски оставался неизменным. На Рис. 3 видно, что максимальные значения добротности Q для МП линий с разными значениями размера b (см. Рис. 2а) ($b=2,7$ и $3,4$ мм.) получены при близких значениях расстояния между замыкающими шлейфами $L \sim 18$ мм, т.е. когда точки замыкания МП линий на корпус практически совпадали для обоих значений b . Это указывает на наличие в резонаторе отличных от рабочей мод колебаний, энергия которых сосредоточена в области подводящих МП линий. Применение замыкающих шлейфов на подводящих МП линиях позволило ослабить одну из таких “паразитных” мод, что привело к повышению добротности резонатора за счет уменьшения потерь, обусловленных взаимодействием рабочей и “паразитной” моды. Отметим, что максимальная Q на Рис. 3,4 возрастает от ~ 15000 до ~ 35000 с ростом ёмкостного зазора связи d , как и должно быть в случае, когда возбуждается только одна рабочая мода.

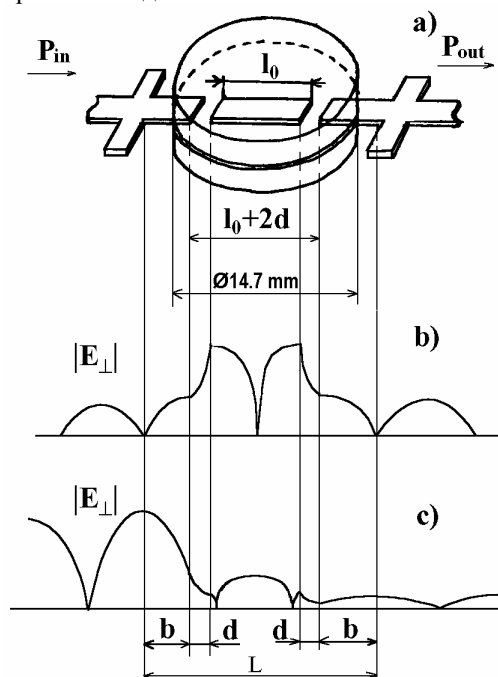


Рис. 2. Схема полуволнового микрополоскового ниобиевого резонатора и линии передачи с закорачивающими шлейфами (а). Распределение амплитуд электромагнитного поля для рабочей моды резонатора (b) при полуволновом резонансе и для паразитной моды (с)

На Рис. 4 заметны совпадающие максимумы полуширин резонансных кривых (минимумы Q), которые имеют место при значениях зазора связи $d=3,9-4,0$ мм, соответствующих расстоянию между обрывами МП линий $l_0+2d=14,7$ мм (см. Рис.2).

Объяснить этот эффект можно тем, что при указанных значениях d концы возбуждающих МП линий совпадали с краями диэлектрических сапфировых дисков, диаметр которых составлял также $14,7$ мм. При этом становится наиболее эффективным возбуждение диэлектрического резонанса в подложке, взаимодействие с которым приводит к наблюдаемому уширению резонансной кривой рабочей моды, т.е. к уменьшению ее добротности.

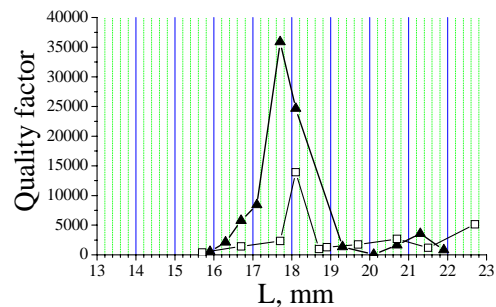


Рис. 3. Зависимость добротности от расстояния L между закорачивающими шлейфами на линиях передачи (см. Рис. 2) для $b=2,7$ мм (треугольники) и $b=3,4$ мм (квадраты)

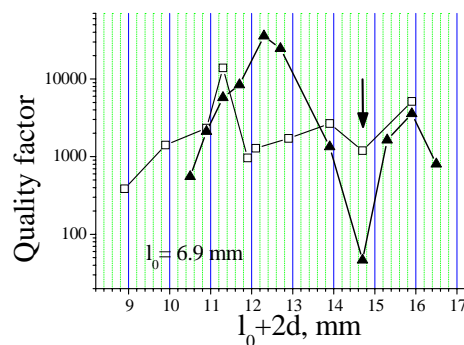


Рис. 4. Зависимость добротности от расстояния l_0+2d между концами линий передачи (см. Рис. 2) для $b=2,7$ мм (треугольники) и $b=3,4$ мм (квадраты)

Таким образом показано, что дисперсионные характеристики СМНР во многих случаях оказывают доминирующее влияние на величину предельно достижимой добротности СМНР, т.е. на диссипативные характеристики сверхпроводящего микрополоскового резонатора.

ФЦНТП (40.012.1.1.1355), РФФИ (02-02-16977).

1. Ю. М. Богданов и др., СФХТ, 7, 170 (1994).
- 2 R. V. Greed and S. J. Hedges, GEC J. of Research, 12, 97 (1995).
- 3 V. A. Dravin et al., Proc. of the 9th Workshop on RF Superconductivity, Santa Fe, USA, Nov. 1999, p. 190.
4. Н. А. Волчков и др., НТ-33, Екатеринбург (2003). Тезисы докл. сек. S и N, с. 127.