

01,02

## Численное моделирование конструкции сверхпроводящего сигма-нейрона

© А.С. Ионин<sup>1,2,4</sup>, С.В. Егоров<sup>1</sup>, М.С. Сидельников<sup>1</sup>, Л.Н. Карелина<sup>1</sup>, Н.С. Шуравин<sup>1</sup>,  
М.М. Хапаев<sup>1,3</sup>, В.В. Больгинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН,  
Черноголовка, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>4</sup> ООО «СП „Квант“,  
Москва, Россия

E-mail: sasha-ionin@mail.ru

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Представлены результаты численного моделирования распределения сверхпроводящих токов в прототипе адиабатического сигма-нейрона, реализованного в 2023 г. в виде многослойной тонкопленочной структуры над толстым сверхпроводящим экраном. Расчет проводился в программе 3D-MLSI, допускающей учет трехмерной конструкции экспериментального образца. Получено хорошее согласование значений собственных индуктивностей частей сигма-нейрона с ранее полученными численными оценками. Показано, что сверхпроводящий экран не обеспечивает достаточной независимости элементов нейрона, что выражается в ненулевых значениях соответствующих компонент матрицы индуктивностей. Это соответствует имеющимся экспериментальным данным и требует обобщения ранее предложенных моделей стационарного состояния сверхпроводящего сигма-нейрона. Предложен метод компенсации паразитной связи задающего и считывающего элементов нейрона путем изменения формы управляющей линии.

**Ключевые слова:** сверхпроводимость, эффект Джозефсона, нейроморфные вычисления, тонкопленочные структуры, численное моделирование.

DOI: 10.61011/FTT.2024.07.58366.25NN

### 1. Введение

Задача создания сверхпроводящих нейроморфных устройств привлекает большой интерес исследователей в связи с ростом числа задач и объемов обрабатываемой информации. Одним из направлений исследований является разработка адиабатических нейронов (см. например, [1–10]), удовлетворяющих требованию физической обратимости, когда в каждый момент времени система находится в квазистационарном состоянии [9]. Основной характеристикой нейроморфных элементов является передаточная функция, то есть зависимость выходного сигнала от входного. В работах [1,3] был предложен сверхпроводящий сигма-нейрон, представляющий собой одноконтный интерферометр, часть контура которого шунтирована дополнительной индуктивностью, используемой для считывания выходного сигнала (магнитного потока). Входным сигналом также является магнитный поток, задаваемый в приемный контур. Было продемонстрировано, что передаточная функция такой структуры может быть близка к сигмоидальной зависимости, необходимой для реализации сверхпроводящего персептрона, являющегося самым распространенным видом нейронных сетей. В работе [11] была представлена

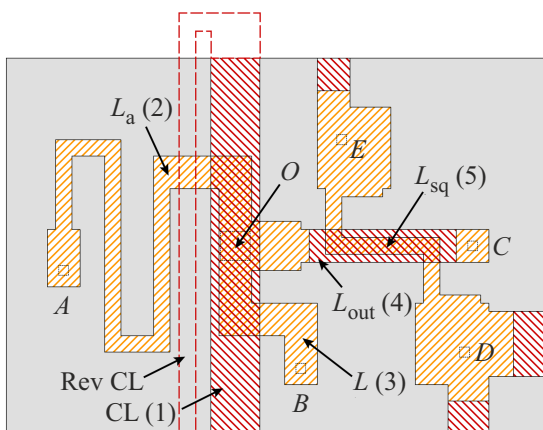
экспериментальная реализация подобного устройства в виде многослойной тонкопленочной структуры над толстым сверхпроводящим экраном. В целом эксперименты подтвердили общие положения теоретических исследований [1,3], однако продемонстрировали необходимость учета дополнительных обстоятельств, в частности воздействия процесса измерения на состояние образца и возможности непосредственной передачи магнитного потока между элементами схемы через сверхпроводящий экран.

Для успешной реализации сверхпроводящего сигма-нейрона крайне важно уметь проектировать его элементы с заранее заданными индуктивностями, поскольку сигмоидальная передаточная функция реализуется только при выполнении определенных соотношений между последними [3]. В работе [11] для оценки индуктивностей использовались формулы модельной задачи о тонкопленочной полосе над толстым сверхпроводящим экраном (см. [12], параграф 10), причем было получено неожиданно хорошее согласие коэффициентов передаточной функции с экспериментальными результатами. Неожиданность была связана с использованием неочевидных феноменологических предположений для учета непрямой (изогнутой) формы элементов нейрона. В свя-

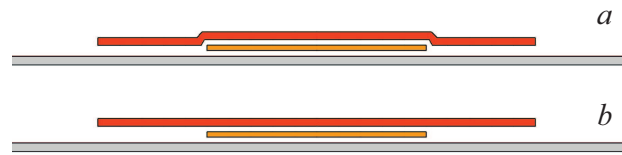
зи с этим, представляет интерес численное моделирование, предполагающее совместное решение уравнений Лондонов и Максвелла для трехмерной многослойной конструкции образца. Такая работа была начата в статье [13] с использованием программы 3D-MLSI [14], являющейся в настоящее время наиболее доступной для российских пользователей. Была получена оценка собственной индуктивности одного из частичных контуров сигма-нейрона (последовательное соединение двух из трех основных частей нейрона), индуктивности регистрирующей цепи, а также их взаимной индуктивности. Однако этих данных недостаточно, поскольку параметрическая запись передаточной функции даже изолированного сигма-нейрона (см. [3]) включает в себя индуктивности трех элементов нейрона по отдельности. Для аппроксимации передаточной функции практического образца [11] требуется дополнительно оценка взаимной индуктивности контрольной линии с приемными элементами нейрона, а также с измерительным элементом (двухконтактным СКВИДом). Целями данной работы являются расчет полной матрицы индуктивностей практического сигма-нейрона и демонстрация возможностей программы 3D-MLSI для проектирования нейроморфных интерферометрических структур.

## 2. Методы

Сигма-нейрон представляет собой совокупность индуктивных элементов  $L_a$ ,  $L$  и  $L_{out}$ , соединенных в общей точке  $O$  и замкнутых на экран в точках  $A$ ,  $B$  и  $C$  соответственно (см. рис. 1). По сравнению с теоретическими работами [1,3], „практический“ сигма-нейрон (состоящий из элементов 2–4) дополняется контрольной линией CL (элемент 1), используемой для задания входного сигнала, и считывающим СКВИДом



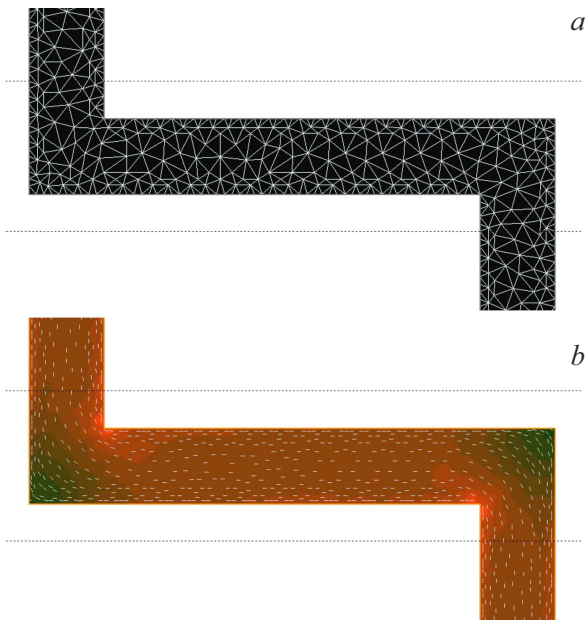
**Рис. 1.** Схематическое изображение (вид сверху) исследованной конструкции сигма-нейрона. Обозначения указаны в тексте. Цифра в скобках указывает номер строки и столбца в матрице индуктивностей (см. таблицу). Пунктиром показана „реверсивная“ полоса контрольной линии (см. обсуждение в разд. 3).



**Рис. 2.** Схематическое изображение поперечного сечения областей наложения полосковых линий над сверхпроводящим экраном (не в масштабе). Цвета слоев соответствуют рис. 1: серый —  $M1$  (нижний слой), оранжевый —  $M2$  (средний слой), красный —  $M3$  (верхний слой). (a) реальный профиль, (b) моделируемый (упрощенный) профиль.

с индуктивностью петли  $L_{sq}$  (элемент 5). В точках  $A$  и  $C$  сверхпроводящие полосковые линии в образце замыкаются непосредственно на экран через окна в слое изоляции, а замыкания в точках  $B$ ,  $D$  и  $E$  производится через туннельные контакты Джозефсона. Последнее обстоятельство не имеет значения для расчета компонент матрицы индуктивности, поскольку они определяются конфигурациями протекающих токов и не зависят от изменения сверхпроводящей фазы в месте замыкания. Более подробное описание конструкции сигма-нейрона и технологического процесса его изготовления приведено в статье [11].

Изучаемая конструкция сигма-нейрона содержит три сверхпроводящих слоя, расположенных на разной высоте. Первый металлический слой  $M1$  (серый прямоугольник на рис. 1, 2) является одновременно сверхпроводящим экраном и нижним электродом для нейрона и измерительного СКВИДа. Его толщина составляет 300 нм. Во втором сверхпроводящем слое  $M2$  располагается большая часть индуктивных элементов (оранжевая штриховка с наклоном вправо на рис. 1). Этот слой имеет толщину 100 нм и отделен от поверхности экрана зазором 330 нм. Третий слой  $M3$  (красная штриховка с наклоном влево на рис. 1) имеет толщину 450 нм и отделен от экрана зазором 760 нм (который складывается из двух зазоров по 330 нм и толщины второго сверхпроводящего слоя 100 нм). Зона наложения второго и третьего слоев используется для индуктивной связи между элементами схемы (см. рис. 2, a). В частности, контрольная линия связана с приемными элементами  $L$  и  $L_a$ , а петля СКВИДа — с элементом  $L_{out}$ . На основании ранее разработанного чертежа был создан файл входных данных, описывающий конструкцию нейрона для программы 3D-MLSI в несколько упрощенном виде. Основными упрощениями предположениями являлись постоянство толщины каждого из слоев, а также постоянство их высоты над экраном (см. рис. 2, b). Конструкция образца предусматривает 5 контактов между слоями  $M1$  и  $M2$  ( $A-E$ ), замыкающих элементы нейрона или измерительного СКВИДа на сверхпроводящий экран с целью образования замкнутых сверхпроводящих контуров. В точке соединения элементов нейрона „O“ (см. рис. 1) был расположен виртуальный (отсутствовавший в реаль-



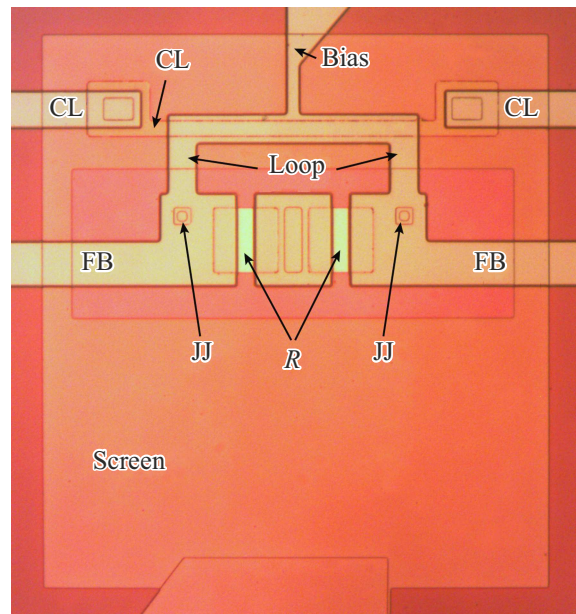
**Рис. 3.** (а) Треугольная сетка переменного размера, построенная для петли СКВИДа (элемент 5 на рис. 1). (б) Рассчитанное распределение сверхтока при его протекании по петле СКВИДа. Более светлым областям соответствует большая плотность тока. Белыми черточками показано направление тока.

ности) контакт между указанными слоями ( $M1$  и  $M2$ ), необходимый для независимого задания токов в элементы нейрона в процессе численного моделирования. Программа моделировала протекание сверхтока по пяти токовым путям. Первый соответствует протеканию тока по прямоугольной полосе контрольной линии, лежащей целиком в слое  $M3$  (красная штриховка с наклоном влево на рис. 1). Остальные четыре контура (ОАО, ОВО, ОСО и ДЕД на рис. 1) моделировались в виде кольца, замкнутого через сверхпроводящий экран посредством „виртуальных“ или „реальных“ контактов. Отметим, что в работе [13] был представлен расчет собственных и взаимной индуктивностей контуров АСА и ДЕД для несколько отличной геометрии элементов нейрона.

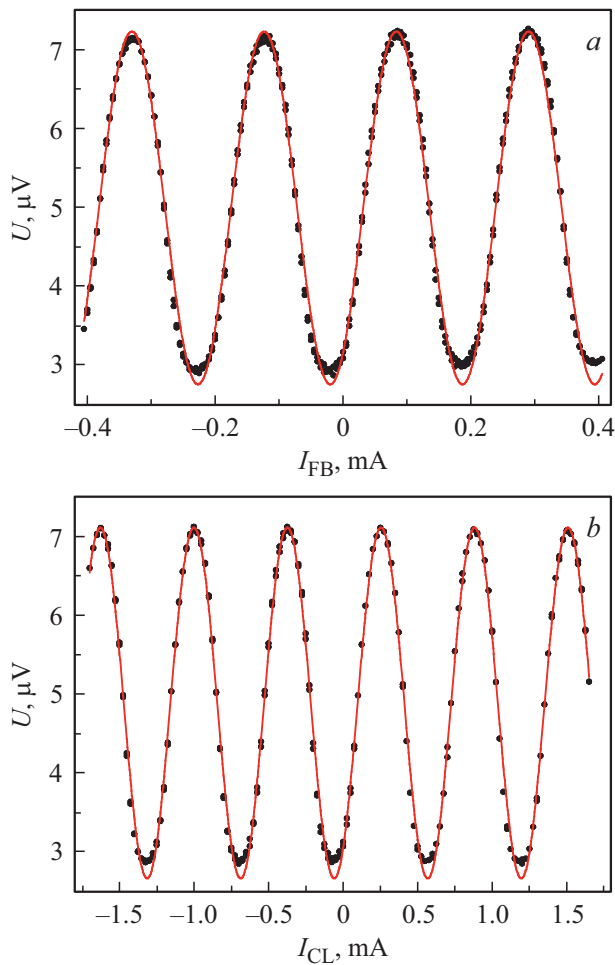
Параметрами расчета являются лондоновская длина  $80\text{ nm}$  [15], а также минимальный и максимальный шаг сетки дискретизации. Формирование сетки в программе 3D-MLSI производится автоматически с помощью известного генератора треугольных сеток Triangle [16]. Минимальный шаг сетки  $1\text{ }\mu\text{m}$  используется в окрестности краев сверхпроводящих структур (см. рис. 3, а), где величина и направление сверхтока сильно изменяются в пространстве (см. рис. 3, б). С удалением от краев сверхпроводящих элементов шаг сетки увеличивался до  $3\text{ }\mu\text{m}$  (см. рис. 3, а) с целью сокращения количества треугольников и времени вычисления. Результатом расчетов является распределение плотности тока в слоях тонкопленочной структуры, а также матрица индуктивностей размером  $5 \times 5$ , содержащая собственные и

взаимные индуктивности всех рассмотренных элементов. В силу симметричности матрица индуктивностей содержит всего 15 различных компонент. Подробное описание математической модели и вычислительных методов, реализованных в программе 3D-MLSI приведены, например, в работах [13,14]. Вычисления проводились на процессоре AMD Ryzen 9 5900X 3.70 GHz в одноядерном режиме.

Для проверки соответствия моделирования в 3D-MLSI эксперименту было проведено исследование более простых структур: одноконтурных двухконтактных интерферометров, изготовленных по тому же техпроцессу, что и в работах [11,17]. Интерферометры представляли собой П-образную структуру (см. рис. 4), причем замыкание петли интерферометра на экран происходило в основании буквы П через туннельные контакты Джозефсона (КД). Оба КД были шунтированы сопротивлениями номиналом  $0.6\text{ }\Omega$  для обеспечения однозначности их вольт-амперных характеристик. Ток питания образца задавался в центр петли (симметрично) по специальной „линии питания“ (сверху на рис. 4) и выводился через сверхпроводящий экран. К петле СКВИДа была подключена специальная сигнальная линия („линия обратной связи“, FB), позволяющая пропускать ток через петлю интерферометра и тем самым создавать магнитный поток через нее. Название связано с использованием подобной линии для задания сигнала обратной связи



**Рис. 4.** Микрофотография тестовой интерферометрической структуры с наложением петли интерферометра и контрольной линии. Петля интерферометра (Loop) изготовлена в слое  $M3$  и лежит над контрольной линией, лежащей в слое  $M2$ . Структура сформирована над сверхпроводящим экраном (Screen). На схеме обозначены (см. определения в тексте): контакты Джозефсона JJ; шунтирующие сопротивления R; линия питания bias; линия обратной связи FB и контрольная линия CL.



**Рис. 5.** Вольт-потоковые характеристики интерферометра, показанного на рис. 4, полученные при пропускании управляющего тока по линии обратной связи (*a*) и по контрольной линии (*b*). Точки — экспериментальные данные, красные линии — аппроксимация синусоидальной зависимостью, использованной для определения периода. Ток питания  $15\ \mu\text{A}$ , температура эксперимента  $1.5\ \text{K}$ .

Матрица индуктивностей элементов прототипа сигма-нейрона, реализованного в статье [11]

$L_{jk}$ , pH	1 (CL)	2 ( $L_a$ )	3 ( $L$ )	4 ( $L_{out}$ )	5 ( $L_{sq}$ )
1 (CL)	8.20	0.75	0.69	0.00	0.07
2 ( $L_a$ )	0.75	21.20	0.05	-0.05	0.00
3 ( $L$ )	0.69	0.05	2.65	0.05	0.00
4 ( $L_{out}$ )	0.00	-0.05	0.05	5.91	-1.53
5 ( $L_{sq}$ )	0.07	0.00	0.00	-1.53	7.64

при исследовании сверхпроводящего нейрона [11]. Под переключателем „буквы П“ проходила „контрольная линия“ (control line, CL), отделенная от нее вторым слоем изоляции.

Разработанная конструкция позволяла оценить как собственную индуктивность  $L$  петли СКВИДа, так и взаимную индуктивность  $M$  образца с контрольной линией. Для этого измерялась так называемая вольт-потоковая характеристика: периодическая зависимость постоянного (усредненного) напряжения  $U$ , возникающего на СКВИДе в нестационарном режиме, от тока в линии обратной связи  $I_{FB}$  (рис. 5, *a*) или в контрольной линии  $I_{CL}$  (рис. 5, *b*). Первым способом определяется собственная индуктивность петли 2-контактного интерферометра как  $L = \Phi_0 / \Delta I_{FB}$  ( $\Phi_0$  — квант магнитного потока,  $\Delta I_{FB}$  — период функции  $U(I_{FB})$ ), вторым — взаимная индуктивность СКВИДа и контрольной линии  $M = \Phi_0 / \Delta I_{CL}$ . Периодичность кривых  $U(I_{FB})$  и  $U(I_{CL})$  следует из модели резистивно-шунтированного контакта Джозефсона (RSJ) при учете периодической зависимости критического тока двухконтактного СКВИДа от магнитного потока через его петлю [12]. Полученные значения  $L$  и  $M$  сравнивались с результатами моделирования в программе 3D-MLSI, проведенного с использованием геометрии реализованного образца в приближении плоских слоев (см. рис. 2, *b*).

### 3. Результаты

Начнем с изложения результатов экспериментального исследования характеристик одноконтурных двухконтактных интерферометров. На рис. 5 приведены типичные вольтпотоковые характеристики образцов, полученные двумя способами: при задании сигнала от линии обратной связи и от контрольной линии. Кривые могут быть аппроксимированы синусоидальной зависимостью, причем точность определения периода по методу наименьших квадратов лучше 1%. Собственная индуктивность петли составляет  $10.0\ \text{pH}$ , а взаимная —  $3.3\ \text{pH}$ . Численное моделирование дает значения  $10.5\ \text{pH}$  для собственной индуктивности петли и  $3.2\ \text{pH}$  для взаимной индуктивности. Таким образом, расчетные и фактические значения индуктивностей совпадают с точностью 3–5%, что позволяет использовать программу 3D-MLSI для моделирования конструкции сверхпроводящего нейрона.

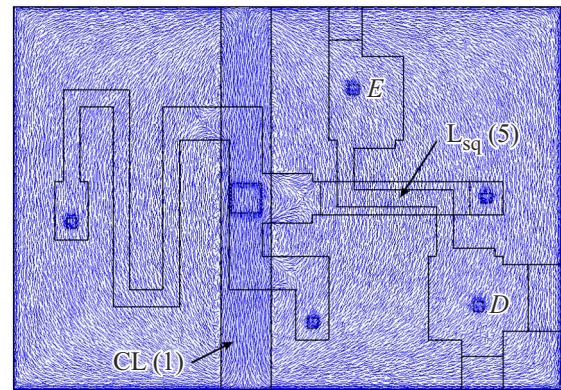
Основной результат представлен в таблице. Элементы сигма-нейрона пронумерованы в порядке „от задающего к регистрирующему элементу“, как показано на рис. 1. Собственные индуктивности элементов нейрона расположены по диагонали в центральном миноре  $3 \times 3$  матрицы индуктивностей  $L_{ik}$  (см. таблицу). Диагональный элемент  $L_{55}$  соответствует индуктивности измерительного СКВИДа. Элемент  $L_{11}$  является собственной индуктивностью контрольной линии и не входит ни в одно уравнение состояния сигма-нейрона, поскольку контрольная линия не образует замкнутый сверхпроводящий контур. Взаимодействие нейрона с измерительной схемой описывается недиагональными элементами  $L_{45} = L_{54}$ , расположенными во внешнем кольце



таблицы. Там же расположены недиагональные элементы  $L_{12} = L_{21}$ ,  $L_{13} = L_{31}$ , описывающие прием внешнего сигнала от контрольной линии. Остальные компоненты матрицы индуктивностей описывают паразитное взаимодействие элементов нейрона друг с другом. Некоторые из них заметно отличны от нуля и составляют 5–10% от „полезных“ недиагональных компонент  $L_{12}$ ,  $L_{13}$ ,  $L_{45}$ .

Интересно сравнить расчетные значения компонент  $L_{ik}$  с оценками, выполненными в статье [11] на основе формул модельной задачи о полосковой линии над толстым сверхпроводящим экраном. Оценочные значения могут рассматриваться в качестве контрольных, поскольку их использование обеспечило хорошее совпадение параметров экспериментальной и расчетной кривых. Значения собственных индуктивностей элементов нейрона согласуются с хорошей точностью (0.5–3.6%), но наблюдается занижение расчетных значений недиагональных компонент по сравнению с модельными оценками. Это может быть связано с упрощенной геометрией верхнего сверхпроводящего слоя при проведении моделирования или с погрешностями технологического процесса, приводящими к увеличению фактической взаимной индуктивности. В частности, рассчитанные „полезные“ недиагональные компоненты  $L_{12}$ ,  $L_{13}$  (определяющие период передаточной функции) и компонента  $L_{45}$  (определяющая амплитуду изменения выходного сигнала) меньше оценочных на 6–15%. Несмотря на одинаковую форму приемных участков, входной магнитный поток задается несимметричным образом в приемные плечи нейрона ( $L_{12} \neq L_{13}$ ), нарушая одно из предположений теоретических работ [1–3]. Причиной может быть неодинаковое воздействие „токов замыкания“ в сверхпроводящем экране (см. [11] и обсуждение ниже) на индуктивности  $L$  и  $L_a$ , сильно различающиеся по форме (см. рис. 1). До настоящего времени это обстоятельство, а также наличие паразитных недиагональных компонент, не учитывалось при построении теоретических моделей.

Расчеты также показали, что сверхпроводящий экран не обеспечивает полной независимости элементов сигма-нейрона друг от друга, что предполагалось при построении теоретических моделей [1–3]. В частности, было подтверждено ненулевое значение  $L_{15}$ , обеспечивающее непосредственную передачу входного сигнала в измерительную цепь. Расчетное значение примерно на 30% меньше оценочного согласно [11], хотя и совпадает по порядку величины (0.1 рН). Помимо компоненты  $L_{15}$ , довольно большие значения были получены для недиагональных компонент  $L_{23}$ ,  $L_{24}$  и  $L_{34}$ , описывающих взаимодействие элементов нейрона  $L$ ,  $L_a$  и  $L_{out}$ . Нулевое значение компоненты  $L_{14}$ , описывающей взаимодействие контрольной линии (CL) с выходной индуктивностью  $L_{out}$ , является ожидаемым в силу расположения элемента  $L_{out}$  перпендикулярно контрольной линии на оси симметрии экрана. Нулевые значения коэффициентов  $L_{25}$ ,  $L_{35}$  являются благоприятным, но неожиданным обстоятельством, поскольку петля измерительного СКВИДа (элемент 5 на рис. 1) имеет участки параллельные

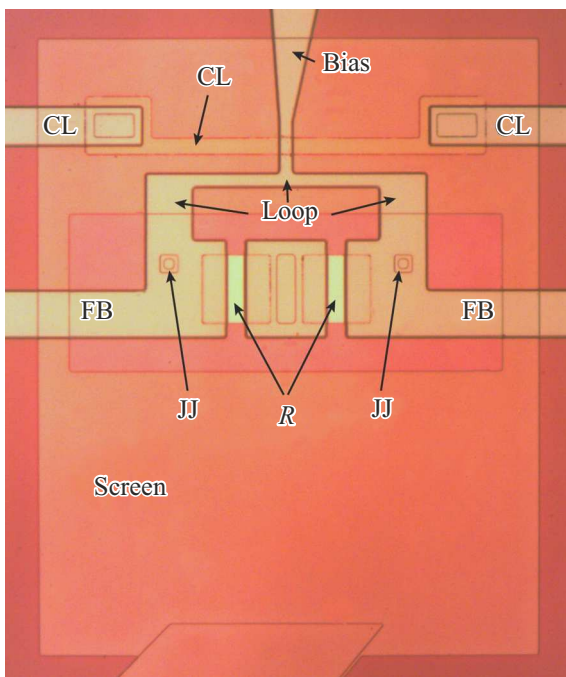


**Рис. 6.** Рассчитанное распределение токов в экране при протекании тока по контрольной линии. Синими черточками показано направление тока.

соответствующим элементам нейрона (элементы 2 и 3 на рис. 1). На данный момент мы не исключаем занижение недиагональных компонент из-за упрощения моделируемой конструкции. Тестирование и совершенствование использованной программы является предметом наших текущих исследований.

Среди паразитных недиагональных компонент, наиболее неприятной является  $L_{15}$ , описывающая непосредственное взаимодействие контрольной линии с измерительной схемой. Именно она ответственна за появление дополнительной линейной компоненты, мешающей реализации целевой сигмоидальной [11] или гауссовой [17] передаточной функции. На рис. 6 представлен пример распределения токов, возникающих в экране при протекании тока по контрольной линии. Видно, что в сверхпроводящем экране возникает „противоток“ под контрольной линией (1), который вынужден замыкаться через остальную часть экрана. Замыкающие токи имеют компоненту вдоль контура приемного СКВИДа (5), что вызывает „паразитную“ прямую передачу в него входного магнитного потока. Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают качественный анализ, приведенный в работе [11].

Наличие паразитной связи индуктивных элементов через сверхпроводящий экран наблюдалось и для случая тестовых двухконтактных интерферометров. На рис. 7 представлена микрофотография сверхпроводящего интерферометра, не содержащего наложения петли СКВИДа и контрольной линии. Тем не менее, для их взаимной индуктивности экспериментально было получено значение  $M = 0.12$  рН (см. рис. 8, а). Расчет в программе 3D-MLSI дает величину 0.18 рН. Экспериментальное значение собственной индуктивности петли интерферометра составило  $L = 13.6$  рН (см. рис. 8, б), а рассчитанное в 3D-MLSI — 14.1 рН. Таким образом, мы видим хорошее соответствие (3–5%) результатов эксперимента и моделирования в 3D-MLSI для индуктивности порядка 1–10 рН, и разумную оценку индуктивностей

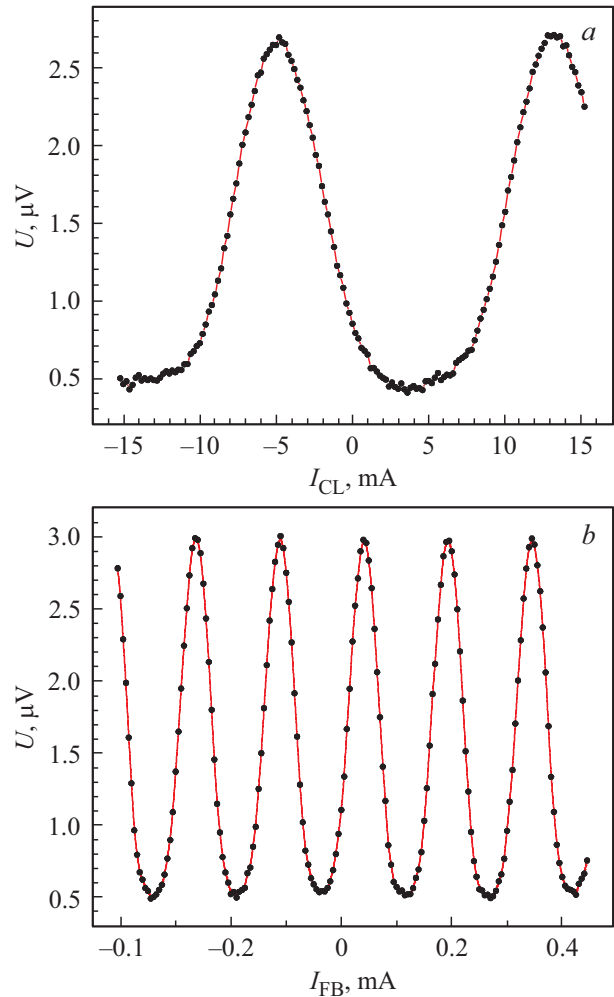


**Рис. 7.** Микрофотография тестовой интерферометрической структуры без наложения петли интерферометра и контрольной линии. Петля интерферометра (Loop) изготовлена в слое  $M3$  и лежит сбоку от контрольной линии, лежащей в слое  $M2$ . Структура сформирована над сверхпроводящим экраном (Screen). На схеме обозначены (см. определения в тексте): контакты Джозефсона JJ; шунтирующие сопротивления  $R$ ; линия питания bias; линия обратной связи FB и контрольная линия CL.

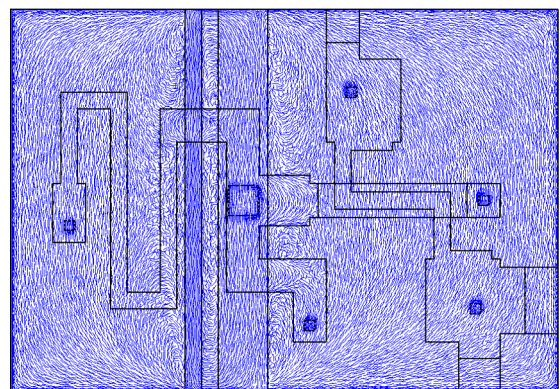
порядка  $0.1 \text{ pH}$ . Индуктивности порядка  $1 \text{ fH}$  округлялись до нуля в таблице. Отмеченные выше расхождения могут быть связаны также с несовершенством использованного технологического процесса. В настоящее время проводится тестирование 3D-MLSI с использованием образцов, изготовленных на более высоком технологическом уровне.

Уменьшение влияния замыкающих токов может быть достигнуто путем добавления в конструкцию нейрона „реверсивной“ части контрольной линии, расположенной рядом с основной и несущей ток  $I_{CL}$  в противоположном направлении. Для этого можно, например, изготовить контрольную линию в форме полупетли (см. пунктирную линию на рис. 1). В этом случае замыкающие токи сконцентрируются в зазоре между основной и реверсивной полосами (см. рис. 9), а во внешней зоне существенно ослабнут. Расчет с использованием 3D-MLSI в такой геометрии показывает уменьшение значения  $L_{15}$  в пять раз. Для сохранения неизменными „полезных“ компонент матрицы индуктивности, „реверсивная“ полоса не должна иметь наложения на элементы нейрона, хотя и может их пересекать. Помимо подавления компоненты  $L_{15}$ , использование двунаправленной контрольной линии немного увеличивает

компоненты  $L_{12}$  (на 12%) и  $L_{13}$  (на 5%), оставляя неизменными остальные недиагональные компоненты. Изменение компонент  $L_{12}$  и  $L_{13}$  говорит о связи их



**Рис. 8.** Вольт-поточковые характеристики интерферометра, показанного на рис. 7, полученные при пропускании управляющего тока по контрольной линии (a) и по линии обратной связи (b). Ток питания  $9 \mu\text{A}$ , температура эксперимента  $1.5 \text{ K}$ .



**Рис. 9.** Рассчитанное распределение токов в экране при протекании тока по двунаправленной контрольной линии. Синими черточками показано направление тока.

асимметрии ( $L_{12} \neq L_{13}$ ) с протеканием замыкающих токов, как было указано выше. В целом, увеличение  $L_{12}$  и  $L_{13}$  является положительным обстоятельством, поскольку позволяет уменьшить период передаточной функции по управляющему току (см. обсуждение в [11]). Отмеченная асимметрия может быть компенсирована небольшим увеличением длины зоны наложения элемента  $L$  с контрольной линией (см. рис. 1). Таким образом, предложенный способ подавления паразитной передачи входного сигнала в приемный контур не требует существенного изменения дизайна сигма-нейрона.

#### 4. Заключение

Проведен расчет матрицы индуктивностей прототипа сверхпроводящего сигма-нейрона на основе решения уравнений Лондонов и Максвелла при помощи программы 3D-MLSI. Применимость программы 3D-MLSI к поставленной задаче продемонстрирована путем сравнения расчетных и экспериментально измеренных величин собственных и взаимных индуктивностей тонкопленочных двухконтактных интерферометров, сформированных над сверхпроводящим экраном. Показано, что сверхпроводящий экран не обеспечивает достаточной независимости элементов нейрона, и подтвержден механизм прямой передачи входного сигнала в приемный контур через кольцевые сверхпроводящие токи, возникающие в качестве отклика на входной магнитный поток. Предложен способ минимизации этого эффекта использованием двунаправленной контрольной линии. Выявлено возникновение асимметрии входного сигнала в частичных контурах нейрона с одинаковой геометрией приемных участков, а также наличие других паразитных связей элементов нейрона. Полученные результаты говорят о необходимости разработки обобщенной модели стационарного состояния сигма-нейрона, учитывающей все недиагональные компоненты матрицы индуктивностей для анализа экспериментальных данных и проектирования сверхпроводящих нейронов следующего поколения.

#### Финансирование работы

Расчет матрицы индуктивностей сверхпроводящего сигма-нейрона и анализ полученных результатов выполнены в Институте физики твердого тела РАН при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 23-72-00053. Изготовление двухконтактных интерферометров произведено в рамках производственной практики аспиранта Московского Физико-технического института А.С. Ионина. Экспериментальное исследование двухконтактных интерферометров проведено в рамках сотрудничества с ООО СП „Квант“. Расчет собственных и взаимных индуктивностей двухконтактных интерферометров выполнен в рамках плана работ доцента Московского государственного университета им. Ломоносова (кафедра вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики) М.М. Хапаева.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] A.E. Schegolev, N.V. Klenov, I.I. Soloviev, M.V. Tereshonok. *Beilstein J. Nanotechnol.* **7**, 1397 (2016).
- [2] N.V. Klenov, A.E. Schegolev, I.I. Soloviev, S.V. Bakurskiy, M.V. Tereshonok. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28**, 7, 1301006 (2018).
- [3] I.I. Soloviev, A.E. Schegolev, N.V. Klenov, S.V. Bakurskiy, M.Yu. Kupriyanov, M.V. Tereshonok, A.V. Shadrin, V.S. Stolyarov, A.A. Golubov. *J. Appl. Phys.* **124**, 152113 (2018).
- [4] A.E. Schegolev, N.V. Klenov, I.I. Soloviev, A.L. Gudkov, M.V. Tereshonok. *Nanobiotechnology Rep.* **16**, 6, 811 (2021).
- [5] A.E. Schegolev, N.V. Klenov, I.I. Soloviev, M.V. Tereshonok. *Supercond. Sci. Technol.* **34**, 1, 015006 (2021).
- [6] M.V. Bastrakova, A. Gorchavkina, A.E. Schegolev, N.V. Klenov, I.I. Soloviev, A.M. Satanin. *Symmetry (Basel)*. **13**, 9, 1735 (2021).
- [7] A.E. Schegolev, N.V. Klenov, S.V. Bakurskiy, I.I. Soloviev, M.Yu. Kupriyanov, M.V. Tereshonok, A.S. Sidorenko. *Beilstein J. Nanotechnol.* **13**, 444 (2022).
- [8] M.V. Bastrakova, D.S. Pashin, D.A. Rybin, A.E. Schegolev, N.V. Klenov, I.I. Soloviev, A.A. Gorchavkina, A.M. Satanin. *Beilstein J. Nanotechnol.* **13**, 653 (2022).
- [9] И.И. Соловьев, Г.С. Хисматуллин, Н.В. Кленов, А.Е. Щеголев. *Радиотехника и электроника* **67**, 12, 1232 (2022).
- [10] D.S. Pashin, P.V. Pikunov, M.V. Bastrakova, A.E. Schegolev, N.V. Klenov, I.I. Soloviev. *Beilstein J. Nanotechnol.* **14**, 1116 (2023).
- [11] А.С. Ионин, Н.С. Шуравин, Л.Н. Карелина, А.Н. Россоленко, М.С. Сидельников, С.В. Егоров, В.И. Чичков, М.В. Чичков, М.В. Жданова, А.Е. Щеголев, В.В. Больгинов. *ЖЭТФ* **164**, 6(12), 1008 (2023).
- [12] В.В. Шмидт. *Введение в физику сверхпроводников. МЦНМО, М.* (2000). 402 с.
- [13] С.В. Бакурский, Н.В. Кленов, М.Ю. Куприянов, И.И. Соловьев, М.М. Хапаев. *Журн. вычисл. математики и мат. физики* **61**, 5, 885 (2021).
- [14] М.М. Хапаев, А.У. Кидиярова-Shevchenko, P. Magnelind, M.Y. Kupriyanov. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11**, 1, 1090 (2001).
- [15] A.I. Gubin, K.S. Il'in, S.A. Vitusevich, M. Siegel, N. Klein. *Phys. Rev. B* **72**, 6, 064503 (2005).
- [16] J.R. Shewchuk. *Comput. Geom. Theory Appl.* **22**, 1-3, 21 (2002).
- [17] А.С. Ионин, Л.Н. Карелина, Н.С. Шуравин, М.С. Сидельников, Ф.А. Разоренов, С.В. Егоров, В.В. Больгинов. *Письма в ЖЭТФ* **118**, 10, 761 (2023).

Редактор Т.Н. Василевская