

PACS numbers: 73.50.-h, 74.25.fc, 74.25.Na, 74.50.+r, 74.55.+v, 85.25.Cp

Характеристики Джозефсонових контактів Nb/Al/AlO_x/Nb, сформованих за спрощеною методикою

А. О. Каленюк^{*,**}, А. П. Шаповалов^{*,**}

^{*}Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна

^{**}Київський академічний університет НАН та МОН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна

Джозефсонові переходи широко застосовуються у якості головного елемента різних чутливих приладів, наприклад, у СКВІДах, кубітах, у цифрових надпровідних елементах. Тому розробка технології масового виготовлення таких переходів є актуальною проблемою сучасної мікроелектроніки. Головними вимогами до технології є простота її реалізації, повторюваність та стабільність характеристик переходів. В роботі представлено дві спрощені та наближені до стандартної напівпровідникової КМОН технології виготовлення пліткових ніобійових Джозефсонових переходів з діелектричним прошарком з оксиду алюмінію, які здійснені без використання дорогих прецизійних за глибиною щавлення. Показана можливість формування якісного переходу навіть з порушенням вакууму між осадженнями першого шару ніобію і наступного шару алюмінію. Знайдено, що застосування додаткового шару ізолятора SiO₂ з вікном у точці контакту виключає пряме протікання струму між верхньою та нижньою ніобійовою електродами на краях переходу і тим саме дає змогу повністю виключити трудомісткий процес анодування краю. Виявлені Шапірові сходи на вольт-амперних характеристиках та придушення критичного струму не-

Corresponding author: A. A. Kalenyuk
E-mail: oleksii.kalenyuk@gmail.com

^{*}G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine

^{**}Kyiv Academic University, N.A.S. and M.E.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine

Citation: A. A. Kalenyuk and A. P. Shapovalov, Characteristics of Josephson Nb/Al/AlO_x/Nb Contacts Formed by a Simplified Method, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 10: 1239–1253 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.10.1239](https://doi.org/10.15407/mfint.44.10.1239)

великим паралельним до площини контактів магнетним полем 7 мТл підтверджують високу якість виготовлених Джозефсонових переходів. Одержані температурні залежності величини енергетичної щільності добре узгоджуються з моделлю БКШ, що вказує на формування класичного *SIS*-контакту. Одержано також температурні залежності критичного струму та опору переходів, з яких випливає неоднакова критична температура верхньої та нижньої електроди, що пояснюється значною різницею в їх товщині. За допомогою проведених вимірів виконано розрахунки величини параметра Маккамбера–Стюарта, ємності, нормального опору та товщини діелектричного прошарку контакту. Розроблені технології можуть бути застосовані для масового виготовлення *SIS*-Джозефсонових переходів з метою застосувань їх у сучасній мікроелектроніці.

Ключові слова: Джозефсонів перехід, теорія БКШ, Шапірові сходинки, ніобій, енергетична щільність.

The Josephson junctions are widely used as the main elements in various sensitive devices, such as SQUIDS, qubits, and digital superconducting appliances. Therefore, the development of technology for the large-scale fabrication of such junctions is an urgent problem of modern microelectronics. The main requirements for the technology are simplicity of its implementation, repeatability, and stability of transition characteristics. The paper presents two simplified CMOS-like technologies for manufacturing thin film niobium Josephson junctions with an aluminium oxide dielectric layer, which are implemented without the use of expensive precision etching systems. As shown, a high-quality Josephson junction can be formed even when the vacuum between deposition of the first niobium layer and the subsequent aluminium layer is violated. It was found that the use of an additional SiO₂ insulating layer with a window at the junction point excludes the direct current flow between the upper and lower niobium electrodes at the junction edges and thus allows completely exclude the laborious process of the edge anodizing. The revealed Shapiro steps on the current-voltage characteristics and suppression of the critical current by a small magnetic field of 7 mT parallel to the junction plane confirm the high quality of the fabricated Josephson junctions. The obtained temperature dependence of the superconducting gap is in a good agreement with the BCS model that indicates formation of the conventional *SIS* type junction. Temperature dependences of the critical current and resistive transition of fabricated junctions are also obtained. From these dependencies, it follows that the critical temperatures of the upper and lower electrodes are unequal that can be explained by a significant difference in their thicknesses. From the carried-out measurements, the calculations of the McCumber–Stewart parameter, capacitance, normal resistance values, and also the dielectric layer thickness in the junction were performed. The developed technologies can be used for the large-scale production of *SIS* Josephson junctions for applications in modern microelectronics.

Key words: Josephson junction, BCS theory, Shapiro steps, niobium, energy gap.

(Отримано 17 лютого 2022 р.; остаточн. варіант — 11 серпня 2022 р.)

1. ВСТУП

З часу винаходу перших інтегральних схем у 1960-х роках, напівпровідникова цифрова електроніка продемонструвала майже експоненційне зростання масштабу інтеграції схем. Кількість транзисторів на мікросхемі зростає більше ніж на вісім порядків, досягаючи величин в сучасних процесорах понад 10^9 . У той же час розміри елементів інтегральних схемах зменшилися з десятків мікрон до 7 нм і майже досягли своїх фізичних меж (коли квантові ефекти є перешкодою нормальної роботи). Мало сумнівів, що напівпровідникова промисловість буде продовжувати упаковувати ще більше транзисторів на мікросхему за допомогою тривимірної (3D) інтеграції та інших підходів протягом принаймні ще десятиліття. Але головна перешкода в цьому — досягнення межі розсіювання енергії ~ 100 Вт/см². Чинник, з яким пов'язане розсіювання енергії, обмежує тактову частоту сучасних процесорів на рівні ~ 4 ГГц [1]. Тому не дивно, що сьогодні йде інтенсивний пошук принципово нових підходів для заміни напівпровідникової елементної бази. Наприклад, була реалізована спроба створити прототип транзистору з вуглецевої нанотрубки з розмірами 1 нм [2].

Застосування елементів надпровідної електроніки дає змогу досягти квантової межі і забезпечити високу енергоефективність обчислювальної техніки. Наприклад, найбільш швидкодійні напівпровідникові аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що досягають тактової частоти 4 ГГц, мають низьку розрядність (6–8 розрядів). Надпровідникові АЦП на основі шунтованих Джозефсонових переходів SIS-типу (надпровідник–ізолятор–надпровідник), можуть працювати на частотах десятки ГігаГерц і мати значно більшу розрядність та енергоефективність [3]. З використанням Джозефсонових переходів розроблено унікальні прилади, такі як стандарти вольт [4], генератори безперервного випромінювання терагерцового діапазону [5], [6], квантові комірки пам'яті на основі СКВІДу [7], системи квантових обчислень (кубіти) [8]. Струм крізь Джозефсонів перехід являє собою фазочутливий інструмент для визначення надпровідної симетрії параметру порядку. Тому спостереження транспорту крізь Джозефсонів перехід відіграє важливу роль у вивченні самого явища надпровідності у новітніх надпровідних матеріалах [9].

Одним з стримувальних чинників розвитку надпровідної електроніки є невелика густина інтеграції у надпровідних цифрових схемах, що на п'ять порядків нижче ніж цей показник у типових напівпровідникових схемах [10]. Також виникають складності при виготовленні базових елементів надпровідної електроніки — Джозефсонових переходів, характерна товщина діелектричного шару між надпровідними електродами в яких ~ 1 –2 нм.

Класична технологія виготовлення Джозефсонових переходів була розроблена ще в 1983 році [11]. За цією технологією, формування Джозефсонових *SIS*-контактів базується на створенні тришарової структури з тонких плівок Nb–Al/AlO_x–Nb в одному вакуумному циклі (рис. 1, *a*). Надалі, за допомогою серій літографій і прецизійних процесів щавлення (за глибиною) в атмосфері йонної плазми, а також з обов'язковим використанням процесу анодизації ніобію для уникнення формування дефектів ізоляції на краях контакту одержують контакти високої якості (рис. 1, *a–в*). На фінальній стадії формування контакту осаджують верхній шар Nb (рис. 1, *г*). Сучасний стан розвитку цієї технології створення Джозефсонових контактів йде шляхом пошарової інтеграції та зменшення розмірів контакту до субмікронних [1]. Суттєвим недоліком такого формування контакту є необхідність етапу анодизації ніобію для запобі-

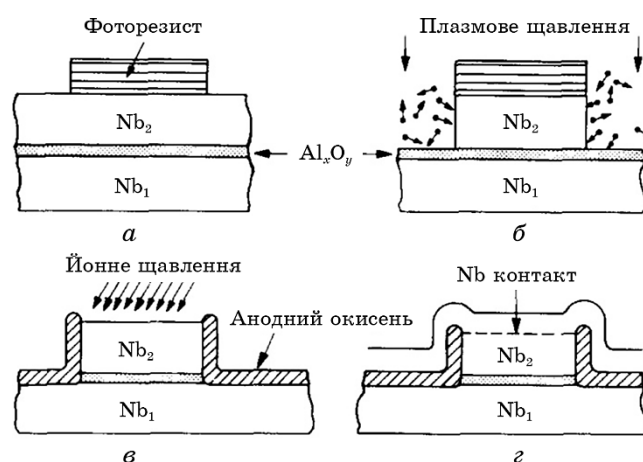


Рис. 1. Традиційна схема формування Nb–Al–AlO_x–Nb Джозефсонових контактів: осадження тришарової структури Nb–Al–AlO_x–Nb без розриву вакууму та нанесення фоторезисту (*a*); прецизійне щавлення верхнього шару ніобію для формування необхідної геометрії контакту (*б*); формування оксидного шару в процесі анодизації ніобію для уникнення формування дефектів ізоляції на краях контакту, видалення шару фоторезисту та очистка поверхні контакту перед нанесенням верхнього шару ніобію (*в*); формування верхньої електроди контакту [11] (*г*).

Fig. 1. Traditional scheme of the Nb–Al–AlO_x–Nb Josephson junction fabrication: sputtering of three-layer Nb–Al–AlO_x–Nb structure without vacuum breaking with photoresist setting (*a*); precision etching of the upper layer of niobium to form the required junction geometry (*б*); forming an oxide layer in the process of anodizing niobium to avoid the formation of insulation defects at the edges of the junction, removing the photoresist layer and cleaning the junction surface before applying the top layer of niobium (*в*); the formation of the upper junction electrode [11] (*г*).

гання небажаних закоротко. Використання анодизації не дає можливості зменшити контакт до нанорозмірів.

Останнім часом також набуло популярності виготовлення поодиноких плоских [7] або 3D контактів [12] з використанням сфокусованого йонного пучка (FIB) та одно стадійної фотолітографії. Всі ці процеси вимагають коштовного обладнання зі стабільними робочими параметрами.

У даній роботі розглянуто два способи одержання Nb–Al/AlO_x–Nb контактів без використання процесів анодизації та прецизійного йонного щавлення.

2. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1. Виготовлення зразків

Зразки були одержані за допомогою послідовних процесів осадження тонких плівок, фотолітографії і щавлення. Для одержання тонких плівок була використана установка магнетронного осадження із залишковим тиском в камері 10⁻⁸ Торр. Зразок містився на обертову платформу на відстані 24 см від мішені. Параметри осадження наведені в табл. 1. На першому етапі була одержана плівка Nb товщиною 40 нм на сапфіровій підкладинці з розмірами 5×5 мм. Структурні дослідження плівок з Nb, що були одержані з аналогічними параметрами осадження, наведено у [13]. Після цього, за допомогою стандартної фотолітографії з подальшим не прецизійним за глибиною та швидкістю реактивним йонним щавленням у атмосфері CF₄ + O₂ були одержані 6 нижніх електрод (F1–F6). Слід зауважити, що йонне щавлення можна замінити звичайним рідинним. Надалі такі заготовки були використані для одержання зразків

ТАБЛИЦЯ 1. Параметри осадження та окиснення плівок, що були використані для формування Nb–Al–AlO_x–Nb-переходів.

TABLE 1. Parameters of films deposition and oxidation for Nb–Al–AlO_x–Nb junctions' fabrication.

Тип плівки/позначення	Тип/потужність живлення, Вт	Тиск газу, мТорр	Тип газу/швидкість його потоку, см ³ /хв	Швидкість осадження, нм/хв	Час, хв	Товщина шару плівки, нм
Nb/F1–F6	DC/250	3	Ar/25	1,9	21	40
SiO ₂ /I	RF/150	3	Ar/25	0,67	90	60
Al	RF/104	3	Ar/25	2,5	8	20
AlO _x	–	30	O ₂ /10 + Ar/20	–	40	1–2
Nb/FG	DC/250	3	Ar/25	1,9	54	100

двох типів з додатковим шаром SiO_2 і без нього.

Обидві технології показано на рис. 2 у вигляді схематичної послідовності технологічних процесів. При першому спрощеному способі на зразок з нижніми Nb електродами (рис. 2, а) наносилася маска з фоторезисту з вікном для діелектричного шару і верхньої електроди. Надалі зразок містився в вакуумну камеру для магнетронного осадження плівок Al та Nb. Перед осадженням шару з Al була проведена ВЧ чистка в плазмі аргону з видаленням верхнього забрудненого шару (~ 5 нм) з поверхні нижньої Nb-електроди. Після цього, було послідовно здійснено осадження та окиснення шару Al та осадження шару Nb (рис. 2, б). Параметри осадження та окис-

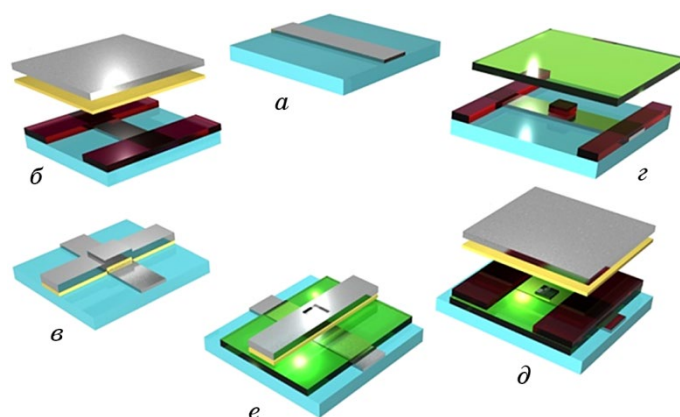


Рис. 2. Схематичне зображення послідовності технологічних процесів для одержання $S-I-S$ -контактів двома способами. Перший спрощений спосіб: зразок з нижньою електродою (а); осадження шару Al з окисацією до AlO_x і наступного шару Nb на вікно з фоторезиста (б); видалення верхньої плівки з місць, покритих фоторезистом з утворенням $S-I-S$ -контакту (в). Другий спосіб: осадження плівки SiO_2 на маску з фоторезисту та утворення вікна в SiO_2 в центрі і на краях нижньої електроди (г); нанесення маски з фоторезисту з наступним осадженням шару Al з окисацією до AlO_x і шару Nb (д); видалення плівки разом з маскою фоторезисту, формування $S-I-S$ контакту у вікні з SiO_2 (е).

Fig. 2. Schematic of the technological processes for obtaining $S-I-S$ junctions in two ways. The first simplified method: a sample with a lower electrode (a); deposition of a layer of Al with oxidation to AlO_x and the next layer of Nb on the window in the photoresist (b); removing the top film from the places covered with photoresist with the formation of $S-I-S$ junction (c); the second method: deposition of the SiO_2 film on the photoresist mask and the formation of a window in SiO_2 in the centre and at the edges of the lower electrode (g); applying a mask of photoresist, followed by deposition of a layer of Al with oxidation to AlO_x and a layer of Nb (d); removing the film together with the photoresist mask, forming $S-I-S$ junction in the SiO_2 window (e).

нення вказані в табл. 1. У подальшому, зразок поміщався в ультразвукову ванну з розігрітим до 40°C ацетоном. Завдяки процесу вибухової літографії, відбувалося видалення зайвих шарів плівки, що була осаджена на фоторезист (рис. 2, *е*). В результаті було одержано контакт, що знаходиться в місці перетину верхньої та нижньої електроди з прошарком з $\text{Al}-\text{AlO}_x$. Таким чином, використовуючи заготовку з шістьма електродами, було утворено 6 переходів по спрощеній схемі (рис. 3, *а, в*).

Виготовлення зразків з діелектричним шаром SiO_2 між нижньою і верхньою електродою здійснювалось шляхом додаванням додаткового початкового етапу для формування ізоляційного діелектричного прошарку SiO_2 і вікна у ньому (розташованого в центрі нижньої електроди) методом вибухової літографії, (рис. 2, *з*). Надалі

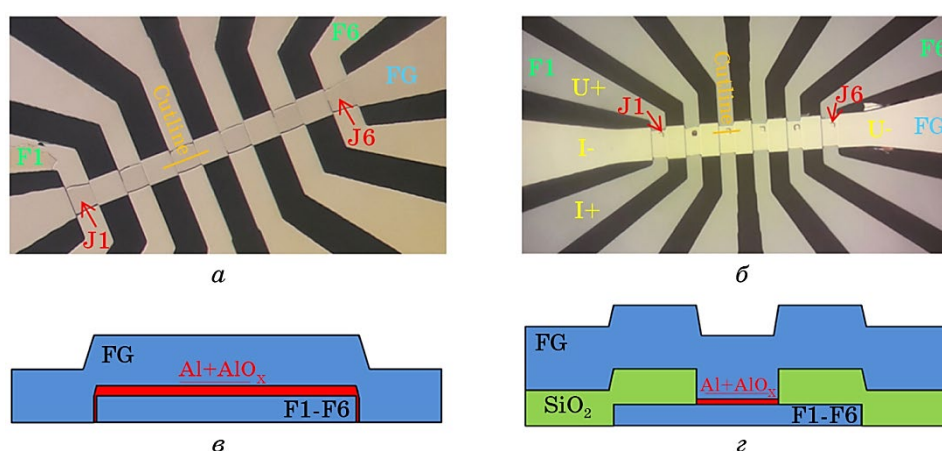


Рис. 3. Мікроскопічні зображення двох типів контактів $\text{Nb}-\text{Al}-\text{AlO}_x-\text{Nb}$ і їх схематичний вигляд в перерізі. Контакти по спрощеній технологічній схемі, що утворені на прямому перетині Nb електрод через бар'єр AlO_x (*а*), (*в*) з розмірами 8×8 мкм. Контакти $\text{Nb}-\text{Al}-\text{AlO}_x-\text{Nb}$ з додатковим шаром ізолятора SiO_2 та з вікнами в місцях контактів (*б*), (*г*) з розмірами $7,5 \times 7,5$ мкм. Позначення на малюнках: FG — верхня Nb -електрода, F1–F6 — нижні Nb -електроди, шар ізолятора SiO_2 , J1–J6-контакти, Cutline — умовна лінія зрізу контакту, якій відповідають рисунки (*в*) та (*г*).

Fig. 3. Microscopic images of two types of $\text{Nb}-\text{Al}-\text{AlO}_x-\text{Nb}$ junctions and their schematic cross-sectional view. Junctions according to the simplified technological scheme, was formed on the direct intersection of Nb electrodes through the barrier AlO_x (*a*), (*c*) with dimensions of 8×8 μm . Junctions $\text{Nb}-\text{Al}-\text{AlO}_x-\text{Nb}$ with an additional layer of SiO_2 insulator and with windows in the junctions (*b*), (*d*) with dimensions of 7.5×7.5 μm . Designations in the figures: FG—upper Nb electrode, F1–F6—lower Nb electrodes, an insulator layer SiO_2 , J1–J6-junctions, Cutline—conditional cut line of junction, which corresponds to Figs. (*c*) and (*d*).

було сформовано перехресне з нижньою електродою вікно в фоторезисті і також осаджено плівку Al з окисненням до AlO_x і, потім, плівку Nb (рис. 2, *д*). На заключному етапі проведено процедуру вибухової літографії з утворенням контакту Nb–Al– AlO_x –Nb між верхньою та нижньою електродами крізь вікно в SiO_2 (рис. 2, *е*). Параметри осадження для цих процесів також приведено у табл. 1.

В результаті роботи було одержано структури, що містять перехресні переходи, мікроскопічне зображення яких приведене на рис. 3, *а, б*.

2.2. Методика вимірювань

Одержані зразки з контактами Nb–Al– AlO_x –Nb були приклеєні до текстолітової вставки і підключені до неї тонкими 65 мкм алюмінієвими проводами за допомогою ультразвукового мікрозварювання. Після цього вставка зі зразком була поміщена в кріостат замкнутого циклу з можливістю зміни температури в діапазоні 300–0,3 К.

З генератора, через систему квазіоптичних лінз і прозоре вікно в кріостаті, на зразок подавалося надвисокочастотне (НВЧ) випромінювання з частотою ~ 75 ГГц. В процесі одержання вольт-амперних характеристик (ВАХ) крізь зразок йшов синусоїдальний струм з частотою 1 Гц, і вимірювались величини струму та падіння напруги в реальному часі, з роздільною здатністю 10000 вимірів за секунду.

У режимі вимірювання опору $R_J = U_{ac}/I_{ac}$, було виставлено фіксоване значення амплітуди змінного струму I_{ac} на рівні 10 мкА, і методом синхронного детектування визначалася амплітуда змінної напруги U_{ac} на зразку. Вимірювання проводились на частоті 23 Гц. Таким чином, досягалася висока чутливість вимірювань, і повністю виключався вплив контактної різниці потенціалів в схемі. Один з варіантів підключення контактів струму та напруги для вимірів параметрів контакту J1 зображено на рис. 3, *б*. Застосована методика показала свою високу ефективність у одержанні транспортних характеристик надпровідних зразків [5, 9, 14].

2.3. Результати досліджень

Температурні залежності опору контактів Nb–Al– AlO_x –Nb спрощеного типу демонструють два надпровідні переходи. Температура переходу верхньої електроди Nb 8,75 К та безпосередньо самого контакту 8,1 К (рис. 4, *а*). Нормальний опір контактів склав близько 0,2 Ом. Значення критичного струму за температури 6 К склали від 8 до 3 мА. Вольт-амперні характеристики контактів демонструють гістерезисну поведінку (рис. 4, *б*).

Температурні залежності опору контактів Nb–Al– AlO_x –Nb з до-

датковим шаром ізолятору SiO_2 показані на рис. 5. Найвищу температуру переходу продемонструвала верхня електрода 8,5 К (рис. 5). Це значення нижче, ніж температура переходу зразка без прошарку (8,75 К). Температура переходу нижньої електроди склала 7,25 К. Істотна відмінність в критичній температурі можна пояснити невеликою товщиною нижньої електроди 40 нм в порівнянні з верхньою електродою 100 нм. Критична температура переходів склала 6,8 К (рис. 5). Всі переходи продемонстрували хорошу відтворюваність транспортних властивостей. Розкид нормального опору контактів 1,6–2,5 Ом і нормованого опору 90–141 Ом·мкм². В процесі виготовлення зразка на контакті J2 не відкрилося вікно у діелектричному шарі SiO_2 (рис. 3, б). Опір цього контакту склав 21 МОм. Таке велике значення вказує на хорошу ізоляцію між верхньою і нижньою електродами і виключає протікання струму повз вікно з переходом.

ВАХ мають вигляд звичайних *SIS*-контактів с характерною вертикальною сходинкою при напрузі більше ніж 2 мВ і низьких температурах. Величина сходинки трохи менша за подвійну надпровідну щілину Nb (рис. 6, а). При переході від щілини до нормального опору на ВАХ спостерігається коліно-подібна особливість, яка характерна для *SNIS*-контактів, що вказує на те, що після процесу оксидизації залишився суттєвий шар Al.

Прикладене зовнішнє паралельне до площини контактів невелике магнетне поле (7,5 мТл) майже повністю пригнічує критичний струм (рис. 6, а). Це поле значно менше $H_{c2||}$ для Nb (~1 Тл) [15]. Це вказує на те, що в контакті відсутні надпровідні закортки між верхньою та нижньою електродами через шар окисненого алюмінію.

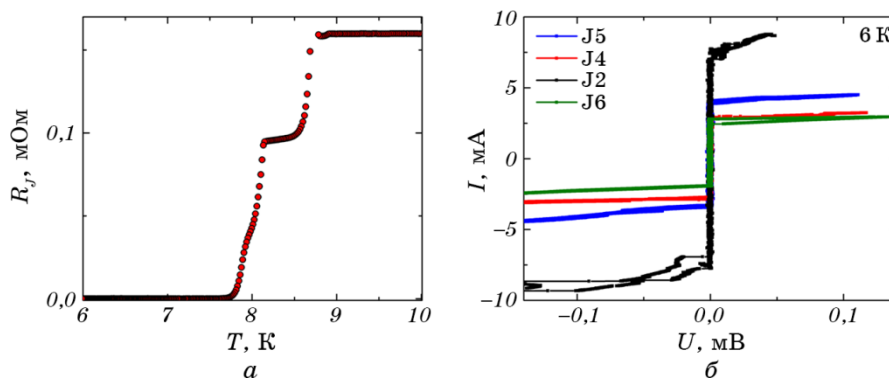


Рис. 4. Температурні залежності опору R_J (а) та вольт-амперні характеристики (б) контактів, що були виготовлені без ізоляційного шару SiO_2 .

Fig. 4. Temperature dependences of R_J resistance (а) and volt-ampere characteristics (б) of junctions without SiO_2 insulating layer.

Інакше були би сформовані так звані «пінхоли» (закоротки між електродами через невеликі отвори в шарі AlO_x), які приводять до низького нормального опору (що спостерігався у зразках зроблених по спрощеній схемі) та відсутності залежності критичного струму від невеликого магнетного поля. Пінхоли породжують струми зміщення із множинними гістерезисами на ВАХ, що мають природу перемикування таких тонких каналів в нормальний стан і виникнення андреевського відбиття на межі надпровідник–метал–надпровідник. Наявність всіх цих ознак на ВАХ першого зразка, який було виготовлено без ізоляційного шару SiO_2 (рис. 4, б), вказує на присутність таких пінхолів в ньому.

Мікрохвильове опромінення зразка на частоті 75 ГГц приводило до появи відповідних цій частоті по напрузі вертикальних Шапірових сходинок. Потужність була підібрана таким чином, що критичний струм повністю пригнічувався, а Шапірова сходишка досягала максимуму (рис. 6, б). Падна мікрохвильова потужність і струм розігрівали зразок, тому при падінні напруги більше ніж 0,5 мВ на ВАХ спостерігаються також термічні ефекти.

На рисунку 7, а продемонстровано еволюцію ВАХ зі зміною тем-

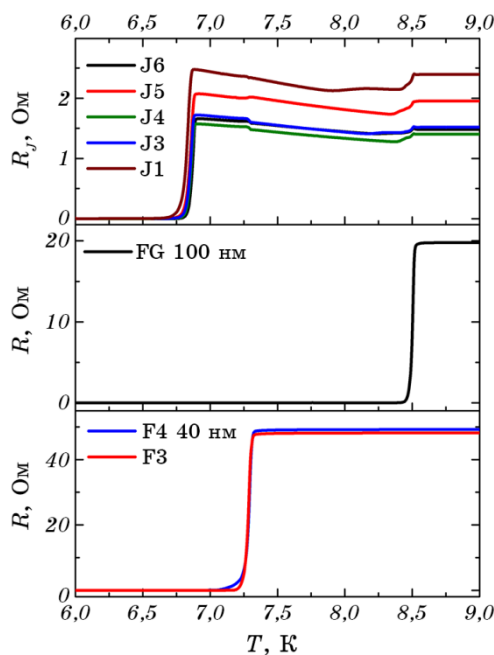


Рис. 5. Температурні залежності опорів зразку з ізолювальним шаром SiO_2 : контактів J1–J6; верхньої електроди FG; нижніх електрод F4, F3.

Fig. 5. Temperature dependences of sample resistances with SiO_2 insulating layer: junctions J1–J6; upper electrode FG; lower electrodes F4, F3.

ператури. З цих ВАХ було одержано температурну залежність критичного струму (рис. 7, б).

3. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Енергетична щілина

На ВАХ (рис. 6, а) спостерігається вертикальна сходинка, що відповідає напрузі $2\Delta/e$, де e — заряд електрона, Δ — енергетична щілина. Використовуючи серію ВАХ, що були виміряні за різних температур (рис. 7, а), одержано температурну залежність щілини (рис. 8). Згідно з теорією Бардина–Купера–Шриффера (БКШ) критична температура T_c зв'язана з щілиною Δ формулою:

$$T_c \approx 0,57\Delta_0 / k, \quad (1)$$

де k — Больцманнова стала.

Використовуючи одержане з експерименту значення $2\Delta_0/e = 2,18$ мВ розрахунок за формулою (1) дає значення критичної температури $T_c = 7,3$ К. З наведеної на рис. 8 апроксимації БКШ по всім експериментальним точкам одержане значення $T_c = 7,5$ К. Невелика розбіжність розрахункових значень T_c контактів з виміряними зна-

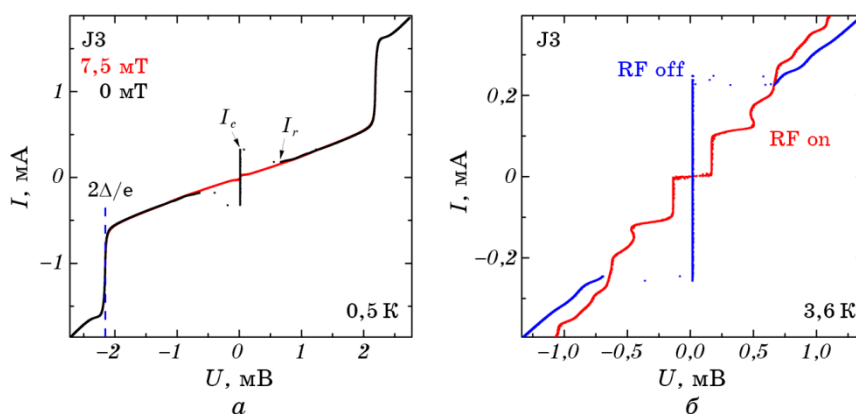


Рис. 6. Вольт-амперні характеристики контакту J3 з шаром ізолятору SiO₂. Ефект придушення критичного струму контакту слабким, паралельним до площини контакту магнетним полем 7,5 мТл (а). Вплив мікрохвильового опромінення 75 ГГц на вольт-амперні характеристики контакту з утворенням Шапірової сходинки (б).

Fig. 6. I - V characteristics of the junction J3 with the insulator layer SiO₂. The effect of suppression of the critical current by a weak parallel to the plane of junction magnetic field 7.5 mT (a). Influence of microwave irradiation 75 GHz on volt-ampere characteristics of junction with Shapiro step formation (b).

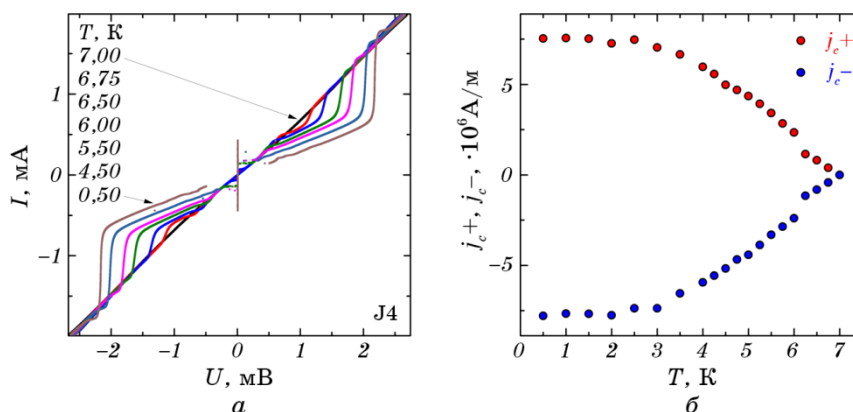


Рис. 7. Вольт-амперні характеристики контакту J4 з шаром ізолятору SiO₂ що були одержані у діапазоні температур 0,5–7,0 К (а). Температурна залежність густини критичного струму контакту з ізоляційним шаром SiO₂ (б).

Fig. 7. I – V characteristics of the junction J4 with the SiO₂ insulator layer was obtained in the temperature range 0.5–7.0 K (a). Temperature dependence of the critical current density of the junction with the insulating SiO₂ layer (б).

ченнями можна пояснити впливом залишкового металевого прошарку Al на критичну температуру переходу.

3.2. Розрахунок параметрів Джозефсонових переходів

SNIS-контакти мають велику ємність між електродами, і як наслідок, гістерезис на ВАХ. Вплив ємності на ВАХ визначається параметром Маккамбера–Стюарта:

$$\beta_c = \frac{2e}{\hbar} I_c R_N^2 C, \quad (2)$$

де C — ємність, R_N — нормальний опір, I_c — критичний струм контакту; e — заряд електрону; \hbar — стала Планка.

Для діапазону значень параметру $10 < \beta_c < 100$ справедлива формула [16]:

$$\frac{I_r}{I_c} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{\sqrt{\beta_c}}, \quad (3)$$

де I_r — струм повернення на ВАХ (рис. 6, а).

Підставляючи значення критичного струму $I_c = 0,433$ мА і струму повернення $I_r = 0,142$ мА в формулу (3), одержимо значення параметра Маккамбера–Стюарта $\beta_c = 14,9$. Використовуючи це значення, а також величину нормального опору контакту $R_N = 1,65$ Ом, за

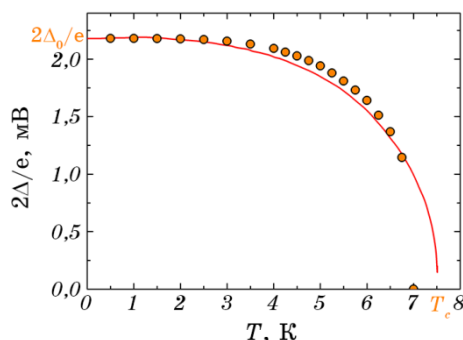


Рис. 8. Температурна залежність щілини Δ . Точки — експериментальні дані, суцільна лінія — розрахунок за моделлю БКШ.

Fig. 8. Temperature dependence of the superconducting gap Δ . Points are experimental data; the solid line shows the result of the BCS model calculation.

допомогою виразу (2) знайдемо значення ємності контакту $C = 2,11$ пФ.

Ємність плаского конденсатору виражається формулою:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}, \quad (4)$$

де S — площа конденсатору, d — товщина діелектричного шару, ε — діелектрична проникливість шару. Використовуючи формулу (4) і встановивши значення діелектричної проникності для шару Al_2O_3 $\varepsilon = 9,5$, одержимо товщину шару $d = 2,2$ нм. Це значення характерно для Джозефсонових SIS -переходів і показує хорошу відповідність одержаних в роботі контактів.

4. ВИСНОВКИ

В роботі було розглянуто дві близькі до КМОН технології виготовлення Джозефсонових ніобійових SIS -переходів без використання анодизації краю контакту. Весь технологічний цикл можна відтворити за допомогою рідинного замість коштального, прецизійного за глибиною, йонного цвплення.

Перша спрощена технологія полягає у формуванні контакту на перетині двох ніобійових електрод безпосередньо крізь шар AlO_x . Друга методика доповнює першу додаванням ізоляційного шару і з вікном у місці контакту. Зразки, що були одержані за першою технологією, продемонстрували наявність закороток на краях контактів. Вони виникають внаслідок деградації тонкого діелектричного шару на краях при взаємодії з оточуючим середовищем. Зазвичай

їх знешкоджують додатковим процесом анодизації країв. Виникнення закороток також може бути пов'язано з осадженням більш тонкої плівки Al на бокові поверхні нижніх ніобійових електрод (рис. 3, е). Застосування додаткового ізоляційного шару SiO₂ у другій технології дало змогу виключити можливість виникнення закороток, а також захистити тонкий шар Al–AlO_x від впливу навколишнього середовища. Одержані цим способом контакти продемонстрували хорошу відтворюваність параметрів, а також ефект придушення критичного струму слабким зовнішнім магнетним полем, та наявність Шапірових сходинок під дією мікрохвильового опромінення. Форма вольт-амперних характеристик та присутність вище згаданих ознак свідчить про одержання цим способом Джозефсонових переходів SNIS-типу. Розроблені технології можуть бути використані для масового виготовлення Джозефсонових SIS-переходів з метою їхніх застосувань в сучасній мікроелектроніці [17, 18].

Автори вдячні В. І. Шниркову, В. М. Краснову та Т. Голоду за участь в обговоренні результатів. Дослідження було виконано у рамках програми НАТО «Наука заради миру» (грант G5796) і Програми фундаментальних і прикладних досліджень Міністерства освіти і науки України (НДР 0121U110046).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА — REFERENCES

1. S. K. Tolpygo, *Low Temp. Phys.*, **42**, No. 5: 361 (2016).
2. S. B. Desai, S. R. Madhvapathy, A. B. Sachid, J. P. Llinas, Q. Wang, G. H. Ahn, G. Pitner, M. Kim, J. Bokor, C. Hu, A. Javey, H. S. Wong, and A. Javey, *Science*, **354**, No. 6308: 99 (2016).
3. M. Ito, K. Kawasaki, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai, and S. Yorozu, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15**, No. 2: 255 (2005).
4. A. M. Klushin, J. Lesueur, Marian Kampik, F. Raso, A. Sosso, S. Khorshev, N. Bergeal, F. Couedo, Ch. Feuillet-Palma, P. Durandetto, Michał Grzenik, Krzysztof Kubiczek, Krzysztof Musiol, and Artur Skyrkowski, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, **23**, No. 2: 4 (2020).
5. R. Cattaneo, E. A. Borodianskyi, A. A. Kalenyuk, and V. M. Krasnov, *Phys. Rev. Applied*, **16**, No. 6: L061001 (2021).
6. Mikhail M. Krasnov, Natalia D. Novikova, Roger Cattaneo, Alexey A. Kalenyuk, and Vladimir M. Krasnov, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, **12**: 1392 (2021).
7. Taras Golod, Razmik A. Hovhannisyan, Olena M. Kapran, Vyacheslav V. Dremov, Vasily S. Stolyarov, and Vladimir M. Krasnov, *Nano Letters*, **21**, No. 12: 5240 (2021).
8. F. Arute, K. Arya, R. Babbush, Dave Bacon, Joseph C. Bardin, Rami Barends, Rupak Biswas, Sergio Boixo, Fernando G. S. L. Brandao, David A. Buell, Brian Burkett, Yu Chen, Zijun Chen, Ben Chiaro, Roberto Collins, William Courtney, Andrew Dunsworth, Edward Farhi, Brooks Foxen,

- Austin Fowler, Craig Gidney, Marissa Giustina, Rob Graff, Keith Guerin, Steve Habegger, Matthew P. Harrigan, Michael J. Hartmann, Alan Ho, Markus Hoffmann, Trent Huang, Travis S. Humble, Sergei V. Isakov, Evan Jeffrey, Zhang Jiang, Dvir Kafri, Kostyantyn Kechedzhi, Julian Kelly, Paul V. Klimov, Sergey Knysh, Alexander Korotkov, Fedor Kostritsa, David Landhuis, Mike Lindmark, Erik Lucero, Dmitry Lyakh, Salvatore Mandra, Jarrod R. McClean, Matthew McEwen, Anthony Megrant, Xiao Mi, Kristel Michielsen, Masoud Mohseni, Josh Mutus, Ofer Naaman, Matthew Neeley, Charles Neill, Murphy Yuezhen Niu, Eric Ostby, Andre Petukhov, John C. Platt, Chris Quintana, Eleanor G. Rieffel, Pedram Roushan, Nicholas C. Rubin, Daniel Sank, Kevin J. Satzinger, Vadim Smelyanskiy, Kevin J. Sung, Matthew D. Trevithick, Amit Vainsencher, Benjamin Villalonga, Theodore White, Z. Jamie Yao, Ping Yeh, Adam Zalcman, Hartmut Neven, and John M. Martinis, *Nature*, **574**: 505 (2019).
9. A. A. Kalenyuk, E. A. Borodianskyi, A. A. Kordyuk, and V. M. Krasnov, *Phys. Rev. B*, **103**, No. 21: 214507 (2021).
 10. M. Hidaka, S. Nagasawa, K. Hinode, and T. Satoh, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **23**, No. 3: 1100906 (2013).
 11. M. Gurvitch, M. A. Washington, and H. A. Huggins, *Appl. Phys. Lett.*, **42**, No. 5: 472 (1983).
 12. A. Kalenyuk, A. Shapovalov, V. Shnyrkov, V. Shaternik, M. Belogolovskii, P. Febvre, F. Schmidl, and P. Seidel, *J. Phys.: Conference Series*, **1559**, No. 1: 012005 (2019).
 13. A. A. Kalenyuk, T. Golod, A. P. Shapovalov, A. L. Kasatkin, and S. I. Futimsky, *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, 743 (2020).
 14. A. A. Kalenyuk, A. Pagliero, E. A. Borodianskyi, S. Aswartham, S. Wurmehl, B. Вьchner, D. A. Chareev, A. A. Kordyuk, and V. M. Krasnov, *Phys. Rev. B*, **96**, No.13: 134512 (2017).
 15. A. Zeinali, T. Golod, and V. M. Krasnov, *Phys. Rev. B*, **94**, No.21: 214506 (2016).
 16. K. K. Likharev, *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits* (New York: Gordon and Breach Science Publishers: 1986).
 17. M. Belogolovskii, E. Zhitlukhina, V. Lacquaniti, N. De Leo, M. Fretto, and A. Soso, *Low Temp. Phys.*, **43**, No. 7: 756 (2017).
 18. A. I. Braginski, *J. Supercond. Nov. Magn.*, **32**, No. 1: 23 (2019).