

ЛОКАЛЬНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ДИПОЛЬНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ МОДЫ В МИКРОПОЛОСКОВОМ КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ЧАСТОТ

А. В. Снежко^{1,2}, О. Ю. Волков¹, В. Н. Губанков¹, И. И. Гундарева^{1,3}, Ю. Я. Дивин^{1,3},
В. В. Павловский¹, В. И. Покалякин¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

² Московский физико-технический институт (ГУ)

³ Peter Grünberg Institute, PGI-5, Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich, Germany

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2016 г.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования дипольной резонансной моды в микрополосковом замкнутом кольцевом резонаторе. Резонатор возбуждался электрическим полем, создаваемым планарным бикристаллическим джозефсоновским переходом в полосе частот 200-650 ГГц, Методом джозефсоновской спектроскопии был обнаружен резонанс при частоте 321 ГГц. Из сравнения с данными математического моделирования следует, что возбуждаемая резонансная мода в силу симметрии является чётной относительно отражения в плоскости симметрии исследуемой электродинамической системы дипольной модой.

Ключевые слова: терагерцовая электроника, сверхпроводимость, джозефсоновский переход.

Abstract. Here the results of subterahertz frequency closed ring resonator study are presented. Microstrip ring resonator was formed from cooper 400 μm film of 400 μm thickness on sapphire substrate by ultraviolet lithography and wet etching and covered by thin PMMA layer. It has a form of square with 111 μm external side length and 95 μm internal side length. Substrate with the resonator was attached to planar bicrystal Josephson junction from $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ high temperature superconductor on NdGaO_3 substrate. Resonator was excited by the electric field of Josephson junction in 200-650 GHz frequency range. A dependence of Josephson

junction differential resistance on frequency has a peculiarity, related to resonance mode excitation. It is known that in ac Josephson effect dc voltage bias is proportional to the Josephson oscillation frequency. In our case peculiarity voltage corresponded to central resonance frequency of 321 GHz. To analyze resonance mode observed, 3D electromagnetic simulation was performed. A passive electrodynamic system was considered, which consisted of Josephson junction electrodes and a resonator. Real part of the electrodynamic system admittance vs. frequency dependence and current density distribution at the resonance frequency were calculated, It was shown that the resonance observed corresponded to excitation of an even dipole mode. Excitation of this mode was related to electrodynamic system symmetry. This result agreed with earlier experiments on electromagnetic radiation interaction with arrays of microstrip ring resonators.

Key words: superconductivity, Josephson junction, terahertz electronics

1. Введение

Микрополосковые кольцевые резонаторы широко применяются в измерительных системах и электронных устройствах микроволнового диапазона частот. В частности, они используются для измерения фазовой скорости и дисперсионных свойств микрополосковых линий [1]-[3], измерения диэлектрической проницаемости материалов [4], анализа параметров неоднородностей микрополосковых линий [5]-[6], в качестве элементов фильтров [7], [8] и частотно-селективных поверхностей [9]. В последнее время повышенный интерес привлекают к себе кольцевые резонаторы субтерагерцовых частот. В частности, резонаторы с резонансными частотами до 600 ГГц использовались в составе сенсоров для спектрального анализа ДНК [10].

В настоящей работе исследуется возбуждение резонансных мод в планарном замкнутом кольцевом резонаторе с помощью нестационарного эффекта Джозефсона [12]. При этом джозефоновский переход (ДП) одновременно является как источником возбуждающего резонатор

электромагнитного сигнала, так и прибором, измеряющим отклик резонатора на внешний электромагнитный сигнал. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) ДП изменяется под влиянием взаимодействующей с ДП электродинамической системы. Основной вклад в изменение зависимости напряжения на ДП от тока смещения $\delta V(I)$ вносит зависящий от частоты комплексный адмиттанс электродинамической системы $Y_e(f)$:

$$\delta V(I) = R_n (IR_n - V) \operatorname{Re} Y_e(f) \quad (1)$$

где R_n – сопротивление ДП в нормальном состоянии, а частота f связана с напряжением соотношением Джозефсона $f = \frac{2eV}{hf}$.

Возможности джозефсоновской спектроскопии уже были успешно продемонстрированы как для исследования источников электромагнитного излучения в терагерцовой области частот [11], так и для частотной характеристики различных планарных электродинамических систем в диапазоне частот от 50 ГГц до 1.2 ТГц [12]-[18].

2. Детали эксперимента

В работе использовался бикристаллический ДП из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с критической температурой $T \sim 90$ К, на диэлектрической подложке из $NdGaO_3$ (рис.1). Как было показано, такие ДП описываются резистивной моделью, а джозефсоновские колебания существуют вплоть до 5 ТГц [19], что позволяет использовать данные ДП для частотной характеристики резонаторных структур в области частот до нескольких единиц терагерц. Характеристические напряжения $V_c = I_c R_n$ ДП варьировались от 0.3 до 3 мВ при температуре $T = 5$ К, сопротивления в нормальном состоянии – от 0.3 до 50 Ом. Подводящие электроды ДП были выполнены в виде треугольников с углами при вершинах 90° и длинами высот 1000 мкм. Такая форма обеспечивала плавно меняющийся с частотой импеданс электродов. Исследовался медный планарный квадратный резонатор (рис.2а), на сапфировой подложке. Длина внешней стороны квадрата резонатора составляла

111 мкм, а внутренней - 95 мкм. Резонатор был покрыт слоем полиметилметакрилата (PMMA) толщиной 10-30 мкм для исключения электрических контактов резонатора с ДП. Резонатор накладывался непосредственно на ДП (рис.1).

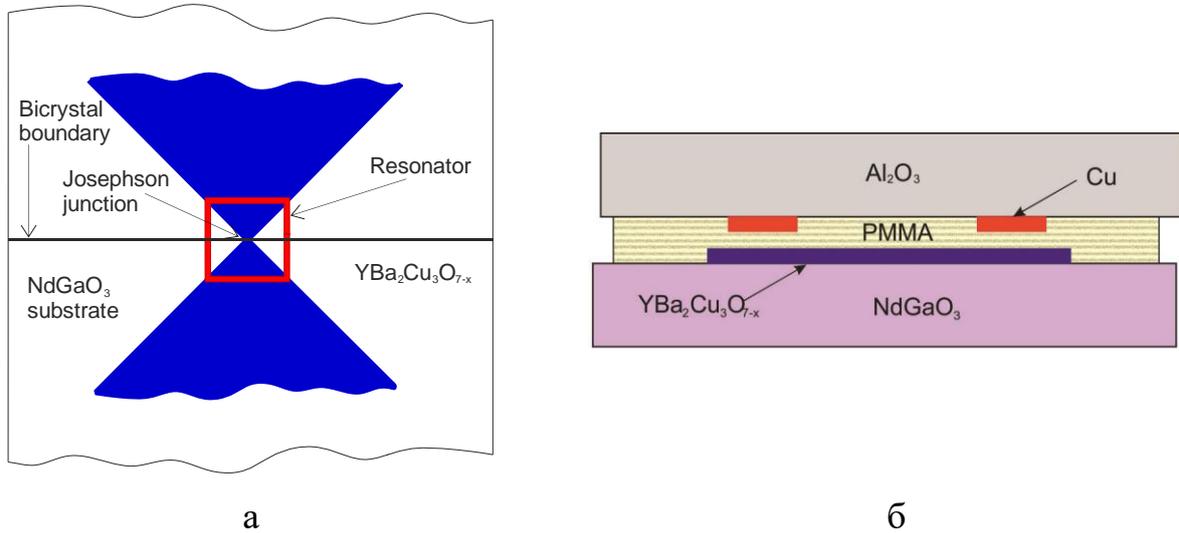


Рис.1. Расположение резонатора относительно ДП (а), расположение диэлектрических и металлических слоёв (б).

ДП с исследуемой структурой монтировался в криогенной вставке в сосуд Дьюара с жидким гелием, Температура ДП варьировалась от 5 К до 90 К. Для достижения оптимального электромагнитного согласования ДП с резонатором в области резонансной частоты дифференциальное сопротивление ДП изменялось с помощью магнитного поля.

Для проведения измерений статических характеристик использовался режим задания тока смещения через ДП. Зависимость дифференциального сопротивления ДП $R_d(I) = dV/dI$ от тока смещения I измерялась по отклику напряжения ДП на слабый переменный сигнал тока с помощью специализированного малошумящего усилителя и синхронного детектора. Частота переменного сигнала составляла 350 кГц для уменьшения влияния низкочастотных флуктуаций тока в ДП на измеряемые характеристики. На основе этих данных, а также данных измерения вольтамперной характеристики ДП $V(I)$ строилась зависимость $R_d(V)$ ДП.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Результаты измерения зависимостей дифференциального сопротивления ДП от напряжения приведены на рис. 2. Кривая 1, относящаяся к автономному ДП, является гладкой, что соответствует гладкой зависимости импеданса электродов ДП от частоты в рассматриваемом диапазоне частот.

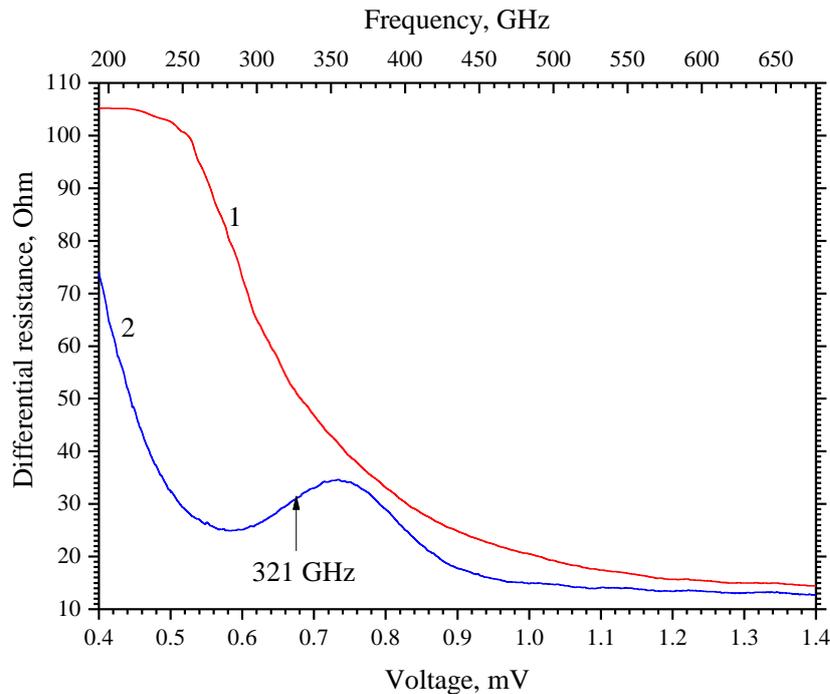


Рис. 2 Зависимость дифференциального сопротивления от напряжения ДП без резонатора (1) и с резонатором (2).

На кривой 2 наблюдается особенность при частотах от 250 до 350 ГГц. Эта особенность соответствует появлению локального минимума на зависимости $V(I)$ ДП, т.е., согласно (1), локальному уменьшению действительной части адмиттанса резонатора с минимумом при $f=321$ ГГц. Такое поведение характерно для электродинамических систем, которые могут быть описаны с помощью эквивалентной схемы в виде параллельного RLC контура (рис. 3). При этом, вследствие симметричного расположения резонатора относительно электродов ДП, магнитный поток через резонатор равен 0.

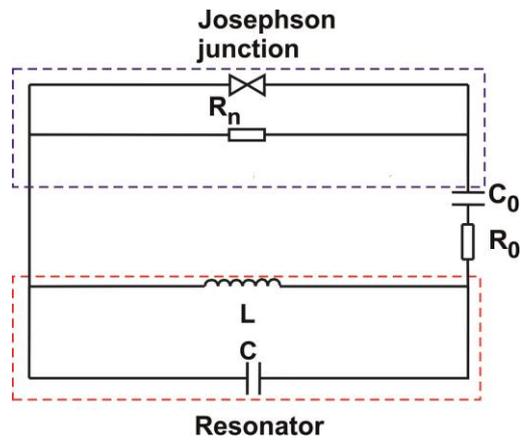


Рис. 3. Эквивалентная схема ДП, взаимодействующего с резонатором при частотах вблизи резонанса.

Поэтому в данном случае возможно возбуждение ДП только электрическим полем. Это соответствует ёмкостной связи параллельного колебательного контура с ДП. При достаточно большой ёмкости C_0 ($2\pi f C_0 R_0 \gg 1$), которая в рассматриваемом случае обусловлена значительной площадью перекрытия резонатора с электродами ДП, действительная часть адмиттанса резонатора имеет вид:

$$\operatorname{Re}Y(\tilde{f}) = \frac{1}{R_0} \frac{(\tilde{f}^2 - 1)^2}{(\tilde{f}^2 - 1)^2 + Q^2 \tilde{f}^2}, \quad (3)$$

где $\tilde{f} = \frac{f}{f_r}$, $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ - резонансная частота контура, а $Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$.

Для более детального анализа полученных данных зависимость $\operatorname{Re}Y(f)$ для рассматриваемой электродинамической системы, состоящей из электродов ДП и резонатора, была вычислена методом конечных разностей во временной области (TDFD) с использованием программного пакета CST Studio. Результаты вычислений представлены на рис. 5.

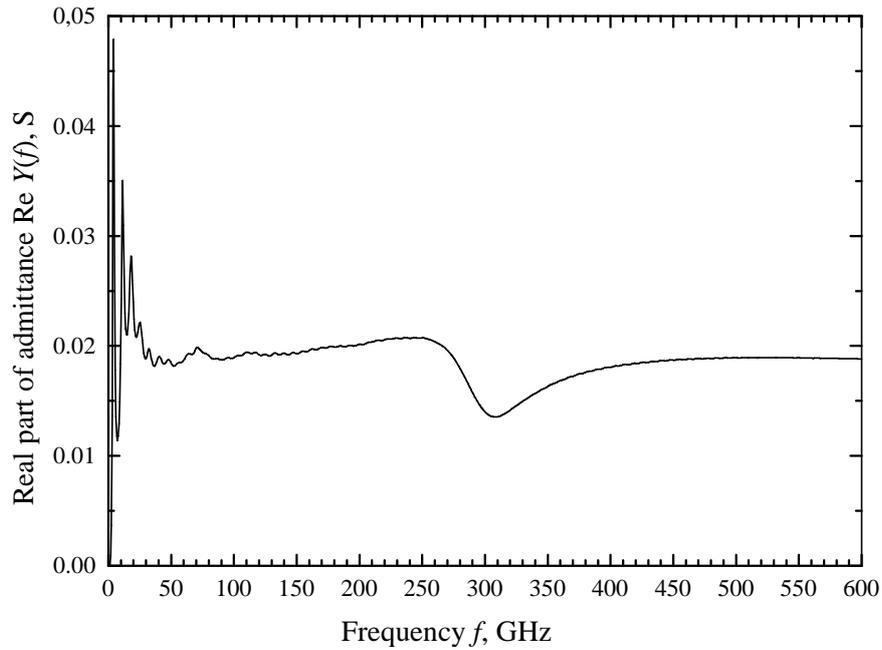


Рис. 5. Зависимость действительной части адмиттанса электродинамической системы от частоты, вычисленное с использованием метода TDFD.

На рис. 6 представлено вычисленное распределение плотности тока в резонаторе и электродах ДП, вычисленное с использованием метода TDFD.

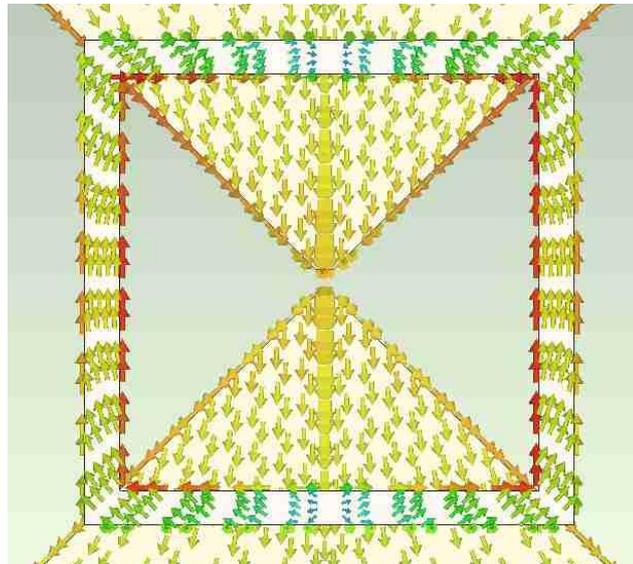


Рис. 6. Распределение плотности тока в резонаторе и электродах ДП, вычисленное с использованием метода TDFD. Стрелками указано направление токов.

Из рис. 6 следует, что в рассматриваемом случае возбуждается чётная относительно отражения в плоскости симметрии электродов ДП дипольная мода. Согласно [20], при симметричном расположении резонатора относительно направления возбуждающего электрического поля, как это имеет место в рассматриваемом эксперименте, возможно возбуждение резонансных мод только указанного типа, которые не являются магнитоактивными.

4. Заключение

В работе представлены результаты исследования дипольной резонансной моды в микрополосковом замкнутом кольцевом резонаторе. Резонатор возбуждался электрическим полем, создаваемым планарным бикристаллическим джозефсоновским переходом в полосе частот 200-650 ГГц, который использовался также в качестве спектрального анализатора. Был обнаружен резонанс при частоте 321 ГГц. Из сравнения с данными математического моделирования следует, что возбуждаемая резонансная мода в силу симметрии является чётной дипольной модой. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании электронных устройств субтерагерцового диапазона частот, антенн и частотно-селективных поверхностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 14-19-01164).

Литература

1. Troughton P. Measurement Techniques in Microstrip // Electron. Lett. 1969, V. 5, N 2, P. 25 –26.
2. Wolff I., Koppik N., Microstrip ring resonator and dispersion measurement on microstrip lines. // Electron. Lett., 1971, V. 7, N. 26, P. 779–781.
3. Edwards C. Microstrip measurements. // IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Dig., 338–341, Dallas, TX, 1982.

4. Bernard P. A., Gautray J.M. Measurement of dielectric constant using a microstrip ring resonator // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1991, V. 39, P. 592–595,
5. Stephenson, I. M., Easter B. Resonant techniques for establishing the equivalent circuits of small discontinuities in microstrip. // *Electron. Lett.*, 1071, N. 7, P. 582–584.
6. Hofer, W. J. R., Chattopadhyay A. Evaluation of the equivalent circuit parameters of microstrip discontinuities through perturbation of a resonant ring. // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1975, V. 23, P. 1067–1071.
7. Jovanovic, S., Nestic A. Microstrip bandpass filter with new type of capacitive coupled resonator. // *Electron. Lett.*, 2005, V. 41, N. 1, P. 12–13.
8. Prabhu S., Mandeep J.S. Microstrip bandpass filter at S-band using capacitive coupled resonator. // *Prog. Electromagn. Res. PIER*, 2007, V. 76, P. 223–228.
9. Parker, E. A., Hamdy S. M. A. Rings as elements for frequency selective surface. // *Electron. Lett.*, 1981, V. 17, N. 17, P. 612–614,
10. Nagel M., Richter F., Haring-Bolivar P., et al. A functionalized THz sensor for marker-free DNA analysis. // *Phys. Med. Biol.* 2003, V. 48 P. 3625–3636.
11. Divin, Y., Snezhko, A., Poppe U., et al. Terahertz Applications of Hilbert-Transform Spectral Analysis // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, V. 24, N. 4, P.1500807.
12. Павловский В.В., Гундарева И.И., Волков О.Ю., и др.. // Расширение частотного диапазона джозефсоновской импедансной спектроскопии. *Радиотехника и электроника*, 2013, Т. 58, №9, С. 977-988.
13. Снежко А.В., Губанков В.Н. Взаимодействие бикристаллического джозефсоновского перехода с внешним планарным резонатором в субтерагерцевой области частот. // *Нелинейный мир*, 2015, Т. 13, №2, С. 46 – 48.
14. Волков О.Ю., Губанков В.Н., Гундарева И.И. и др. Джозефсоновская спектроскопия для локальной диагностики планарных резонаторных систем

в миллиметровом диапазоне длин волн. // Радиотехника и электроника, 2015, Т 60 №9 с 1-6.

15. Snezhko A., Volkov O., Gubankov V., et al. Frequency Characterization of Planar Resonators by terahertz Josephson spectroscopy // Progress In Electromagnetics Research Symposium, July 6-9, 2015, Prague, Czech Republic.
16. Snezhko A., Volkov O., Gubankov V., et al. Spectral Characterization of Planar Resonators by terahertz Josephson spectroscopy». // 40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, August 23-28, 2015. Hong Kong, China.
17. Snezhko A., Pavlovskiy V., Gubankov V., et al. Frequency-Selective Analysis Of THz Photonic Elements By The Ac Josephson Effect. // 41th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, September 25-30, 2016. Copenhagen, Denmark.
18. Снежко А. В., Павловский В. В., Губанков В. Н. Эквивалентная схема планарного открытого резонатора, взаимодействующего с джозефсоновским переходом в терагерцовом диапазоне частот. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал 2015 № 11, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov15/9/text.pdf>
19. Дивин Ю.Я., Губанков В.Н., Котелянский И.М. Бикристаллические джозефсоновские переходы для терагерцовой гильберт-спектроскопии. // Радиотехника и электроника, 2003, Т.48, № 10, С. 1238-1249.
20. Enkrich S., Wegener M., Linden S., et al. Magnetic Metamaterials at Telecommunication and Visible Frequencies. Phys. Rev. Lett. 2005, V.95, P. 203901.