



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2007121005/09, 06.06.2007

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.06.2007

(45) Опубликовано: 20.04.2009 Бюл. № 11

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: JP 10028021, 27.01.1998. RU 2246119 C1,
10.02.2005. SU 1785056 A1, 30.12.1992. SU
1675808 A1, 07.09.1991. WO 01/25805 A1,
12.04.2001. US 2004201099 B2, 14.10.2004. US
2001025012 B2, 27.09.2001. US 2005231196 A1,
20.10.2005.

Адрес для переписки:

119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, 1,
стр. 2, Физический факультет МГУ им. М.В.
Ломоносова

(72) Автор(ы):

Корнев Виктор Константинович (RU),
Соловьев Игорь Игоревич (RU),
Кленов Николай Викторович (RU)

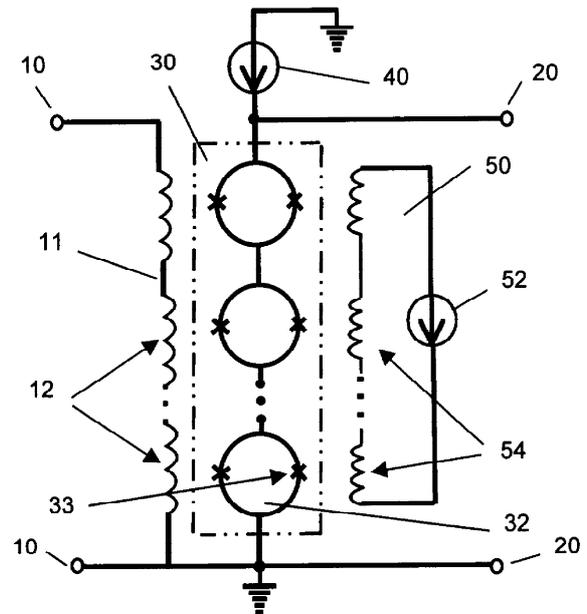
(73) Патентообладатель(и):

Государственное учебно-научное
учреждение Физический факультет
Московского Государственного
университета им. М.В. Ломоносова (RU)

(54) СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ СВЧ-УСИЛИТЕЛЬ

(57) Реферат:

Изобретение относится к криогенной радиотехнике. Техническим результатом является повышение уровня выходного сигнала и линейности коэффициента усиления за счет использования многоэлементных джозефсоновских структур из последовательно соединенных сквидов. Сверхпроводящий широкополосный СВЧ-усилитель содержит последовательную цепочку сегментов из двухконтактных сквидов для формирования периодического треугольного отклика напряжения от величины магнитного поля смещения. Сегменты состоят из групп сквидов с одинаковыми эффективными площадями. Ток смещения выбран из условия обеспечения синусоидального отклика напряжения единичного сквида от величины магнитного поля смещения. 6 з.п. ф-лы, 8 ил.



ФИГ. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21), (22) Application: **2007121005/09, 06.06.2007**

(24) Effective date for property rights:
06.06.2007

(45) Date of publication: **20.04.2009 Bull. 11**

Mail address:
**119992, Moskva, GSP-2, Leninskie gory, 1, str. 2,
Fizicheskij fakul'tet MGU im. M.V. Lomonosova**

(72) Inventor(s):
**Kornev Viktor Konstantinovich (RU),
Solov'ev Igor' Igorevich (RU),
Klenov Nikolaj Viktorovich (RU)**

(73) Proprietor(s):
**Gosudarstvennoe uchebno-nauchnoe uchrezhdenie
Fizicheskij fakul'tet Moskovskogo
Gosudarstvennogo universiteta im. M.V.
Lomonosova (RU)**

(54) SUPERCONDUCTING WIDE-BAND SHF AMPLIFIER

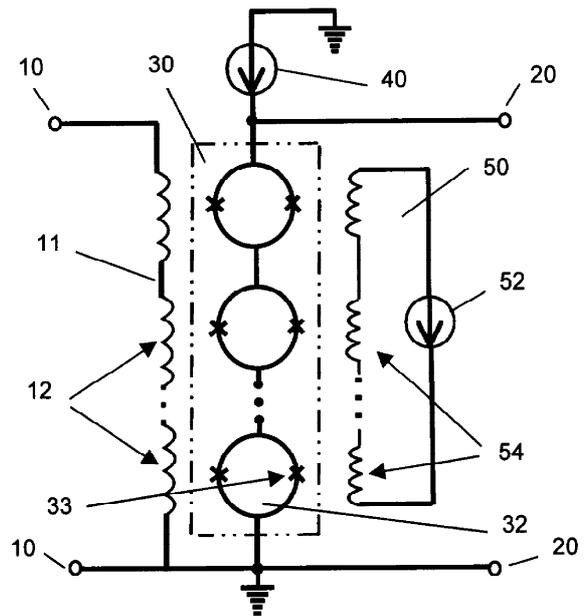
(57) Abstract:

FIELD: electrical engineering.

SUBSTANCE: invention relates to cryogenic radio engineering. Superconducting wide-band SHF amplifier includes a chain of segments consisting from two-contact squids for generating periodic triangle-shaped voltage response depending on magnetic field shift value. The above segments are made up from squid groups with similar effective squares. The shift current is selected based on the condition that sinusoidal voltage response of the single squid is ensured depending on the magnetic field shift value.

EFFECT: increased level of output signal and amplification linearity factor due to multi-element Josephson structures consisting from serial connection of squids.

7 cl, 8 dwg



ФИГ. 1

RU 2 3 5 3 0 5 1 C 2

RU 2 3 5 3 0 5 1 C 2

Изобретение относится к криогенной радиотехнике, а именно к усилителям радиочастотного диапазона, и может быть использовано для усиления электрических сигналов в гигагерцовом диапазоне частот.

Радиочастотные усилители на основе сверхпроводящих двухконтактных квантовых интерферометров (двухконтактных сквидов) имеют высокую чувствительность и обладают низкой шумовой температурой ($T_N=1...3$ К), совместимы с другими сверхпроводниковыми устройствами.

Существуют две проблемы, затрудняющие переход к более высоким частотам сигналов 1-10 ГГц при сохранении столь же высоких показателей по усилению и шумовой температуре, делающих эти усилители конкурентоспособными с полупроводниковыми усилителями на транзисторах с высокой электронной подвижностью. Во-первых, сквид-усилители являются особым видом параметрических усилителей, в которых усиление мощности сигнала на его частоте F_S происходит путем преобразования сигнала на частоту F_S+F_J , где F_J - частота джозефсоновской генерации, и последующего преобразования вниз, снова на частоту сигнала. Исходя из соотношений Мэн-ли-Роу, коэффициент усиления по мощности, G , такого усилителя не превышает:

$$G \approx F_J / F_S. \quad (1)$$

Поэтому джозефсоновские переходы сквида должны обладать высоким характеристическим напряжением V_C , чтобы предельная частота F_C джозефсоновской генерации

$$F_C = V_C / \Phi_0 \quad (2)$$

(Φ_0 - квант магнитного потока, равный $2,07 \times 10^{-15}$ Вб), была на несколько порядков выше частоты F_S сигнала. Для сквидов на основе Nb джозефсоновских переходов типичные значения V_C не превышают 100-200 мкВ, соответственно, значения F_C не превышают 100 ГГц. Типичные значения F_J в рабочей точке примерно на порядок меньше F_C и, как видно из формулы (1), усиление исчезает для сигналов с частотой порядка 10 ГГц. Соответственно, ухудшаются и шумовые характеристики усилителя.

Второй проблемой для СВЧ-усилителей на основе классических сквидов в частотном диапазоне выше 0,1 ГГц является нелинейный вид вольт-полевого отклика напряжения на задаваемое извне магнитное поле. В мегагерцовом диапазоне частот эти задачи решаются посредством введения эффективной компенсирующей обратной связи, что практически невозможно осуществить в гигагерцовом диапазоне частот.

Описаны различные конструкции и схемотехнические решения сверхпроводниковых усилителей СВЧ-диапазона. В частности, описана схема согласованного усилителя на сквиде с нагрузкой для диапазона до 0,1 ГГц (JP 60247311, Noguchi, оп. 07.12.1985). Однако как рабочий диапазон частот, так и линейность преобразования для усилителей на одиночном сквиде недостаточны для современных приложений.

Для улучшения характеристик предлагалось перейти к усилителям, содержащим большое количество взаимосвязанных сквидов. Последовательная цепочка из регулярно расположенных одинаковых двухконтактных сквидов может быть использована в качестве основного элемента для усиления цифрового или аналогового сигнала, а также в качестве детектора магнитного поля. Нерегулярная цепочка сквидов, имеющих произвольные площади и ориентации интерферометров, представляет собой так называемые сверхпроводящие квантовые интерференционные фильтры (СКИФы), которые также могут использоваться при построении

СВЧ-усилителей. Особенность СКИФа вытекает из нерегулярности его структуры: он позволяет получить один центральный максимум вольт-полевого отклика в нуле внешнего магнитного поля.

5 Так, в изобретении (DE 3936686, Hoenig, 08.05.1991) описан усилитель на матрице сквидов, охлаждаемой жидким азотом, в тонкопленочном варианте, однако указывается, что он может работать до частот 100 МГц. В изобретении (US 6005380, Hubbell Stephen, 21.12.1999) описан усилитель для высокочувствительной антенны с использованием магнито-связанных сквидов, образующих
10 многоэлементную матрицу. Однако такое устройство предназначено для работы в существенно более узком диапазоне частот и характеризуется относительно низкой предельной рабочей частотой - 516 МГц.

Для создания усилителя электрических сигналов с большими значениями выходного тока предлагалось использовать набор параллельно соединенных сквидов
15 постоянного тока (JP 2003209299, Morooka et al., 25.07.2003). Однако это предложение также не рассчитано на работу в гигагерцовом диапазоне.

В изобретении (US 7095227 B2, Tarutani et al., 22.08.2006) описан усилитель на последовательной цепочке сквидов, позволяющий использовать для питания источник
20 постоянного тока и занимающий малую площадь. Однако такое устройство позволяет достичь лишь относительно малой линейности усиления сигнала, не превышающей линейность усиления для одиночного сквида.

Описаны конструкции усилителей-драйверов на основе многоэлементных цепочек из сквидов для диапазона частот до десятка ГГц, преобразующие БОК-импульсы на
25 входе в импульсы напряжения на выходе, величина которых достаточна для дальнейшего использования в цепях полупроводниковой электроники. В изобретении (US 6486756 B2, Tarutani et al., 26.11.2002) цепочка сквидов разбита на изолированные от земли пары. Такое решение позволяет уменьшить паразитные емкости и увеличить предельное быстродействие усилителя, однако
30 усилители-драйверы годятся лишь для цифровых применений и не могут быть использованы для усиления аналогового сигнала. Еще одним примером такого усилителя для БОК-логики является изобретение (US 6917216 B2, Neff Quentin, 14.10.2004). Принцип его действия основан на разделении и
35 последовательности отражений используемого БОК-импульса для получения достаточных значений выходных импульсов напряжения. Но и это предложение рассчитано исключительно на применение в цифровых устройствах.

Параллельная цепочка сквидов переменной площади (СКИФ-структура) в качестве
40 высокочувствительного магнетометра описана (WO 0125805, Schopohl et al., 12.04.2001; WO 2004114463, Oppenlaender J. et al., 29.12.2004). Однако СВЧ-усилитель на основе параллельной СКИФ-структуры не обеспечивает необходимой линейности усиления сигнала и не позволяет, ко всему прочему, добиться значительных значений сигнала на выходе. Недостаточно высокая линейность усиления сигнала характеризует и
45 усилитель на основе последовательной СКИФ-структуры.

Наиболее близким по совокупности признаков к патентуемому усилителю является сверхпроводящий широкополосный СВЧ-усилитель, содержащий подключенную к
50 входной и выходной сверхпроводящим линиям последовательную цепочку двухконтактных сквидов, связанных со средствами задания рабочих режимов тока и магнитного поля (JP 10028021, TAKEDA et al., 27.01.1998 - ближайший аналог).

Анализ уровня техники, в том числе и ближайшего аналога, показывает, что невысокая линейность отклика напряжения на магнитную компоненту

электромагнитного сигнала остается общим недостатком конструкций всех усилителей, выполненных как на низкотемпературных металлических, так и на высокотемпературных оксидных сверхпроводниках и реализованных как на основе регулярных цепочек скидков, так и нерегулярных СКИФ-структур.

Задачей изобретения является конструкция СВЧ-усилителя на основе линейных цепочек скидков постоянного тока, имеющего повышенный коэффициент усиления и высокую линейность отклика напряжения на магнитную компоненту электромагнитного сигнала в полосе частот 1-10 ГГц.

Решение задачи состоит в том, что сверхпроводящий широкополосный СВЧ-усилитель содержит входной элемент, предназначенный для подачи СВЧ-сигнала и преобразования его в магнитный поток, воздействующий на последовательную цепочку двухконтактных скидков, источник постоянного тока смещения, средство задания режима магнитного поля смещения, подключенное индуктивным образом к каждому из скидков указанной цепочки скидков, которая подключена к указанному выходному элементу таким образом, чтобы получить на нем суммарное изменение напряжения с указанной последовательной цепочки скидков, образованной из сегментов, каждый из которых выполнен с возможностью формирования периодического отклика напряжения на величину магнитного поля смещения, заданного указанным средством задания магнитного поля смещения.

Каждый из сегментов состоит из групп скидков с одинаковыми эффективными площадями S_{kn} , удовлетворяющими условию:

$$S_{kn} = n \cdot S_{k1},$$

где S_{kn} - эффективная площадь скидков n-ой группы в k-сегменте;

S_{k1} - эффективная площадь скидков в первой группе k-сегмента;

$k=1, 2 \dots K$ - номер сегмента в цепочке;

$n=1, 2 \dots N$ - номер группы в сегменте,

при этом величина тока смещения источника постоянного тока выбрана из условия обеспечения синусоидального отклика напряжения единичного скида от величины магнитного поля B смещения, и отклик напряжения n-ой группы k-го сегмента от величины магнитного поля B смещения удовлетворяет условию:

$$mV_0 = A \frac{\sin^2(n\omega_k \Delta B / 2)}{(n\omega_k \Delta B / 2)^2}, \text{ мВ},$$

где m - число скидков в n-ой группе, принадлежащей k-му сегменту; V_0 - амплитуда синусоидального отклика единичного скида; $\omega_k = 2\pi S_{k1} / \Phi_0$; $\Phi_0 = 2,07 \times 10^{-15}$ Вб; ΔB - наперед заданная величина диапазона изменения поля B смещения, в котором обеспечивается линейность усиления, мТл; A - постоянная, определяемая экспериментальным путем, мВ.

Устройство может характеризоваться тем, что число сегментов в цепочке составляет по меньшей мере два, а также тем, что число скидков в группе составляет 1-100, а также и тем, что число групп скидков в сегменте составляет 50-100.

Устройство может характеризоваться и тем, что периодический отклик напряжения на величину магнитного поля смещения устанавливаются общим для всех сегментов, а период отклика $(B_T)_k$ для k-го сегмента устанавливаются в соответствии с условием $(B_T)_k = \Phi_0 / S_{k1}$.

Устройство может характеризоваться, кроме того, тем, что величины площадей S_{k1} для разных сегментов не являются кратными и выбраны из условия:

$$\Phi_0/2\Delta B \geq S_{k1} \geq 0.01\Phi_0/2\Delta B.$$

Устройство может характеризоваться также тем, что указанные входной и выходной элементы выполнены в виде сверхпроводящей полосковой линии передачи, при этом один из контактов каждого сквида цепочки включен в разрыв одного из
5 полосков выходной линии.

Технический результат изобретения состоит в повышении уровня выходного сигнала и линейности закона преобразования входного магнитного сигнала в изменения напряжения на выходном элементе за счет использования
10 многоэлементных джозефсоновских структур, состоящих из последовательно соединенных сквидов, конструкция и характеристики которых в цепочке подобраны определенным образом, описанным в изобретении.

Сложение откликов от составляющих такую цепочку сквидов как раз и позволяет достигнуть требуемого уровня усиления. Улучшение эксплуатационных характеристик предлагаемой структуры достигается, в том числе, и за счет того, что ее отклик от магнитного поля не периодичен, а имеет один ярко выраженный максимум в нуле поля.

Существо изобретения поясняется на чертежах, где
20 на фиг.1 представлена структурная схема патентуемого усилителя;
на фиг.2 проиллюстрирован принцип построения цепочки;
на фиг.3 представлено распределение числа сквидов с синусоидальным откликом по значениям их эффективной площади для формирования результирующего
25 периодического отклика;

на фиг.4 - непериодический (а) и периодические (б, в) отклики напряжения от приложенного магнитного поля смещения, соответствующие непрерывному и дискретным распределениям, показанным на фиг.3;

на фиг.5 - принцип формирования дискретного спектра посредством групп сквидов
30 с одинаковыми эффективными площадями;

на фиг.6 - зависимость линейности отклика от числа групп в сегменте;

на фиг.7 показана схема усилителя с использованием сверхпроводящей полосковой линии передачи,

на фиг.8 - то же, что на фиг.7, увеличена область, где находится включенный в
35 выходную линию сквид.

Структурная схема патентуемого усилителя показана на фиг.1. Сверхпроводящий широкополосный СВЧ-усилитель содержит подключенную к входному 10 и выходному 20 элементам последовательную цепочку 30 двухконтактных сквидов 32.
40 Входной элемент 10 содержит цепь 11 индуктивных элементов 12 по числу сквидов 32, имеющих по два джозефсоновских перехода 33. Цепочка 30 подключена к источнику 40 постоянного тока смещения и средству 50 задания режима магнитного поля смещения. Средство 50 представляет собой источник постоянного тока 52, к
45 которому подключены индуктивные элементы 54, каждый из которых связан с единственным сквидом 32. Смещение рабочей точки сквидов 32 может осуществляться и с помощью индуктивных элементов 12, в этом случае источник 52 должен быть включен в цепь 11 индуктивных элементов 12.

На фиг.2 показан принцип построения цепочки 30. Сквиды 32, содержащие два джозефсоновских перехода 33, образующие цепочку 30, соединены последовательно
50 электрическим образом и составляют К сегментов 300.

Каждый из сегментов 300 состоит из N_k групп 310 сквидов с одинаковыми эффективными площадями S_{kn} ($k=1, 2 \dots K$ - номер сегмента в цепочке; $n=1, 2 \dots N$ -

номер группы в сегменте), удовлетворяющими условию $S_{kn} = n \cdot S_{k1}$, где S_{kn} - эффективная площадь скидков n-ой группы в k-ом сегменте; S_{k1} - эффективная площадь скидков в первой группе k-го сегмента. Под признаком «эффективная площадь скида» понимается отношение величины попавшего в скид магнитного

5 потока Φ к величине индукции прикладываемого к скиду магнитного поля B .
Каждая из групп 310 состоит из m скидков 32. Эффективные площади S_{kn} скидков 32 в группах 310 k-го сегмента 300 кратны площади S_{k1} скидков 32 в первой

10 группе 312.
Для того, чтобы обеспечить достаточно высокую линейность усиления в гигагерцовом диапазоне частот, где неприменимы стандартные способы увеличения линейности усиления за счет использования систем обратной связи, необходимо с высокой точностью обеспечить периодический отклик $V(B)$ усилителя от магнитного

15 поля в смещения с единственным максимумом в нуле поля. Соответственно, проводится подбор тока смещения скидков 32 для обеспечения синусоидального отклика напряжения с амплитудой V_0 единичного скида от магнитного поля B смещения. Далее, K сегментов 300, в соответствии с патентуемым изобретением,

20 должны иметь периодический отклик напряжения сегмента от магнитного поля B смещения. Периодический отклик напряжения устанавливаются общим для всех сегментов 300, а период отклика $(B_T)_k$ для k-го сегмента устанавливаются в соответствии с условием $(B_T)_k = \Phi_0 / S_{k1}$, $\Phi_0 = 2,07 \times 10^{-15}$ Вб.

25 Рекомендованное число K сегментов 300 составляет порядка десяти, но получить периодический отклик, имеющий множество максимумов, помимо основного, в нуле поля принципиально возможно и с помощью даже одного сегмента.

На фиг.3 и 4 представлены графики, поясняющие физические принципы, лежащие в основе настоящего изобретения. Цепочка скидков образована из сегментов, каждый

30 из которых обеспечивает формирование периодического отклика напряжения на величину магнитного поля смещения $V(B)$, заданного указанным средством задания магнитного поля смещения, причем линейные участки периодической кусочно-заданной функции $V(B)$ образуют периодический «треугольный» отклик,

35 представленный на фиг.4 б, в.

По оси абсцисс на фиг.3 отложено распределение групп 310 по площадям S_{kn} скидков 32, а по оси ординат - количество m элементов в группе, обеспечивающее формирование периодического отклика напряжения k-го сегмента 300 от магнитного

40 поля B . Непрерывный спектр, показанный поз.60, соответствует отклику (а) на фиг.4. Дискретные спектры поз.62 соответствует отклику (б), а спектр поз.64 - отклику (в).

На фиг.5 пояснен принцип, позволяющий обеспечить необходимую величину отклика группы 310: количество m скидков 32 в n-ой группе, принадлежащей k-му сегменту, выбрано в соответствии с законом «синк в квадрате»:

$$45 \quad mV_0 = A \frac{\sin^2(n\omega_k \Delta B / 2)}{(n\omega_k \Delta B / 2)^2}, \text{ мВ},$$

где V_0 - амплитуда единичного скида, A - постоянная, определяемая экспериментальным путем, мВ, $\omega_k = 2\pi S_{k1} / \Phi_0$.

50 На фиг.6 представлена рассчитанная зависимость линейности отклика от числа групп 310 в сегменте 300. Для конечного числа спектральных компонент линейность представленных спектров не зависит от начальной частоты дискретного спектра и определяется частотой последней взятой компоненты. С точки зрения количества

используемых скидидов оптимальным является дискретный спектр с начальной частотой $\omega_k=1$ (спектр (в) на фиг.4).

При необходимости формирования непериодического отклика число k сегментов 300 должно быть порядка 10...30, а величины площадей S_{k1} для разных сегментов 300 должны быть выбраны в пределах от максимального значения $\Phi_0/2\Delta V$ до минимального значения $(0.01...0.1)\Phi_0/2\Delta V$ и не являться кратными. Это приведет к тому, что сложение откликов с разными периодами обеспечит формирование отклика напряжения всей цепочки с единственным максимумом в нуле магнитного поля ($V=0$).

На фиг.7, 8 показан широкополосный СВЧ-усилитель на последовательной цепочке 30 скидидов 32, работающий на принципе бегущей волны, с использованием входного 10 и выходного 20 элементов в виде входной 70 и выходной 80, 81 сверхпроводящих полосковых линий. В конце входной линии 70 и в начале выходной линии 80 включены согласованные нагрузки 73 и 82, соответственно. В разрывы выходной полосковой линии 81 включены джозефсоновские переходы 33. Стрелками поз.72 условно показаны области локального воздействия входной волны на скидиды усилителя, а стрелками поз.83 - область пространства, где распространяется усиленная волна.

Все элементы сверхпроводящего широкополосного СВЧ-усилителя могут быть выполнены с помощью электронной литографии и размещены на одной диэлектрической подложке. Технология изготовления таких структур известна и описана (<http://www.hypres.com>), поэтому в настоящем описании не приводится.

Устройство работает следующим образом (см. фиг.1, 2). При поступлении СВЧ-сигнала на входной элемент 10 он преобразуется посредством индуктивных элементов 12 в магнитный поток, воздействующий на скидиды 32, смещенные источником тока 40 в резистивное состояние. Это воздействие вызывает изменение постоянной составляющей напряжения V_0 на скидиде 32. Суммарное изменение напряжения на выходном элементе 20 цепочки 30 прямо пропорционально, с высокой степенью точности, величине входного сигнала. Оценки показывают (см. фиг.6), что высокая линейность (вплоть до 120 дБ) в диапазоне частот усиления вплоть до нескольких десятков ГГц может быть достигнута для разумного количества скидидов 32 в цепочке 30. Для получения, например, как показано на фиг.6, линейности порядка 80 дБ необходимо 25 групп скидидов. Причем с ростом номера группы n (а значит, и ее эффективной площади) количество скидидов в группе, обеспечивающее отклик, меняющийся с номером n по указанному выше закону «синк в квадрате», падает до единицы в группе с номером N . Таким образом, в случае использования скидидов с одинаковым откликом для достижения высокой линейности усиления достаточно изготовить последовательную цепочку из примерно 760 единичных скидидов.

Для конструкции, показанной на фиг.7, усилитель работает аналогичным образом. При подаче СВЧ-сигнала на входной элемент 10 он преобразуется в магнитный поток (условно показан стрелками поз.72), воздействующий на скидиды 32 цепочки, и таким образом возбуждается выходной СВЧ-сигнал 20, поскольку один из джозефсоновских переходов 33 каждого скидиде 32 включен в разрыв выходной сверхпроводящей полосковой линии 81. По мере распространения по полосковой линии к элементу 20 выходной сигнал возрастает (условно показано стрелками поз.83).

Такое выполнение СВЧ-усилителя позволяет реализовать многоэлементную протяженную цепочку 30, размеры которой сравнимы или превышают длину волны,

без ограничений, связанных с распределенностью системы.

Формула изобретения

1. Сверхпроводящий широкополосный СВЧ-усилитель, содержащий входной элемент, предназначенный для подачи СВЧ-сигнала и преобразования его в магнитный поток, воздействующий на последовательную цепочку двухконтактных сквидов, источник тока смещения, средство задания режима магнитного поля смещения, подключенное индуктивным образом к каждому из сквидов указанной цепочки сквидов, которая подключена к указанному выходному элементу таким образом, чтобы получить на нем суммарное изменение напряжения с указанной последовательной цепочки сквидов, образованной из сегментов, каждый из которых выполнен с возможностью формирования периодического отклика напряжения на величину магнитного поля смещения, заданного указанным средством задания режима магнитного поля В смещения, причем

каждый из сегментов состоит из групп сквидов с одинаковыми эффективными площадями S_{kn} , удовлетворяющими условию

$$S_{kn} = n \cdot S_{k1},$$

где S_{kn} - эффективная площадь сквидов n-й группы в k-сегменте;

S_{k1} - эффективная площадь сквидов в первой группе сквидов k-сегмента;

$k=1, 2 \dots K$ - номер сегмента в цепочке;

$n=1, 2 \dots N$ - номер группы в сегменте,

при этом величина тока смещения источника постоянного тока выбрана из условия обеспечения синусоидального отклика напряжения единичного сквида от величины магнитного поля В смещения и отклик напряжения n-й группы сквидов k-го сегмента от величины магнитного поля В смещения удовлетворяет условию

$$mV_0 = A \frac{\sin^2(n\omega_k \Delta B / 2)}{(n\omega_k \Delta B / 2)^2}, \text{ мВ}$$

где m - число сквидов в n-й группе, принадлежащей k-му сегменту; V_0 - амплитуда синусоидального отклика единичного сквида; $\omega_k = 2\pi S_{k1} / \Phi_0$; $\Phi_0 = 2,07 \times 10^{-15}$ Вб; ΔB - наперед заданная величина диапазона изменения магнитного поля смещения, в котором обеспечивается линейность усиления, A - постоянная, определяемая экспериментальным путем, мВ.

2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что число сегментов в цепочке составляет по меньшей мере два.

3. Устройство по п.1, отличающееся тем, что число сквидов в группе составляет 1-100.

4. Устройство по п.1, отличающееся тем, что число групп сквидов в сегменте составляет 50-100.

5. Устройство по п.1, отличающееся тем, что периодический отклик напряжения на величину магнитного поля смещения устанавливают общим для всех сегментов, а период отклика $(B_T)_k$ для k-го сегмента устанавливают в соответствии с условием $(B_T)_k = \Phi_0 / S_{k1}$.

6. Устройство по п.1, отличающееся тем, что величины площадей S_{k1} для разных сегментов не являются кратными и выбраны из условия

$$\Phi_0 / 2\Delta B \geq S_{k1} \geq 0,01 \Phi_0 / 2\Delta B.$$

7. Устройство по п.1, отличающееся тем, что указанные входной и выходной

элементы выполнены в виде сверхпроводящей полосковой линии передачи, при этом один из контактов каждого сквида цепочки включен в разрыв одного из полосков Выходной линии.

5

10

15

20

25

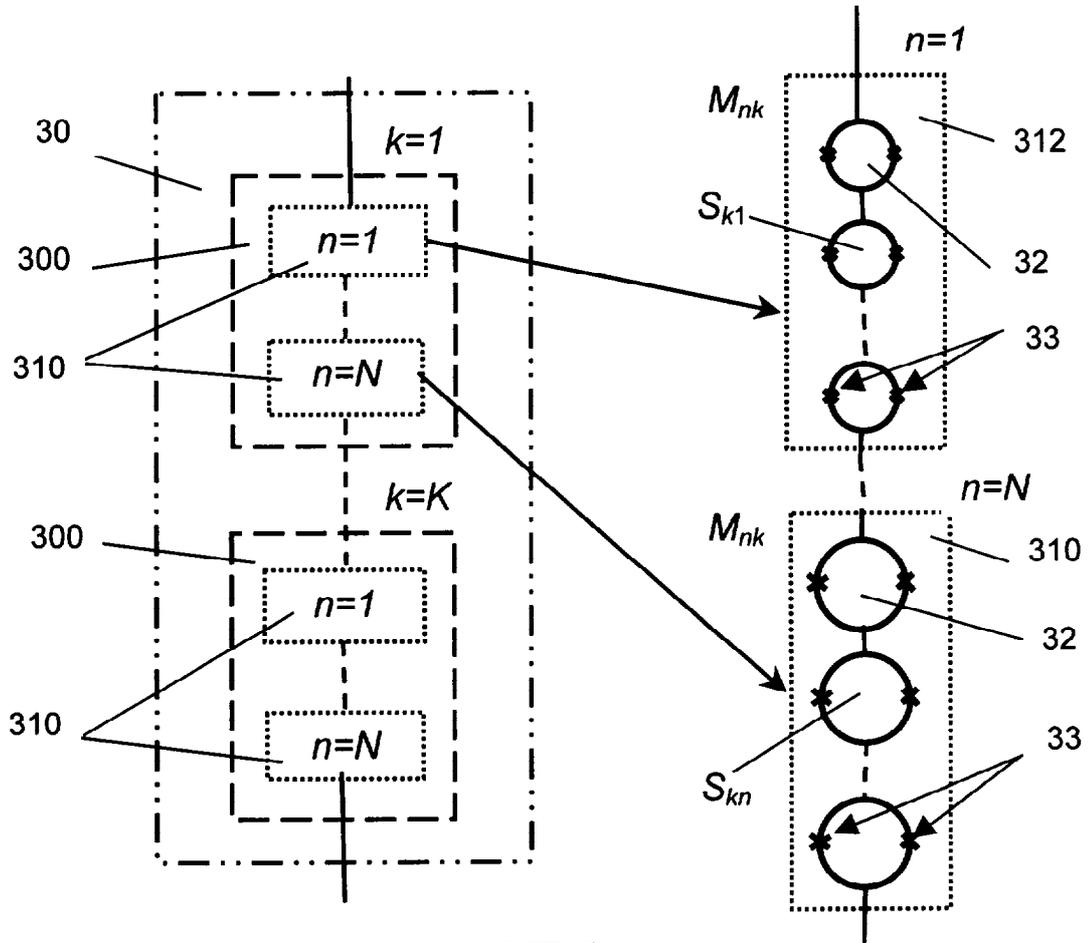
30

35

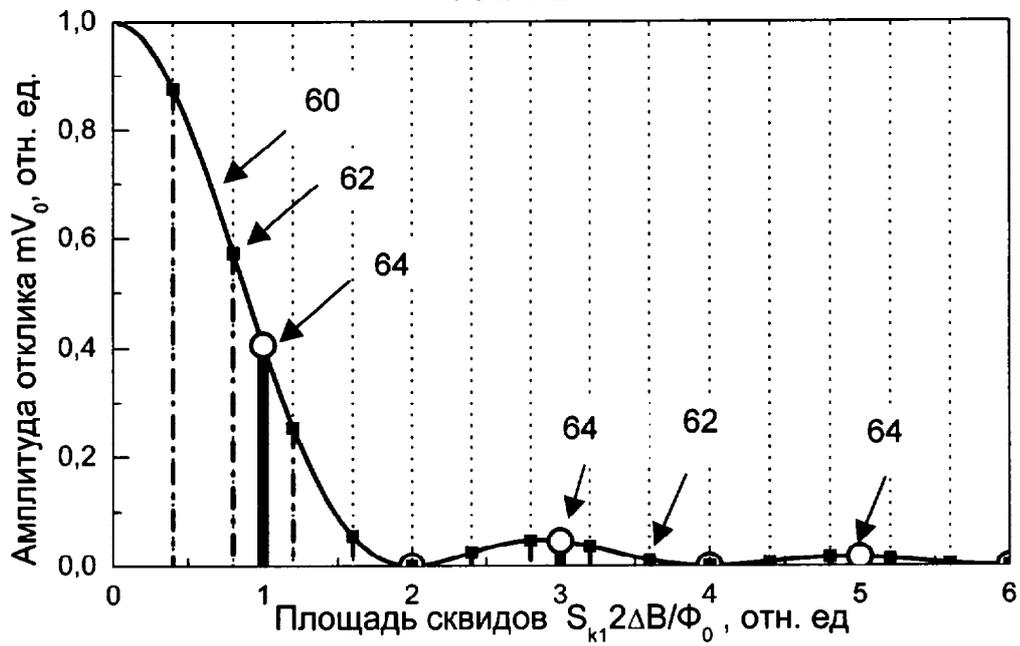
40

45

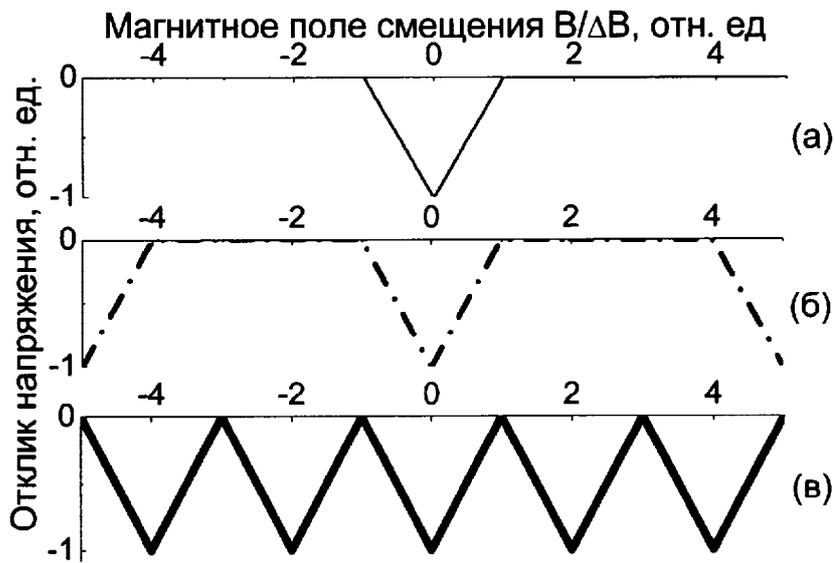
50



ФИГ. 2



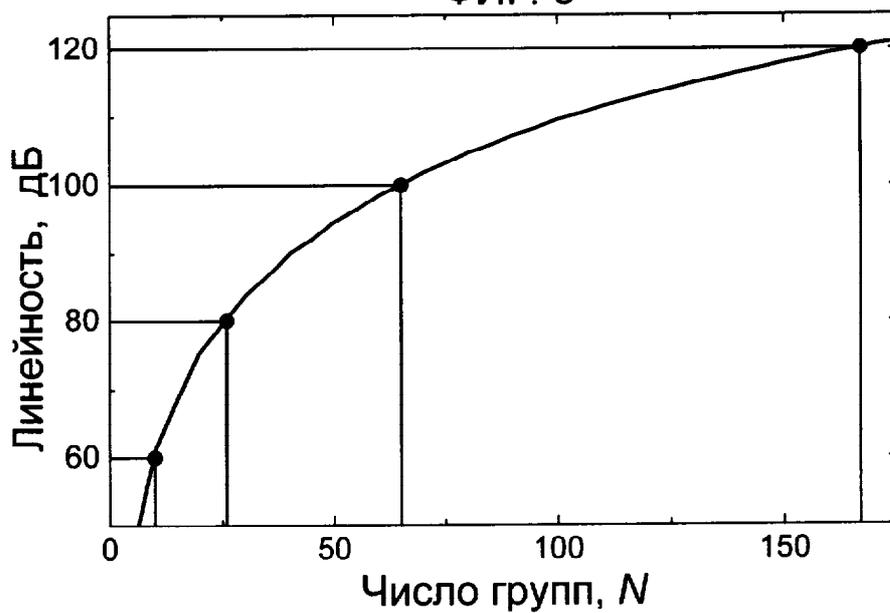
ФИГ. 3



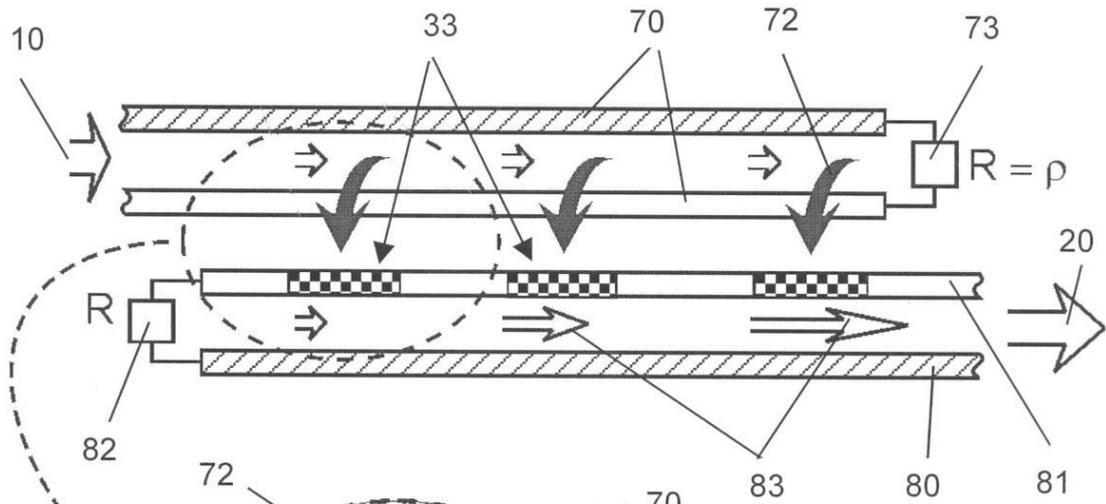
ФИГ. 4



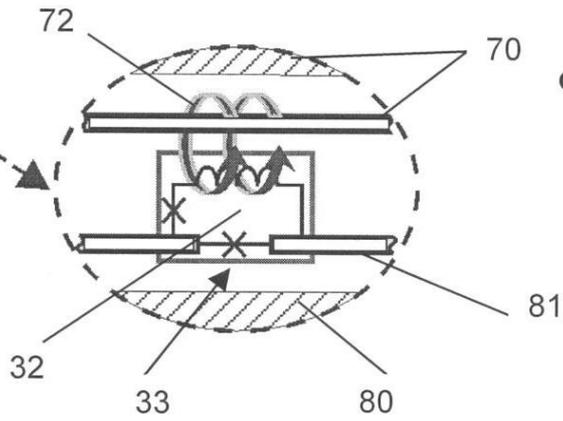
ФИГ. 5



ФИГ. 6



ФИГ. 7



ФИГ. 8