



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Корнев В.К., Колотинский Н.В.

Введение в сверхпроводящие квантовые решетки

Москва
2019

УДК 621.396.6-973:538.945(078)

ББК 32.855

К67

*Рекомендовано к изданию Ученым советом Физического факультета
Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова*

Рецензенты:

д.ф.-м.н., проф. О.В. Снигирев (МГУ имени М.В. Ломоносова)

д.ф.-м.н., проф. В.П. Митрофанов (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Корнев В.К., Колотинский Н.В.

К67 **Введение в сверхпроводящие квантовые решетки:** учебное пособие / В.К. Корнев, Н.В. Колотинский — М.:Издательский отдел Физического факультета МГУ, 2019 — 20 с.:ил.

Учебное пособие знакомит с физическими основами джозефсоновских сверхпроводящих квантовых решеток (Superconducting Quantum Arrays) – новых структур, расширяющих возможности современной сверхпроводниковой электроники. Такие решетки разработаны для создания на их основе новых широкополосных устройств с большим динамическим диапазоном и высокой линейностью сигнальных характеристик. В данном пособии рассматриваются возможные типы базовых ячеек, требования к характеристикам ячеек и общей структуре сверхпроводящих квантовых решеток. Приводятся результаты численного моделирования и экспериментальных исследований. Даются примеры принципиально новых практических устройств на основе сверхпроводящих квантовых решеток, таких как электрически малые антенны активного типа, и новых возможностей развития технологий широкополосного приема, выделения и обработки сигналов.

Пособие предназначено для студентов четвертого и пятого курсов кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, обучающихся по специальности «физическая электроника»; представляется крайне полезным для подготовки специалистов в области современных микро- и нано-технологий. Материал данного пособия относится к читаемым на кафедре курсам «Джозефсоновские структуры», «Динамика джозефсоновских систем», «Основы сверхпроводниковой электроники».

УДК 621.396.6-973:538.945(078)

ББК 32.855

© Корнев В.К., Колотинский Н.В., 2019

Оглавление

1	Введение	4
2	Динамический диапазон многоэлементной структуры	5
3	Линейность преобразования	7
4	Динамический диапазон, свободный от нелинейных искажений	8
5	Сверхпроводящие квантовые решетки	9
6	Ячейки сверхпроводящих квантовых решеток	9
6.1	Би-СКВИД как квантовая ячейка	10
6.2	Дифференциальный сквид – D-сквид (<i>DSQUID</i>)	12
6.3	Дифференциальная квантовая ячейка (<i>DQC, Differential Quantum Cell</i>)	13
7	Применение сверхпроводящих квантовых решеток	15
	Список литературы	18

1. Введение

Широко используемые в настоящее время сверхпроводниковые сквиды (*SQUID – Superconducting Quantum Interference Device*) [1, 2] обладают уникальной чувствительностью к магнитным сигналам, однако имеют очень ограниченный динамический диапазон и ограниченную линейность преобразования входного сигнала в напряжение. В низкочастотных устройствах на основе сквидов (когда частота сигналов не превышает единиц мегагерц) требуемое увеличение динамического диапазона и линейности достигается за счет применения внешней следящей обратной связи. Схема реализации цепи такой обратной связи первого порядка (с одним интегратором) показана на рис. 1. Скорость слежения такой цепи ограничена величиной постоянной интегратора τ_{int} , а также постоянной RL-цепи преобразования выходного напряжения интегратора в магнитный поток, прикладываемый к сквиду для компенсации входного сигнала Φ_e . Поэтому такой подход не может быть использован в случае широкополосных

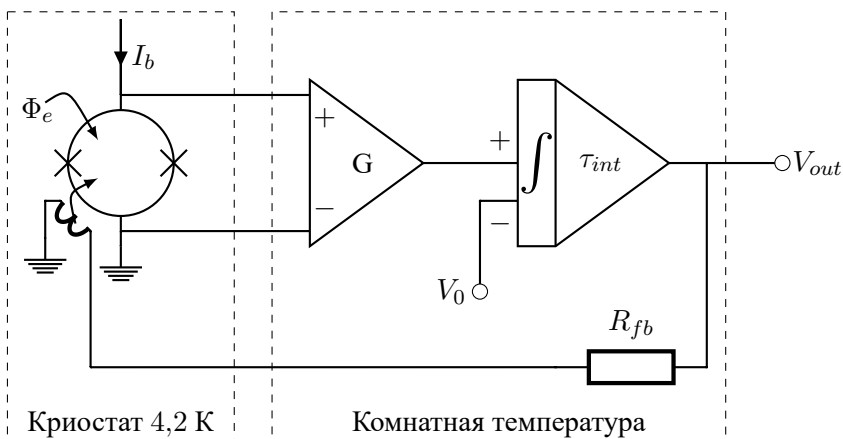


Рис. 1. Сквид постоянного тока с цепью следящей обратной связи первого порядка (с одним интегратором). Φ_e – входной сигнал (магнитный поток), V_{out} – выходной сигнал (напряжение) данного устройства.

систем на основе скиддов. Решение данной проблемы может быть получено путем использования многоэлементных сверхпроводниковых структур [3]. В качестве таких структур, позволяющих получить большой динамический диапазон линейного преобразования магнитного потока в напряжение и большую амплитуду / мощность выходного сигнала, были предложены сверхпроводящие квантовые решетки (СКР) – *Superconducting Quantum Arrays (SQA)* [4, 5].

2. Динамический диапазон многоэлементной структуры

Динамический диапазон DR, как таковой, определяется как отношение (обычно в дБ) амплитуды A_{\max} (или мощности P_{\max}) максимально допустимого сигнала к амплитуде A_{\min} (мощности P_{\min}) минимально возможного сигнала на выходе устройства или как отношение соответствующих величин на его входе:

$$DR = 20 \lg (A_{\max}/A_{\min}) = 10 \lg (P_{\max}/P_{\min}) . \quad (1)$$

Минимальная величина выходного сигнала любого устройства и, следовательно, минимальное значение входного сигнала (обнаружимого сигнала) определяются уровнем шумов на выходе этого устройства – среднеквадратичным значением напряжения (мощности) шумов. Максимальная величина входного сигнала определяется условием достижения определенных ограничений на величину выходного сигнала (например, как это часто практикуется, достижением величины отклонения 1 дБ выходного сигнала от линейного закона нарастания).

Увеличение динамического диапазона можно получить путем перехода от одного элемента (например, скидда) к цепочке или решетке таких ячеек,

которые соединены последовательно, параллельно или последовательно-параллельно.

Действительно, в силу независимости флуктуаций выходного напряжения ячеек, при последовательном соединении ячеек спектральная плотность (на сигнальной частоте Ω) флуктуаций выходного напряжения такой цепочки $S_V(0) = N \cdot S_{V1}(\Omega)$, где $S_{V1}(\Omega)$ – спектральная плотность низкочастотных флуктуаций выходного напряжения одной ячейки на частоте сигнала Ω . Таким образом, среднеквадратичное значение флуктуаций выходного сигнала $V_f = \sqrt{N \cdot S_{V1}(\Omega)}$ увеличивается пропорционально \sqrt{N} , а выходной сигнал $V(\Phi)$ и коэффициент преобразования $V_\Phi = dV/d\Phi$ приложенного магнитного потока Φ в напряжение увеличиваются пропорционально N . Поэтому динамический диапазон такой цепочки растет с увеличением числа ячеек N пропорционально \sqrt{N} .

При параллельном соединении ячеек выходное напряжение и коэффициент преобразования $V_\Phi = dV/d\Phi$ не изменяются, а спектральная плотность низкочастотных флуктуаций тока увеличивается пропорционально числу ячеек: $S_I(\Omega) = N \cdot S_{I1}(\Omega)$, где $S_{I1}(\Omega)$ – спектральная плотность независимых источников флуктуационных токов, подключенных к ячейкам в соответствии, для описания флуктуаций по методу Ланжевена [6, 7] и, следовательно, средне-квадратичное значение флуктуаций выходного сигнала $V_f = \sqrt{N \cdot S_{I1}(\Omega)} \cdot R_d/N$, где $R_d = dV/dI$ – дифференциальное сопротивление в рабочей точке вольт-амперной характеристики (ВАХ) сверхпроводниковой ячейки, уменьшается как \sqrt{N} . Поэтому динамический диапазон при параллельном включении ячеек растет с увеличением числа ячеек N пропорционально \sqrt{N} , то есть также, как и при последовательном соединении.

При этом в обоих случаях (и, следовательно, при параллельно-последовательном включении ячеек, среднеквадратичное значение флуктуаций, приведенных к входу устройства, V_f/V_Φ уменьшается с ростом числа яче-

ек N пропорционально \sqrt{N} , что означает улучшение чувствительности такого устройства в \sqrt{N} раз.

3. Линейность преобразования

Линейность преобразования входного сигнала в выходное напряжение может быть вычислена (измерена экспериментально) путем реализации техники одно-тонового или двух-тонового методов анализа. Согласно первому методу анализа, на вход устройства подается синусоидальный сигнал, измеряются амплитуды основного тона a_1 и гармоник a_k выходного сигнала и затем линейность Lin вычисляется по формуле:

$$\text{Lin} = 20 \lg [a_1 / \max \{a_k\}] \quad (2a)$$

Полученная величина линейности является характеристикой линейности изучаемого участка отклика напряжения, равного размаху выходного сигнала $2a_1$.

Согласно двух-тоновому методу анализа (эквивалентному по своему результату первому методу), на вход устройства подаются два синусоидальных сигнала одинаковой амплитуды с относительно близкими частотами Ω_1 и Ω_2 , затем измеряется амплитуда основного тона этих сигналов на выходе устройства ($a_1 = a_2$), а также амплитуды a_{nm} компонент выходного сигнала на комбинационных частотах ($n\Omega_1 \pm m\Omega_2$) – амплитуды интермодуляционных искажений. Линейность Lin вычисляется по формуле:

$$\text{Lin} = 20 \lg [a_1 / \max \{a_{nm}\}] \quad (26)$$

Следует отметить, что в большинстве практических устройств наибольшей величиной характеризуются интермодуляционные компоненты

третьего порядка на частотах $(2\Omega_1 - \Omega_2)$ и $(2\Omega_2 - \Omega_1)$, которые также наиболее близки к частотам основного тона сигналов (Ω_1 и Ω_2).

4. Динамический диапазон, свободный от нелинейных искажений

Во многих устройствах, особенно в случае широкополосных систем, реализация относительно широкой полосы частот предполагает присутствие в ее пределах многих независимых сигналов с частотами F_k и различными амплитудами в пределах динамического диапазона. Возникающие за счет нелинейных свойств системы новые сигналы (в пределах этой полосы) на комбинационных частотах $nF_k \pm mF_l$ (интермодуляционные искажения), где $n, m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$, накладываться на принимаемые сигналы и искажают их или создают новые, ложные, сигналы. Поэтому, для таких систем крайне важной характеристикой является *динамический диапазон линейного преобразования* или *динамический диапазон, свободный от нелинейных искажений*; англ.: *Spurious Free Dynamic Range (SFDR)*. Этот диапазон определяется через отношение амплитуды выходного сигнала к наибольшей из двух величин: или к амплитуде нелинейных искажений выходного сигнала, или к среднеквадратичной величине шумов на выходе данного устройства.

Максимальная величина SFDR, трактуемая часто как просто SFDR, может быть определена с помощью формул (2), что и линейность (используя одно- или двух-тоновый методы анализа), но при условии, что наибольшая амплитуда гармоники a_k или комбинационной компоненты a_{nm} только достигает границы различимости сигнала на уровне шумов, то есть чувствительности этого устройства. Таким образом, чем ниже уровень шумов устройства, тем выше требования к малости интермодуляционных иска-

жений на участке отклика напряжения устройства ΔV , соответствующего размаху $2a_1$ максимального сигнала в пределах SFDR.

Поскольку уровень шумов на выходе устройства зависит от выходной полосы этого устройства и может быть изменен (уменьшен) посредством дополнительного фильтрования выходного сигнала, линейность характеристик устройства играет основополагающую роль в формировании величины SFDR.

5. Сверхпроводящие квантовые решетки

Сверхпроводящая квантовая решетка [4, 5] – *Superconducting Quantum Array (SQA)* представляет собой однородную периодическую структуру, состоящую из идентичных сверхпроводниковых ячеек (*SQC, Superconducting Quantum Cell*) с высоколинейным откликом напряжения на приложенный магнитный сигнал, которые электрически соединены последовательно или последовательно-параллельно. Такая решетка показана схематически на рис. 2а. Обобщенная схема соединения ячеек решетки, представляющая собой комбинацию параллельного соединения секций решетки и последовательного соединения ячеек в секциях решетки, показана на рис. 2б. СКР характеризуется независимой работой ячеек и коллективно формируемым выходным сигналом, линейность которого определяется линейностью отклика напряжения используемых ячеек. *Динамический диапазон, свободный от нелинейных искажений*, SFDR, увеличивается с ростом числа N ячеек как \sqrt{N} .

6. Ячейки сверхпроводящих квантовых решеток

Несколько сквид-подобных устройств, разработанных в последнее время, могут быть использованы в качестве базовых блоков (ячеек) сверх-

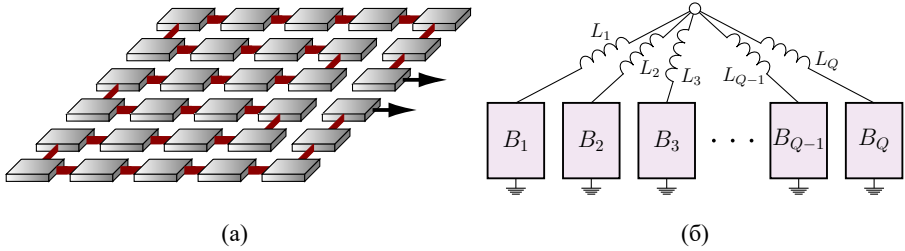


Рис. 2. (а) Сверхпроводящая квантовая решетка. (б) Обобщенная схема электрического соединения ячеек решетки: параллельное соединение секций решетки B_k и последовательное соединение ячеек в этих секциях. Импеданс индуктивностей L_k соединения секций предполагается малым по сравнению с импедансом самих секций на частоте сигнала.

проводящих квантовых решеток. Такими устройствами являются (i) би-сквид, (ii) дифференциальный сквид (D-сквид) и (iii) дифференциальная квантовая ячейка (*Differential Quantum cell, DQC*), зарекомендовавшая себя наиболее эффективной ячейкой в создании практических сверхпроводящих квантовых решеток и устройств на их основе.

6.1. Би-СКВИД как квантовая ячейка

Би-сквид [8–10] представляет собой модернизированный сквид постоянного тока. Для линеаризации функции отклика напряжения такого двухконтактного сквида тока было предложено ввести дополнительную нелинейную трансформацию сигнала во входной цепи сквида. Для этой цели параллельно основной индуктивности двухконтактного сквида был включен третий джозефсоновский переход (см. схему на рис. 3а), который находится всегда в сверхпроводящем состоянии и играет роль нелинейной индуктивности. Такая модификация сквида постоянного тока превращает его в би-сквид, в котором входной сигнал претерпевает два последовательных нелинейных преобразования: (i) преобразование в одно-контактном

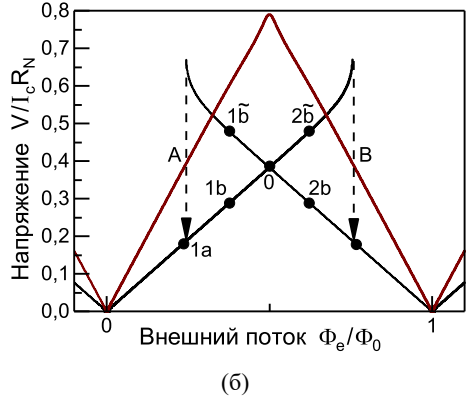
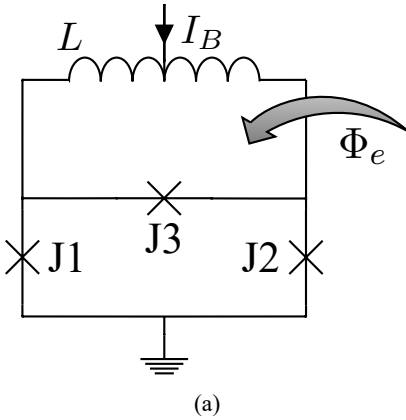


Рис. 3. (а) Би-сквид; (б) максимально линейный отклик напряжения $V(\Phi_e)$ би-сквида, имеющий треугольный вид при $l \leq 1$ и гистерезисный при $l > 1$. Здесь $l \equiv 2\pi I_c L / \Phi_0$, I_c – критический ток основных джозефсоновских переходов J1 и J2. Варианты выбора рабочих точек (для обсуждения) на гистерезисном отклике показаны точками 1a, 1b, 1b̃, а также 2a, 2b, 2b̃. Штриховыми стрелками показаны скачки напряжения при увеличении/уменьшении приложенного магнитного потока.

сквиде приложенного магнитного потока Φ_e в фазу третьего джозефсоновского перехода φ_3 и (ii) преобразование в двух-контактном сквиде приложенной к нему фазы φ_3 в выходное напряжение V . Эти преобразования могут быть взаимно обратными в достаточно широкой области значений сигналов, обеспечивая высокую линейность преобразования приложенного магнитного потока Φ_e в выходное напряжение V .

Линейность выходного сигнала может достигать 90 – 100 дБ, однако, при очень точном задании требуемых величин параметров би-сквида (нормированные величины индуктивностей контуров и соотношение между критическим током третьего джозефсоновского перехода I_{c3} и критическим током I_c базовых переходов). По мере снижения ограничений на допустимую линейность выходного сигнала требования к точности расчета и

воспроизведения величин параметров быстро ослабевают. Поскольку все параметры, отвечающие за линейность отклика напряжения, фиксируются в процессе изготовления би-сквида и не могут быть в дальнейшем изменены для достижения максимально возможной линейности, более реалистичным представляется достижение линейности на уровне не выше 60 – 70 дБ. В силу данных причин, би-сквид как возможная ячейка сверхпроводящей квантовой решетки уступает место по своей эффективности другой ячейке – дифференциальной квантовой ячейке, в которой параметры, отвечающие за линейность отклика напряжения могут быть заданы и подстроены в процессе использования решетки с такими ячейками.

6.2. Дифференциальный сквид – D-сквид (*DSQUID*)

Дифференциальный сквид состоит из двух сквидов постоянного тока (двух-контактных сквидов), включенных дифференциально, когда к каждому сквиду приложен одинаковый входной сигнал (магнитный поток Φ_e), а выходным сигналом является разность напряжений на этих сквидах [11]. Отклики сквидов в этом устройстве противоположно сдвинуты за счет приложения к сквидам некоторого фиксированного магнитного потока $\Phi_b < \Phi_0/4$ с противоположным знаком. Линейность получаемого разностного сигнала основана на том, что определенная часть отклика напряжения сквидов близка к параболическому закону (вычитание двух сдвинутых одинаковых парабол дает линейную зависимость).

Поскольку каждый этих двух сквидов в этом устройстве можно рассматривать как параллельную цепочку из двух джозефсоновских переходов, *DSQUID* является частным случаем рассматриваемой далее дифференциальной квантовой ячейки, в которой наилучшая линейность отклика выходного напряжения достигается при большем числе джозефсоновских переходов в параллельных цепочках.

6.3. Дифференциальная квантовая ячейка (DQC, *Differential Quantum Cell*)

Дифференциальная квантовая ячейка (DQC) состоит из двух дифференциально включенных параллельных цепочек джозефсоновских переходов с малыми индуктивностями связи (рис. 4) – плеч этой ячейки, смещенных равномерно приложенным током $I_b \approx nI_c$, где n – число джозефсоновских переходов, I_c – критический ток одного перехода. К плечам ячейки приложен одинаковый входной сигнал (магнитный поток Φ_e), а также одинаковый, но противоположный по знаку, поток смещения Φ_b . Выходным сигналом ячейки является разность напряжений на ее плечах. При последовательном включении таких ячеек выходным напряжением квантовой решетки является разность напряжений на цепочках последовательно включенных правых и левых плеч дифференциальных ячеек (см. рис. 5а).

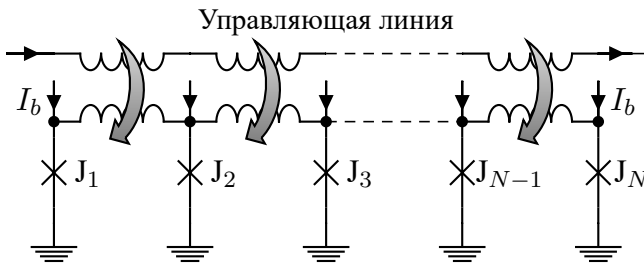


Рис. 4. Плечо дифференциальной квантовой ячейки – параллельная цепочка джозефсоновских переходов с индуктивностями связи $l_{coup} \sim 0,1 \dots 0,5$. Входной сигнал (магнитный поток Φ_e) может быть приложен с использованием сверхпроводящего трансформатора магнитного потока, фрагмент которого показан как «Управляющая линия». Поток смещения Φ_b может быть приложен с помощью дополнительной управляющей линии или того же самого трансформатора потока.

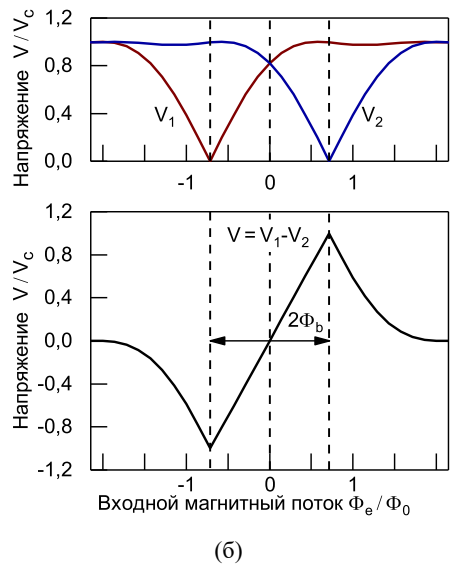
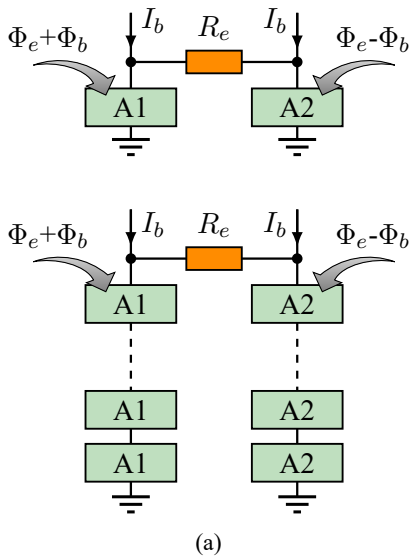


Рис. 5. (а) Схематическое изображение дифференциальной квантовой ячейки (DQC) состоящей из двух плеч A1 и A2 – параллельных цепочек, содержащих каждая n джозефсоновских переходов, (вверху) и цепочка последовательно включенных дифференциальных ячеек (внизу); R_e – внешняя нагрузка, I_b – ток смещения. (б) Отклики напряжения плеч дифференциальной ячейки при $I_b = nI_c$ (критический ток цепочки), противоположно смещенные потоком Φ_b , (вверху) и результирующий отклик напряжения дифференциальной квантовой ячейки $V = V_1 - V_2$ (внизу).

Форма боковых сторон пика отклика напряжения плеч ячейки близка к параболической; эта близость учушается с увеличением числа джозефсоновских переходов в параллельных цепочках – плечах ячейки [12, 13]. Поэтому отклик напряжения дифференциальной ячейки (как разность сдвинутых одинаковых парабол) близок к линейному в пределах всего своего размаха, как показано на рис. 5б. Линейность центральной части отклика ($\sim 50\%$ его размаха) достигает 100 дБ при оптимальных значениях потока смещения Φ_b и тока смещения I_b [12, 13]. Эти параметры, отвечающие за линейность отклика напряжения, могут быть заданы и подстроены в

процессе использования сверхпроводящей квантовой решетки с такими ячейками.

7. Применение сверхпроводящих квантовых решеток

Сверхпроводящие квантовые решетки предназначены для построения на их основе высокочувствительных широкополосных устройств, таких как широкополосные детекторы, широкополосные усилители и т. д., включая приемные электрически малые антенны (ЭМА) активного типа. Электрически малой называется антенна, размер которой D существенно меньше длины принимаемых электромагнитных волн ($D < \lambda/4$). Активной называется антенна, обеспечивающая не только прием, но и усиление сигналов.

В отличие от обычных магнитных антенн (виткового типа), в которых возникающая ЭДС сигнала пропорциональна скорости изменения вектора магнитной индукции принимаемой волны dB/dt , ЭМА на основе квантовой решетки реагирует на величину вектора магнитной индукции B . Такая ЭМА осуществляет одновременно прием и усиление сигналов, то есть является активной антенной. Усиление сигналов происходит за счет вложения энергии от источника постоянного тока смещения (I_b) квантовой решетки.

Возможны два типа конструкции антенн на основе сверхпроводящих квантовых решеток: трансформаторные и бестрансформаторные ЭМА [14]. В первом типе конструкции антенны сверхпроводящая квантовая решетка интегрирована со сверхпроводящим трансформатором (концентратором) магнитного потока. Такой трансформатор может представлять собой сверхпроводящий контур (охватывающий основную часть площади чипа), индуктивно связанный с расположенными по его периметру

плечами дифференциальных ячеек (см. рис. 6а). Поток вектора магнитной индукции электромагнитной волны, падающий на площадь данного сверхпроводящего контура, обуславливает протекание по нему экранирующего тока, который индуцирует в плечах ячеек входной магнитный поток (см. рис. 4, где показана индуктивная связь цепочки джозефсоновских переходов с линией сверхпроводящего трансформатора потока). На рис. 7 показана микрофотография фрагмента цепочки последовательно включенных плеч дифференциальных квантовых ячеек в прототипе трансформаторной ЭМА, изготовленного с использованием многослойной пленочной ниобиевой технологии [15] с плотностью критического тока джозефсоновских переходов $4,5 \text{ кА/см}^2$.

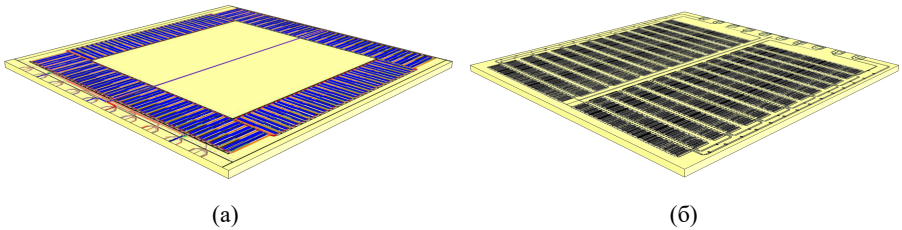


Рис. 6. Примеры общего вида топологии трансформаторной (а) и бестрансформаторной (б) активных электрически малых антенн (ЭМА) на основе сверхпроводящих квантовых решеток. Антенны занимают площадь $\sim 4,2 \times 4,4 \text{ мм}^2$ на чипе размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$. Трансформаторная ЭМА содержит 120 последовательно включенных дифференциальных квантовых ячеек, в каждом из плеч которых содержится 40 джозефсоновских переходов. Цепочки из правых и левых плеч дифференциальных ячеек занимают соответствующие половины периметра трансформатора охватывающего основную часть площади чипа. Бестрансформаторная антенна содержит 588 последовательно включенных дифференциальных квантовых ячеек, правые и левые плечи которых из 12 джозефсоновских переходов, сгруппированы в две последовательные цепочки, каждая из которых занимает половину площади чипа.

В бестрансформаторной конструкции антенны (см. пример общего вида такой антенны на рис. 6б) плечи дифференциальных квантовых ячеек преобразуют самостоятельно падающий на их площадь (общую эффективную площадь образуемую сверхпроводящими пленочными фрагментами в конструкции параллельных цепочек джозефсоновских переходов – можно оценить, используя микрофотографию, показанную на рис. 7) поток вектора магнитной индукции электромагнитной волны в магнитный поток, приложенный непосредственно к цепочкам джозефсоновских переходов.

Выбор между двумя возможными конструкциями активной ЭМА может быть сделан, исходя из требований, предъявляемых к чувствительности антенны, импедансу антенны и амплитуде выходного сигнала. В силу

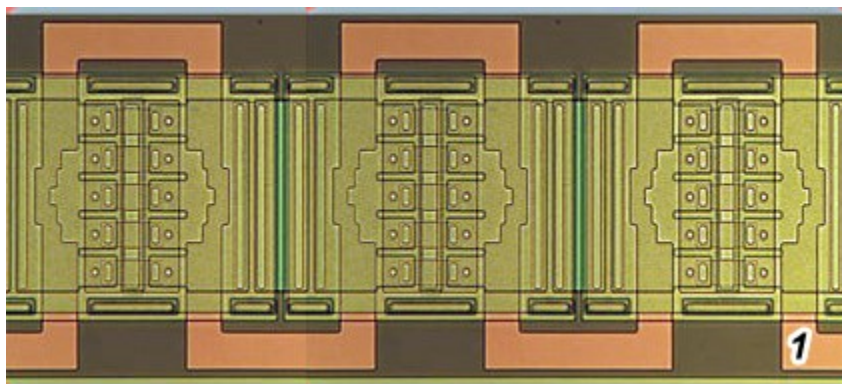


Рис. 7. Микрофотография фрагмента (6 элементов) цепочки последовательно включенных плеч дифференциальных квантовых ячеек в прототипе трансформаторной ЭМА, изготовленного с использованием многослойной пленочной ниобиевой технологии с плотностью критического тока джозефсоновских переходов $4,5 \text{ кА/см}^2$. Плечи дифференциальных ячеек, представляющие собой параллельные цепочки из $n = 5$ джозефсоновских переходов, индуктивно связаны с линией «1» (в форме меандра) сверхпроводящего трансформатора магнитного потока, сформированной в нижнем сверхпроводящем слое. Светлые кружки – джозефсоновские переходы с эффективным диаметром $1,8 \text{ мкм}$.

широкополосности макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках, активные ЭМА на основе квантовых решеток способны принимать сигналы с частотами от нескольких герц (и даже ниже) до десятков гигагерц (и потенциально выше). Ограничение на верхнюю частоту принимаемых сигналов определяется характерными параметрами используемых джозефсоновских переходов: частота сигналов должна быть существенно ниже характерной частоты джозефсоновской генерации $F_c = I_c R_N / \Phi_0$ (здесь I_c и R_N – соответственно критический ток и нормальное сопротивление джозефсоновского перехода).

Список литературы

- [1] *Drung D.* Advanced SQUID read-out electronics / Ed. by H Weinstock. — Dordrecht : Kluwer–Academic, 1996. — Vol. 329 of NATO ASI Series E: Applied Sciences. — p. 63–116.
- [2] *Kleiner R., Koelle D., Ludwig F., Clarke J.* Superconducting quantum interference devices: State of the art and applications // Proceedings of the IEEE. — 2004. — Vol. 92, no. 10. — pp. 1534–1548. doi:10.1109/JPROC.2004.833655.
- [3] *Колотинский Н.В., Корнев В.К., Шарафиев А.В., Соловьев И.И.* Широкополосные устройства на основе многоэлементных джозефсоновских структур // Ученые записки физического факультета МГУ. — 2013. — Т. 2, № 5. — с. 135006.
- [4] *Kornev V. K., Sharafiev A. V., Soloviev I. I., Kolotinskiy N. V., Scripka V. A., Mukhanov O. A.* Superconducting Quantum Arrays // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2014. — Vol. 24, no. 4. — p. 1800606. doi:10.1109/TASC.2014.2318291.
- [5] *Kornev V. K., Kolotinskiy N. V., Sharafiev A. V., Soloviev I. I., Mukhanov O. A.* From single SQUID to superconducting quantum arrays // Low Temperature Physics. — 2017. — Vol. 43, no. 7. — pp. 829–836. doi:10.1063/1.4995632.
- [6] *Лихарев К. К., Ульрих Б. Т.* Системы с джозефсоновскими контактами. Основы теории. — М.: : Изд-во Моск. Ун-та., 1978. — С. 448.
- [7] *Ахманов С. А., Е. Дьяков Ю., С. Чиркин А.* Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в линейных системах. — М. : Физматлит, 2010. — С. 428. — ISBN: 978-5-9221-1204-8.

- [8] *Kornev V. K., Soloviev I. I., Klenov N. V., Mukhanov O. A.* Bi-SQUID: a novel linearization method for dc SQUID voltage response // *Superconductor Science and Technology*. — 2009. — Vol. 22, no. 11. — p. 114011. doi:10.1088/0953-2048/22/11/114011.
- [9] *Корнев В.К., Соловьев И.И., Шарафиев А.В., Кленов Н.В.* От одно- и двухконтактного сквидов к би-сквиду // *Радиотехника*. — 2012. — № 12. — сс. 32–41.
- [10] *Корнев В.К., Колотинский Н.В.* Би-сквид: физические основы. — М. : Изд-во Физического факультета МГУ, 2019. — С. 28.
- [11] *Soloviev I. I., Ruzhickiy V. I., Klenov N. V., Bakurskiy S. V., Kupriyanov M. Y.* A linear magnetic flux-to-voltage transfer function of differential DC SQUID // *Superconductor Science and Technology*. — 2019. doi:10.1088/1361-6668/ab0d73.
- [12] *Kornev V., Kolotinskiy N., Skripka V., Sharafiev A., Soloviev I., Mukhanov O.* High Linearity Voltage Response Parallel-Array Cell // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2014. — Vol. 507, no. 4. — p. 042018. doi:10.1088/1742-6596/507/4/042018.
- [13] *Н.В. Колотинский.* Сверхпроводящие квантовые решетки как широкополосные активные устройства : Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 2015.
- [14] *Kornev V. K., Kolotinskiy N. V., Sharafiev A. V., Soloviev I. I., Mukhanov O. A.* Broadband active electrically small superconductor antennas // *Superconductor Science and Technology*. — 2017. — Vol. 30, no. 10. — p. 103001. doi:10.1088/1361-6668/aa7a52.
- [15] HYPRES Design Rules, HYPRES. — 2013. — URL: <http://www.hypres.com/foundry/niobium-process/>.

Учебное издание

Корнев Виктор Константинович
Колотинский Николай Васильевич

ВВЕДЕНИЕ В СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КВАНТОВЫЕ РЕШЕТКИ

Учебное пособие

Оригинал-макет подготовлен авторами

Подписано в печать 18.06.2019. Печ. лист. 1,15.

Тираж 50 экз. Заказ № 98.

Издательство: Издательский отдел Физического факультета
МГУ, 119234, г. Москва, Ленинский горы, д. 1, стр. 2,
тел. 8 (495) 939-54-94.

Отпечатано в Отделе оперативной печати Физического
факультета МГУ