

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Карелиной Любови Николаевны "Разработка элементов джозефсоновской магнитной памяти на основе сплава $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ ", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Диссертация Карелиной Любови Николаевны посвящена фундаментальным исследованиям взаимодействия между сверхпроводимостью и ферромагнетизмом и разработке на этой основе элементов джозефсоновской магнитной памяти.

Взаимодействие между сверхпроводимостью и ферромагнетизмом является весьма активным направлением в современной физике конденсированного состояния. Это обусловлено как большим количеством предсказанных при этом новых физических явлений, так и возможностью использования структур ферромагнетик-сверхпроводник для создания новых приборов сверхпроводниковой электроники, в частности элементов памяти, совместимых с требованиями и технологией быстрой одноквантовой логики. Таким образом, тема диссертационной работы **актуальна** и значима как с фундаментальной, так и с практической точки зрения.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикации автора по теме диссертации и списка литературы.

Во **введении** обосновывается актуальность исследования, сформулированы его цели и задачи, раскрываются его новизна и практическая значимость. Приведены основные результаты диссертации и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной. В ней приведены сведения об особенностях ферромагнетизма в слабоферромагнитном сплаве $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$, и дан весьма полный обзор литературных данных о свойствах гибридных структур ферромагнетик-сверхпроводник и об уже достигнутых результатах по созданию элементов джозефсоновской магнитной памяти на основе этого сплава. Также обсуждается предельное быстродействие элементов джозефсоновской магнитной памяти.

Во **второй главе** описаны методы изготовления образцов и методики эксперимента, причём особое внимание уделяется методам, в разработку или внедрение которых значительный вклад внесён автором. Приведено описание установки магнетронного осаждения и технологического маршрута изготовления плёнок Nb и $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$, использованных в исследованиях данной работы. Рассмотрены внедренные автором методы контроля толщины и пространственного профиля плёнок, а также освоенные ей методы "протяжки" и "клина". Изложены методики изготовления основных типов образцов, а также методические особенности их измерения.

Третья глава посвящена микроволновой стимуляции перемагничивания ферромагнитного слоя SIsFS-элемента джозефсоновской магнитной памяти.

Приведено описание экспериментальной установки, содержащей связанную с образцом микроволновую антенну. Даны характерные кривые перемагничивания, полученные методом джозефсоновской магнитометрии, и определены состояния логического нуля и единицы. Продемонстрировано, что критический ток в одном из состояний уменьшается при подаче импульса СВЧ, в то время как в другом состоянии он остаётся неизменным. В результате, получено увеличение относительного диапазона токов на 9%.

В **четвертой главе** исследуются SIsFS контакты нестандартной - прямоугольной - формы, в которых разные логические состояния кодируются ориентацией намагниченности вдоль длинной или короткой стороны контакта. Благодаря зависимости периода фраунгоферовских осцилляций от ориентации поля, разным ориентациям намагниченности соответствует различное значение критического тока. Измерения проводились с образцами со сторонами $10 \text{ мкм} * 30 \text{ мкм}$ и $10 \text{ мкм} * 50 \text{ мкм}$. Показаны запись и считывание логического 0 и 1 для контакта с меньшим соотношением сторон и трёх логических состояний - для контакта с большим соотношением сторон. Возможность записи дополнительного состояния во втором случае обусловлена расщеплением поперечного магнитного состояния на два, различающихся ориентацией намагниченности относительно тока смещения. Показана совместимость продемонстрированных элементов с требованиями БОК-логики. Далее, исследованы перспективы миниатюризации: численным моделированием на основе кластерного ферромагнетика со случайно распределённой магнетизацией кластеров показано, что площадь SIsFS элемента джозефсоновской памяти потенциально может быть уменьшена до 2 мкм^2 .

Пятая глава посвящена исследованию планарных трехслойных структур ферромагнетик-сверхпроводник-ферромагнетик, в которых ток смещения протекает параллельно плоскости образца и которые могут рассматриваться как сверхпроводящие псевдоспиновые вентили. Вначале изучен эффект близости между Nb и $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ и обнаружена плавная зависимость критической температуры от толщины ферромагнитного слоя в необычно широком диапазоне толщин, которая объяснена зависимостью энергии обменного взаимодействия от толщины слоя. Исследовано магнитосопротивление образцов в окрестности перехода и показано усиление сверхпроводимости в слое Nb. Продемонстрирована возможность запоминания низкорезистивного состояния. Показана возможность получить большую разность напряжений между цифровыми состояниями при использовании трёхслойного мостика в качестве элемента памяти. Обсуждаются высоко- и низковольтный режимы работы мостика.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Список литературы содержит 157 источников.

Представленные в диссертации результаты получены впервые и являются **новыми**. Они также являются **научно значимыми**, так как представляют собой фундаментальный интерес для физики джозефсоновских переходов с

дополнительными слоями ферромагнетика. **Практическая значимость** обусловлена близостью темы диссертации к актуальной проблеме создания энергоэффективной памяти.

В проведённых исследованиях **авторский вклад** состоит в постановке некоторых методов контроля фабрикации образцов, проведении экспериментальных измерений, обработке полученных результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается выполнением измерений на нескольких образцах с использованием стандартных низкотемпературных транспортных техник, систематичностью полученных данных.

Апробация работы.

Результаты опубликованы в 5 статьях в высокорейтинговых научных журналах (все – из перечня ВАК) и докладывались на международных и российских конференциях. Диссертация написана хорошим и прозрачным языком, а автореферат правильно и полно отражает её содержание.

К диссертации есть следующие замечания.

1. Уровни критического тока, представленные на рис. 56, 60, 61, демонстрируют довольно значительный разброс, как в отсутствие, так и в присутствии импульсов СВЧ. Этот разброс автором не обсуждается. Важно, однако, связан ли он с погрешностями измерений или с флуктуациями в образце, например с невозпроизводимостью его намагниченности от цикла к циклу? В последнем случае, разброс критических токов ограничивает диапазон разности токов между состояниями 0 и 1, который может быть использован для элемента памяти, и, следовательно, уменьшает скорость считывания.

2. Автор приводит энергии в переключающих импульсах СВЧ и замечает, что "именно эта величина, по-видимому, определяет стимулирование магнитного переключения SIsFS-контакта". Неясно, насколько это соотносится с физической картиной резонансного переключения за счёт возбуждения прецессии локальных магнитных моментов; автором также не сделано попытки количественного сравнения с теорией, пусть даже и на уровне оценки.

3. В диссертации встречаются опечатки, например в подписи к рис. 26 на стр. 53 упоминается гистограмма "поэргитивного" поля. Отмечу, однако, что количество опечаток весьма незначительно.

Сделанные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация Карелиной Л.Н. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на мировом научном уровне.

По объёму, структуре, актуальности, научной новизне и значимости полученных результатов диссертация полностью соответствует требованиям, предъявляемым

к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор, Карелина Любовь Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Оппонент:

Семенов Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика, без учёного звания, доцент кафедры общей и экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет».

Я, Семенов Александр Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02), и их дальнейшую обработку.

«18» ноября 2022 г.



Семенов А.В.

Подпись Семенова А.В. заверяю



В Семенов с
ДОСТОВЕРНО
А. Б. Никитина

Сведения об организации - месте работы оппонента

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет».

Адрес: 119991, город Москва, улица М. Пироговская, дом 1, строение 1. Телефон: +7(499)245-03-10. Сайт: <http://mpgu.su>.