

Введение

В последнее десятилетие активно развиваются новые концепции вычислительных систем, которые смогут превзойти существующие полупроводниковые технологии. Следуя идее увеличения рабочей частоты и повышения энергоэффективности, часто используются сверхпроводящие схемы из-за их квантовых свойств. В ряде работ предлагается использовать кванты магнитного потока в сверхпроводниках для хранения информации (например, [1,2]). В данной работе мы изучаем высокочастотные свойства длинного джозефсоновского перехода с помощью копланарного микроволнового резонатора. Целью работы стало измерение естественного гистерезиса длинного перехода в магнитном поле. На основе этого эффекта возможно создание ячейки памяти.

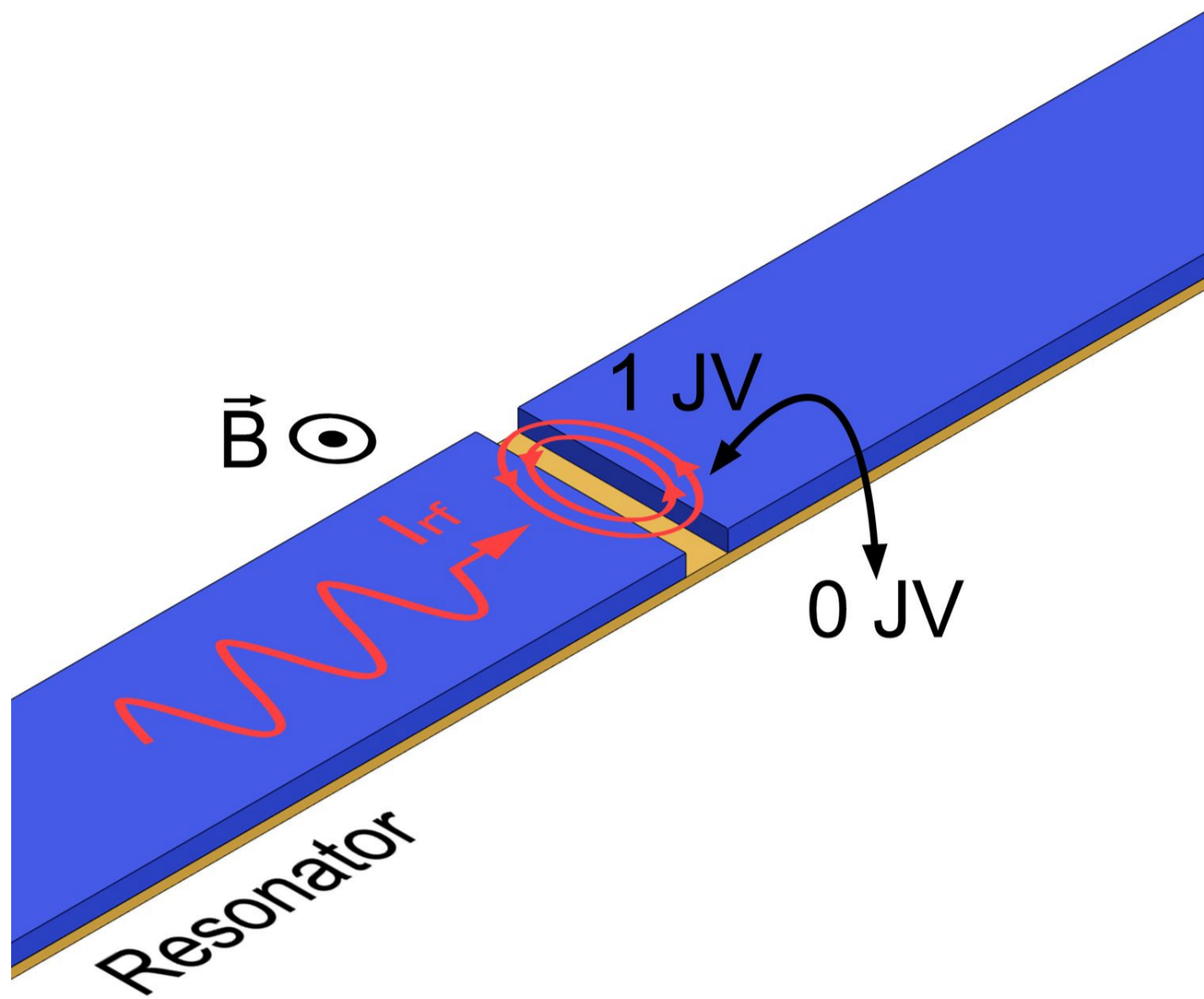


Рисунок 1. Схема исследуемой системы: центральная линия резонатора, изготовленная из бислоя медь/ниобий закорочена, на землю через длинный джозефсоновский переход типа SNS. Во внешнем магнитном поле в переход проникают вихри Джозефсона.

Результаты

- В эксперименте измеряется коэффициент пропускания S_{21} резонатора с SNS переходом в зависимости от частоты сигнала и внешнего магнитного поля. Результаты представлены на Рис. 2 а) и б), которые отличаются направлением развертки магнитного поля. Изменения в резонансной частоте (см. Рис. 2с) и добротности связаны с проникновением в SNS переход вихря Джозефсона.
- Ключевой особенностью, обнаруженной в экспериментах, является гистерезис входа и выхода вихря, который наблюдается в области полей между 0,21 мТл и 0,27 мТл.
- Численное моделирование длинного джозефсоновского перехода показывает аналогичное поведение (метод подробно описан и был использован в [3]). На Рис. 2 д) представлена зависимость потока через контакт в зависимости от внешнего магнитного поля, при этом область гистерезиса совпадает с измеренными значениями. Рис. 2 е) показывает, что гистерезис действительно связан с вихрями Джозефсона.
- На основе эффекта гистерезиса между состоянием без вихря и состоянием с одним вихрем может быть создана ячейка памяти. Чтобы перевести систему в рабочую область, применяется постоянное магнитное поле $B = 0,22$ мТл. Рисунок 3 показывает два различных состояния резонатора в этом поле. Чтобы переключаться между этими состояниями, систему следует вывести из области гистерезиса, приложив импульс большего или меньшего магнитного поля. Этот процесс проиллюстрирован на Рис. 3 справа. Моделирование показывает, что в экспериментальной системе продолжительность импульса может быть уменьшена до $\sim 0,1$ нс.

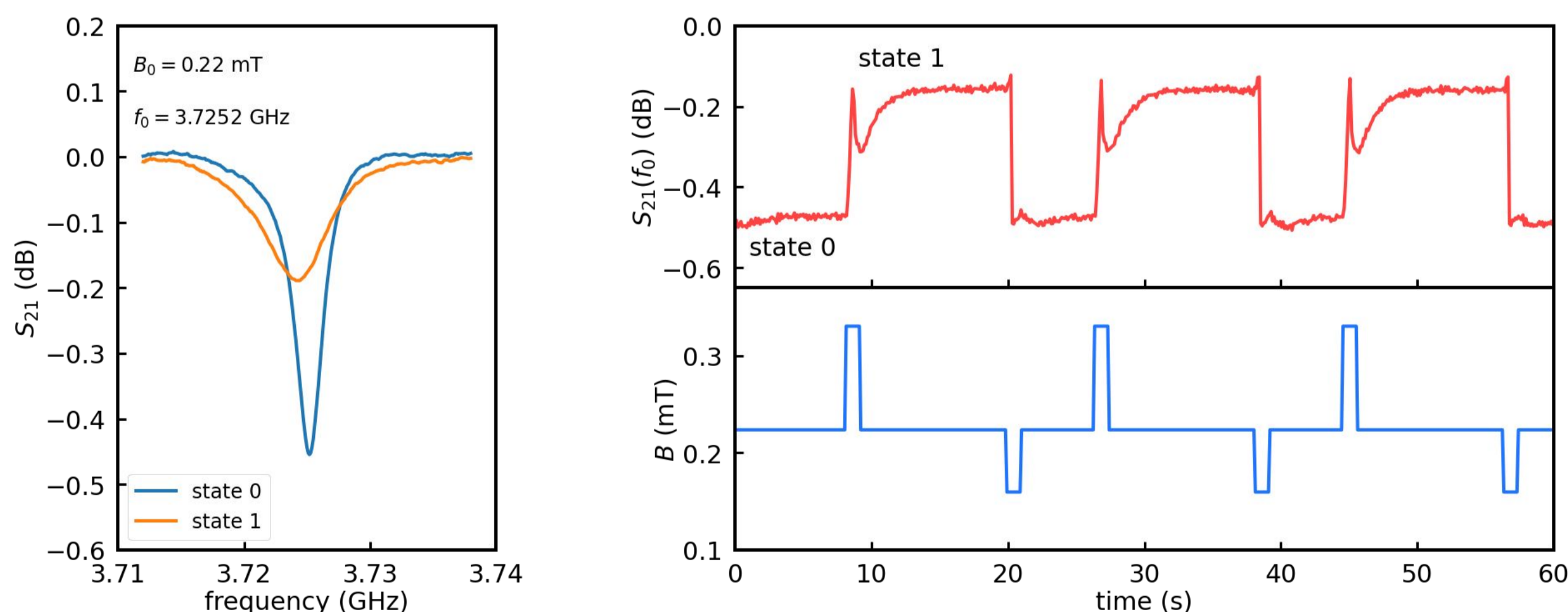


Рисунок 3. Слева: измеренные резонансные пики в гистерезисной области в состоянии без вихрей Джозефсона (state 0) и в состоянии с одним вихрем (state 1); справа: эксперимент по переключению состояний джозефсоновского контакта: сверху — измеряемый отклик системы, снизу — запись состояний с помощью импульсов внешнего магнитного поля.

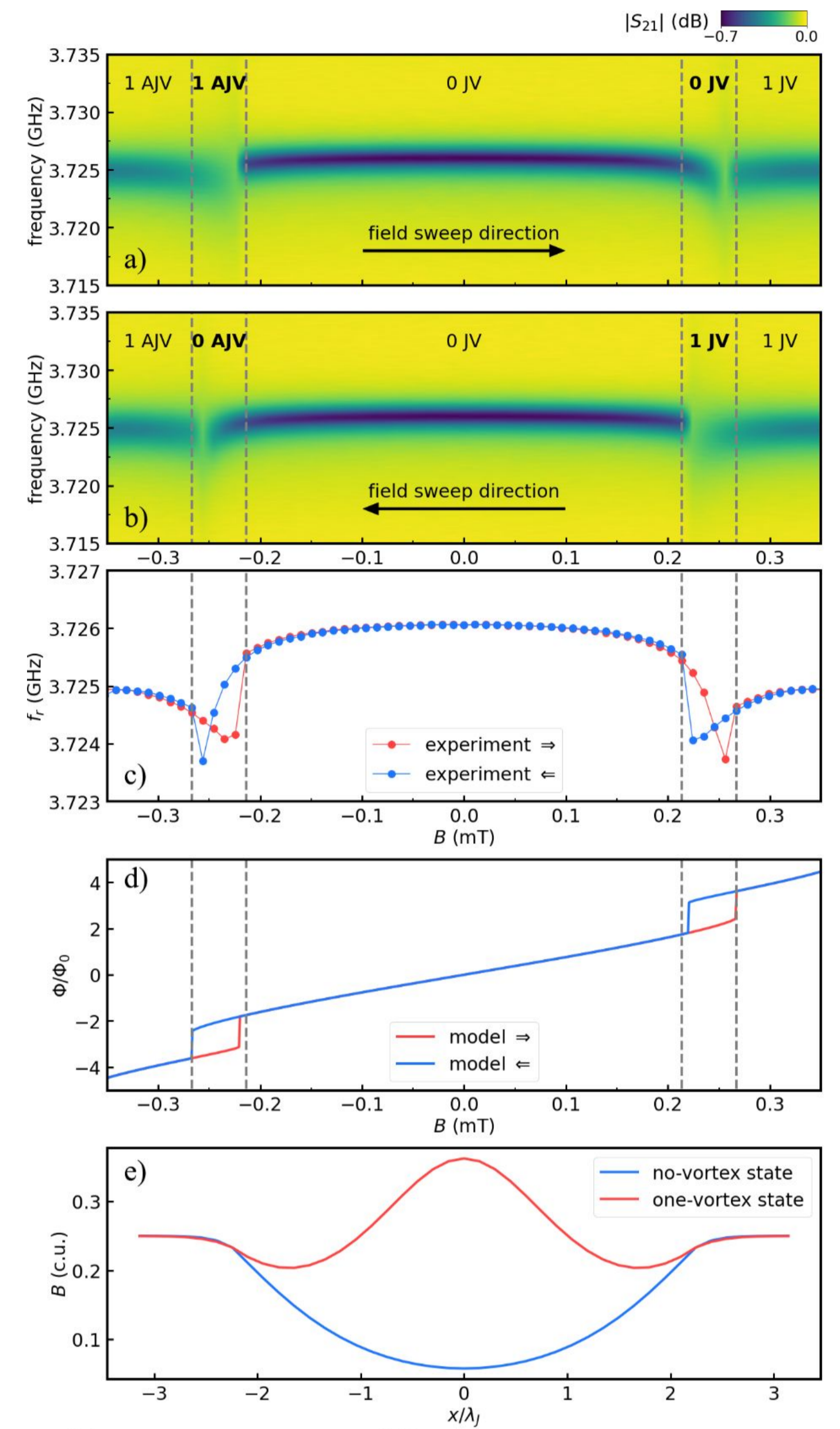


Рисунок 2. Результаты измерений и моделирования резонатора с длинным SNS в магнитном поле: на графиках а) и б) изображена зависимость амплитуды коэффициента пропускания S_{21} резонатора от частоты и магнитного поля при развертке поля слева направо (а) и справа налево (б), области синего цвета соответствуют резонансному поглощению сигнала; в) изменение резонансной частоты в магнитном поле; г) зависимость потока магнитного поля через переход от внешнего магнитного поля, полученная в результате моделирования; е) распределение магнитного поля в гистерезисной области при одинаковом внешнем магнитном поле 0,24 мТл, полученное в результате моделирования;

Заключение

В данной работе мы продемонстрировали возможность различать состояния с разным числом вихрей Джозефсона в длинном переходе при помощи микроволнового резонатора. В зависимости от состояния джозефсоновского перехода система имеет различную резонансную частоту и добротность. Данным методом удалось напрямую пронаблюдать эффект гистерезиса в длинном переходе. Численное моделирование подтвердило, что это явление связано с вихрями Джозефсона. На основе этого эффекта может быть создан элемент памяти, для считывания информации в котором используются СВЧ токи малой амплитуды, не разрушающие хранящееся состояние. Переключение между состояниями было показано экспериментально.

Литература

- C. Guarcello, P. Solinas, M. Di Ventra et al. // Sci. Rep. **7**, 46736 (2017)
- T. Golod, V. M. Krasnov // Nat Commun **13**, 3658 (2022)
- V. S. Stolyarov, V. Ruzhitskiy, R. A. Hovhannisyanyan, et al. // Nano Lett. **22**, 5715–5722 (2022)

Финансирование

Источники финансовой поддержки работы: ГЗ №FSMG-2023-0014, РФФ 21-72-30026, К2 №К2-2022-029