

# Пленочный сверхпроводящий квантовый интерферометр со сверхмалой индуктивностью

С.И. Бондаренко<sup>1</sup>, А.В. Кревсун<sup>1</sup>, Е.В. Ильичев<sup>2</sup>, У. Хюбнер<sup>2</sup>, В.П. Коверя<sup>1</sup>, С.И. Линк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Науки, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: bondarenko@ilt.kharkov.ua

<sup>2</sup>Leibniz Institute of Photonic Technology  
Albert-Einstein-Straße 9 (Beutenberg Campus), 07745 Jena, Germany

Статья поступила в редакцию 27 октября 2017 г., опубликована онлайн 25 января 2018 г.

Разработан простой в изготовлении пленочный сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКИ) со сверхмалой индуктивностью ( $\sim 10^{-13}$  Гн). Приведены вольт-амперные и вольт-полевые характеристики СКИ. Получены основные расчетные соотношения, подтвержденные экспериментом. С помощью СКИ впервые определена глубина проникновения магнитного поля в пленку сплава 50% In–50% Sn.

Розроблено простий у виготовленні плівковий надпровідний квантовий інтерферометр (НКІ) з надмалою індуктивністю ( $\sim 10^{-13}$  Гн). Приведено вольт-амперні та вольт-польові характеристики НКІ. Одержано основні розрахункові співвідношення, які підтверджені експериментом. За допомогою НКІ вперше визначено глибину проникнення магнітного поля у плівку сплаву 50% In–50% Sn.

PACS: 74.50.+g Эффекты близости, слабые связи, туннелирование, эффект Джозефсона;  
74.25.F– Транспортные свойства;  
74.25 Na Магнитные свойства, включая вихревые структуры и подобные явления;  
74.78.–w Сверхпроводящие пленки и низкоразмерные структуры.

Ключевые слова: сверхпроводящий квантовый интерферометр, контакт Джозефсона, двухсвязный сверхпроводник, площадь квантования, циркулирующий ток.

## 1. Введение

Экспериментальное открытие квантовой интерференции в двухсвязном сверхпроводнике с двумя контактами Джозефсона в 1964 г. [1] привело к разработке различных типов СКВИДов (Superconducting Quantum Interference Device) [2]. В настоящее время сверхпроводящие магниты и СКВИДы находят наибольшее применение в науке и технике по сравнению с другими сверхпроводящими устройствами. Основной привлекательной стороной СКВИДов является экстремально высокая их чувствительность к приращениям внешнего магнитного поля в области низких и инфранизких частот при малых размерах чувствительного элемента. Чувствительным элементом СКВИДа является сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКИ). Чаще всего конструкция СКИ представляет собой миниатюрный двухсвязный сверхпроводящий контур с одним или двумя контактами Джозефсона [2]. Несмотря

на многолетнюю историю создания СКИ, их конструкция продолжает совершенствоваться, а область применения расширяться. В настоящее время предпочтение отдается пленочным СКИ с двумя контактами джозефсоновского типа. Пленочная конструкция позволяет использовать достижения современной нанотехнологии структурирования элементов СКИ с целью дальнейшей их миниатюризации. Микро- и нано-СКВИДы необходимы для изучения магнитных свойств органических и неорганических молекул, а также для создания современных СКВИД микроскопов с высоким пространственным разрешением [3]. В частности, индуктивность  $L_0$  таких нано-СКВИДов в настоящее время достигает единиц пикогенри ( $L_0 \approx 10^{-12}$  Гн). Уменьшение  $L_0$  позволяет применять джозефсоновские контакты с существенно большими размерами и критическими токами, так как увеличивается глубина модуляции  $\delta i$  квантованных значений циркулирующего в СКИ тока  $i$  в соответствии с соотношением [2]

$$\delta i = \Phi_0 / (2L_0), \quad (1)$$

где  $\Phi_0$  — квант магнитного потока ( $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$  Вб). Увеличение размеров контактов уменьшает влияние флуктуаций критического тока СКИ на его характеристики, увеличивает помехозащищенность СКИ и упрощает технологию изготовления контактов.

При этом интерференционный период изменения циркулирующего тока под влиянием внешнего магнитного поля через интерферометр равен:

$$\Delta i = \Phi_0 / L_0. \quad (2)$$

Следует также отметить, что традиционно под  $L_0$  подразумевается так называемая магнитная индуктивность СКИ.

## 2. Цель работы

Основной целью настоящей работы явилось создание низкоиндуктивного СКИ для разработанной нами

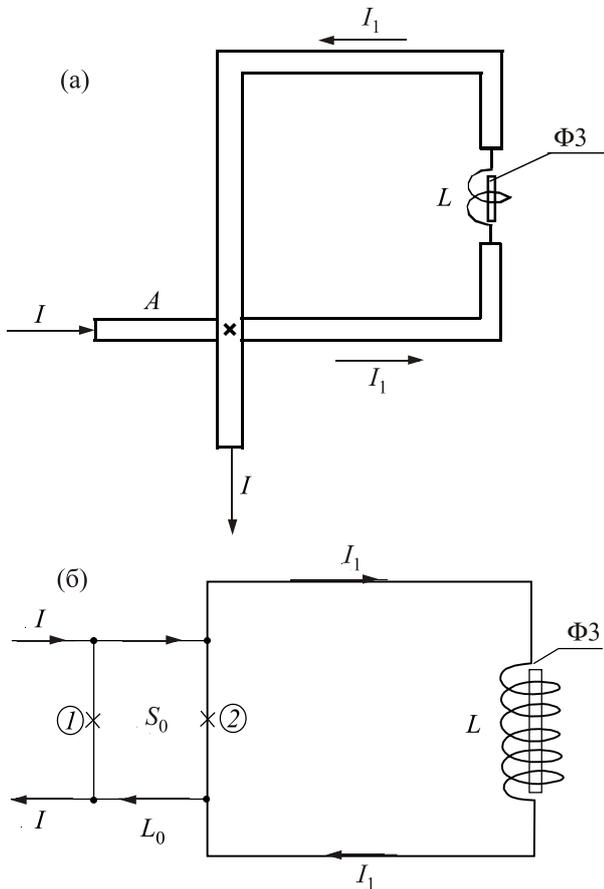


Рис. 1. Принципиальная схема ДСП с ПТК в точке пересечения проводников  $A$ ;  $\Phi_3$  — датчик феррозондового магнитометра, измеряющего магнитное поле тока  $I_1$ ;  $L$  — индуктивность контура ДСП,  $I$  — постоянный транспортный ток (а). Электрическая схема замещения ДСП с СКИ, содержащим два контакта Джозефсона (1) и (2), имеющим площадь квантования  $S_0$  и индуктивность  $L_0$  (б).

новой сверхпроводящей интерференционной структуры в виде двухсвязного сверхпроводника (ДСП) с СКИ. Структура представляет собой высокоиндуктивный (индуктивность контура более  $10^{-9}$  Гн) сверхпроводящий контур, в разрыв которого включается несимметричный СКИ с двумя контактами джозефсоновского типа [4–6]. До настоящего времени в качестве такого СКИ нами использовался прижимной точечный контакт (ПТК) ниобий–ниобий. На рис. 1 показаны принципиальная схема двухсвязной структуры с ПТК и ее электрическая схема замещения.

Оценочные значения индуктивности СКИ такой конструкции составляют около  $10^{-13}$  Гн (0,1 пГн). Определить с необходимой точностью размеры и критические токи индивидуальных микроконтактов такого СКИ затруднительно. Для построения завершенной теории процессов в новой структуре необходим был пленочный низкоиндуктивный двухконтактный СКИ с достаточно точно определяемыми размерами его элементов и стабильными критическими токами контактов. Другой целью работы явилась разработка такой технологии изготовления малоиндуктивного СКИ, которая бы соответствовала современному состоянию нашей экспериментальной базы и была существенно проще, чем используемая сейчас в других лабораториях.

## 3. Конструкция и метод изготовления пленочного СКИ

На рис. 2(а), (б) показан схематический чертеж разработанного несимметричного СКИ в двух проекциях, а на рис. 2(в) — его электрическая схема с токовыми и потенциальными выводами.

Сверхпроводящий контур СКИ образован двумя тонкими пленками 2 и 5 разной ширины и двумя контактами между ними. Прямоугольная нижняя ниобиевая пленка (5) с размерами  $1,5 \times 7$  мм и толщиной  $t_5 = 100$  нм напылена на подложку монокристаллического кремния (1) и электролитически окислена на толщину  $t_4 = 30$  нм. Верхняя узкая прямоугольная пленка сплава 50% Sn–50% In с размерами  $1,5 \times 7$  мм и толщиной  $t_2 \approx 200$  нм напылена на окисел ниобия (4) нижней пленки. Верхняя и нижняя пленки соединены двумя пленочными квазиточечными контактами джозефсоновского типа (3). Расстояние между контактами (1) составляет 200 мкм. Площадь  $S_0$  квантования СКИ равна:

$$S_0 = l(t_4 + \lambda_2 + \lambda_5), \quad (3)$$

где  $\lambda_2, \lambda_5$  — глубины проникновения магнитного поля в верхнюю и нижнюю пленки. Контакты образованы с помощью механического прокола пленок и слоя окисла стандартной алмазной пирамидой прибора ПМТ-3 для определения микротвердости материалов. Размер отпечатка пирамиды на верхней пленке около 10 мкм.

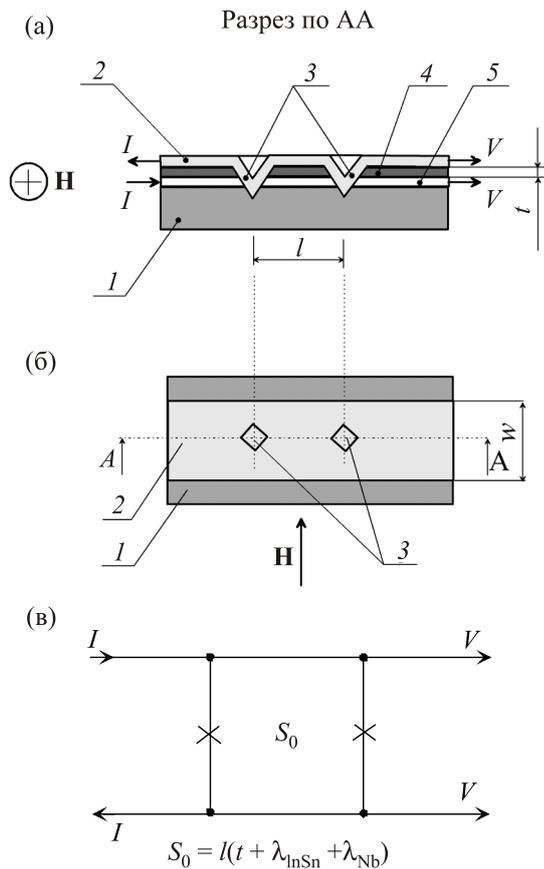


Рис. 2. Поперечный разрез СКИ с двумя пленочными джозефсоновскими контактами (3) между пленкой ниобия (5) и пленкой сплава InSn (2); 1 — подложка из кремния, 4 — изолирующий окисел ниобия с толщиной  $t$ ,  $l$  — расстояние между контактами,  $I$ - $I$  и  $V$ - $V$  — токовые и потенциальные выходы,  $H$  — измеряемое магнитное поле (а). Вид на поверхность СКИ,  $w$  — ширина пленки InSn, 3 — изображение отпечатков алмазной пирамиды в местах проколов пленки InSn для создания контактов (б). Электрическая схема замещения СКИ с двумя контактами Джозефсона (×) и с площадью квантования  $S_0$  (в).

Мы предполагаем, что микроструктура каждого из контактов имеет вид, показанный на рис. 3.

Благодаря высокой пластичности пленки InSn при проколе и внедрению пирамиды в подложку по периметру пирамиды образуется металлический контакт между пленками InSn и Nb. Ширина контакта равна произведению периметра на толщину пленки Nb, а длина равна толщине окисла (типичному для прижимных контактов значению, т.е. близка к атомным размерам). Таким образом, удовлетворяется главное требование к металлическим контактам джозефсоновского типа, а именно, что его протяженность вдоль протекания тока должна быть порядка или меньше длины когерентности  $\xi$  контактирующих металлов (при температуре  $4,2\text{ K}$   $\xi_{\text{Nb}} \approx 10\text{ nm}$ ,  $\xi_{\text{InSn}} \approx 80\text{ nm}$ ).

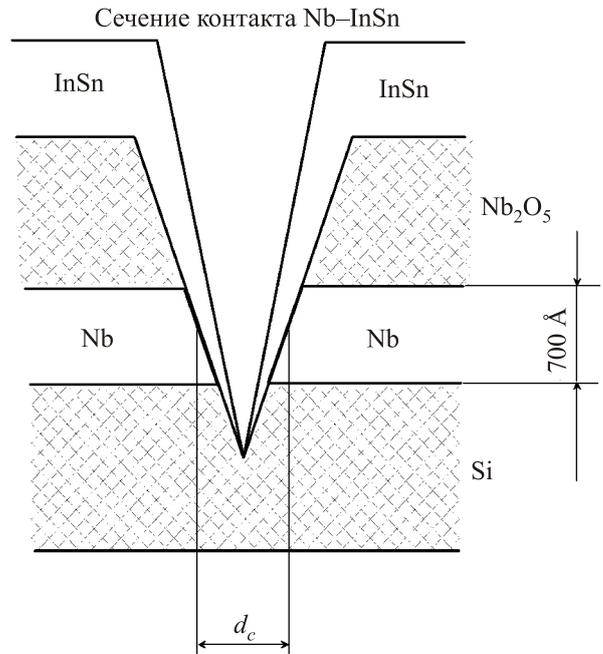


Рис. 3. Схема сечения одного из сверхпроводящих контактов СКИ, образованного между пленкой ниобия и пленкой InSn в конической области со средним диаметром  $d_c$  и шириной около 70 нм.

#### 4. Расчетные соотношения

Наблюдаемым в экспериментах параметром двух-контактного СКИ является период  $\Delta H$  напряжения  $V$  СКИ в зависимости от внешнего магнитного поля  $H$ . Для этого необходимо, чтобы контакты СКИ находились в резистивном состоянии, задаваемом определенным по величине постоянным током  $I$  через СКИ. В соответствии с теорией СКИ [3] с учетом соотношения (3) значение  $\Delta H$  должно составлять

$$\Delta H = \frac{\Phi_0}{\mu_0 S_0} = \frac{\Phi_0}{\mu_0 l (t_4 + \lambda_2 + \lambda_5)}, \quad (4)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Теперь определим индуктивность интерферометра. Измерение малых индуктивностей  $L_0$  СКИ в области значений, равных нескольким пГн и менее, является достаточно сложной задачей. Поэтому в настоящей работе мы ограничиваемся расчетом магнитной индуктивности СКИ предлагаемого типа. В основу расчета можно положить следующие представления. Как известно [2], магнитный поток  $\Phi$  внешнего магнитного поля  $H$  через контур СКИ по мере его увеличения вначале ( $\Phi < \Phi_0/2$ ) полностью компенсируется магнитным потоком возникающего циркулирующего тока  $i$ , а затем ( $\Phi > \Phi_0/2$ ) проникает в контур в виде кванта потока  $\Phi_0$ . Ограничимся рассмотрением области  $\Phi < \Phi_0/2$ , где реализуется равенство  $\Phi$  и потока поля, созданного током  $i$ . Следовательно, равны и значения поля  $H$  и поля тока  $i$  ( $H = H_i$ ). Поле  $H_i$  формируется током по четырем участ-

кам контура: участку верхней узкой пленки, создающему поле  $H_{it}$ , участку широкой нижней пленки, создающему поле  $H_{ib}$ , и двум участкам со слабыми контактами джозефсоновского типа, каждый из которых создает поле  $H_{il}$ . Поэтому поле  $H_i$  можно представить в виде суммы полей  $H_{it}$ ,  $H_{ib}$ ,  $2H_{il}$ :

$$H_i = H_{it} + H_{ib} + 2H_{il}. \quad (5)$$

Поле  $H_{it}$  определяется по формуле [7] с учетом ее выражения в системе единиц СИ:

$$H_{it} = \frac{i}{10w}, \quad (6)$$

где  $w$  — ширина пленки. Поле  $H_{il}$  можно оценить по формуле

$$H_{il} \approx \frac{i}{\pi l}. \quad (7)$$

Сверхпроводящий ток  $i$  по нижней широкой пленке ниобия имеет тенденцию к растеканию на края. Из-за значительного (на 7,5 мм) удаления краев ниобиевой пленки от квантующего контура СКИ и растекания тока по ее поверхности можно пренебречь его вкладом в магнитное поле  $H_i$  по сравнению с другими составляющими. В результате получаем:

$$H_i = H \approx \left( \frac{1}{10w} + \frac{2}{\pi l} \right) i. \quad (8)$$

Соответственно, для одного периода  $\Delta H$  интерференционной зависимости СКИ  $V(H)$  из (8) следует:

$$\Delta H \approx \left( \frac{1}{10w} + \frac{2}{\pi l} \right) \Delta i. \quad (9)$$

Из (2) и (9) получаем:

$$L_0 \approx \Phi_0 \left( \frac{1}{10w} + \frac{2}{\pi l} \right) / \Delta H. \quad (10)$$

Исходя из экспериментальных значений  $\Delta H$ ,  $l$  и  $w$  формулу (10) удобно использовать при расчете индуктивности. При проектировании СКИ данного типа следует пользоваться другой формулой для индуктивности  $L_0$ , связывающей ее значение только с геометрическими размерами требуемого СКИ. Эта формула получается подстановкой в (10) значения  $\Delta H$  из (4):

$$L_0 \approx \mu_0 \left( \frac{l}{10w} + 1 \right) (t_4 + \lambda_2 + \lambda_5). \quad (11)$$

Таким образом, видно (11), что уменьшать  $L_0$  можно, уменьшая расстояние между контактами и толщину изолятора между пленками, а также увеличивая ширину верхней пленки. Уменьшение геометрической индуктивности ограничено снизу джозефсоновской ин-

дуктивностью контактов ( $L_J$ ) СКИ, подобной кинетической индуктивности обычных сверхпроводников [8]. Если использовать для оценки величины  $L_J$  формулу из [8]:

$$L_J = \frac{\Phi_0}{2\pi I_c}, \quad (12)$$

где  $I_c$  — критический ток контакта Джозефсона, то для  $I_c = 10$  мА получаем  $L_J \approx 3 \cdot 10^{-13}$  Гн. Для более точного расчета  $L_J$  необходимо знать точную геометрию обоих контактов СКИ и иметь доказательство применимости формулы (12) для контактов, находящихся в резистивном состоянии. В настоящее время эти вопросы остаются открытыми.

## 5. Постановка эксперимента

Для получения наибольшей информации о свойствах СКИ в течение криогенного эксперимента на одной кремниевой подложке с ниобиевой пленкой изготавливали одновременно четыре интерферометра. Пленки ниобия были получены в Институте фотонных технологий (г. Йена, ФРГ). После формирования электрохимическим способом слоя окисла на ниобиевой пленке толщиной 30 нм в вакуумной установке проводили напыление четырех полосок пленки сплава индий–олово толщиной около 100 нм через маску. Затем при комнатной температуре вне вакуумной камеры выполняли проколы изолирующего окисла на ниобии и проводили повторное (второе) напыление полосок пленки сплава индий–олово толщиной около 100 нм. После формирования контактов к пленкам и припайки выводов образец устанавливали на криогенной вставке в криостат с жидким гелием. Фотография одного из образцов с СКИ показана на рис. 4.

Измерения вольт-амперных (ВАХ) и вольт-полевых (ВПХ) характеристик интерферометров проводили в жидком гелии ( $T = 4,2$  К). Внешнее магнитное поле  $H$  создавалось калиброванным медным соленоидом, кото-

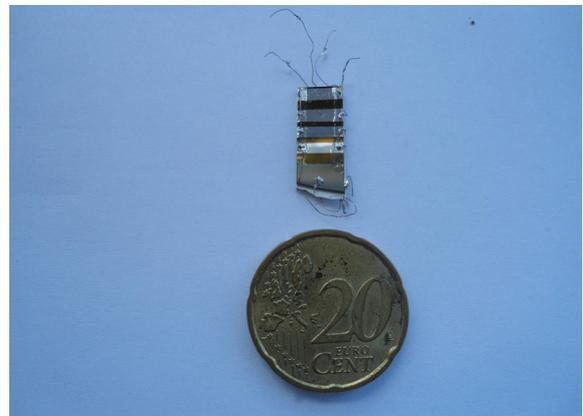


Рис. 4. Фотография одного из образцов с четырьмя СКИ на фоне монеты в 20 евроцентов.

рый охватывал подложку с интерферометрами. Измерительная установка состояла из регулируемых источников постоянного ( $I^{\bar{}}$ ) и переменного ( $I^{\sim}$ ) токов, высокочувствительного микровольтметра постоянного напряжения, аналогово-цифрового преобразователя и компьютера для отображения на его экране ВАХ и ВПХ. Для ослабления влияния паразитных внешних электромагнитных полей в лаборатории криостат с образцом экранировался ферромагнитным экраном.

### 6. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Вольт-амперные характеристики исследованных при постоянном транспортном токе СКИ имели одну общую особенность. При достижении критического тока на СКИ возникает скачок напряжения величиной в сто и более мкВ. Установившееся после этого напряжение не чувствительно к полю  $H$ . Одна из типичных ВАХ такого типа показана на рис. 5. Значения критического тока большинства СКИ находились в пределах от 5 до 10 мА при значениях нормального сопротивления  $R_N$  в интервале 0,1–0,2 Ом. Таким образом, переходная резистивная область ВАХ между чисто сверхпроводящим и нормальным состояниями контактов СКИ отсутствовала. Это делало невозможным получение информации о ВПХ в резистивном состоянии СКИ.

Одним из решений возникшей проблемы может быть усовершенствование технологии изготовления контактов для снижения критического тока при температуре 4,2 К до уровня около одного мА. Другим решением для уже изготовленных СКИ является применение предложенного нами ранее метода одновременного пропускания через контакты постоянного и переменного транспортных токов и регистрации возникающего при этом постоянного напряжения [10]. В результате на регистрируемой ВАХ исчезает скачок и появляется резистивный участок, чувствительный к внешнему магнитному полю. На рис. 6 показана полу-

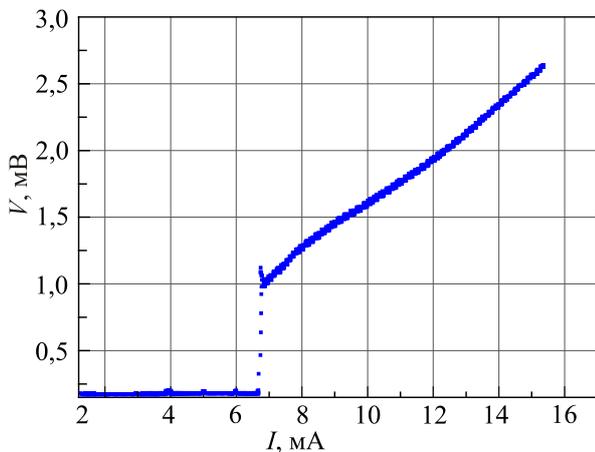


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика СКИ при  $T = 4,2$  К. Виден скачок напряжения до 1,2 мВ при достижении критического тока около  $I_c^{\bar{}} = 6,5$  мА.

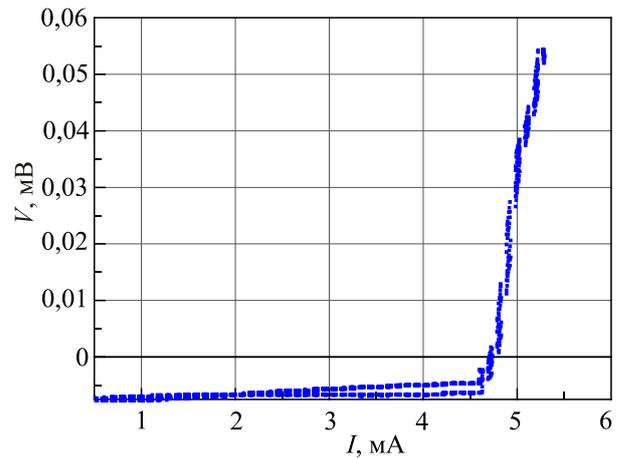


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика СКИ при  $T = 4,2$  К при пропускании постоянного транспортного тока и фиксированного значения переменного тока в виде однополярных треугольных импульсов с амплитудой тока 2 мА на частоте  $10^5$  Гц.

ченная указанным методом ВАХ того же СКИ, а на рис. 7 — соответствующая ВПХ.

Видна четкая периодическая интерференционная зависимость  $V(I_H)$ , типичная для СКИ постоянного тока с двумя контактами Джозефсона.  $I_H$  — ток соленоида, создающий поле  $H$ . Период  $\Delta I_H \approx 9$  мА с точностью до 10% соответствует рассчитанному периоду по магнитному полю  $\Delta H = 0,67$  Э, используя соотношение (4). Для  $\lambda_2$  взято значение толщины пленки ниобия 70 нм, так как она была меньше глубины проникновения в нее магнитного поля [11]. В результате с помощью разработанного СКИ и указанного соотношения удалось впервые измерить глубину проникновения поля  $\lambda_5$  в пленку сплава InSn при  $T = 4,2$  К,  $\lambda_5 = (60 \pm 10\%)$  нм.

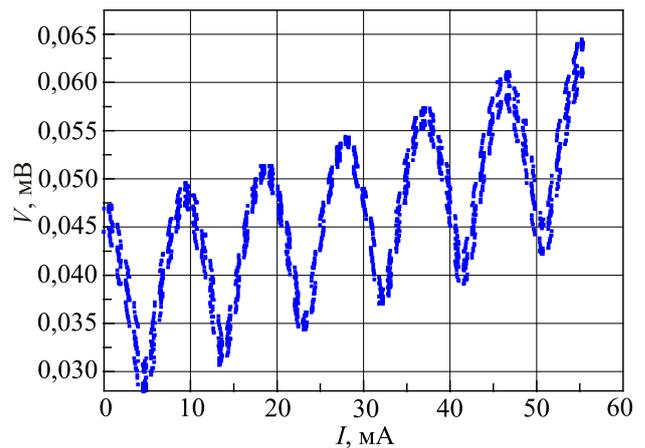


Рис. 7. Вольт-полевая зависимость СКИ с ВАХ, изображенной на рис. 5. Амплитуда квантовых модуляций напряжения на СКИ составляет 20 мкВ при периоде по току соленоида  $I_H$ , создающего магнитное поле  $H$ , около 9 мА, что соответствует  $\Delta H \approx 0,67$  Э.

Рассчитанные по формулам (10), (11) значения индуктивности СКИ близки друг к другу и составляют около  $10^{-13}$  Гн (т.е. 0,1 пГн). Достигнутое значение геометрической индуктивности близко к оценке ее минимально возможной величины при критическом токе  $\sim 10$  мА, т.е. к джозефсоновской индуктивности  $L_J$  контактов данного СКИ.

Описанная технология достижения малой геометрической индуктивности  $L_0$  СКИ позволяет в принципе произвести ее уменьшение еще в 20 раз за счет уменьшения расстояния  $l$  между контактами. Кратность уменьшения индуктивности ограничивается в основном оптическим разрешением объектива прибора ПМТ-3 и величиной  $L_J$ .

Вопрос о сопоставлении индуктивности СКИ с глубиной модуляции напряжения не может быть в настоящее время решен, так как резистивность контактов СКИ данного типа достигается суммарным воздействием на них постоянного и переменного транспортных токов, в то время как известные теоретические положения применимы к случаю использования в качестве транспортного только постоянного тока. При этом из экспериментальных исследований ВАХ контактов СКИ известно, что добавление переменного тока не только уменьшает критический постоянный ток СКИ, но и сильно снижает величину модуляции напряжения на СКИ магнитным полем. Такое сопоставление станет возможным после завершения следующего этапа наших разработок малоиндуктивных СКИ, направленного на существенное уменьшение их критического тока при  $T = 4,2$  К и получения в наших условиях ВАХ необходимого вида с использованием только постоянного транспортного тока.

## 7. Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований изготовлены первые образцы пленочных сверхпроводящих квантовых интерферометров относительно простой (в технологическом отношении) конструкции со сверхмалой геометрической (магнитной) индуктивностью ( $\sim 10^{-13}$  Гн).

Получены расчетные соотношения, позволяющие определять индуктивность как уже изготовленного, так и проектируемого интерферометра. В первом случае это делается на основе измерения периода  $\Delta H$  интерференционной зависимости напряжения  $V$  на интерферометре от внешнего магнитного поля  $H$ . Во втором случае формула для индуктивности содержит только геометрические размеры элементов интерферометра.

Как показали эксперименты, полученная расчетная формула для значения  $\Delta H$  позволяет определять эту величину с высокой точностью ( $\pm 10\%$ ). В частности, это может позволить использовать измерение  $\Delta H$  в качестве метода наиболее простого измерения глубины проник-

новения магнитного поля в сверхпроводящие пленки, входящие в контур подобного СКИ. В настоящей работе этим методом впервые измерена глубина проникновения магнитного поля в пленку сплава 50% In–50% Sn при температуре 4,2 К,  $\lambda_{\text{InSn}} = (60 \pm 10\%)$  нм.

Одной из приоритетных задач дальнейших работ с СКИ данного типа является изучение влияния на его характеристики большой шунтирующей сверхпроводящей индуктивности ( $10^{-6}$  Гн). Для ее решения требуется обеспечить достаточно большой (больше, чем критический ток контактов Джозефсона в СКИ) критический ток переходных соединений между СКИ и шунтирующей индуктивностью.

Авторы выражают благодарность А.С. Заике и сотрудникам его группы за разработку аналогово-цифрового устройства, позволившего вести регистрацию экспериментальных данных с помощью компьютера.

1. R.C. Jaklevic, J. Lambe, A.H. Silver, and J.E. Mercereau, *Phys. Rev. Lett.* **12**, 345 (1964).
2. *Слабая сверхпроводимость. Квантовые интерферометры и их применения*, Б.Б. Шварц, С. Фонер (ред.), Мир, Москва (1980).
3. M.J. Martinez-Perez and D. Koelle, ArXiv:1609.06182v2[cond-mat. sup-con] 28 Oct 2016.
4. В.П. Коверя, С.И. Бондаренко, А.В. Кревсун, Н.М. Левченко, И.С. Бондаренко, *ФНТ* **36**, 759 (2010) [*Low Temp. Phys.* **36**, 605 (2010)].
5. С.И. Бондаренко, В.П. Коверя, А.В. Кревсун, Л.В. Гнездилова, *ФНТ* **41**, 235 (2015) [*Low Temp. Phys.* **41**, 179 (2015)].
6. S. Bondarenko and V. Koverya, *Int. J. Mod. Phys. B* **29**, 1542013 (2015).
7. Дж. Бремер, *Сверхпроводящие устройства*, Мир, Москва (1964).
8. R. Meservey and P.M. Fedorow, *J. Appl. Phys.* **4**, 543 (1969).
9. К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих, *Системы с джозефсоновскими контактами*, изд.-во Московского университета, Москва (1978).
10. С.И. Бондаренко, А.И. Вердян, Л.Д. Демьянов, *ЖТФ* **42**, 1039 (1972).
11. S. Michotte, D. Lucot, and D. Mailly, *Phys. Rev. B* **81**, 100503-1 (2010).

## Thin film superconducting quantum interferometer with ultra-low inductance

S.I. Bondarenko, A.V. Krevsun, E.V. Ilichev, U. Hubner, V.P. Koverya, and S.I. Link

Simple manufacturing thin film superconducting quantum interferometer (SQI) with an ultra-low inductance ( $\sim 10^{-13}$  H) has been developed. Current-

voltage and voltage-field characteristics of SQI are presented. The main calculated ratios, confirmed by experiment, are obtained. The penetration depth of a magnetic field in an alloy film 50% In–50% Sn for the first time is defined by means of the SQI.

PACS: 74.50.+r Proximity effects, weak links, tunneling phenomena, Josephson effects;  
74.25.F– Transport properties;  
74.25.Ha Magnetic properties including vortex structures and related phenomena;  
74.78.–w Superconducting films and low-dimensional structures.

Keywords: superconducting quantum interferometer, Josephson contact, double-connected superconductor, quantization area, circulating current.