

ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ КВАНТОВИХ ІНТЕРФЕРОМЕТРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуті поняття та переваги аналого-цифрового застосування НКВІДів. Розглянуто дослідження можливості використання магнітних, в тому числі керованих, джозефсоновських контактів в схемах надпровідникової логіки і пам'яті. Розглянуто напрямки дослідження можливості використання магнітних, в тому числі керованих, джозефсоновських контактів в схемах надпровідникової логіки і пам'яті.

Ключові слова: надпровідні квантові інтерферометри, квантування магнітного потоку, цифрові схеми.

Abstract

The concepts and advantages of analog-digital application of superconducting quantum interferometers were considered. The study of the possibility of using magnetic, including controlled, Josephson contacts in the schemes of superconductive logic and memory were considered. The direction of study of the possibility of using magnetic, including controlled, Josephson contacts in the schemes of superconductive logic and memory was considered.

Keywords: superconducting quantum interferometers, quantization of magnetic flux, digital circuits.

Вступ

Ефект макроскопічної квантової інтерференції між двома джозефсонівськими контактами з'єднаними в надпровідний контур, вперше продемонстрований в 1964 р [1], має велике практичне значення. Надпровідні квантові інтерферометри (НКВІДи) в даний час застосовуються в самих різних аналогових [2-4], аналого-цифрових [5] і цифрових [6] пристроях надпровідникової електроніки. Застосування НКВІДів в аналогових пристроях в таких різних областях як медицина, геофізика, дослідження мезоскопічних і мікроскопічних об'єктів, неруйнівна діагностика технічних пристроїв, обумовлено можливістю перетворення з їх допомогою магнітного сигналу в напругу з роздільною здатністю по енергії, яка досягає квантової межі [3]. Унікальні характеристики пристроїв отримують з використанням НКВІДів на основі низькотемпературних надпровідників (НТНП) і джозефсоновських тунельних SIS контактів. Параметри детекторної системи вдається поліпшити за допомогою об'єднання НКВІДів в ланки [7], збільшуючи, таким чином, коефіцієнт перетворення магнітного потоку в напругу і динамічний діапазон. Однак, незважаючи на те, що з моменту першої експериментальної демонстрації надпровідного двоконтактний інтерферометра пройшло вже понад півстоліття, аналітичний вираз залежності перетворення магнітного потоку в напругу НТНП НКВІДа постійного струму (ПС) для практичних параметрів інтерферометра так і не було отримано, що ускладнює оптимізацію багатоелементних структур, які містять сотні і тисячі елементів.

Метою роботи є розвиток методів розрахунку надпровідникових інтерферометричних схем на базі джозефсоновських контактів і підходів створення на їх основі елементної бази пристроїв прийому сигналів і обробки інформації. Відповідний цикл досліджень включає побудову відсутніх аналітичних виразів опису відгуку надпровідних квантових інтерферометрів на зовнішній магнітний сигнал, оптимізацію схем аналогових і цифрових перетворювачів магнітного сигналу в напругу на базі НКВІДів, а також розвиток методів застосування магнітних джозефсоновських контактів в схемах надпровідникової логіки і пам'яті.

Основна частина

Аналого-цифрове застосування НКВІДів засноване на ефекті квантування магнітного потоку в надпровідних контурах. У сукупності з високою чутливістю НКВІДів даний ефект дозволив створити широкий ряд надпровідникових аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) [5], що відрізняються високою лінійністю (до ~ 100 дБ) і великим динамічним діапазоном (до ~ 90 дБ). За рахунок високих характерних частот джозефсоновських контактів (порядку сотень гігагерц) надпровідникові АЦП можуть здійснювати пряме оцифрування сигналу (без аналогового перетворення сигналу на низькі частоти) в широкому діапазоні частот до десятків гігагерц [1]. В даний час характеристики надпровідникових високочастотних прийомальних систем на базі АЦП обмежені недостатньою лінійністю і динамічним діапазоном вхідного тракту, що включає в себе антену і низькошумний підсилювач. У той час як завдання приймання і підсилення магнітного сигналу може бути виконана за допомогою ланок НКВІДів, нелінійність їх передавальної характеристики [3] перешкоджає їх застосуванню в такій системі. Варто відзначити, що дана нелінійність ускладнює застосування НКВІДів в цілому ряді практичних завдань, наприклад, при зчитуванні матриць нанорозмірних сенсорів, таких як фотонні детектори або наноелектромеханічні системи (НЕМС), з поділом каналів по частоті.

Висока чутливість і низькі робочі температури дозволяють за допомогою НКВІД-структур робити зчитування і квантових станів об'єктів. Так, вимір магнітного потоку безпосередньо надпровідних кубітів або пов'язаних з ними схем (наприклад, джозефсоновських фотонних помножувачів), що проводиться в часовому домені за допомогою балістично поширюваних флаксонів [4], забезпечує можливість реалізації як руйнівного, так і неруйнівного зчитування в режимі безперервних або одноразових вимірювань. В основі принципу вимірювань лежить ефект розсіювання флаксонів на ефективному потенціалі, створюваному вимірюваним об'єктом. Однак відсутність теоретичного опису релятивістського процесу розсіювання перешкоджає оптимізації та застосуванню цієї універсальної схеми.

Цифрові схеми на базі НКВІДів відрізняються високими тактовими частотами і високою енергоефективністю. Ці переваги роблять їх особливо привабливими для застосування в пристроях високопродуктивних обчислень, таких як суперкомп'ютери і дата-центри [5]. Серед найбільш розвинених підходів обчислень на базі надпровідникових схем можна відзначити швидку одноквантову логіку, а також адіабатичну надпровідникову логіку. У той час як одноквантові схеми характеризуються традиційно високими тактовими частотами (близько 50 ГГц [6]), адіабатична логіка є найбільш енергоефективною. Енергія витрачається на передачу одного біта інформації в адіабатичних схемах на частоті 5 ГГц становить всього близько $\sim 10-20$ Дж [1]. На базі адіабатичної логіки можлива реалізація фізично і логічно оборотних схем, для яких енергія, що відповідає логічній операції, може бути зроблена як завгодно малою [1]. Поряд з порівняно високим рівнем розвитку цифрових логічних схем (кількість джозефсоновських контактів у схемі досягає декількох сотень тисяч [1]), схеми кріогенної пам'яті розвинені відносно слабо [2] з огляду на низьку ступінь інтеграції базових елементів, що перешкоджає практичне впровадження цифрової надпровідникової технології. Вихід з ситуації, що склалася, можливо, буде знайдений з привнесенням елементів спінтроніки в надпровідну електроніку, що підвищує їх функціональну складність. Перспективним видається напрямок дослідження можливості використання магнітних, в тому числі керованих, джозефсоновських контактів в схемах надпровідникової логіки і пам'яті.

Необхідно відзначити, що з огляду на порівняно низьку характерну напругу джозефсоновських контактів (≤ 1 мВ) передача інформації з цифрових логічних схем на базі

НКВІДів в схемі напівпровідникової електроніки вимагає спеціальних цифрових інтерфейсних підсилювачів. Дані підсилювачі так само можуть бути побудовані на базі схем НКВІДів і оптимізовані під вимоги конкретного радіотехнічного пристрою.

Висновки

Отримані аналітичні вирази для відгуку напруги НТНП НКВІДа використовуються для розрахунку і оптимізації характеристик реальних пристроїв на базі одиночних НКВІДів і їх послідовних схем.

Аналітичні вирази для розрахунку критичного струму НКВІДа з довільної асиметрією критичних струмів джозефсонівських контактів використовуються для експериментального визначення індуктивності контуру інтерферометра і застосовуються, в тому числі, в таких експериментальних завданнях, як визначення струм - фазового співвідношення невідомої джозефсоновської гетероструктури за допомогою асиметричного двоконтактного НКВІДа.

Методи лінеаризації відгуку напруги джозефсоновських структур на базі НКВІДов використовуються для розробки високолінійних перетворювачів магнітного поля в напругу, що працюють, в тому числі, в гігагерцовій області частот без зворотного зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. C. Granata and A. Vettoliere, "Nano Superconducting Quantum Interference device: a powerful tool for nanoscale investigations", *Phys. Rep.*, 614, 1-69, 2016
2. O. A. Mukhanov, "Digital Processing, Superconductor Digital Electronics" in *Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications*, P. Seidel, Ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 1 - 28, 2015.
3. M. Schmelz, V. Zakosarenko, T. Schönau, S. Anders, S. Linzen, R. Stolz and H.-G. Meyer, "Nearly quantum limited nanoSQUIDS based on cross-type Nb/AlO_x/Nb junctions", *Supercond. Sci. Technol.* 30, 014001, 2017.
4. D. S. Holmes, A. M. Kadin, M. W. Johnson, "Superconducting Computing in Large-Scale Hybrid Systems", *Computer*, 48, 34-42, 2015.
5. X. Peng, Q. Xu, T. Kato, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, N. Takagi, K. Takagi, M. Hidaka, "High-Speed Demonstration of Bit-Serial Floating-Point Adders and Multipliers Using Single-Flux-Quantum Circuits", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 25, 1301106, 2015.
6. N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "Energy efficiency of adiabatic superconductor logic", *Supercond. Sci. Technol.* 28, 015003 (2015).

Мазур Андрій Володимирович — студент групи ТКС-17мі, факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: andreymazur2009@gmail.com

Хуторний Віталій Олегович — студент групи ТКС-17мі, факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: tkt15ms.hutorny@gmail.com

Науковий керівник: **Васильківський Микола Володимирович** — кандидат технічних наук, доцент кафедри ТКСТБ, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Mazur Andrii V. - student of the group TKS-17mi, faculty of infocommunications, radio electronics and nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: andreymazur2009@gmail.com

Hutornyy Vitaliy O. - student of the group TKS-17mi, faculty of infocommunications, radio electronics and nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: tkt15ms.hutorny@gmail.com

Scientific supervisor: **Vasilkivskyi Mykola V.** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the TKSTB Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia