

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

К вопросу реализации широкополосных приемных системН. В. Колотинский,^{1,2,а} В. К. Корнев¹¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Центр квантовых технологий Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

Поступила в редакцию 11.05.2022, после доработки 08.06.2022, принята к публикации 16.06.2022.

В статье рассматриваются вопросы применимости сверхпроводящих квантовых решеток к созданию на их основе широкополосных приемных систем. Предлагаются решения по реализации приемного тракта таких систем, обеспечивающие линейность на уровне 90–100 дБ, а также рассматриваются дальнейшие методы улучшения характеристик, в том числе с использованием широкополосных джозефсоновских параметрических усилителей бегущей волны.

Ключевые слова: эффект Джозефсона, приемные системы, динамический диапазон, активные электрически малые антенны, сверхпроводимость, сверхпроводящие квантовые решетки.

УДК: 32.855. PACS: 74.81.Fa.

ВВЕДЕНИЕ

Рост объемов передаваемой информации, в том числе из-за внедрения *IoT* (интернета вещей), требует создания и внедрения новых типов устройств телекоммуникационных систем, позволяющих не только увеличить объем, но и расширить возможности и виды обработки принимаемой информации. Одним из перспективных направлений в этой области является создание широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой принимаемых сигналов и последующим цифровым формированием поддиапазонов с программируемым расположением и шириной выделяемых частотных полос [1–7].

Ключевым элементом обсуждаемой приемной системы является широкополосный и высоколинейный аналого–цифровой преобразователь (АЦП). Полупроводниковые АЦП устанавливают неизбежный баланс между полосой пропускания и линейными свойствами [8], что, к сожалению, ограничивает их применимость в устройствах подобного типа. Требуемые характеристики АЦП и других элементов таких систем могут быть обеспечены путем использования сверхпроводниковых устройств.

Уникальные свойства сверхпроводников, обусловленные существованием в них макроскопических квантовых эффектов, такими как эффект Джозефсона, эффект макроскопической квантовой интерференции, а также само явление сверхпроводимости, являются уникально широкополосными и поэтому могут быть использованы для создания аналоговых и цифровых устройств потенциально в очень широком диапазоне частот сигналов — от постоянного тока до сотен гигагерц и даже выше [9–11]. Общим ограничением для сверхпроводниковых устройств являются высокие потери, возникающие с момента достижения «щелевой» частоты сверхпроводящих материалов (например, ~ 700 ГГц для Nb)

(ниобия) и $\sim 1,1$ ТГц для NbN). В сверхпроводниковых устройствах, в работе которых используется резистивное состояние джозефсоновских переходов (состояние джозефсоновской генерации), деградация важных с точки зрения практического применения свойств джозефсоновских элементов начинается только в областях их вольт–амперных характеристик, соответствующих частотам джозефсоновской генерации, превышающим характерную джозефсоновскую частоту, которая может составлять также сотни гигагерц:

$$F_c = \frac{I_c R_N}{\Phi_0},$$

где I_c и R_N — критический ток и нормальное сопротивление, $\Phi_0 = h/(2e)$ — квант магнитного потока, h — постоянная Планка, e — заряд электрона.

Это позволяет разрабатывать разнообразные сверхпроводниковые аналоговые, цифровые, смешанные устройства и схемы [11] с характеристиками, недостижимыми для полупроводниковой электронной техники. Сверхпроводниковая быстрая одноквантовая логика (Rapid Single Flux Quantum (RSFQ) logic) [12–15] используется для реализации широкого спектра цифровых и смешанных сверхпроводниковых устройств, работающих с частотами тактовых сигналов, достигающими десятков гигагерц и выше, при рассеивании мощности порядка одного микроватта на кристалл [1, 16–18].

Технологии на основе RSFQ используются, в том числе, для реализации широкополосных аналого–цифровых преобразователей (АЦП). Современные сверхпроводниковые АЦП демонстрируют выдающиеся линейность и динамический диапазон, совместно позволяющие реализовать динамический диапазон линейного преобразования сигналов до 90–100 дБ и даже потенциально выше [8]. Следует отметить, что высокая линейность характеристик имеет решающее значение для создания широкополосных приемных устройств, открытых для сигналов от многих

^а E-mail: kolotinskij@physics.msu.ru

источников, то есть сигналов с неизбежно различной амплитудой, чтобы избежать возникновения интермодуляционных искажений и формирования ложных сигналов.

Для того, чтобы распространить высокую линейность и большой динамический диапазон сверхпроводникового АЦП на всю приемную систему, необходимо добиться аналогичных характеристик для приемной антенны и малошумящего усилителя, которые предшествуют АЦП в цепи приемника. Для достижения этой цели в качестве указанного блока (антенна + усилитель) можно использовать криогенную малошумящую широкополосную электрически малую антенну (ESA, Electrically Small Antenna) активного типа [19, 21] на основе сверхпроводящей квантовой решетки (SQA, Superconducting Quantum Array), описанной в [20, 23].

В данной статье рассматриваются возможные подходы к построению сверхпроводниковой антенно-усилительной части широкополосных приемных систем для реализации достаточно большого линейного динамического диапазона устройства в целом, в том числе на уровне характеристик, достигнутых для современных сверхпроводниковых АЦП.

1. ЛИНЕЙНОСТЬ КАК КЛЮЧЕВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Динамический диапазон DR устройства является одной из важнейших характеристик и определяется как отношение амплитуды максимального (максимально допустимого) входного сигнала $(A_{in})_{max}$ к амплитуде минимального входного сигнала $(A_{in})_{min}$, величина которой ограничивается приведенным ко входу устройства уровнем шумов на его выходе (среднеквадратичным значением шумов A_{noise}):

$$DR = \frac{(A_{in})_{max}}{(A_{in})_{min}} = \frac{(A_{in})_{max}}{A_{noise}/K} = \frac{(A_{out})_{max}}{A_{noise}},$$

где $K = A_{out}/A_{in}$ — крутизна преобразования входного сигнала в выходной.

Однако, для приемных систем первостепенную роль играет динамический диапазон линейного преобразования сигнала (SFDR, Spurious Free Dynamic Range). SFDR может быть равным DR, но обычно меньше, чем DR, так как величина максимального входного сигнала ограничивается дополнительными требованиями, чтобы амплитуды интермодуляционных искажений выходного сигнала не превышали среднеквадратичной величины шумов. Таким образом, динамический диапазон линейного преобразования сигнала определяется в первую очередь линейностью, являющейся более фундаментальной характеристикой устройства, чем введенный выше динамический диапазон (DR), который может быть увеличен путем уменьшения уровня шумов через уменьшение частотной полосы устройства или рабочей температуры (для тепловых шумов). Кроме того, DR может быть увеличен за счет использования цепочек однотипных устройств за счет того, что сложение сигналов (в виде напряжения в последовательной цепочке двухполюсных элементов или тока

в параллельной цепочке таких элементов) происходит когерентно, а сложение шумов соответствует сложению дисперсий независимых флуктуаций. Это приводит к росту DR как \sqrt{N} с увеличением числа элементов N в цепочке или решетке.

Линейность устройства может быть определена в соответствии с методами однотонового или двухтонового анализа. Согласно этим методам на вход устройства следует подать либо один синусоидальный сигнал (с амплитудой, соответствующей величине анализируемого диапазона входных сигналов), либо два синусоидальных сигнала с близкими частотами ω_1 и ω_2 , а затем измерить спектр выходного сигнала и определить линейность по формуле:

$$Lin = 20 \log(a_1 / \max\{a_k\}),$$

где a_1 — амплитуда основного тона, а a_k — амплитуды последующих гармоник (в однотоновом методе) либо интермодуляционных составляющих (в двухтоновом методе) с частотами $n\omega_1 \pm m\omega_2$ (где $n + m = k$) соответственно.

2. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ АКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫЕ АНТЕННЫ

Активные сверхпроводящие электрически малые антенны (ЭМА) могут быть реализованы на основе предложенной ранее концепции сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) [19–21, 23]. Требуемая высокая линейность функции преобразования магнитного сигнала (магнитной компоненты электромагнитного сигнала) в напряжение достигается за счет использования в качестве таких базовых элементов СКР специально разработанных джозефсоновских ячеек с высоколинейным откликом напряжения. Увеличение линейного динамического диапазона СКР до максимального значения, ограниченного линейностью используемых джозефсоновских ячеек, достигается за счет увеличения числа ячеек N (и соответствующего роста DR как \sqrt{N}). При этом представляется возможным как последовательное, так и последовательно-параллельное соединение ячеек и формирование на этой основе одно-, двух- или даже трехмерных СКР (рис. 1).

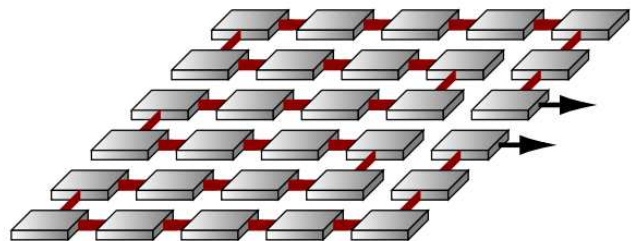


Рис. 1. Сверхпроводящая квантовая решетка

Активная ЭМА на основе СКР может быть как трансформаторного, так и бестрансформаторного типов [21, 22]. В первом случае к СКР добавляется сверхпроводящий контур (вокруг решетки), выполняющий роль концентратора магнитного потока принимаемого сигнала и обеспечивающий приложение сигнала ко всем ячейкам решетки, индуктивно

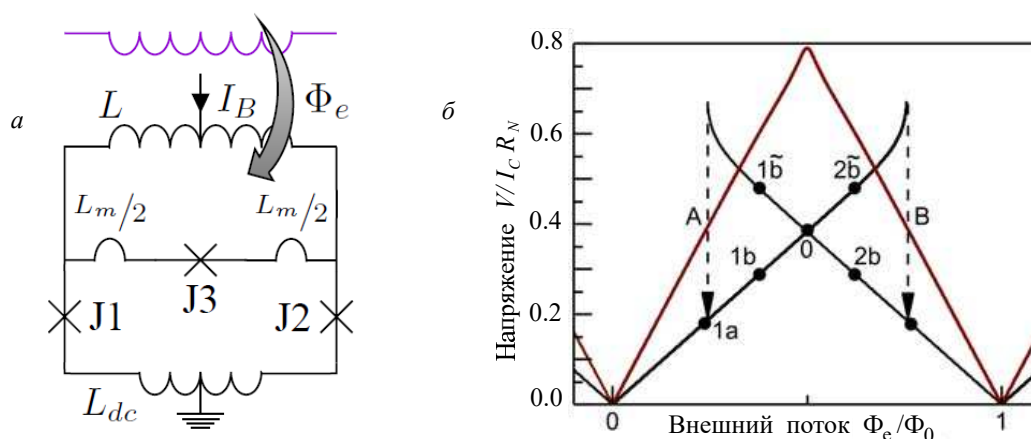


Рис. 2. а — Эквивалентная схема би-сквида с учетом существования индуктивности трехконтактного контура L_{dc} и общей части индуктивностей контуров L_m . L — основная индуктивность би-сквида (индуктивность двухконтактного сквида), I_B — ток питания (смещения), Φ_e — внешний магнитный сигнал. б — Максимально линейный отклик напряжения $V(\Phi_e)$ би-сквида, имеющий треугольный вид при параметре би-сквида $l^* \leq 1$ и гистерезисный при $l^* > 1$

связанным с этим контуром. Во втором типе антенны входной сигнал каждой ячейки формируется индивидуально под действием приложенного непосредственно к площади ячейки магнитного потока падающей волны.

Поскольку СКР является двухполюсным устройством с двумя терминалами, общими для выходного напряжения и цепи задания тока смещения, импеданс нагрузки СКР должен быть достаточно высоким по сравнению с собственным импедансом СКР (нормальным сопротивлением СКР), чтобы избежать значительной деградации линейности отклика напряжения СКР из-за шунтирующего влияния нагрузки [28]. Возможность последовательно-параллельного соединения ячеек СКР упрощает достижение требуемого соотношения импедансов, а также позволяет увеличить мощность сигнала, передаваемого в последующее устройство.

3. БАЗОВЫЕ ЯЧЕЙКИ АНТЕНН

В качестве базовых ячеек антенн на основе СКР могут быть использованы би-сквиды и дифференциальные квантовые ячейки [21, 22]. Оптимальные характеристики ячеек достигаются за счет их конструктивных параметров и прикладываемых токов смещения.

3.1. Би-сквид

Би-сквид [24–27] представляет собой модернизированный сквид постоянного тока: параллельно основной индуктивности двухконтактного сквида включен третий джозефсоновский переход J3 (см. схему на рис. 2, а), который находится всегда в сверхпроводящем состоянии и играет роль нелинейной индуктивности. Такая модификация сквида постоянного тока превращает его в устройство, в котором входной сигнал претерпевает два последовательных нелинейных преобразования:

- преобразование в одноконтактном сквиде приложенного к нему магнитного потока Φ_e в фазу третьего джозефсоновского перехода φ_3 ;

- преобразование в двухконтактном сквиде приложенной к нему фазы φ_3 в выходное напряжение V (в сигнальную составляющую напряжения на би-сквиде, усредненную по более высокочастотным процессам джозефсоновской генерации в основных джозефсоновских переходах J1, J2).

Эти преобразования сигнала могут иметь взаимнообратную форму в достаточно широкой области значений сигналов, обеспечивая высокую линейность преобразования приложенного магнитного потока Φ_e в выходное напряжение V . Как показано на рис. 2, б, форма отклика напряжения может иметь как треугольный вид, так и более сложный, гистерезисный вид в зависимости от величины его параметра l^* (нормированной индуктивности), в случаях, когда $l^* \leq 1$ и когда $l^* \geq 1$ соответственно, где

$$l^* = i_{c3}l,$$

$$i_{c3} = I_{c3}/I_c,$$

$$l = \frac{2\pi I_c L}{\Phi_0},$$

L — основная индуктивность би-сквида (индуктивность одноконтактного контура би-сквида), I_c — критический ток основных джозефсоновских переходов J1 и J2, I_{c3} — критический ток джозефсоновского перехода J3.

Линейность основной части ($\sim 50\%$) участков нарастания/убывания периодического отклика напряжения би-сквида может достигать 90–100 дБ при очень точном задании оптимальных значений его параметров (индуктивностей, критических токов), включая величины неизбежных «паразитных» индуктивностей (L_m и L_{dc} на рис. 2, а). По мере ослабления требований к линейности отклика напряжения би-сквида допустимые области значений его параметров резко увеличиваются. Поскольку все параметры, отвечающие за линейность отклика напряжения, фиксируются в процессе изготовления би-сквида и не могут быть в дальнейшем изменены для корректировки технологически обусловленных отклонений и, таким образом, достижения максимально возможной линейности, получение линейно-

сти на уровне 60–70 дБ [27] следует рассматривать как наиболее реалистичную цель для практических устройств.

В качестве примера, на рис. 3 представлен участок послойной топологии би-сквида, а также микрофотография этого участка в образце, изготовленном с использованием ниобиевой пленочной технологии [29].

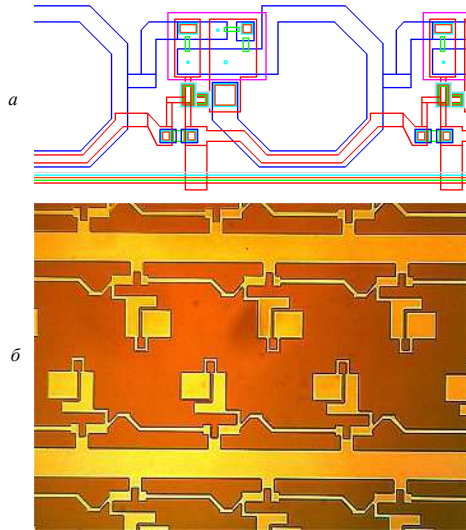


Рис. 3. *а* — Участок послойной топологии би-сквида; *б* — микрофотография образца, содержащего би-сквид и изготовленного с использованием ниобиевой технологии

3.2. Дифференциальная квантовая ячейка

Дифференциальная квантовая ячейка (DQC, Differential Quantum Cell) состоит из двух дифференциально включенных параллельных цепочек джозефсоновских переходов с малыми индуктивностями связи, представляющих собой два плеча дифференциальной ячейки (рис. 4, *а*). Каждое плечо смещено постоянным током $I_b \approx NI_c$, где N — число джозефсоновских переходов в плече, I_c — критический ток одного джозефсоновского перехода, а также смещено фиксированным магнитным потоком Φ_b , одинаковым по величине, но разным по знаку для правого и левого плеч ячейки. К обоим плечам ячейки приложен одинаковый входной сигнал (поток Φ_e магнитной индукции электромагнитного сигнала). Выходным сигналом дифференциальной ячейки является разность напряжений на плечах ячейки. При последовательном включении таких ячеек выходным напряжением квантовой решетки является разность напряжений на цепочках последовательно включенных правых и левых плеч дифференциальных ячеек (см. рис. 4, *б*).

Линейность отклика напряжения дифференциальной ячейки основана на том факте, что форма отклика (боковых сторон отклика) напряжения каждого плеча ячейки близка к параболическому закону, а разность двух парабол, откликов напряжения плеч ячейки, сдвинутых друг относительно друга, является линейной функцией.

Основными параметрами, влияющими на линейность отклика напряжения дифференциальной ячейки, являются параметры, задаваемые током: ток смещения и магнитный поток смещения, что, в отличие от би-сквида, позволяет настраивать линейность устройства до максимально достижимой величины 90–100 дБ [28].

Увеличение количества джозефсоновских переходов n в плече дифференциальной ячейки с одной стороны уменьшает импеданс ячейки и, следовательно, антенны, увеличивает мощность выходного сигнала, а с другой — влияет на форму отклика напряжения плеча, лучше приближая ее к параболическому закону. Однако последнее имеет место только в пределах ограниченного числа джозефсоновских переходов, который называется эффективным радиусом взаимодействия, и зависит от величины индуктивностей связи между джозефсоновскими переходами цепочки [30, 31] (см. также аналитическую модель для изучения величины эффективного радиуса в работе Н.В. Колотинского, В.К. Корнева 2021. № 3. С. 22 в этом журнале). При использовании ниобиевой технологии изготовления сверхпроводниковых устройств эффективное число джозефсоновских переходов n в плече ячейки (в пределах радиуса взаимодействия) в практических устройствах оказывается, как правило, в пределах от 10 до 20.

Частным случаем дифференциальной квантовой ячейки является DSQUID, предложенный в работе [32]. Данное устройство, достаточно перспективное для использования в ряде схем считывания сигналов, имеет, однако, слишком малый размер линейного участка отклика напряжения, недостаточный для антенного тракта широкополосных приемных систем.

На рис. 5 представлен участок послойной топологии дифференциальной квантовой ячейки, а также микрофотография этого участка в образце, изготовленном с использованием ниобиевой пленочной технологии.

4. СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

Дополнительные возможности в решении поставленной задачи могут быть получены с использованием широкополосных джозефсоновских параметрических усилителей бегущей волны, характеризующихся как предельно низким уровнем внутренних шумов, так и отсутствием компромисса между коэффициентом усиления и полосой пропускания, присущего обычным параметрическим усилителям на основе резонаторов [33, 34].

Индуктивные свойства сверхпроводящей компоненты тока через джозефсоновские переходы позволяют создавать на их основе искусственные волноводные линии с нелинейными индуктивностями, то есть линии, в которых параметрическое усиление сигнала может осуществляться в режиме бегущей волны. Периодическая зависимость сверхпроводящей компоненты тока I_s от разности фаз φ

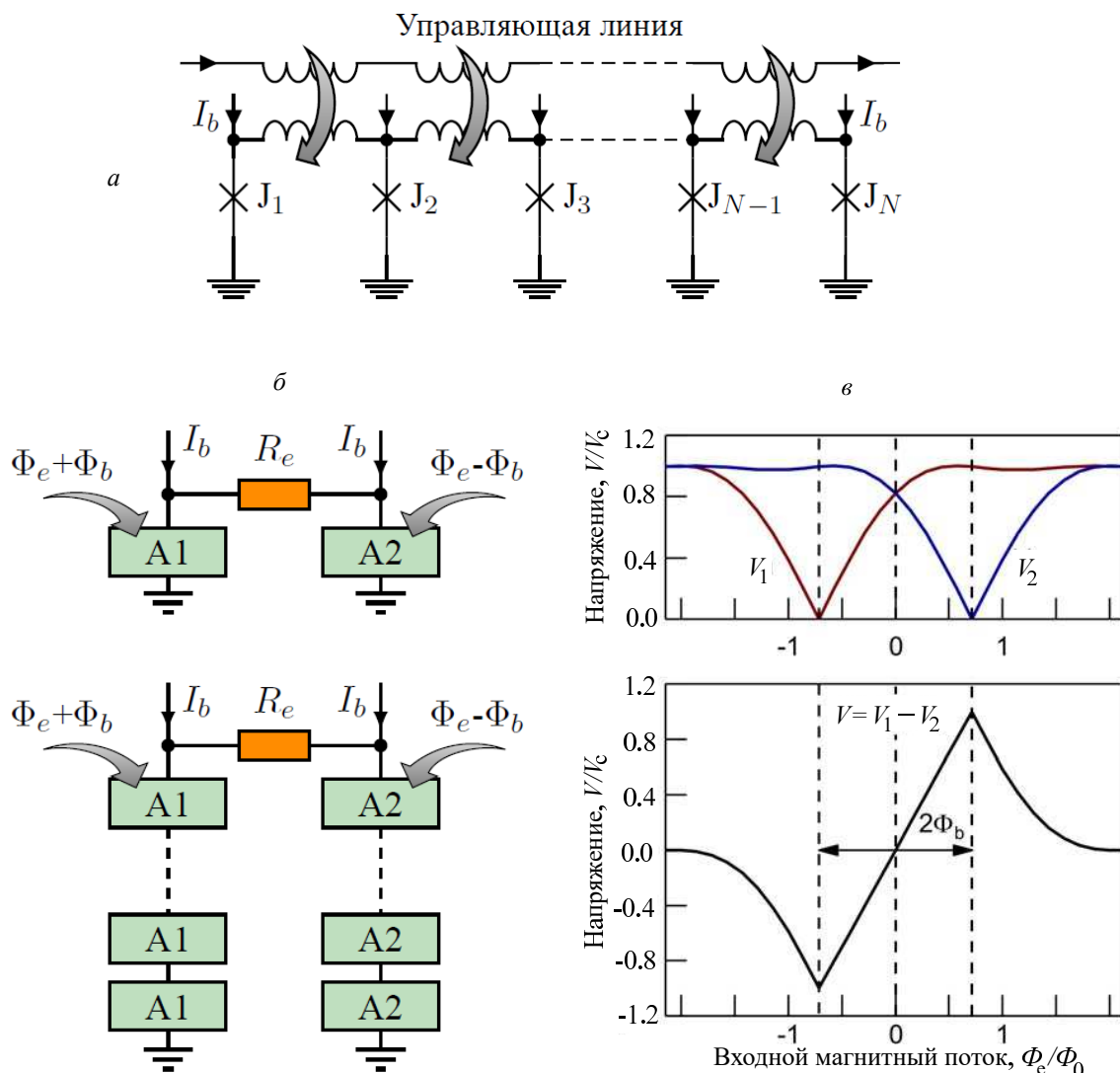


Рис. 4. а — Плечо дифференциальной квантовой ячейки — параллельная цепочка джозефсоновских переходов с индуктивностями связи. Входной сигнал (магнитный поток Φ_e) может быть приложен с использованием сверхпроводящего трансформатора магнитного потока, фрагмент которого показан как «Управляющая линия». Поток смещения Φ_b может быть приложен с помощью дополнительной управляющей линии или того же самого трансформатора потока. б — Схематическое изображение дифференциальной квантовой ячейки, состоящей из двух плеч А1 и А2. в — Отклики напряжения плеч дифференциальной ячейки, противоположно смещенные потоком Φ_b (вверху) и результирующий отклик напряжения дифференциальной квантовой ячейки (внизу)

(называемой обычно джозефсоновской фазой) волновых функций конденсата куперовских пар электронов в электродах джозефсоновского элемента $I_s = I_c \sin \varphi$ определяет сильно нелинейный вид дифференциальной индуктивности

$$L_d = \frac{\Phi_0 / (2\pi I_c)}{\cos \varphi},$$

однако в то же время ограничивает амплитуду тока сигнала накачки в такой линии, а также ограничивает диапазон линейного режима усиления сигнала.

Первое ограничение может быть преодолено путем использования двух волноводных линий: отдельной искусственной линии с постоянными индуктивностями для волны накачки и сигнальной искусственной линии со сверхпроводящими квантовыми интерферометрами (сверхпроводящими контурами с одним или двумя джозефсоновскими элементами — скивдами),

которые индуктивно связаны с индуктивностями линии накачки [35].

Второе ограничение полностью преодолеть невозможно, однако диапазон линейного режима усиления сигнала может быть существенно увеличен за счет использования в искусственной сигнальной линии би-скивдов. В этой конструкции би-скивды работают в сверхпроводящем состоянии, в отличие от их использования в качестве элементов сверхпроводящих квантовых решеток и антенн на их основе. Дополнительные степени свободы в би-скивде по сравнению с одно- или двухконтактным скивдами, появляющиеся вместе с дополнительным (третьим) джозефсоновским переходом, позволяют расширить диапазон линейной связи тока сигнала через би-скивд и с величиной падения джозефсоновской фазы на би-скивде [27]. Таким образом, это делает возможным достижение одновременно как чрезвычайно высокой чувствительности, доста-

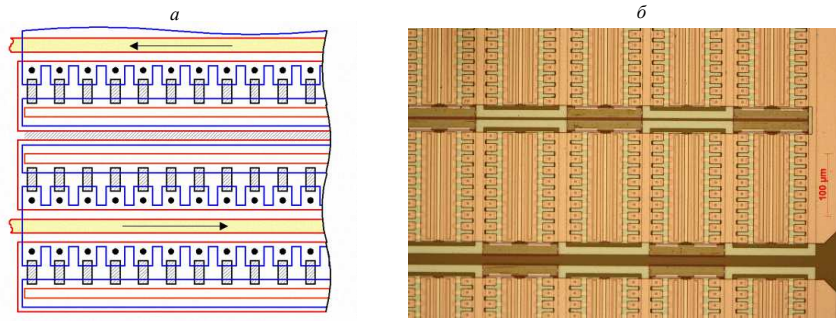


Рис. 5. а — Участок послышной топологии плеча дифференциальной квантовой ячейки (ДКЯ); б — микрофотография образца, содержащего плечо ДКЯ и изготовленного с использованием ниобиевой технологии

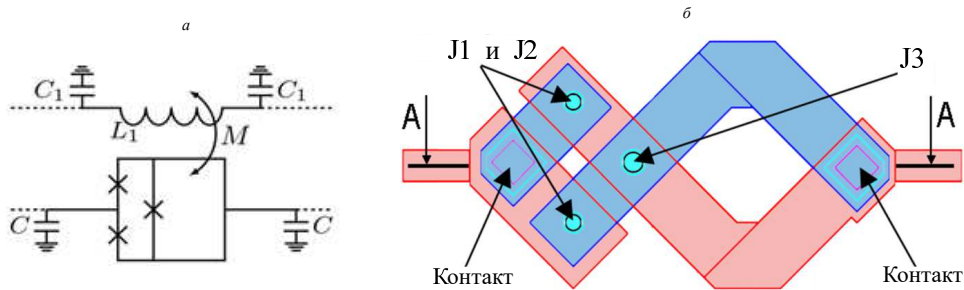


Рис. 6. Фрагмент искусственной сигнальной линии с би-сквидом и возможный вид топологии этого фрагмента линии. Из работы [36]

точно большого усиления сигнала, так и требуемого большого динамического диапазона, свободного от нелинейных искажений.

В качестве примера на рис. 6 показаны схематически фрагмент искусственной сигнальной линии с би-сквидом и возможный вид топологии этого фрагмента линии, спроектированный для изготовления такой искусственной линии с использованием ниобиевой пленочной технологии [36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построение сверхпроводниковой антенно-усилительной части широкополосных приемных систем на основе электрически малых антенн активного типа, реализуемых с использованием сверхпроводящих квантовых решеток, позволяет достичь требуемую высокую величину динамического диапазона линейного преобразования устройства в целом, в том числе на уровне характеристик, достигнутых для современных сверхпроводниковых АЦП — 90–100 дБ.

Это формирует в целом реальные возможности для создания новых типов устройств, расширяющих телекоммуникационные технологии, на основе сверхпроводниковых широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой принимаемых сигналов и последующим цифровым формированием поддиапазонов с программируемыми расположением и шириной выделяемых частотных полос.

Работа выполнена при финансовой поддержке Росийского Научного Фонда (проект №19-72-10016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mukhanov O., Kirichenko D., Vernik I. et al. // *IEICE Trans. Electron.* 2008. **E91-C(3)**. P. 306.
2. Gupta D., Filippov T., Kirichenko A. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2007. **17(2)**. P. 430.
3. Vernik V., Kirichenko D., Dotsenko V. et al. // *Supercond. Sci. and Technol.* 2007. **20**. P. S323.
4. Gupta D., Kirichenko D., Dotsenko V. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2011. **21(3)**. P. 883.
5. de Escobar L., Hitt R., Mukhanov O., Littlefield W. // *IEEE MILCOM.* 2006.
6. Wong J., Dunneagan R., Gupta D. et al. // *IEEE MILCOM.* 2007.
7. Brock D., Mukhanov O., Rosa J. // *IEEE Commun. Mag.* 2001. **39(1)**. P. 174.
8. Kadin A., Mukhanov O. *Handbook of Superconductivity.* 2021. P. H.3.6.
9. Schmidt V. *The Physics of Superconductors: Introduction to Fundamentals and Applications.* 1997.
10. Likharev K. *Dynamics of Josephson junctions and circuits.* New York, 1986.
11. Seidel P. *Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications.* 2015.
12. Likharev K., Mukhanov O., Semenov V. // *SQUID'85.* Berlin, 1985. P. 1103.
13. Mukhanov O., Semenov V., Likharev K. // *IEEE Trans. Magn.* 1987. **23(2)**. P. 759.
14. Bunyk P., Likharev K., Zinoviev D. // *Int. J. High Speed Electron. Syst.* 2001. **11(1)**. P. 257.
15. Polonsky P., Semenov V., Bunyk P. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3(1)**. P. 2566.
16. Yamanashi Y., Tanaka M., Akimoto A. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2007. **17(2)**. P. 474.
17. Filippov T., Sahu A., Kirichenko A. et al. // *Physics Procedia.* 2012. **36**. P. 59.
18. Ando Yu., Sato R., Tanaka M. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2016 **26(5)**. P. 1301305.
19. Kornev V., Sharafiev A., Soloviev I. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2014. **24(4)**. P. 1800606.
20. Корнев В.К., Колотинский Н.В. *Введение в сверхпроводящие квантовые решетки.* М., 2019.

21. Kornev V., Kolotinskiy N., Sharafiev A. et al. // *Supercond. Sci. and Technol.* 2017. **30**(10). P. 103001.
22. Kornev V., Sharafiev A., Soloviev I. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2016. **26**(3). P. 1400104.
23. Kornev V., Kolotinskiy N., Sharafiev A. et al. // *Low Temp. Phys.* 2017. **43**(7). P. 829.
24. Kornev V., Soloviev I., Klenov N., Mukhanov O. // *Supercond. Sci. and Technol.* 2009. **22**(11). P. 114011.
25. Kornev V., Sharafiev A., Soloviev I., Mukhanov O. // *Supercond. Sci. and Technol.* 2014. **27**(11) P. 115009. 10.1088/0953-2048/27/11/115009.
26. Корнев В.К., Колотинский Н.В. Би-сквид: физические основы. М., 2019.
27. Kornev V., Kolotinskiy N., Mukhanov O. // *Supercond. Sci. and Technol.* 2020. **33**(11) P. 113001.
28. Kornev V., Kolotinskiy N., Scripka V. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2015. **25**(4). P. 1601304.
29. Filippenko L., Shitov S., Dmitriev P. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2001. **11**(1). P. 816.
30. Mitchell E., Muller K., Purches W. et al. // *Supercond. Sci. and Technol.* 2019. **32**(12). P. 124002.
31. Crete D., Lemaitre Y., Lesueur J. et al. // *EUCAS2019: Abstracts.* 2019. 3-EP-SQ-S11.
32. Soloviev I., Ruzhickiy V., Klenov N. et al. // *Supercond. Sci. and Technol.* 2019. **32**(7). P.074005.
33. Sweeny M., Mahler R. // *IEEE Trans. Magn.* 1985. **21**(2). P. 654.
34. Macklin C., O'Brien, K, Hover D. et al. // *Science.* 2015. **350**(6258). P. 307.
35. Zorin A. // *Phys. Rev. Appl.* 2019. **12**(4). P. 044051.
36. Yusupov R., Filippenko L., Bazulin D. et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2022. **32**(4). P. 1700105.

On the Problem of the Implementation of Broadband Receiving Systems

N. V. Kolotinskiy^{1,2,a}, V. K. Kornev¹

¹*Department of Atomic Physics, Plasma Physics and Microelectronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*Quantum Technology Centre, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^akolotinskij@physics.msu.ru

This paper deals with the problem of the applicability of superconducting quantum arrays to the creation of broadband receiving systems on their basis. Some solutions providing linearity at a level of 90–100 dB are proposed for the implementation of the receiving duct of such systems, and the further methods for the improvement of characteristics are considered, including the use of broadband Josephson parametric amplifiers of a traveling wave.

Keywords: Josephson effect, receiving systems, dynamic range, active electrically small antennas, superconductivity, superconducting quantum arrays.

PACS: 74.81.Fa

Received 11 May 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2022. **77**, No. 5. Pp. 755–761.

Сведения об авторах

1. Колотинский Николай Васильевич — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-43-51, e-mail: kolotinskij@physics.msu.ru.

2. Корнев Виктор Константинович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-43-51, e-mail: kornev@phys.msu.ru.