

Известно [5], что такие свойства доменной границы, как ширина и ее скрученность, зависят от эффективного поля одноосной анизотропии, которая в свою очередь существенно зависит от температуры. Поэтому представляли интерес исследования преобразования внутренней структуры ДГ в планарном поле от температуры. На рис. 3 представлены зависимости полей зарождения и коллапса ВБЛ (H_3), формирования и распада кластеров в области температуры 290—430 К. Видно, что поля H_1 , H_2' , H_2'' , H_3 с ростом температуры уменьшаются и при $T = T_{кр} = 422$ К обращаются в нуль, т. е. при $T = T_{кр}$ образование ВБЛ в ДГ невозможно и процесс перемангничивания ДГ идет обратным образом (без гистерезиса). На рис. 2 показана зависимость χ'' (H_p) при $T = 430$ К. Такая зависимость дает основание предполагать, что структура ДГ в этом случае весьма существенно отличается от блоховской модели, в рамках которой возможно существование ВБЛ. На рис. 4 показаны зависимости H_1 , H_2' , H_2'' , H_3 от эффективного поля одноосной анизотропии.

Различные значения поля одноосной анизотропии были получены путем отжига исходного образца в воздухе, намагниченность насыщения пленок при этом оставалась практически неизменной. Необходимо отметить также, что полученные зависимости полей H_2' и H_2'' от температуры и анизотропии отличаются от результатов, полученных в [2]. Этот факт, очевидно, связан с тем, что авторы не учитывали влияния скрученности ДГ на устойчивость кластеров ВБЛ. Представленные зависимости H_1 , H_3 находятся в хорошем согласии с результатами, описанными в [4].

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что при воздействии на доменную границу планарного магнитного поля процесс перемангничивания происходит путем образования ВБЛ через ГБЛ, формирования кластеров и их коллапса в отличие от модели, предложенной в [4]. В пользу этого говорит то, что зависимость χ'' (H_p) совершенно симметрична относительно нуля магнитного поля при наличии блоховских линий в ДГ. Это связано с тем, что как при положительных, так и при отрицательных значениях полей особенности на кривой (формирование и распад кластеров, коллапс ВБЛ) обусловлены взаимодействием ВБЛ, имеющих одно направление закрученности [5]. В то же время в рамках модели [4], предполагающей образование только ГБЛ, зависимость χ'' (H_p) должна, по-видимому, быть асимметричной, так как в магнитных полях одного направления ГБЛ будут «выходить» на поверхность, где компонента намагниченности, нормальная плоскости ДГ, будет противоположна результирующей намагниченности ГБЛ. В противоположно направленных полях эти намагниченности будут совпадать.

Авторы выражают благодарность Ю. А. Кузину за проведение отжига феррит-гранатовых пленок и М. И. Ереминой за измерения эффективной анизотропии этих образцов частотно-индуктивным методом.

Литература

- [1] Ялышев Ю. И., Лукаш К. И., Показаньев В. Г. ФТТ, 1984, т. 26, № 5, с. 1549—1550.
- [2] Ялышев Ю. И., Политов В. Ю., Показаньев В. Г. ФММ, 1986, т. 62, № 1, с. 61—68.
- [3] Барьяхтар Ф. Г., Зиновук А. В., Коновалов А. Ф., Приходько Л. И. В кн.: II Всес. семинар по функциональной магнитоэлектронике. Красноярск, 1986, с. 102—103.
- [4] Maartense I. J. Magnet. Magnetic Mater., 1986, v. 54—57, pt III, p. 1571—1572.
- [5] Малоземов А., Слонзуски Д.ж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982, с. 382.
- [6] Hubert A. J. Appl. Phys., 1975, v. 46, N 5, p. 2276—2287.

Донецкий физико-технический институт АН УССР

Поступило в Редакцию
9 апреля 1987 г.

СИГНАЛЬНЫЕ И ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ЦЕПОЧЕК ТОРЦЕВЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДОВ

А. Л. Гудков, В. А. Ильин, В. Н. Лаптев, В. И. Махов, И. А. Семин, В. С. Эткин

В [1-3] сообщалось о разработке торцевых джозефсоновских переходов (ТДП) на основе ниобия и их использовании в детекторных радиометрах миллиметрового диапазона волн. Было показано, что ТДП являются перспективными элементами для создания малошумящих

приемных устройств. При использовании для этих целей одиночных переходов возникает ряд трудностей. Изготовление ТДП с оптимальными значениями сопротивления $R=150\div 200$ Ом является сложной технологической задачей, при этом полученные переходы обладают относительно невысокими величинами $V_c=I_c R$ (I_c — критический ток перехода). Это ограничивает их применение в коротковолновой области спектра радиоизлучения [4]. Проведенные в [2] измерения показали, что динамический диапазон детекторов на ТДП не превышает 30 дБ. Наконец, при практической реализации устройства использование высокоомных переходов требует применения специальных мер по защите ТДП от электрошоков.

Преодоление указанных недостатков возможно при использовании цепочек ТДП (ЦТДП), составленных из нескольких переходов. При оптимальном сопротивлении цепочки $R \sim 200$ Ом и числе элементов 10—20 каждый ТДП имеет сопротивление 10—20 Ом. Технология получения таких переходов относительно проста, а достигаемое значение V_c составляет 600—700 мкВ, что вдвое увеличивает частоту среза ТДП [4]. Кроме того, низкоомные переходы менее чувствительны к электрошокам и отличаются повышенной стабильностью работы. Наконец, согласно [4], динамический диапазон детектора на ЦТДП в N раз превышает аналогичный параметр детектора на одиночном переходе (N — число элементов в цепочке), если нелинейный элемент хорошо согласован с внешней электродинамической системой.

Широкое применение цепочек сдерживается отсутствием детальных данных о сигнальных и шумовых характеристиках, которые позволили бы провести сравнение их детектирующих свойств с такими же параметрами одиночных переходов.

Целью настоящей работы было создание простейших цепочек торцевых джозефсоновских переходов и исследование их сигнальных и шумовых характеристик в 15-мм диапазоне волн.

Цепочки торцевых джозефсоновских переходов формировались на кремниевых пластинах в последовательности, описанной в работе [1]. Ширина верхнего электрода ~ 4 мкм, площадь переходов ~ 1 мкм². Переходы в цепочках ориентированы в одну сторону и расположены попарно, причем расстояние между ними около 4 мкм, а между парами 12 мкм. Крайние электроды в цепочке имеют большие площади, поэтому при наличии внешнего магнитного поля их критические токи были меньшими, чем у остальных переходов. Сформированные ЦТДП не имели синхронизирующей цепи и располагались между тонкопленочными антеннами.

Для исследования сигнальных и шумовых характеристик полученные ЦТДП были включены в качестве нелинейных элементов в состав детекторного радиометра 15-мм диапазона волн [2]. В процессе эксперимента измерялись следующие параметры: вольт-ваттная чувствительность η , мощность, эквивалентная шуму N_{EP} , динамический диапазон детектора, а также основная характеристика радиометра — флуктуационная чувствительность δT . Измерения проводились на ЦТДП, относящихся к двум сериям образцов: 1—5 и 6—8 (см. таблицу). Для сравнения аналогичные измерения были проведены на одиночных ТДП (образцы 9—12) с параметрами, по возможности близкими к параметрам цепочек.

Число образцов	R , Ом	I_c , мкА	V_c , мкВ на 1 элемент	η , В/Вт	N_{EP} , Вт/Гц ^{1/2}	δT , К
1	30	600	1640	$5 \cdot 10^2$	$2.6 \cdot 10^{-13}$	4
2	100	100	910	$3 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^{-14}$	0.34
3	200	20	365	$3 \cdot 10^4$	$4.6 \cdot 10^{-14}$	0.37
4	230	5—10*	105—210	$8 \cdot 10^4$	10^{-14}	0.095
5	850	4—7*	310—540	10^4	$1.6 \cdot 10^{-13}$	0.2
6	35	350	1110	$1.9 \cdot 10^3$	$5.3 \cdot 10^{-14}$	0.38
7	115	20	210	$1.65 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{-15}$	0.025
8	135	40—65*	492—807	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{-15}$	0.034
9	10.5	70	735	$4 \cdot 10^4$	10^{-14}	0.13
10	62	2	124	$1.7 \cdot 10^4$	10^{-14}	0.06
11	200	1.5	300	$1.7 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-15}$	0.017
12	230	1.5	315	$3.6 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^{-15}$	0.008

* На ВАХ наблюдается гистерезис.

Проанализируем приведенные в таблице данные, относящиеся к первой серии. ЦТДП имели сопротивления 30—850 Ом, критические токи 4—600 мкА и величины V_c , приведенные к одному элементу, 100—1600 мкВ. Сигнальные и шумовые характеристики зависят от сопротивления цепочки. С увеличением R растет вольт-ваттная чувствительность, а величины

NEP и δT уменьшаются. Наилучшие значения указанных параметров получены для ЦТДП № 4 ($R=230$ Ом). Дальнейшее увеличение сопротивления приводит к ухудшению как сигнальных, так и шумовых характеристик.

Образцы второй серии обнаруживают такое же изменение характеристик с изменением R . Однако здесь не было ЦТДП с сопротивлениями, превышающими 135 Ом, в связи с чем мы не наблюдали спада чувствительности с ростом сопротивления, имевшего место в образцах первой серии.

Как видно из этой таблицы, сигнальные и шумовые характеристики зависят не только от величины R . ЦТДП с одинаковыми сопротивлениями, принадлежащие к разным сериям, имеют неодинаковые значения η , NEP и δT , причем различие последних двух параметров достигает 10 раз. Объяснение этому факту следует искать в различии характерных напряжений ЦТДП, относящихся к разным сериям. Согласно [5], для каждого частотного диапазона существует оптимальное значение V_c , при котором могут быть получены наилучшие значения как η , так NEP и δT . Расчет показывает, что в 15-мм диапазоне волн V_c цепочек второй серии ближе к оптимальному, чем первой. Это и приводит к улучшению флюктуационной чувствительности и к уменьшению NEP . Отметим, что при переходе в коротковолновую часть миллиметрового диапазона оптимальная величина V_c возрастает и разница в чувствительности детекторных радиометров, использующих ЦТДП первой и второй серий, по-видимому, будет уменьшаться.

Проведем теперь сравнение сигнальных и шумовых характеристик ЦТДП и одиночных переходов. К сожалению, мы практически не имели пар, в которых были бы одинаковы R и V_c . Лишь образцы 3 и 11, 4 и 12 имели равные величины сопротивлений, однако I_c цепочек были значительно большими, чем одиночных ТДП. Поэтому целесообразно проводить сравнение лишь максимальных экспериментальных значений сигнальных и шумовых характеристик различных типов переходов.

Из таблицы следует, что максимальные величины вольт-ваттной чувствительности составляют $8 \cdot 10^4$ В/Вт для цепочек и $3.6 \cdot 10^5$ В/Вт для одиночных ТДП. Соответственно наилучшие значения $NEP=5 \cdot 10^{-15}$ и $1.5 \cdot 10^{-15}$ Вт/Гц $^{1/2}$, $\delta T=0.025$ и 0.008 К. Таким образом, чувствительность детекторного радиометра на ЦТДП оказалась втрое худшей, чем на одиночном переходе. Согласно [4], это различие должно составлять $N^{1/2}$. Для используемых нами ЦТДП $N^{1/2}=3.3$, что близко к значениям, полученным экспериментально.

Отдельной задачей было сопоставление динамических диапазонов детекторов, использующих ЦТДП и одиночные переходы. Измерения показали, что определенное по уровню половинной мощности среднее значение динамического диапазона детекторов на ЦТДП составило ~ 40 дБ, а на одиночных переходах 30 дБ. Аналогичные значения динамического диапазона по уровню 10 дБ составляют ~ 55 и ~ 32 дБ соответственно. Таким образом, использование последовательных цепочек из 11 переходов приводит к увеличению динамического диапазона детектора на 10—12 дБ, как и предсказывает теория [4].

В целом проведенные исследования показали, что, несмотря на полученные более низкие, чем в [2], значения чувствительности, ЦТДП являются перспективными элементами для создания детекторных приемников миллиметрового диапазона волн. Выше говорилось о возможности повышения чувствительности радиометра на ЦТДП за счет выбора оптимального значения V_c . Наряду с этим указанная цель может быть достигнута путем синхронизации параметров элементов цепочки. В то же время значительное увеличение динамического диапазона, высокая стабильность и защищенность от электрошоков, которые также отмечались в процессе проведения экспериментов, делают ЦТДП удобными для использования в радиометрах, предназначенных для проведения геофизических и радиоастрономических исследований.

Литература

- [1] Гудков А. Л., Лихарев К. К., Малов В. И. Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 23, с. 1423—1426.
- [2] Гудков А. Л., Ильин В. А., Лантев В. Н. и др. Письма в ЖТФ, 1987, т. 14, № 9, с. 826—830.
- [3] Гудков А. Л., Куликов В. А., Лантев В. Н. и др. Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 9, с. 527—533.
- [4] Лихарев К. К., Ульрих Б. Т. Система с джозефсоновскими контактами. М.: Изд-во МГУ, 1975, с. 447.
- [5] Завалев В. П., Лихарев К. К. РИЭ, 1978, т. 21, № 6, с. 1268—1278.

Московский государственный
педагогический институт
им. В. И. Ленина

Поступило в Редакцию
25 мая 1987 г.