

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СИГМА-НЕЙРОНА ДЛЯ АДИАБАТИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*А. С. Ионин^{a,b}, Н. С. Шуравин^a, Л. Н. Карелина^a, А. Н. Россоленко^a,
М. С. Сидельников^a, С. В. Егоров^a, В. И. Чичков^c, М. В. Чичков^c, М. В. Жданова^c,
А. Е. Щеголев^d, В. В. Больгинов^{a*}*

^a *Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипяна Российской академии наук
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия*

^b *Московский физико-технический институт
141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия*

^c *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, Москва, Россия*

^d *Научно-исследовательский институт им. Д. В. Скобелевича
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 24 мая 2023 г.,
после переработки 31 июля 2023 г.
Принята к публикации 3 августа 2023 г.

Рассмотрен эксперимент по реализации искусственного нейрона, предложенного ранее для использования в сверхпроводящих нейронных сетях. Изготовленный образец представляет собой одноконтakтный интерферометр, часть контура которого шунтирована дополнительной индуктивностью, используемой также для генерации выходного сигнала. Был разработан и опробован технологический процесс, позволяющий изготовить нейрон в виде многослойной тонкопленочной структуры над толстым сверхпроводящим экраном. Экспериментально измерена передаточная функция изготовленного образца, содержащая сигмоидальную и линейную компоненты. Сформулирована теоретическая модель, описывающая связь входного и выходного сигналов в практическом сверхпроводящем нейроне. Продемонстрировано, что полученные уравнения позволяют аппроксимировать экспериментальные кривые с высоким уровнем точности. Показано, что линейная компонента передаточной функции связана с непосредственной передачей входного сигнала в измерительную цепь. Рассмотрены возможные направления совершенствования конструкции сигма-нейрона.

DOI: 10.31857/S0044451023120143
EDN: MZIWYZ

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большой интерес исследователей вызывают технологии и алгоритмы нейроморфных вычислений (см., например, [1–13]). Последние активно применяются в задачах компьютерных технологий, биологии, нейрофизиологии, физики, химии и т. д., связанных с оперативной обработ-

кой больших неоднородных объемов данных [14–22]. При использовании традиционных устройств, основанных на полупроводниковых технологиях, большие рабочие напряжения вызывают трудности, связанные со значительным энерговыделением и проблемами отвода тепла (см. [23, 24]). Данные обстоятельства влияют на количество нейронов и сигналов, которое способны обеспечить полупроводниковые технологии для современных нейроморфных процессоров [24]. Кроме того, процесс масштабирования процессоров, ранее подчинявшийся экспоненциальному (эмпирическому) закону Мура [25, 26],

* E-mail: bolg@issp.ac.ru

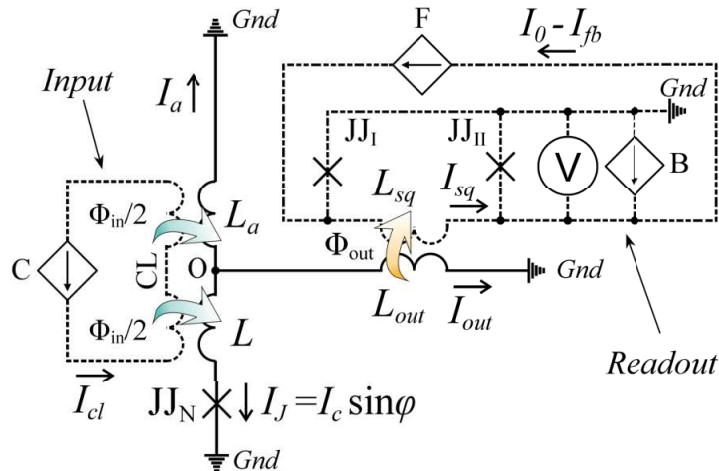


Рис. 1. Принципиальная схема проведенного эксперимента. Сигма-нейрон показан сплошными линиями. Штриховыми линиями показаны задающая (Input) и считывающая (Readout) схемы. Фигурными стрелками показаны входной и выходной магнитные потоки; черными — токи, протекающие в образце. Крестами обозначены контакты Джозефсона. Буквами обозначены точка соединения индуктивных элементов нейрона (O), а также источники тока (B, C, F)

неотвратно подходит к границе характерных размеров базовых элементов, преодолеть которую привычными средствами не представляется возможным [27–30]. В связи с этим ведутся активные исследования альтернативных путей создания более производительной и эффективной элементной базы.

Перспективным методом является переход к сверхпроводниковым технологиям, уже продемонстрировавшим высокую энергоэффективность и быстродействие. Практические устройства цифровой сверхпроводящей электроники разрабатываются на основе концепции быстрой одноквантовой логики (БОК или RSFQ, Rapid Single Flux Quantum), предложенной К. К. Лихаревым в 1987 году [31]. Носителем информации в RSFQ-логике являются пикосекундные импульсы напряжения, поступающие на логические элементы с частотой в десятки ГГц. Развитием этой концепции стало создание семейства энергоэффективной RSFQ (ERSFQ) [32–36], отличающейся отсутствием статического потребления энергии, связанного с необходимостью питания логических элементов. Логические устройства на базе ERSFQ-логики [37–40] были выбраны в качестве одной из ключевых технологий по реализации сверхпроводниковых процессоров в проектах [41, 42].

Начиная с 2013 года, разрабатывается семейство адиабатических логических элементов [43], характеризующихся еще большей энергоэффективностью по сравнению с ERSFQ (см. также [44, 45]). Под адиабатичностью здесь понимается отсутствие обмена теплом или зарядом с окружающей средой в пределах бесконечной длительности логической опе-

рации [46]. Экспериментально было продемонстрировано, что схемы на основе квантового параметрона [43], являющегося базовым элементом адиабатического семейства, более чем на 7 порядков превышают свои полупроводниковые аналоги по уровню энергоэффективности [43–48]. В цикле работ [49–58] была предложена концепция базовых нейроморфных элементов на основе сверхпроводящих интерферометров. В частности, в работе [49] была предложена сверхпроводниковая ячейка на основе квантрона, реализующая сигмоидальную передаточную функцию (Под сигмоидальной понимается класс гладких, монотонно-возрастающих нелинейных функций, вид которых может описываться логистической функцией (вида $1/[1 - \exp(-kx)]$), функцией гиперболического тангенса, функцией ошибок и др. Такие ячейки могут быть использованы в качестве нейронов (сигма-нейронов) сверхпроводящего персептрона, который является наиболее распространенным и разработанным типом нейронных сетей [59]. В данной работе представлена первая практическая реализация сверхпроводящего сигма-нейрона: описаны устройство и способ изготовления образца; методы измерения и анализа передаточной функции; а также пути совершенствования конструкции для достижения целевой (логистической) передаточной функции.

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦА

Сверхпроводящий сигма-нейрон, схематически изображенный на рис. 1, может быть представлен как совокупность трех плеч (джозефсоновского, ин-

дуктивного и выходного), имеющих общую точку соединения О, а другим концом — подключенных к общему электроду Gnd (Ground). При этом джозефсоновское плечо состоит из контакта Джозефсона JJ_N с критическим током I_C и геометрической индуктивности L , а два других образованы элементами L_a (индуктивное плечо) и L_{out} (выходное плечо). Джозефсоновское и индуктивное плечи можно называть приемными, поскольку они содержат элементы (L и L_a), имеющие индуктивную связь с контрольной линией (CL). Выходное плечо имеет индуктивную связь со вспомогательным двухконтактным интерферометром (СКВИДом), предназначенным для измерения выходного сигнала. В сигма-нейроне можно выделить три замкнутых сверхпроводящих контура. Совокупность джозефсоновского и индуктивного плеч дает внешний (или приемный) контур интерферометра, содержащий оба приемных элемента. Заметим, что индуктивность L_{out} на рис. 1, фактически, шунтирует часть приемного контура интерферометра (индуктивность L_a), образуя два частных подконтура. Первый (джозефсоновский) состоит из джозефсоновского и выходного плеч, а второй (шунтирующий) — из выходного и индуктивного. При обходе по каждому контуру должно выполняться условие баланса фаз (см. разд. 5), однако только два из них являются линейно-независимыми.

Входным сигналом нейрона является магнитный поток Φ_{in} , задаваемый симметрично в оба контура при помощи контрольной линии. Выходным сигналом сигма-нейрона считается магнитный поток Φ_{out} , создаваемый током I_{out} , протекающим через выходную индуктивность. Задание и измерение магнитного потока, создаваемого элементами схемы по отдельности, определяет реализацию сигма-нейрона в виде многослойной тонкопленочной структуры, расположенной над сверхпроводящим экраном. В этом случае магнитное поле локализуется в зазоре между экраном и сверхпроводящим проводником с током (см., например, [60], § 9.4), не влияя, на первый взгляд, на остальные индуктивные элементы.

Процесс изготовления образца состоял из 8 этапов. Первый из них состоял в формировании трехслойной заготовки Nb–AlO_x–Nb на подложке из оксидированного кремния размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Напыление ниобия проводилось при давлении аргона 12 мкбар со скоростью 7 нм/с при мощности разряда 930 Вт. Базовый вакуум был не хуже 10^{-3} мкбар. Первый сверхпроводящий слой заготовки имел толщину 300 нм и выполнял одновременно функции сверхпроводящего экрана и нижнего электрода тун-

нельного контакта Джозефсона (КД). Согласно нашим данным выбранная толщина составляла около 4 лондоновских длин в сверхпроводящем ниобии. После осаждения нижнего слоя ниобия в том же вакуумном цикле осаждался слой алюминия толщиной 10 нм со скоростью 1.7 нм/с при том же давлении аргона (12 мкбар) и мощности разряда 190 Вт. Затем проводилось окисление алюминиевого слоя в течение 30 мин в атмосфере кислорода при давлении 200 мбар. Этап завершался осаждением верхнего слоя ниобия толщиной 150 нм.

Следующие 7 технологических этапов были связаны с обработкой трехслойной заготовки. Сначала при помощи фотолитографии и плазмохимического травления ниобия формировались мезы туннельных джозефсоновских контактов размером $14 \times 14 \text{ мкм}^2$. С учетом измерительной схемы (см. рис. 1) образец содержал три идентичных контакта Джозефсона (JJ) с туннельным барьером. Травление проводилось в атмосфере SF₆ с добавлением аргона в соотношении 2 : 1 в индуктивно связанном плазменном разряде мощностью 300 Вт и скоростью травления около 2.5 нм/с. Удаление слоя алюминия проводилось путем травления в 5-процентном растворе КОН. Следующим этапом (третьим) было формирование сверхпроводящего экрана при помощи фотолитографии и плазмохимического травления ниобия. Далее (четвертый этап) изготавливался первый слой изоляции путем термического осаждения 330 нм монооксида кремния SiO на фоторезистивную маску с последующей взрывной фотолитографией. Перед напылением проводилась ионная очистка подложки (травление) в течение 60 с в ВЧ-разряде аргоново-кислородной плазмы с содержанием кислорода 10% при напряжении смещения 1 кВ и давлении 12 мкбар.

Целью пятого этапа является формирование (по большей части) индуктивных элементов сверхпроводящих контуров, включая линии для приема-передачи магнитного потока. Процесс начинался с осаждения слоев алюминия (толщиной 10 нм) и ниобия (толщиной 100 нм) в едином вакуумном цикле. Затем формировалась геометрия слоя ниобия при помощи фотолитографии и последующего плазмохимического травления. Подслой алюминия защищал первый слой изоляции от повреждения в процессе плазмохимического травления. Удаление подслоя осуществлялось аналогично второму этапу (травлением в 5-процентном растворе КОН). Изоляция индуктивного слоя (шестой этап) проводилась аналогично четвертому этапу. На седьмом этапе изготавливались тонкопленочные резисторы для шун-

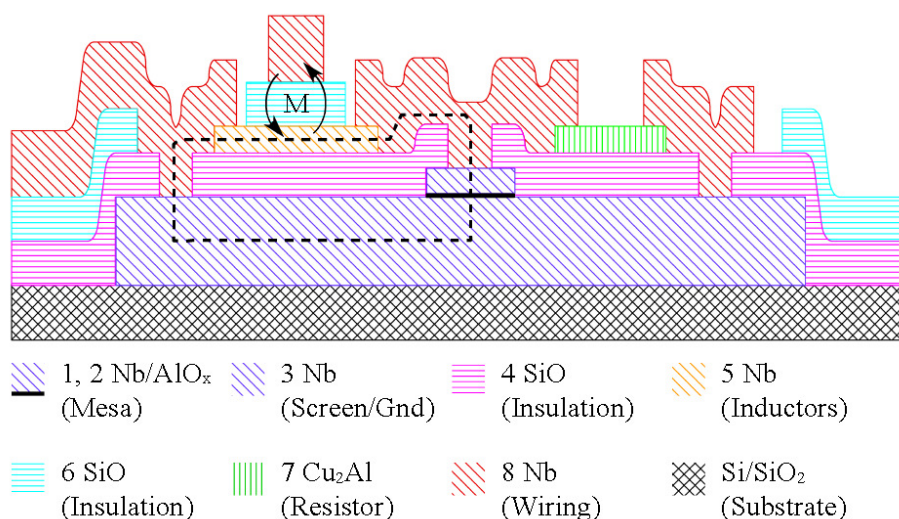


Рис. 2. Схематичное поперечное сечение изготовленных образцов (не в масштабе). Нумерация соответствует этапам технологического процесса; в скобках указано назначение каждого слоя. Одинаковым материалам соответствует одинаковый тип штриховки. Черная полоса слоя Mesa иллюстрирует наличие джозефсоновского барьера из слоя AlO_x . Штриховая линия иллюстрирует контур сверхпроводящего интерферометра; стрелки — наличие индуктивной связи (М) между элементами, изготовленными на 5-м и 8-м этапах

тирования туннельных контактов JJ_I и JJ_{II} (см. рис. 1). Для этого проводилось магнетронное осаждение слоя Cu_2Al толщиной 50 нм на фоторезистивную маску с последующей взрывной фотолитографией (lift-off). Осаждение происходило в атмосфере аргона при давлении 12 мкбар со скоростью 4.7 нм/с при мощности разряда 275 Вт. Завершалось изготовление образца формированием сверхпроводящего замыкания (wiring) из ниобия толщиной 450 нм. На этом этапе достраивались сверхпроводящие контуры, формировалась контрольная линия и подключались резисторы. Перед напылением ниобия проводилась ионная очистка подложки (травление) при давлении 12 мкбар, напряжении смещения 1 кВ (60 с) и 0.6 кВ (120 с) для обеспечения сверхпроводящего контакта к ранее осажденным сверхпроводящим слоям (см. этапы 1, 3, 5 на рис. 2). Согласно проведенным оценкам, общая толщина слоя удаленного ниобия в зонах подключения сверхпроводящего замыкания («окна» в слоях изоляции 4, 6 на рис. 2) составляла около 10 нм.

Схематическое поперечное сечение изготовленных образцов приведено на рис. 2. Сверхпроводящие контуры интерферометров замыкались в вертикальной плоскости (показано пунктиром) и были чувствительны к магнитному полю, параллельному плоскости образца. Индуктивная связь между элементами нейрона обеспечивалась путем наложения полосковых линий, изготовленных на пятом и восьмом этапах процесса (см. элемент «М»). Изоляция края сверхпроводящего экрана (толщиной 300 нм)

достигалась двойным слоем SiO , изготовленным на четвертом и шестом этапах при суммарной толщине 660 нм. Пересечение границ слоев изоляции индуктивными линиями происходило по отдельности, как показано на рис. 2 слева. Это позволяло индуктивным линиям, изготовленным на последнем этапе, пересекать край экрана без разрывов и замыкания на экран. Общая толщина структуры доходила до 1.5 мкм, однако разрушение тонкопленочных слоев из-за большой толщины не наблюдалось (см. рис. 3).

3. ПРОСТЕЙШАЯ КОНСТРУКЦИЯ СИГМА-НЕЙРОНА

На рис. 3 приведена микрофотография изготовленного образца. Благодаря использованному технологическому процессу расположение индуктивных элементов практически копирует схему на рис. 1. Действительно, сигма-нейрон содержит 3 индуктивных элемента, соединенных в точке О (см. рис. 1), которая преобразуется на рис. 3 в общую зону размером $20 \times 30 \text{ мкм}^2$. Джозефсоновское плечо (L) ответвляется в нижнем направлении и замыкается на экран через контакт Джозефсона JJ_N . Индуктивное плечо (L_a) ответвляется вверх и имеет форму меандра. Выходная индуктивность (L_{out}) имеет прямоугольную форму и ответвляется вправо. Элементы L_a и L_{out} замыкаются на экран через окно размером $5 \times 5 \text{ мкм}^2$ в первом слое изоляции (этап 4). Зона О и начальные участки индуктивных элементов сформированы на пятом эта-

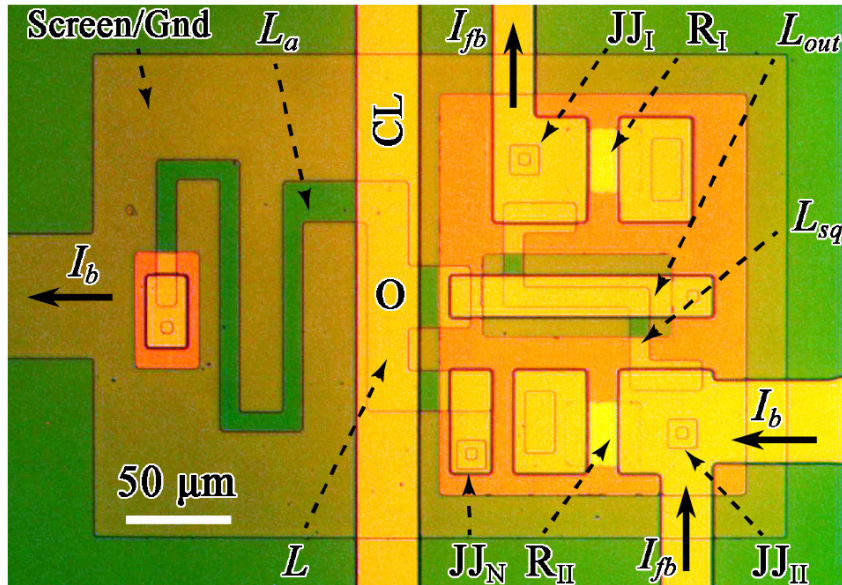


Рис. 3. Микрофотография изготовленного образца. Обозначения соответствуют рис. 1

пе и покрыты слоем изоляции (этап 6, имеют зеленый цвет на рис. 3). Замыкающие участки с шириной линии 20 мкм формируются на восьмом этапе, поскольку для пересечения границы окна требуется большая толщина слоя ниобия. Под замыкающим участком индуктивности L_{out} расположена петля двухконтактного СКВИДа L_{sq} (изготовлена на пятом этапе), замкнутая на экран через контакты Джозефсона JJ_I , JJ_{II} . Каждый из контактов JJ_I , JJ_{II} был шунтирован сопротивлением из слоя Cu_2Al толщиной 50 нм номиналом 2.4 Ом с целью подавления гистерезиса на вольт-амперных характеристиках, возникающего из-за емкостных эффектов и щели в спектре квазичастичных состояний сверхпроводника. (Свойства шунтированных контактов Джозефсона подробно рассмотрены в монографиях [61, 62], а также в последующих публикациях (см., например, [63–67].) Элементы L_{out} и L_{sq} также были разделены слоем изоляции SiO (этап 6) с целью обеспечения чисто индуктивной связи. Элементы L и L_a содержат участки наложения с контрольной линией (CL), одинаковые по размеру. Это позволяет рассчитывать на симметричное задание входного сигнала (магнитного потока) в каждый из контуров образца. Сама контрольная линия (этап 8) имеет ширину 30 мкм и пересекает сверхпроводящий экран (этап 3) целиком.

Индуктивность сверхпроводящей полосы, расположенной над толстым сверхпроводящим экраном, может быть оценена из простых соображений. Например, джозефсоновское плечо L состоит из 6 квадратов, изготовленных на пятом и восьмом эта-

пах технологического процесса, три из которых являются прямыми и три поворотными. Индуктивность прямых квадратов можно оценить по формуле (см. [60], § 10)

$$L_{\square}^{(5)} = \mu_0 d_m^{(5)} = \mu_0 (2\lambda + d_{SiO}), \quad (1)$$

где $d_m^{(5)}$ — магнитная длина «индуктивного» слоя (в основном, изготовленного на пятом этапе), состоящая из двух лондоновских длин для ниобия и толщины первого слоя изоляции (четвертый этап). Подставляя значение лондоновской длины $\lambda_L = 80$ нм (см., например, [68]) и толщину $d_{SiO} = 330$ нм, получаем $L_{\square}^{(5)} = 0.6$ пГн. В рамках простейших оценок индуктивность поворотных квадратов можно принять за $L_{\square}/2$. Таким образом, индуктивность джозефсоновского плеча составляет $L = 2.7$ пГн. Индуктивное плечо L_a содержит 39 квадратов, из которых 32 являются прямыми и 7 поворотными. Его индуктивность можно оценить как $L_a = 21.3$ пГн.

Выходная индуктивность L_{out} поворотных квадратов не содержит. Она состоит из 2 квадратов с индуктивностью $L_{\square}^{(5)}$ (оранжевые элементы на рис. 2) и 4.5 квадратов с индуктивностью

$$L_{\square}^{(8)} = \mu_0 d_m^{(8)} = \mu_0 (2\lambda + 2d_{SiO}), \quad (2)$$

изготовленных на восьмом этапе технологического процесса (красные элементы на рис. 2). Квадраты второго типа лежат на двойном слое изоляции, что обеспечивает увеличенную оценку их индуктивности. Оценка дает $L_{\square}^{(8)} = 1$ пГн и $L_{out} = 5.7$ пГн. Второй слой изоляции (этап 6), в свою очередь, необ-

ходим для наложения индуктивных линий, изготовленных на пятом и восьмом этапах технологического процесса (см. оранжевые и красные элементы в зоне наложения «М» на рис. 2), с целью обеспечения индуктивной связи элементов схемы. В частности, такая связь присутствует между контрольной линией и приемным контуром (с коэффициентом M_{in}), а также между индуктивностями L_{out} и L_{sq} (с коэффициентом M_{out}). Взаимную индуктивность красной линии с прямым квадратом оранжевого слоя можно оценить как

$$M_{\square}^{(58)} = L_{\square}^{(5)} \frac{w^{(5)}}{w^{(8)}}, \quad (3)$$

где $w^{(5,8)}$ — ширины линий. Характерные значения составляют 0.4 пГн для входного сигнала и 0.3 пГн для выходного. Взаимную индуктивность к поворотному квадрату можно принять за половину от прямого (как было предложено выше). Суммирование оранжевых квадратов дает значения $M_{in} = 1.6$ пГн и $M_{out} = 1.8$ пГн.

Ранее было показано (см. [51]), что наилучшее совпадение реальной передаточной функции сигма-нейрона с целевой сигмоидальной (логистической) зависимостью достигается при выполнении следующего условия:

$$l_a = l + 1, \quad (4)$$

где l и l_a обозначают величины L и L_a , измеренные в единицах джозефсоновской индуктивности $L_J = \Phi_0/2\pi I_c$. В абсолютных единицах это условие сводится к равенству индуктивностей приемных плеч с учетом эффективной индуктивности контакта Джозефсона:

$$L_a = L + L_J. \quad (5)$$

Подстановка значений L и L_a дает целевое значение $L_J = 18.6$ пГн, которое достигается при $I_c = 17.7$ мкА. Однако такое целевое значение в данной работе не достигалось. При использованных параметрах окисления прозрачность туннельного барьера для сверхпроводящего тока составляла около 25 А/см² при гелиевой температуре, а критический ток джозефсоновских контактов — около $I_c = 45$ мкА. Выбор размера мезы был обусловлен технологическими ограничениями, имевшимися на момент проведения эксперимента. Уменьшение критического тока контакта за счет уменьшения его площади является очевидным направлением работ по совершенствованию конструкции сигма-нейрона.

4. ЭКСПЕРИМЕНТ

Принципиальная схема проведенного эксперимента представлена на рис. 1. Входной магнитный

поток Φ_{in} создается током I_{cl} , протекающим по контрольной линии СЛ и создающимся током источника С. Выходной магнитный поток измеряется при помощи двухконтактного СКВИДа, состоящего из джозефсоновских переходов JJ_I и JJ_{II} , соединенных индуктивностью L_{sq} . Предполагается наличие общего сверхпроводящего электрода Gnd, замыкающего контуры как сигма-нейрона, так и СКВИДа. Для управления измерительной схемой используются два источника тока и вольтметр. Ток смещения I_b вольт-амперной характеристики СКВИДа (ток питания) $I_b \geq 2I_c$ задается источником В, включенным параллельно контакту JJ_{II} . Ток I_b распределяется между контактами JJ_I и JJ_{II} в зависимости от магнитного потока через СКВИД Φ_{sq} . Поскольку ток питания измерительного СКВИДа превышал критическое значение, измерение среднего напряжения U на dc-СКВИДе позволяет контролировать значение Φ_{sq} . Источник F включен параллельно индуктивности L_{sq} (т.е. петле СКВИДа) и не подключен к общему электроду Gnd. При измерении передаточной функции ток этого источника I_F состоял из двух компонент. Постоянная компонента I_0 использовалась для задания начального состояния СКВИДа (т.е. для смещения вольт-потокковой характеристики), а переменная I_{fb} (зависящая от входного сигнала) — для стабилизации напряжения при изменении входного магнитного потока Φ_{in} .

Каждый эксперимент начинался с изучения характеристик измерительного СКВИДа (см. вставки на рис. 4). При изучении вольт-амперной характеристики (ВАХ) мы изменяли ток источника «В» и измеряли напряжение U при помощи вольтметра постоянного тока по 4-точечной схеме. Вольт-амперные характеристики были однозначными, благодаря наличию шунтирующих сопротивлений (см. разд. 3). Измерение серии ВАХ при разных значениях I_F позволяло построить зависимость критического тока измерительного СКВИДа, фактически, от приложенного магнитного поля (полевая характеристика). Каждое измерение ВАХ в этом эксперименте проводилось в автоматическом режиме, а значение критического тока определялось при превышении напряжением заранее выбранного порогового напряжения менее 1 мкВ. Подключение источника В к измерительному СКВИДу было несимметричным, чтобы исказить полевые характеристики последнего и обеспечить чувствительность к знаку измеряемого магнитного потока. Этот эффект наиболее заметен на полевой зависимости критического тока (см. верхнюю вставку к рис. 4). При измерении вольт-потокковой характеристики (см. нижнюю

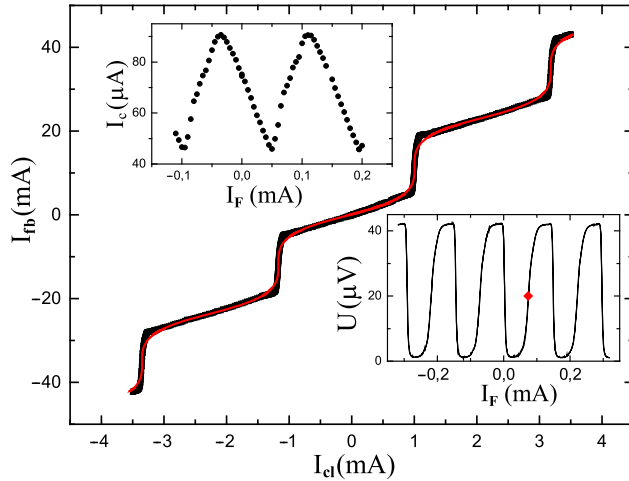


Рис. 4. Типичная передаточная функция исследованного образца. Красной линией показана аппроксимация параметрической зависимостью (7), (8). На вставках приведены примеры полевой зависимости критического тока измерительного СКВИДа (верхняя вставка) и его вольт-поточная характеристика при токе смещения 80 мкА. Красная точка на нижней вставке иллюстрирует возможный выбор стабилизируемого напряжения. Температура эксперимента 4.2 К

вставку на рис. 4) ток I_b поддерживался чуть большим максимального критического, а разворачивался ток I_F , изменяя таким образом величину Φ_{sq} . Период этой зависимости составлял 145 мкА, что позволяет оценить эффективную индуктивность измерительной схемы $L_{sq} = 14.3$ пГн. Предварительные эксперименты позволяли выбрать комфортную рабочую точку, которая определялась величиной напряжения U , стабилизируемого в окрестности начального тока I_0 .

В ходе основного эксперимента мы изменяли ток в контрольную линию (управляющий ток) от источника С, поддерживая постоянным напряжение на датчике СКВИДа с помощью источника F (см. рис. 1). На графике откладывалась разность (обозначаемая I_{fb}) начального и текущего значений тока источника F (далее — компенсирующий ток или ток обратной связи). Таким образом, при измерении передаточной функции мы поддерживали постоянным критический ток измерительного СКВИДа, а следовательно, магнитный поток Φ_{sq} через него. Фактически, ток I_{fb} использовался для компенсации магнитного потока Φ_{out} и служил выходным сигналом при проведении эксперимента. Разработанный нами алгоритм подбирал компенсирующий ток с шагом дискретизации 0.1 мкА, поддерживая постоянным напряжение на измерительном СКВИДе с точностью около 0.5 мкВ. Точность стабилизации маг-

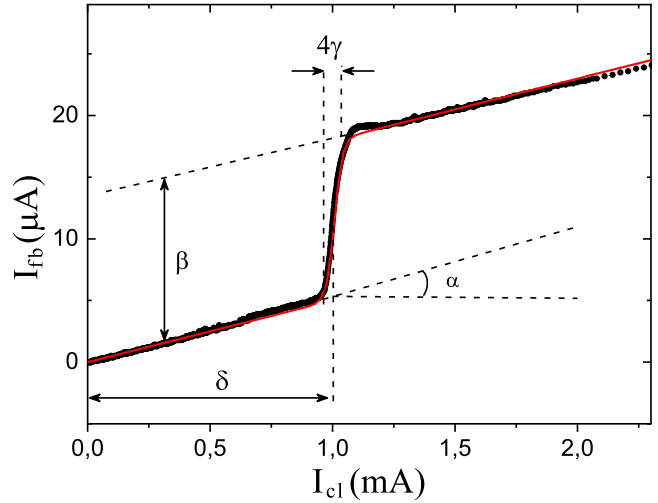


Рис. 5. Отдельно взятый период передаточной функции (черные точки), аппроксимированный сигмоидальной зависимостью (6) (красная кривая). Штриховые линии и стрелки иллюстрируют графический смысл параметров аппроксимации

нитного потока составляла примерно 1/128 кванта. График зависимости компенсирующего тока от управляющего $I_{fb}(I_{cl})$ является передаточной функцией исследуемого образца.

Пример экспериментальной кривой приведен на рис. 4. Она является квазипериодической с периодом $T_{cl} = 2.18$ мА вдоль горизонтальной оси и $T_{fb} = 23.4$ мкА вдоль вертикальной. Отдельный период этой зависимости (см. рис. 5) можно представить как сумму линейной части и сигмоидальной зависимости вида

$$I_{fb} = \alpha I_{cl} + \beta / [1 + \exp(-(I_{cl} - \delta)/\gamma)], \quad (6)$$

где α , β , γ , δ — параметры аппроксимации. Параметр $\alpha = 0.5\%$ характеризует линейную передачу сигнала на выход измерительной схемы; $\beta = 13$ мкА определяет амплитуду сигмоиды; $\gamma = 16$ мкА — определяет скорость нарастания выходного сигнала в нелинейной области; $\delta = 1$ мА — сдвиговое слагаемое, близкое к $T_{cl}/2$. Графический смысл параметров аппроксимации проиллюстрирован на рис. 5. Среднеквадратичное отклонение кривых составляет около 2.3% амплитуды сигмоиды (параметр β).

Аппроксимация всей экспериментальной кривой на рис. 4 может быть проведена при помощи параметрической зависимости вида

$$I_{cl} = k_1 I_c (t + k_2 \sin t - \varepsilon), \quad (7)$$

$$I_{fb} = k_3 I_c (k_4 i_{cl} - \sin t + \zeta), \quad (8)$$

где t — параметрическая переменная, $i_{cl} = I_{cl}/I_c$ — нормированное значение управляющего тока, ко-

эффиценты k_i определяют форму кривой и выражаются через индуктивности элементов сигма-нейрона, а сдвиговые слагаемые ε и ζ определяют начальным состоянием образца. Критический ток джозефсоновского контакта нейрона $I_c \approx 45$ мКА может быть оценен как половина максимального критического тока измерительного СКВИДа (см. верхнюю вставку на рис. 4). Ниже будет показано, что использованный вид аппроксимирующей функции следует из результатов статьи [51], поскольку входной и выходной потоки линейно выражаются через I_{cl} и I_{fb} . Слагаемые ε и ζ определяют, фактически, сдвиг начальной точки передаточной функции, возникающий из-за взаимодействия сигма-нейрона с измерительной схемой. Условие $I_{fb}(I_{cl} = 0) = 0$ дает связь коэффициентов ε и ζ :

$$\zeta = \sin(\varepsilon - k_2 \zeta). \quad (9)$$

Поэтому при аппроксимации параметр ε считался свободным, а параметр ζ вычислялся из уравнения (9). На рис. 4 видно, что уравнения (7), (8) хорошо описывают экспериментальные данные в пределах нескольких периодов передаточной функции: среднеквадратичное отклонение экспериментальной и расчетной кривых на рис. 4 составляет около 7% амплитуды сигмоиды.

5. МОДЕЛЬ СТАЦИОНАРНОГО СОСТОЯНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО СИГМА-НЕЙРОНА

Важным отличием исследованного здесь («практического») сигма-нейрона от рассмотренного теоретически в [49, 51] является наличие двухконтактного СКВИДа, измеряющего выходной магнитный поток. В силу индуктивной связи между элементами L_{out} и L_{sq} сам процесс измерения будет оказывать влияние на состояние изучаемого объекта (сигма-нейрона). Поэтому модель [49, 51] нуждается в дополнении. Следуя использованному в [51] правилу, будем обозначать строчными буквами m_{in} и m_{out} величины M_{in} и M_{out} , нормированные на джозефсоновскую индуктивность $L_J = \Phi_0/2\pi I_c = 7.32$ пГн, где Φ_0 — квант магнитного потока. Такое же соглашение далее применяется для остальных индуктивностей. Связь контрольной линии с элементами L, L_a будем считать одинаковой ($M_{in}/2$) из-за одинаковой длины участков наложения упомянутых элементов. Магнитные потоки, обозначаемые строчными буквами, предполагаются нормированными на величину $\Phi_0/2\pi$, а сверхтоки — на величи-

ну критического тока контактов Джозефсона. Обозначим как I_{sq} ток, протекающий по петле измерительного СКВИДа, а i_{sq} — нормированное значение этого тока. Аналогично, величины i_{cl} , i_{fb} представляют собой токи I_{cl} , I_{fb} , измеренные в единицах I_c .

При измерении передаточной функции изменение тока I_{cl} происходило скачкообразным образом на величину около $0.2\% T_{cl}$ с периодом более 1 с, что на много порядков больше характерных времен джозефсоновских процессов. Поэтому в данном разделе динамика изменения состояния сигма-нейрона рассматриваться не будет (динамические свойства сигма-нейрона были подробно изучены в работах [56, 58]). В стационарном режиме свойства сигма-нейрона определяются условиями баланса фаз в замкнутых сверхпроводящих контурах и законом Кирхгофа в точке соединения О. В сигма-нейроне можно выделить три сверхпроводящих контура, которые дают два линейно-независимых условия баланса фаз. Выбирая в качестве независимых джозефсоновский контур $\text{Gnd}-JJ_N-\text{O}-L_{out}-\text{Gnd}$ и приемный контур $\text{Gnd}-JJ_N-\text{O}-L_a-\text{Gnd}$ (см. рис. 1), получаем условия баланса фаз в виде

$$\phi_{in}/2 + \phi_{out} - \varphi - l \sin \varphi = 0, \quad (10)$$

$$\phi_{in} + l_a i_a - \varphi - l \sin \varphi = 0. \quad (11)$$

Здесь φ — разность фаз на контакте Джозефсона, а $\sin \varphi$ — нормированный ток через него. Закон Кирхгофа в точке соединения имеет вид

$$i_a + i_{out} + \sin \varphi = 0. \quad (12)$$

Уравнения (10)–(12) соответствуют использованному в исходной работе [51]. Изменения вызваны другим видом связи между величинами i_{out} и ϕ_{out} . Действительно, в практическом сигма-нейроне выходной магнитный поток не просто пропорционален i_{out} , а состоит из двух компонент:

$$\phi_{out} = l_{out} i_{out} + m_{out} i_{sq}. \quad (13)$$

При этом обе компоненты (точнее, токи i_{out} и i_{sq}) связаны условием постоянства магнитного потока ϕ_{sq} через измерительную систему:

$$\phi_{sq} = m_{out} i_{out} + l_{sq} i_{sq} = \text{const}. \quad (14)$$

Исключая ток i_{sq} из уравнения (13) с помощью (14), получаем

$$\phi_{out} = l_{out} \left(1 - \frac{m_{out}^2}{l_{sq} l_{out}} \right) i_{out} + \frac{m_{out}}{l_{sq}} \phi_{sq}. \quad (15)$$

Таким образом, воздействие процесса измерения выходного сигнала на состояние образца сводится к незначительной перенормировке выходной индуктивности (поскольку в нашем случае $m_{out}^2 \ll l_{sq}l_{out}$), а также к появлению сдвигового слагаемого, пропорционального ϕ_{sq} . Поэтому параметрическая запись передаточной функции в представлении $\phi_{out}(\phi_{in})$ является почти такой же, как в работах [49, 51]. Ее можно записать в виде

$$\phi_{in} = 2 \left(\frac{l_a + l_{out}}{2l_{out} + l_a} \right) \left(\varphi + l_t \sin \varphi - \frac{l_{sh} m_{out}}{l_{out}} \frac{\phi_{sq}}{l_{sq}} \right), \quad (16)$$

$$\phi_{out} = l_{sh} \left(\frac{\phi_{in}}{2l_a} - \sin \varphi + \frac{m_{out}}{l_{out}} \frac{\phi_{sq}}{l_{sq}} \right), \quad (17)$$

где для краткости введены следующие обозначения:

$$l_{sh} = \frac{l_a l_{out}}{l_a + l_{out}}, \quad (18)$$

$$l_t = l + l_{sh}. \quad (19)$$

Величина l_{sh} есть эффективная индуктивность элемента l_a , шунтированного элементом l_{out} , а l_t есть полная индуктивностью нейрона как одноконтантного интерферометра. Поэтому можно сразу сказать, что передаточная функция сигма-нейрона будет однозначной (безгистерезисной), если

$$l_t < 1. \quad (20)$$

При выполнении условия (4) уравнение (20) сводится к уравнению

$$l < \sqrt{l_{out}^2 + 1} - l_{out},$$

полученному ранее в [56].

Выразим теперь передаточную функцию через токовые переменные. Уравнение (16) преобразуется к форме (7) посредством определения $\phi_{in} = m_{in} i_{cl}$. Для преобразования (17) выразим ток i_{out} из уравнения (14) и подставим в (13):

$$\phi_{out} = \frac{l_{out}}{m_{out}} \left(\phi_{sq} - l_{sq} i_{sq} \right) + m_{out} i_{sq}. \quad (21)$$

Вид зависимости $\phi_{out}(i_{sq})$ не зависит от конструкции изучаемого интерферометра, но определяется методом измерения передаточной функции. Далее заметим, что ток i_{sq} складывается из нескольких компонент, только одна из которых (i_{fb}) изменяется в ходе эксперимента. Другими компонентами являются ток питания измерительного СКВИДа (частично) и ток смещения его вольт-поточковой характеристики. Учитывая, что

$$i_{sq}(\phi_{in}) \equiv i_{sq}^{(0)} - i_{fb}, \quad (22)$$

где $i_{sq}^{(0)}$ есть (по определению) ток в петле СКВИДа при нулевом входном сигнале (в начальный момент

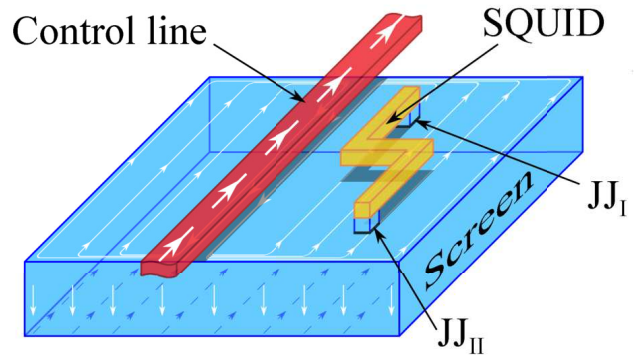


Рис. 6. Схематическое изображение распределения сверхпроводящих токов в системе «тонкая пленка над сверхпроводящим экраном», получаемое с использованием метода замыкания

времени), получаем запись передаточной функции в форме (7), (8) с точностью до нормировки обоих уравнений на критический ток контакта Джозефсона I_c . Коэффициенты k_i определяются как

$$k_1 = \frac{2}{m_{in}} \frac{l_a + l_{out}}{l_a + 2l_{out}}, \quad (23)$$

$$k_2 = l + \frac{l_a l_{out}}{l_a + l_{out}} = l_t, \quad (24)$$

$$k_3 = \frac{l_{sh}}{l_{sq}} \frac{m_{out}}{l_{out}}, \quad (25)$$

$$k_4 = \frac{m_{in}}{2l_a}, \quad (26)$$

а сдвиговые слагаемые определяются начальным состоянием образца:

$$\varepsilon = m_{out} \frac{\phi_{sq}}{l_{sq}} \frac{l_{sh}}{l_{out}}, \quad (27)$$

$$\zeta = i_{sq}^{(0)} \left(\frac{l_{out} l_{sq}}{l_{sh} m_{out}} - \frac{m_{out}}{l_a} \right) - \phi_{sq} \frac{l_{out}}{l_{sh} m_{out}}. \quad (28)$$

Таким образом, форма экспериментальных кривых на рис. 4, описываемая уравнениями (7), (8), качественно соответствует ожидаемой, а параметрическая переменная t представляет собой разность фаз φ на контакте JJ_N . Используя физический смысл параметрической переменной, можно выразить сдвиговые слагаемые через значение начальной джозефсоновской фазы φ_0 с помощью выражений (7), (8):

$$\varepsilon = \varphi_0 + l_t \sin \varphi_0, \quad (29)$$

$$\zeta = \sin \varphi_0. \quad (30)$$

Из уравнений (29), (30) следует, что ζ — начальный ток через контакт JJ_N , а ε — эффективный

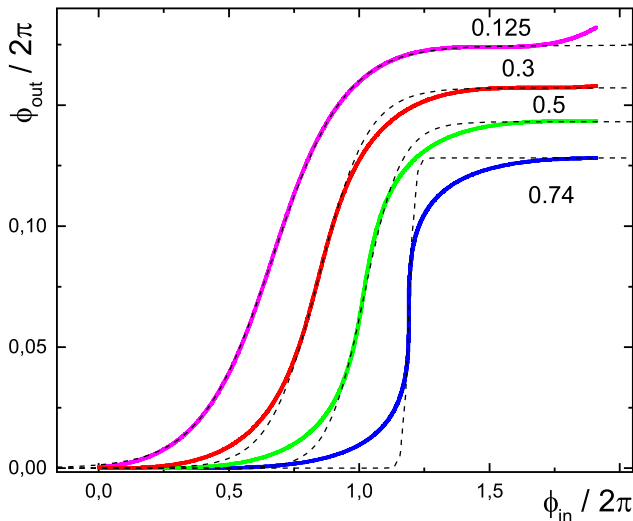


Рис. 7. Расчетные передаточные функции сигма-нейрона при разных значениях индуктивности джозефсоновского плеча (указаны на рисунке). Выходная индуктивность $l_{out} = 0.3$, а величина l_a определяется согласно уравнению (4). Штриховые линии показывают наилучшую аппроксимацию сигмоидальной зависимостью вида (6). Все кривые сдвинуты относительно горизонтальной оси на произвольную величину для наглядности. Расчет проводился на основе выражений (16), (17)

начальный поток через нейрон. Последнее вытекает из аналогии между (29) и условием баланса фаз для одноконтактного интерферометра (см., например, формулу (3) в [51]). Уравнения (27)–(30) позволяют получить связь величин $i_{sq}^{(0)}$, ϕ_{sq} , и φ_0 , точнее, выразить любые два параметра через третий.

6. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В табл. 1 приведены значения коэффициентов k_i , вычисленных по формулам (23)–(26) с использованием оценок из разд. 2, а также полученных при аппроксимации экспериментальных данных по уравнениям (7), (8) в разд. 4. Обращает на себя внимание неожиданно хорошее (с расхождением порядка 5%) совпадение значений коэффициентов k_{1-3} , опреде-

Таблица 1. Коэффициенты передаточной функции (7), (8), рассчитанные на основе выражений (23)–(26) (строка «Теория») и полученные при аппроксимации экспериментальных данных (строка «Эксперимент»)

	k_1	k_2	k_3	k_4
Теория	7.56	0.98	0.099	0.038
Эксперимент	7.69	0.99	0.105	0.103

ляющих период передаточной функции по входному сигналу, эффективную индуктивность нейрона и амплитуду изменения передаточной функции соответственно. Однако экспериментальное значение коэффициента k_4 , описывающее линейную передачу входного сигнала на выход нейрона, превышает оценочное почти в три раза. Это свидетельствует о непосредственной передаче части входного потока в измерительную цепь. В рамках развитого выше подхода учет взаимной индуктивности M_{sq} измерительного СКВИДа и контрольной линии может быть сделан путем добавления в выражение (14) слагаемого $m_{sq} i_{cl}$, где m_{sq} — значение M_{sq} , нормированное на джозефсоновскую индуктивность. При этом для сохранения условия $\Phi_{sq} = \text{const}$ потребуется дополнительный компенсирующий ток $M_{sq} I_{cl} / L_{sq}$, а для разницы экспериментального и теоретического коэффициентов k_4 (Δk_4) имеем согласно (8)

$$\Delta k_4 = M_{sq} / k_3 L_{sq}. \quad (31)$$

Подставляя значения из табл. 1 и экспериментальную величину L_{sq} , имеем оценку $M_{sq}^{(exp)} \simeq 0.1$ пГн.

Механизм линейной передачи входного сигнала в измерительную цепь выглядит следующим образом. Используя принцип замыкания (см. [60], § 9.5) можно показать, что по сверхпроводящему экрану вне контрольной линии течет поверхностный ток с линейной плотностью (в среднем) $I_{cl} / 2w_{scr}$, где $w_{scr} = 330$ мкм — ширина экрана, а множитель 2 учитывает протекание сверхтока по обеим поверхностям экрана. Под контрольной линией течет ток, равный и противоположный контрольному в соответствии с методом изображений. Магнитный поток, передаваемый в петлю измерительного СКВИДа, может быть записан с учетом формул (1)–(3) в виде

$$\Phi_m = \left(L_{\square}^{(5)} \sum \frac{w_{sq}}{2w_{scr}} N \right) I_{cl}, \quad (32)$$

где w_{sq} — ширина участка петли СКВИДа, параллельного контрольной линии, N — число квадратов на нем, а суммирование проводится по участкам постоянной ширины. Подстановка размеров исследованного образца дает $M_{sq}^{(theor)} = 0.12$ пГн, что совпадает по порядку величины с экспериментальным значением. Несмотря на малость величины M_{sq} , передаваемый за счет этого эффекта магнитный поток довольно заметен: порядка 0.2 кванта на период передаточной функции. Очевидно, что это связано с малой взаимной индуктивностью образца с контрольной линией M_{in} , приводящей к большой величине T_{cl} .

В свою очередь, малость величины M_{in} в рассматриваемой конструкции сигма-нейрона связана с необходимостью выполнить требования индуктивной связи контрольной линии с образцом, и сигмоидальной формы передаточной функции. Первое условие предполагает расположение контакта Джоузефсона и участка джоузефсоновского плеча нейрона вне контрольной линии. Следствием является ограничение снизу на длину и, следовательно, на минимальную индуктивность джоузефсоновского плеча. Однако выполнение второго условия требует малости величины l . На рис. 7 приведены расчетные передаточные функции сигма-нейрона при разных значениях величины l при условии выполнения критерия (4). Видно, что передаточная функция хорошо описывается сигмоидальной зависимостью вида (6) только при малых значениях l , а с увеличением индуктивности джоузефсоновского плеча форма передаточной функции стремится к ступенчатой. Поиск путей выполнения упомянутых выше условий является предметом работ по совершенствованию конструкции сигма-нейрона.

Очевидным способом является использование более совершенных технологических методов для изготовления образцов, поскольку форма кривой определяется *нормированным* значением индуктивности джоузефсоновского плеча. В частности, простое уменьшение размера контакта в 7 раз (до 2 мкм) приведет к 50-кратному уменьшению критического тока (менее 1 мкА) и такому же росту джоузефсоновской индуктивности. При этом величина геометрической индуктивности L может быть увеличена до 50 раз при сохранении значения $l = 0.4$, полученного в данной работе. Полученное приращение длины может быть направлено на увеличение взаимной индуктивности с приемным контуром. Еще одним решением может быть уменьшение относительной ширины индуктивной линии измерительного СКВИДа. Согласно уравнению (32), уменьшение величины M_{sq} может быть достигнуто путем увеличения ширины экрана, либо путем уменьшения размеров структуры в целом при неизменной величине w_{scr} . Еще одним направлением совершенствования конструкции сигма-нейрона может быть оптимизация формы и соединений индуктивных линий с целью повышения чувствительности к входному сигналу.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе была экспериментально опробована простейшая топология сигма-нейрона, предполагающая изготовление образца

в виде многослойной тонкопленочной структуры над толстым сверхпроводящим экраном. Измерена передаточная функция образца, представляющая собой сумму сигмоидальной и линейной компонент. Обнаружена неожиданно большая передача входного сигнала в измерительную цепь, вызванная малой взаимной индуктивностью нейрона и контрольной линии. Предложены направления совершенствования конструкции нейрона с целью минимизации обнаруженного эффекта.

Финансирование. Экспериментальное исследование и анализ передаточной функции (см. разд. 4 и 6) проводились в ИФТТ РАН при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-72-00053). Изготовление образца, включая разработку технологических указаний (см. разд. 2), проводились специалистами НИТУ МИСиС в рамках программы исследований лаборатории сверхпроводящих метаматериалов. Разработка и анализ конструкции практического сигма-нейрона (см. разд. 3) были выполнены в рамках программы исследований отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ. Модель стационарного состояния практического сигма-нейрона (см. разд. 5) была сформулирована в рамках производственной практики аспиранта МФТИ А. С. Ионина.

Благодарности. Авторы благодарны В. Н. Шилову и Н. С. Степакову за помощь в изготовлении образцов и проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Bartolozzi, G. Indiveri, and E. Donati, *Embodied Neuromorphic Intelligence*, Naturecommunications **13**, 1 (2022).
2. C. D. Schuman, S. R. Kulkarni, M. Parsa et al., *Opportunities for Neuromorphic Computing Algorithms and Applications*, Nature Computational Science **2**, 10 (2022).
3. B. J. Shastri, A. N. Tait, T. Ferreira de Lima et al., *Photonics for Artificial Intelligence and Neuromorphic Computing*, Nature Photonics **15**, 102 (2021).
4. M. Davies, A. Wild, G. Orchard et al., *Advancing Neuromorphic Computing with Loihi: A Survey of Results and Outlook*, Proceedings of the IEEE **109**, 911 (2021).
5. D. Marković, A. Mizrahi, D. Querlioz et al., *Physics for Neuromorphic Computing*, Nature Reviews Physics **2**, 499 (2020).

6. D. Marković and J. Grollier, *Quantum Neuromorphic Computing*, Applied Physics Letters **117**, 150501 (2020).
7. Y. van De Burgt, A. Melianas, S. T. Keene et al., *Organic Electronics for Neuromorphic Computing*, Nature Electronics **1**, 386 (2018).
8. C. D. Schuman, T. E. Potok, R. M. Patton et al., *A Survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware*, arXiv preprint arXiv:1705.06963 (2017).
9. G. W. Burr, R. M. Shelby, A. Sebastian et al., *Neuromorphic Computing Using Non-volatile Memory*, Advances in Physics: X, **2**, 89 (2017).
10. Furber, S. *Large-scale neuromorphic computing systems*, Journal of neural engineering **13**, 051001 (2016).
11. S. K. Esser, R. Appuswamy, P. Merolla et al., *Backpropagation for Energy-Efficient Neuromorphic Computing*, Advances in neural information processing systems **28** (2015).
12. H. Markram, E. Muller, S. Ramaswamy et al., *Reconstruction and Simulation of Neocortical Microcircuitry*, Cell **163**, 456 (2015).
13. D. Monroe, *Neuromorphic Computing Gets Ready for the (Really) Big Time*, Communications of the ACM **57**, 13 (2014).
14. <https://videocardz.com/newz/tesla-d1-chip-features-50-billion-transistors-scales-up-to-1-1-exaflops-with-exapod>
15. R. Irwin, S. Dimitriadis, J. He et al., *Chemformer: a Pretrained Transformer for Computational Chemistry*, Machine Learning: Science and Technology **3**, 015022 (2022).
16. H. Tao, T. Wu, M. Aldeghi et al., *Nanoparticle Synthesis Assisted by Machine Learning*, Nature Reviews Materials **6**, 701 (2021).
17. G. R. Khattak, S. Vallecorsa, F. Carminati et al., *High Energy Physics Calorimeter Detector Simulation Using Generative Adversarial Networks with Domain Related Constraints*, IEEE Access **9**, 108899 (2021).
18. Y. Meurice, J. C. Osborn, R. Sakai et al., *Tensor Networks for High Energy Physics: Contribution to Snowmass 2021*, arXiv preprint arXiv:2203.04902 (2022).
19. R. Wang and R. Yu, *Physics-guided Deep Learning for Dynamical Systems: A Survey*, arXiv preprint arXiv:2107.01272 (2021).
20. J. Gilman, L. Walls, L. Bandiera et al., *Statistical Design of Experiments for Synthetic Biology*, ACS Synthetic Biology **10**, 1 (2021).
21. Y. Ren, T. Chakraborty, S. Doijad et al., *Prediction of Antimicrobial Resistance Based on Whole- Genome Sequencing and Machine Learning*, Bioinformatics **38**, 325 (2022).
22. J. Gangiredla, H. Rand, D. Benisatto et al., *GalaxyTrakr: a Distributed Analysis Tool for Public Health Whole Genome Sequence Data Accessible to Non-bioinformaticians*, BMC genomics **22**, 1 (2021).
23. <https://irds.ieee.org/editions/2022/more-moore>
24. <https://irds.ieee.org/editions/2022/irds%E2%84%A2-2022-cryogenic-electronics-and-quantum-information-processing>
25. C. E. Leiserson, N. C. Thompson, J. S. Emer et al., *There's Plenty of Room at the Top: What Will Drive Computer Performance after Moore's Law?* Science **368**, eaam9744 (2020).
26. T. N. Theis and H. S. P. Wong, *The End of Moore's Law: A New Beginning for Information Technology*, Computing in Science Engineering **19**, 41 (2017).
27. I. I. Soloviev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy et al., *Beyond Moore's Technologies: Operation Principles of a Superconductor Alternative*, Beilstein Journal of Nanotechnology **8**, 2689 (2017).
28. <https://www.technologyreview.com/2020/02/24/905789/were-not-prepared-for-the-end-of-moores-law/>
29. M. Campbell, *Computational Acceleration: Offense in Depth*, Computer **54**, 55 (2021).
30. <https://www.techpowerup.com/284936/intel-rebadges-10nm-enhanced-superfin-node-as-intel-7-invents-other-creative-node-names?cp=2>
31. O. A. Mukhanov, V. K. Semenov, and K. K. Likharev, *Ultimate Performance of RSFQ Logic Circuits*, IEEE Transactions on Magnetics **23**, 759 (1987).
32. D. E. Kirichenko, S. Sarwana, and A. F. Kirichenko, *Zero Static Power Dissipation Biasing of RSFQ Circuits*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **21**, 776 (2011).
33. O. A. Mukhanov, *Energy-Efficient Single Flux Quantum Technology*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **21**, 760 (2011).

34. M. H. Volkmann, A. Sahu, C. J. Fourie et al., *Implementation of Energy Efficient Single Flux Quantum Digital Circuits with Sub-aJ/bit Operation*, Superconductor Science and Technology **26**, 015002 (2012).
35. M. Tanaka, M. Ito, A. Kitayama et al., *18-GHz, 4.0-aJ/bit Operation of Ultra-Low-Energy Rapid Single-Flux-Quantum Shift Registers*, Japanese Journal of Applied Physics **51**, 053102 (2012).
36. Q. P. Herr, A. Y. Herr, O. T. Oberg et al., *Ultra-low-power Superconductor Logic*, Journal of Applied Physics **109**, 103903 (2011).
37. A. F. Kirichenko, I. V. Vernik, J. A. Vivalda et al., *ERSFQ 8-bit Parallel Adders as a Process Benchmark*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **25**, 1 (2014).
38. A. F. Kirichenko, I. V. Vernik, O. A. Mukhanov et al., *ERSFQ 4-to-16 Decoder for Energy-Efficient RAM*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **25**, 1 (2014).
39. I. V. Vernik, A. F. Kirichenko, O. A. Mukhanov et al., *Energy-Efficient and Compact ERSFQ Decoder for Cryogenic RAM*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **27**, 1 (2016).
40. N. K. Katam, O. Mukhanov, and M. Pedram, *Simulation Analysis and Energy-Saving Techniques for ERSFQ Circuits*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **29**, 1 (2019).
41. M. A. Manheimer, *Cryogenic Computing Complexity Program: Phase 1 Introduction*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **25**, 1 (2015).
42. A. F. Kirichenko, I. V. Vernik, M. Y. Kamkar et al., *ERSFQ 8-bit Parallel Arithmetic Logic Unit*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **29**, 1 (2019).
43. N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi et al., *An Adiabatic Quantum Flux Parametron as an Ultra-low-power Logic Device*, Superconductor Science and Technology **26**, 035010 (2013).
44. V. Semenov, G. Danilov, and D. Averin, *Negative-Inductance SQUID as the Basic Element of Reversible Josephson-Junction Circuits*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **13**, 938 (2003).
45. V. Semenov, G. Danilov, and D. Averin, *Classical and Quantum Operation Modes of the Reversible Josephson-Junction Logic Circuits*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **17**, 455 (2007).
46. И. И. Соловьев, Г. С. Хисматуллин, Н. В. Кленов и др., *π-контакты в ячейках адиабатической сверхпроводниковой логики*, Радиотехника и электроника **67**, 1232 (2022).
47. N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, *Adiabatic Quantum-Flux-Parametron Cell Library Adopting Minimalist Design*, Journal of Applied Physics **117**, 173912 (2015).
48. Q. Xu, Y. Yamanashi, C. L. Ayala et al., *Design of an Extremely Energy-Efficient Hardware Algorithm Using Adiabatic Superconductor Logic*, 2015 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC), Nagoya, Japan (2015), p. 1.
49. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev et al., *Adiabatic Superconducting Cells for Ultra-low-power Artificial Neural Networks*, Beilstein journal of nanotechnology **7**, 1397 (2016).
50. N. V. Klenov, A. E. Schegolev, I. I. Soloviev et al., *Energy Efficient Superconducting Neural Networks for High-speed Intellectual Data Processing Systems*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **28**, 1301006 (2018).
51. I. I. Soloviev, A. E. Schegolev, N. V. Klenov et al., *Adiabatic Superconducting Artificial Neural Network: Basic Cells*, Journal of Applied Physics **124**, 152113 (2018).
52. N. V. Klenov, A. V. Kuznetsov, A. E. Schegolev et al., *A Neuron Based on a Single Flux Qubit*, Low Temperature Physics **45**, 769 (2019).
53. S. Bakurskiy, M. Kupriyanov, N. V. Klenov et al., *Controlling the Proximity in a Co/Nb Multilayer: the Properties of Electronic Transport*, Beilstein Journal of Nanotechnology **11**, 1336 (2020).
54. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev et al., *Superconducting Neural Networks: from an Idea to Fundamentals and, further, to Application*, Nanobiotechnology Reports **16**, 811 (2021).
55. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, I. I. Soloviev et al., *Learning Cell for Superconducting Neural Networks*, Superconductor Science and Technology **34**, 015006 (2021).
56. M. Bastrakova, A. Gorchavkina, A. Schegolev et al., *Dynamic Processes in a Superconducting Adiabatic Neuron with Non-shunted Josephson Contacts*, Symmetry **13**, 1735 (2021).
57. A. E. Schegolev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy et al., *Tunable Superconducting Neurons for Networks Based on Radial Basis Functions*, Beilstein Journal of Nanotechnology **13**, 444 (2022).

58. M. V. Bastrakova, D. S. Pashin, D. A. Rybin et al., *A Superconducting Adiabatic Neuron in a Quantum Regime*, Beilstein Journal of Nanotechnology **13**, 653 (2022).
59. L. N. Kanal, *Perceptron*. In *Encyclopedia of Computer Science* John Wiley and Sons: Chichester, UK (2003).
60. В. В. Шмидт, *Введение в физику сверхпроводников*, М.: МЦНМО, Изд. 2-е (2000).
61. А. Бароне и Дж. Паттерно, *Эффект Джозефсона*, Мир, Москва (1984).
62. К. К. Лихарев, *Введение в динамику джозефсоновских переходов*, Наука, Москва (1985).
63. Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, K. V. Kulikov et al., *Modeling of LC-shunted Intrinsic Josephson Junctions in High-Tc Superconductors*, Superconductor Science and Technology **30**, 024006 (2017).
64. Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, and G. Filatrella, *Dependence of the Maximal Superconducting Current on the Resonance Frequency in a Shunted Josephson Junction*, Journal of Experimental and Theoretical Physics **125**, 781 (2017).
65. S. K. Tolpygo, J. L. Mallek, V. Bolkhovskiy et al., *Progress toward Superconductor Electronics Fabrication Process with Planarized NbN and NbN/Nb Layers*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **33**, 1 (2023).
66. М. С. Шевченко, Л. В. Филиппенко, О. С. Киселев и др., *Джозефсоновские туннельные переходы с интегральным СИН-шунтированием*, Физика твердого тела **64**, 1223 (2022).
67. M. S. Shevchenko, A. A. Atepalikhin, F. V. Khan et al., *Shunted Josephson Junctions and Optimization of Niobium Integrated Matching Circuits*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **32**, 1100205 (2022).
68. A. Gubin, K. Il'in, S. Vitusevich et al., *Dependence of Magnetic Penetration Depth on the Thickness of Superconducting Nb Thin Films*, Physical Review B **72**, 064503 (2005).