

УДК 621.3

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ПЕРЕХОДА С ИНТЕГРИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ В ТЕРАГЕРЦОВОЙ ОБЛАСТИ ЧАСТОТ

О. Ю. Волков¹, В. Н. Губанков¹, И. И. Гундарева¹, Ю. Я. Дивин², В. В. Павловский¹

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

² Исследовательский центр г. Юлиха, Юлих, ФРГ

Получена 19 марта 2013 г.

Аннотация. В работе представлена эквивалентная схема электромагнитной системы, состоящей из бикристаллического джозефсоновского перехода из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и логопериодической антенны, в области частот от 0 до 1100 ГГц. Эквивалентная схема учитывает влияние тепловых флуктуаций тока нормальных электронов на переход, резонансные свойства антенны и медленно меняющуюся с частотой часть импеданса, связанную с электродинамическим окружением перехода и дающую вклад на частотах до 200 ГГц. Параметры эквивалентной схемы получены путём подгонки вычисленной зависимости статического дифференциального сопротивления перехода от напряжения к зависимости, полученной из экспериментальных данных.

Ключевые слова: сверхпроводимость, джозефсоновский переход, терагерцовая электроника.

Abstract: An equivalent circuit of the electromagnetic system, consisting of a Josephson junction and a log-periodic antenna is presented for the frequency range from 0 GHz and up to 1100 GHz. Impact of thermal fluctuations of normal electron currents on the junction, resonant properties of the antenna and an additional slowly-varying part of the antenna impedance are taken into account in this circuit. The additional part of the impedance is related to electrodynamic environment of the junction and is the most important at low frequencies up to 200 GHz. To obtain the parameters of the equivalent circuit, a calculated static dependence of a differential resistance on junction voltage was fitted to the measured one.

Keywords: superconductivity, Josephson junction, terahertz electronics.

Введение

Несмотря на достаточно большие усилия, которые были затрачены на исследования электромагнитного излучения дальнего инфракрасного диапазона, в этой области остаётся ещё много нерешённых проблем. В частности, продолжается поиск новых принципов, которые позволили бы создать эффективные детекторы и приёмники излучения с частотой свыше 300 ГГц. Одним из перспективных направлений является использование эффекта Джозефсона. Ранее было продемонстрировано, что в бикристаллических джозефсоновских переходах (ДП), изготовленных из высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, нестационарный эффект Джозефсона наблюдается при частотах до 5 ТГц [1]. При этом было показано, что на основе таких ДП можно создавать высокочувствительные широкополосные [2] и селективные детекторы [3], а также применять их для спектроскопии электромагнитного излучения [3] и исследования спектров поглощения жидкостей [4].

При разработке устройств такого типа для обеспечения оптимального согласования ДП с антеннами, межсоединительными структурами и волноводами возникает необходимость в создании адекватных моделей цепей содержащих ДП в субтерагерцовой и терагерцовой областях частот. Как было показано в [5], характеристики ДП весьма чувствительны к электромагнитному окружению. Кроме того известно, что характеристики ДП во многом определяются флуктуациями тока нормальных электронов, которые, в свою очередь, также зависят от частотных характеристик взаимодействующих с ДП электромагнитных структур. По этим причинам достаточно сложно, если вообще возможно, создать компактную модель автономного ДП, которую далее можно использовать в программных пакетах схемотехнического моделирования типа SPICE, как это делается в полупроводниковой электронике. Эту проблему можно решить созданием модели для конкретной электромагнитной системы, включающей ДП. Обычно параметры моделей, используемых в схемотехническом моделировании, получают из

экспериментальных данных, но методики непосредственных измерений при частотах выше 100 ГГц сталкиваются с существенными трудностями. В полупроводниковой электронике в настоящее время максимальные частоты, при которых были получены параметры компактных моделей, составляют 170 ГГц [6]. Однако, как показали проведённые ранее исследования [5], [7], электродинамические характеристики устройств с ДП могут быть восстановлены из их статических характеристик при значительно более высоких частотах.

В данной работе представлены результаты исследования ДП с интегрированной широкополосной логопериодической антенной терагерцового диапазона частот, который может быть использован как чувствительный элемент приёмника электромагнитного излучения. Была разработана эквивалентная схема этого устройства, учитывающая тепловые флуктуации токов как в самом ДП, так и в его окружении. Параметры эквивалентной схемы были получены путём подгонки рассчитанной вольтамперной характеристики (ВАХ) и зависимости статического дифференциального сопротивления $R_d(V)$ ДП к соответствующим зависимостям, полученным из экспериментальных данных.

1. Детали эксперимента

Для измерений использовался ДП из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на бикристаллической подложке $NdGaO_3$ с вертикальными осями [001] (Рис. 1).

Измерения характеристик ДП производились в интервале температур от 5 К до 60 К. При температурах ниже 30 К наблюдалось гистерезисное поведение ВАХ ДП. С другой стороны, при повышении температуры уменьшался критический ток ДП и его рабочая полоса частот смещалась в низкочастотную область [8], поэтому для получения данных при максимальных частотах была выбрана температура 30 К. ВАХ ДП при температуре 30 К представлена на Рис. 2. По измеренной кривой можно оценить параметры резистивной модели ДП

[9]: ток $I_c = 1.75$ мА при $T = 30$ К и сопротивление в нормальном состоянии $R_n = 1.37$ Ом.

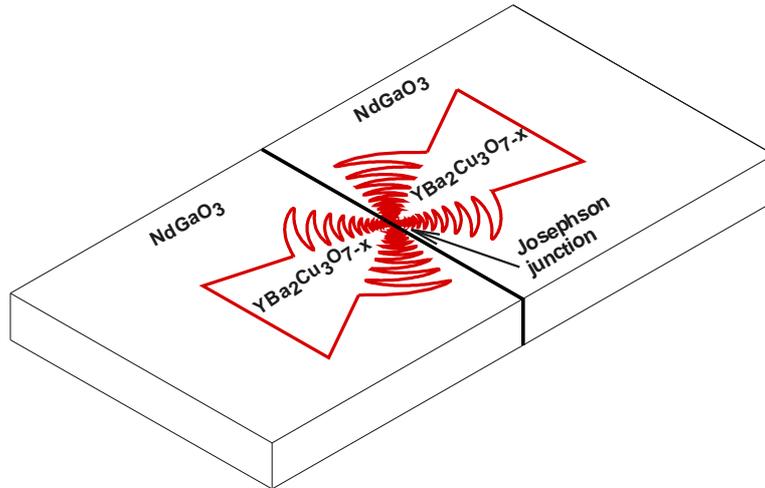


Рис. 1 Схема джозефсоновского перехода из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на бикристаллической подложке из NdGaO_3 с интегрированной антенной. Толстой линией обозначена бикристаллическая граница.

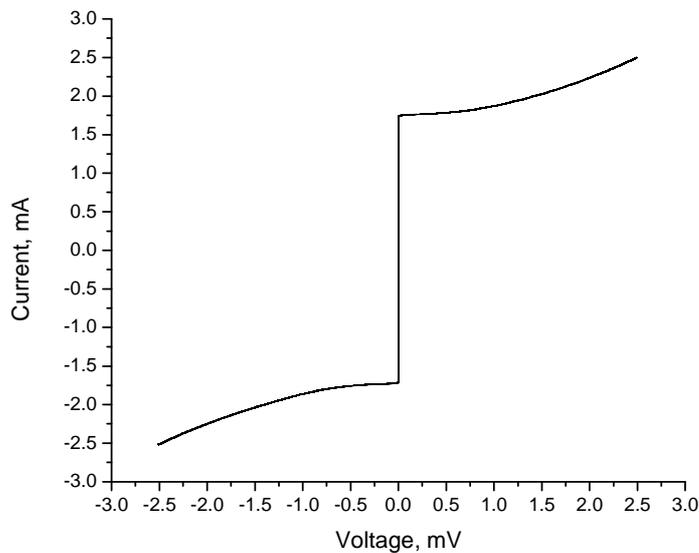


Рис.2 ВАХ бикристаллического джозефсоновского перехода из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ от напряжения при температуре $T = 30$ К.

Антенна была сформирована из пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, напыленной на бикристаллической подложке из (110) NdGaO_3 (Рис. 3) и возбуждалась колебаниями, генерируемыми в ДП. Детали конструкции антенны приведены ранее в [5].

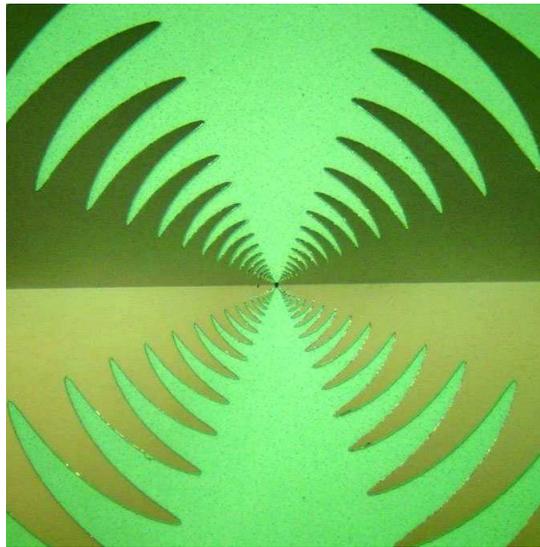


Рис. 3 Фотография широкополосной логопериодической антенны, интегрированной с джозефсоновским переходом.

Для проведения измерений подложка с антенной и джозефсоновским переходом монтировалась в криогенной вставке и помещалась в сосуд Дьюара. В режиме заданного тока измерялись ВАХ $V(I)$ ДП и зависимость его дифференциального сопротивления $R_d(I)$ от тока. Для измерения $R_d(I)$ использовалась известная схема модуляции тока через ДП переменным сигналом малой амплитуды. Известно [10], что джозефсоновские переходы на границах зерен характеризуются избыточным шумом вида $1/f$. Для уменьшения влияния такого рода флуктуаций, измерения $R_d(I)$ проводились на частоте 300 кГц, для чего использовался малошумящий усилитель с резонансным трансформатором [11].

3. Результаты и обсуждение

Для анализа использовалась зависимость дифференциального сопротивления от напряжения смещения $R_d(V)$, которая была построена по данным измерений $R_d(I)$ и ВАХ ДП и представлена на Рис. 4 пунктирной линией красного цвета.

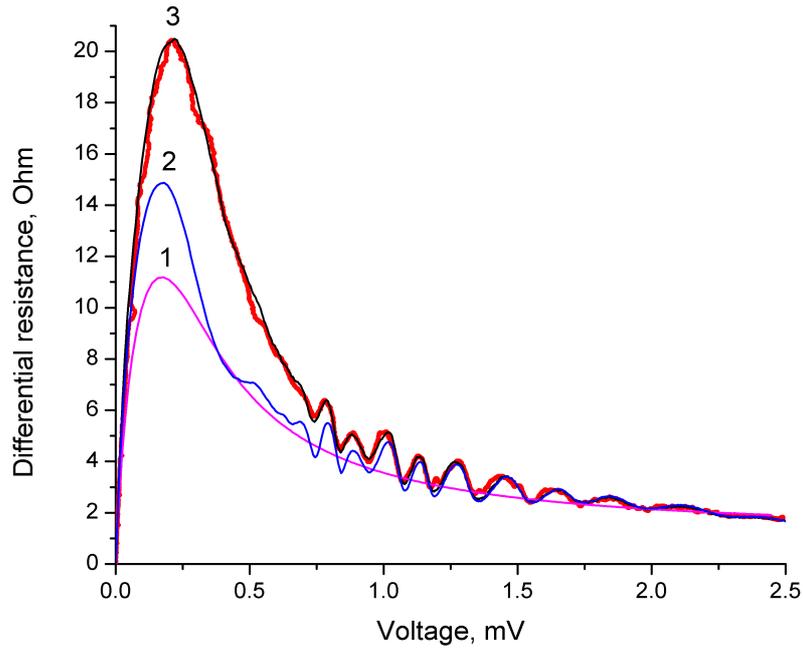


Рис. 4. Зависимость дифференциального сопротивления джозефсоновского перехода, взаимодействующего с логопериодической антенной, от напряжения.

Характерные осциллирующие особенности на этой кривой связаны с резонансами логопериодической антенны. Об этом свидетельствует линейная зависимость логарифма напряжения центральной точки особенности от номера особенности (Рис.5).

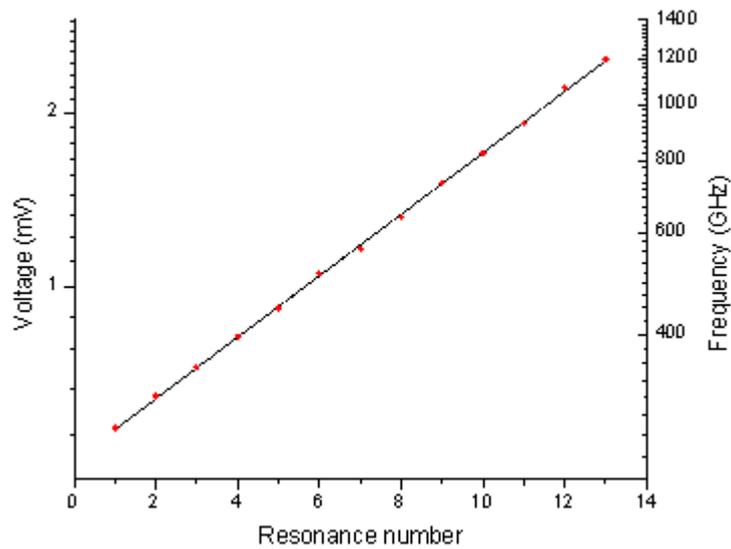


Рис 5. Зависимость напряжения центра особенности зависимости $R_d(V)$ от номера особенности (точки) и результат линейной подгонки (сплошная линия).

Для того чтобы обеспечить достаточно хорошее совпадение рассчитанной характеристики с измеренной, рассматриваемую электромагнитную систему необходимо представить в виде совокупности трёх частей, которые соответствуют трём компонентам эквивалентной схемы, изображённой на Рис. 6:

- собственно ДП, описываемого простой резистивной моделью [9] (1 на Рис. 6);
- антенны, представленной в виде набора из 12 последовательных колебательных контуров по числу наблюдаемых на зависимости $R_d(V)$ логопериодических по частоте особенностей (3 на Рис. 6);
- остальной части электромагнитного окружения ДП с медленно меняющимся с частотой импедансом (2 на Рис. 6).

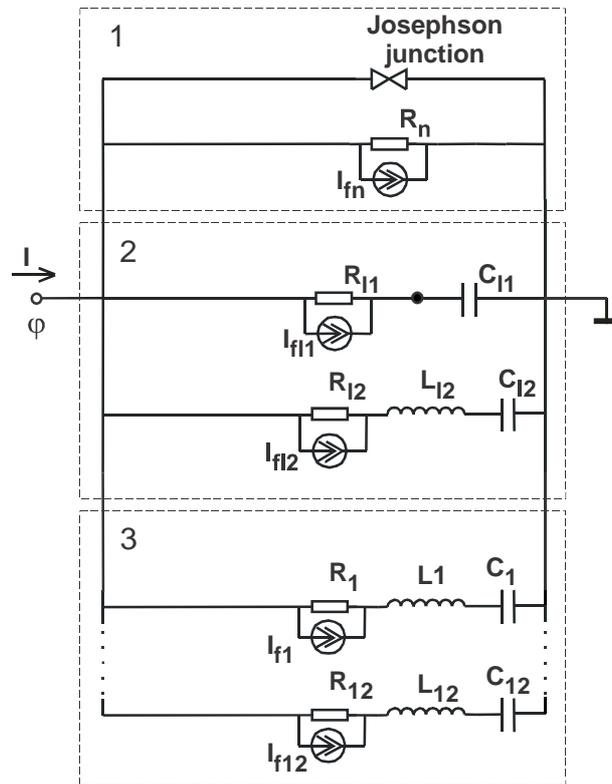


Рис 6. Эквивалентная схема ДП с логопериодической антенной.

Последняя компонента включает в себя, в частности, следующее:

- медленно меняющуюся по частоте часть импеданса антенны;
- импеданс низкочастотных элементов антенны, особенности от которых не проявились на зависимости $R_d(V)$ вследствие влияния тепловых флуктуаций

токов нормальных электронов, учитываемых в эквивалентной схеме с помощью источников флуктуационных токов I_{fk} ;

- импеданс соединительных линий;

- частотно-зависимый импеданс, связанный с поглощением электромагнитного излучения в материале ДП, подложки и на границе зёрен материала ВТСП, образующей слабую связь, а также собственную ёмкость ДП.

Подгонка параметров эквивалентной схемы осуществлялась с помощью компьютерной программы, описанной в [12]. Результаты подгонки зависимости $R_d(V)$ к экспериментальной зависимости приведены на Рис. 4. Отметим, что антенна влияет не только на наличие логопериодических по частоте особенностей, но и на общую форму зависимости. Кривая 1 на Рис. 4 представляет результаты вычисления характеристики для автономного ДП (1 на Рис. 6) и существенно отличается от кривой 2, полученной в результате вычисления характеристик с учётом влияния антенны. При получении кривой 2 на рис 4 в расчете учитывались части 1 и 3 эквивалентной схемы. Основное отличие наблюдается в области напряжений до 0.4 мВ, что соответствует частотам до 200 ГГц. Кроме того, только учёт дополнительной компоненты импеданса (2 на Рис. 6) позволяет достичь близкого совпадения рассчитанной (кривая 3 чёрного цвета на Рис. 4) и измеренной зависимостей. В результате подгонки были получены следующие значения параметров эквивалентной схемы: $R_{11}=15$ Ом, $C_{11}=50$ фФ, $R_{12}= 24$ Ом, $C_{12}= 165$ фФ, $L_{12}=2390$ фГн. В Таблице 1 представлены параметры эквивалентной схемы антенны, которые для удобства приведены в величинах резонансной частоты $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$, добротности $Q = \frac{1}{R}\sqrt{L/C}$ и сопротивления R для каждого резонансного контура.

Следует отметить достаточно существенное (в 4 раза) уменьшение сопротивления R с ростом частоты от 275 до 1070 ГГц. При описании отдельного резонансного элемента антенны в параметрах f_0 , R , Q , R имеет смысл сопротивления связи между элементом и ДП, а электромагнитные потери в элементе учтены в Q . Таким образом, уменьшение R можно объяснить

уменьшением в 4 раза расстояния от слабой связи до соответствующего элемента антенны. Это означает слабую зависимость электромагнитных потерь в сверхпроводящем материале от частоты в рассматриваемом диапазоне частот. С уменьшением размеров, в общей площади элемента увеличивается доля приграничных областей с нарушенной структурой и дефицитом кислорода, что увеличивает электромагнитные потери в элементе [13]. Этим можно объяснить уменьшение Q более чем в 6 раз с ростом частоты. Флуктуации параметров могут быть связаны с неоднородностью кислородного состава поверхностного слоя антенны, что может приводить, в частности, к увеличению или уменьшению потерь в отдельных частях антенны.

Таблица 1.

№ контура	Резонансная частота f_0 , ГГц	Добротность Q	Сопротивление R , Ом
1	275	20	70
2	312	20	70
3	350	25	47
4	397	33.3	40
5	443	8.33	75
6	509	14.3	50
7	563	14.3	57
8	637	10	45
9	732	8.7	42
10	823	8.33	46
11	927	5.9	28
12	1070	5	18

Заключение

Представлена эквивалентная схема электромагнитной системы, состоящей из ДП и планарной логопериодической антенны, в области частот от 0 до 1100

ГГц. ДП представляет собой бикристаллический переход с вертикальными осями c из высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, напылённого на бикристаллическую подложку из $NdGaO_3$. Антенна изготовлена из того же сверхпроводящего материала и интегрирована с ДП. Эквивалентная схема учитывает влияние тепловых флуктуаций тока нормальных электронов на ДП, резонансные свойства антенны и медленно меняющуюся с частотой часть импеданса, связанную с окружением ДП и дающую вклад при частотах до 200 ГГц. Параметры эквивалентной схемы получены путём подгонки вычисленной зависимости $R_d(V)$ ДП к зависимости, полученной из экспериментальных данных. Полученная модель может быть использована для обеспечения оптимального согласования ДП с антенной в джозефсоновских детекторах и приёмниках электромагнитного излучения дальнего инфракрасного диапазона.

Настоящая работа поддерживается РФФИ (гранты №11-07-00544-а, 11-07-12023-офи-м и 11-02-91321-сиг_а) и Министерством образования и науки РФ (контракт №11.519.11.4005).

Литература

1. Дивин Ю.Я., Котелянский И.М., Губанков В.Н. Бикристаллические джозефсоновские переходы из c -ориентированных $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ пленок для терагерцовой Гильберт-спектроскопии. РЭ, 2003, Т. 48, № 10, С. 1238-1249.
2. Divin Y.Y., Pavlovski V.V., Tkachev D.A., et al. Broadband THz detection by high- T_c Josephson junctions. // Proc. 2006 Joint 31st Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves and 14th Int. Conf. Terahertz Electronics, Sept. 18-22, 2006, Shanghai, China, ed. by S.C.Shen et al.
3. Дивин Ю.Я., Поппе У., Котелянский И.М., Губанков В.Н., Урбан К.. Терагерцовая спектроскопия на основе джозефсоновских переходов из высокотемпературных сверхпроводников. // РЭ, 2008, Т.53, С.1205-1222.
4. Lyatti M., Divin Y., Poppe U., Urban K. Liquid identification by Hilbert spectroscopy // Supercond. Sci. Technol., 2009 V. 22, N. 11, P. 114005.

5. Волков О.Ю., Губанков В.Н., Гундарева И.И., Дивин Ю.Я., Павловский В.В. Джозефсоновская адмиттансная спектроскопия характеристик логопериодической антенны в субмиллиметровом диапазоне длин волн. РЭ, 2009, т. 54, № 11, с. 1381–1386..
6. Yau K.H.K., Dacquay E., Sarkas I., Voinigescu S.P.// IEEE Microwave Mag., 2012, V.13, № 1, P. 30.
7. Volkov O.Y., Divin Y.Y., Gubankov V.N., et al. Terahertz characterization of external resonant systems by high- T_c Josephson junctions. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, V. 21, N. 3, P. 306-310.
8. Павловский В.В., Гундарева И.И., Волков О.Ю., и др. Частотный диапазон джозефсоновской импедансной спектроскопии. // РЭ, 2013, Т.58, принято в печать.
9. Лихарев, К.К.. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М., Наука, 1985, 320 С.
10. Hilgenkamp H., Mannhart J. Grain boundaries in high- T_c superconductors.// Rev. Mod. Phys. , 2002, V. 74, P. 485-549.
11. Гундарева И.И. Усилитель с резонансным трансформатором для измерения особенностей вольтамперной характеристики бикристаллических джозефсоновских переходов из ВТСП-материалов // Нелинейный мир, 2009, Т.7, № 6, С. 491.
12. Павловский В. В. Моделирование электромагнитной резонансной системы с джозефсоновским переходом. // Журнал радиоэлектроники, 2013, направлено в печать.
13. Gundareva I. I., Volkov O.Y., Lyatti M. V., et al. Evolution of electrical and electro-dynamic properties of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ bicrystal Josephson junctions with oxygen loading // IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2011, V. 21, N. 3, P. 147-150.