

УДК 621.317.444

ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МАГНИТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ДО 1 нТл

П.Ф. Баранов, С.В. Муравьев, В.Е. Огай, С.В. Учайкин*

Томский политехнический университет

*D-Wave Systems Inc., г. Бёрнаби, Канада

E-mail: muravyov@tpu.ru

Представлен опыт разработки однокомпонентного магнитометра на базе миниатюрного планарного феррозондового датчика для измерения магнитной индукции в диапазоне от 10 мкТл до 1 нТл и обеспечения работы сверхпроводящего квантового компьютера. Описаны способ изготовления феррозондового датчика и принцип работы схемы кондиционирования сигналов с датчика.

Ключевые слова:

Квантовый компьютер, магнитометр, планарный феррозондовый датчик, магнитная индукция, Finemet.

Key words:

Quantum computer, magnetometer, planar fluxgate sensor, magnetic induction, Finemet.

Введение

Измерение малых магнитных полей требуется при создании сверхпроводящего квантового компьютера, элементы которого — кубиты — представляют собой сверхпроводящие кольца, в одном или нескольких местах прерванные джозефсоновскими контактами. Кубиты очень чувствительны к внешнему магнитному полю, и для получения неискажённых результатов вычислений требуется обеспечить для их функционирования условия, близкие к магнитному вакууму. Для сверхпроводящего чипа это означает отсутствие захвата квантов магнитного потока $2,07 \cdot 10^{-15}$ Вб, что эквивалентно остаточной магнитной индукции менее 100 пТл [1].

Измерение абсолютного магнитного поля при рабочей температуре квантового чипа от 20 до 50 мК с высокой точностью традиционными способами связано с определенными трудностями. Измерение магнитного поля с помощью сквидов затруднено из-за периодичности вольт-поточковой характеристики [2], а использование магниторезистивных феррозондовых сенсоров и вибрационных преобразователей ограничено большим тепловыделением [3].

Наиболее широкое применение в качестве датчиков абсолютного магнитного поля при низких температурах нашли феррозондовые магнитометры [4]. Феррозонд обладает меньшей чувствительностью, чем сквид, но может измерять быстро меняющиеся поля с высокой амплитудой.

В статье представлен опыт разработки прототипа однокомпонентного магнитометра на базе миниатюрного феррозондового датчика для обеспечения работы сверхпроводящего квантового компьютера.

Конструкция феррозондового датчика

К конструкции феррозондового датчика, предназначенного для работы в области сверхнизких температур в вакууме, предъявляются особые требования: низкая теплоемкость; малое время термализации; низкое газовыделение.

Для уменьшения массы и габаритов датчика была выбрана планарная конструкция. Такой под-

ход позволил минимизировать габаритные размеры и упростить создание обмоток. Проводники изготавливались из меди, обладающей высокой теплопроводностью при низких температурах. Для придания обмоткам сверхпроводящих свойств, медные проводники покрывались слоем свинцово-оловянного сплава с температурой сверхпроводящего перехода около 5,3 К. Покрытие наносилось методом HALS (Hot Air Solder Leveling), при котором соответствующим образом подготовленная печатная плата вытягивается из свинцово-оловянного расплава в потоке горячего воздуха.

С целью минимизации стоимости и большей гибкости в выборе параметров феррозонда использовалась упрощенная технология однослойных печатных плат.

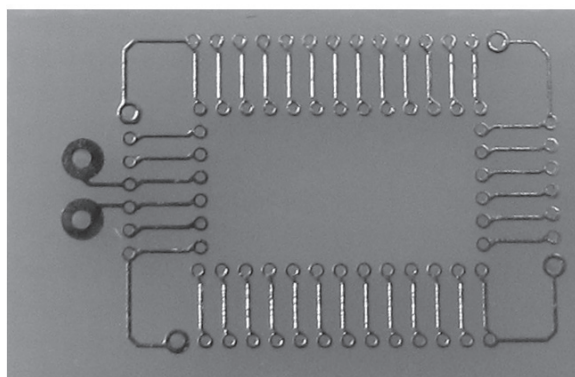
По этой технологии изготовлены отдельные платы обмоток возбуждения (рис. 1, а) и считывания (рис. 1, б).

На одной стороне платы с обмоткой возбуждения располагаются печатные проводники, на другую сторону приклеен сердечник из магнитомягкого ферромагнитного материала Finemet, вырезанный механическим способом (рис. 2).

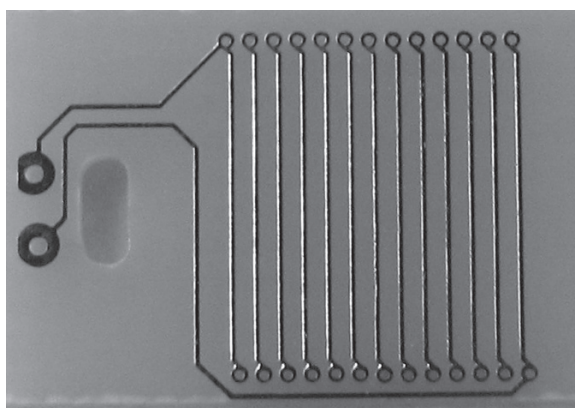
Для создания одной обмотки возбуждения на плату с сердечником накладывалась вторая печатная плата с обмоткой возбуждения. Соединения между платами осуществлялись с помощью покрытого медью титаноникобиевого провода диаметром 0,05 мм путем спайки.

После спайки обмотка возбуждения пропитывалась двухкомпонентной эпоксидной смолой Stycast 2850 FT. Сушка производилась в камере с давлением не более 1 Па. Затем на заготовку с двух сторон накладывались платы с обмоткой считывания. Соединения проводников обмоток производились с помощью того же титаноникобиевого провода. Затем датчик снова пропитывался клеем Stycast с сушкой в вакууме в течение суток.

Схема размещения обмоток феррозондового датчика представлена на рис. 3, а, а внешний вид готового датчика — на рис. 3, б. Геометрические размеры датчика $10 \times 6 \times 2$ мм.



a



б

Рис. 1. Печатная плата с обмоткой (а) возбуждения и (б) считывания

Материал сердечника Finemet производится фирмой Hitachi из магнитомягкого ферромагнитного композита путем специальной термообработки [5, 6], в результате которой в материале образуются нанокристаллы, придающие ему такие уникальные физические свойства, как высокая магнитная индукция насыщения, сравнимая с индукцией насыщения материалов на основе аморфного железа; высокая магнитная восприимчивость, сравнимая с магнитной восприимчивостью материалов на основе аморфного кобальта; низкие потери на перемагничивание сердечника, не превы-

шающие 20 % от потерь сердечников из аморфного железа; чрезвычайно низкая магнитострикция и др. Указанные свойства позволяют улучшить метрологические характеристики феррозондов при замене обычного материала сердечника на Finemet.

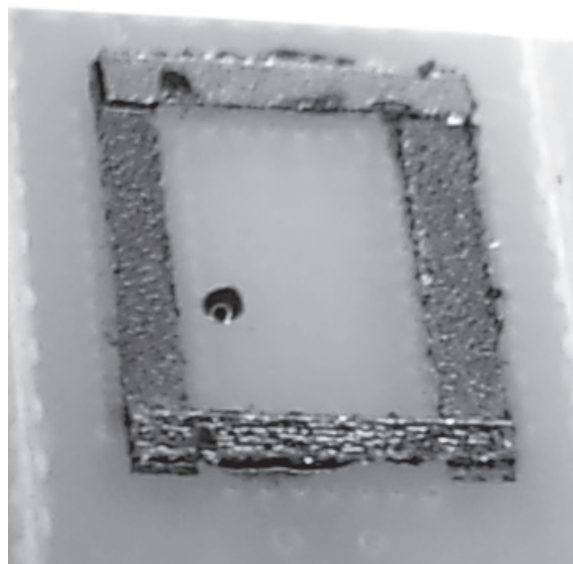
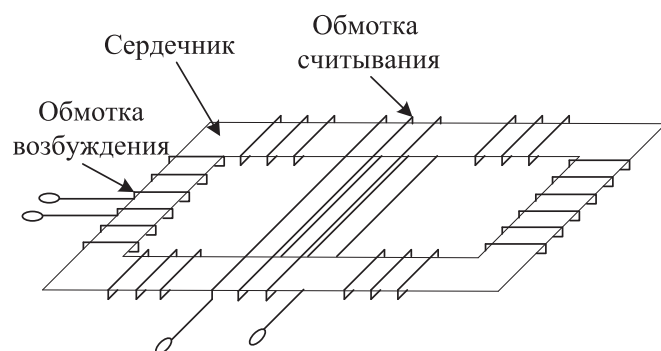


Рис. 2. Формирование сердечника

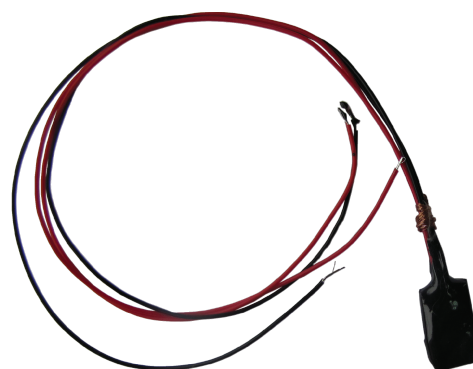
Схема кондиционирования сигнала с феррозондового датчика

Для формирования управляющего воздействия на феррозондовый датчик магнитного поля и считывания с него ЭДС, пропорциональной магнитной индукции измеряемого поля, была предложена функциональная схема кондиционирования сигнала контроллера, рис. 4.

Возбуждение феррозондового датчика осуществляется с помощью задающего генератора на логических элементах, который формирует униполярные прямоугольные импульсы частотой, равной $4f$. Для установления частоты сигнала f и скважности импульсов, равной двум, используются последовательно включенные два D-триггера. С выхода второго D-триггера сигнал с частотой f подается



a



б

Рис. 3. Схема размещения обмоток феррозондового датчика (а) и датчик в сборе (б)

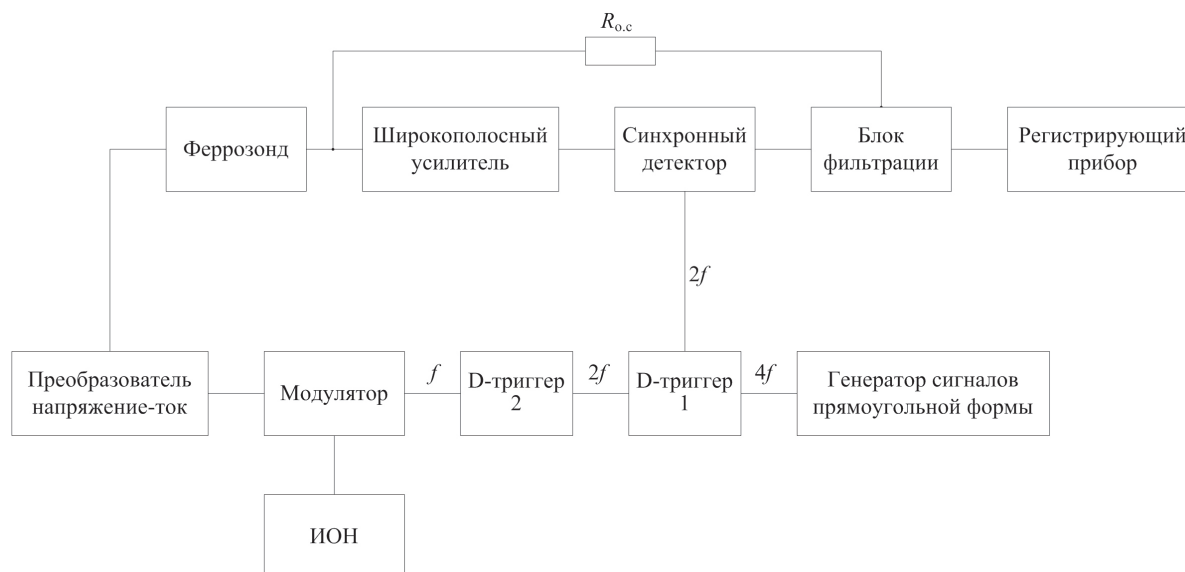


Рис. 4. Функциональная схема кондиционирования сигнала с феррозондового датчика

на управляющий вход модулятора, на сигнальный вход которого подано постоянное напряжение с регулируемого источника опорного напряжения (ИОН). В результате на выходе модулятора формируется биполярный сигнал скважностью равной двум и частотой f , который через преобразователь напряжения в ток поступает на обмотку возбуждения феррозондового датчика.

Сигнал с измерительной обмотки феррозонда усиливается широкополосным усилителем и поступает на вход синхронного детектора, на второй вход которого поступает сигнал с выхода первого D-триггера с частотой $2f$. В результате на выходе синхронного детектора выделяется сигнал, пропорциональный амплитуде второй гармоники, которая, в свою очередь, соответствует значению измеряемого магнитного поля. Выделенный сигнал фильтруется с целью устранения высокочастотного шума и через резистор отрицательной обратной связи $R_{о.с}$ задает компенсационный ток в измерительной обмотке феррозонда, а также через фильтр нижних частот поступает на регистрирующий прибор. Амплитуда напряжения на выходе фильтра нижних частот пропорциональна значению магнитной индукции.

Генератор сигналов прямоугольной формы собран на микросхеме 74НСТ14, D-триггеры выполнены на микросхеме HCF4013, источник опорного напряжения собран на микросхеме AD584, схемы модулятора и синхронного детектора построены на основе микросхемы AD630. Широкополосный усилитель собран на микросхемах AD797 и ADA4627-1, фильтры нижних частот выполнены на микросхемах AD8610.

Внешний вид устройства кондиционирования сигнала с феррозондового датчика представлен на рис. 5.

Проверка разработанного прототипа магнитометра и установление коэффициента преобразования осуществлялась методом прямых измерений магнитной индукции внутри системы экранов, поле создавалось соленоидом. В качестве образцового магнитометра использовался феррозондовый магнитометр Mag-01H производства Bartington Instruments. Магнитометр Mag-01H позволяет измерять одну компоненту магнитной индукции с разрешением не более 1 нТл в диапазоне температур от 300 до 4 К [7].

Результаты измерений приведены в таблице.

Таблица. Результаты измерений магнитной индукции

Значение магнитной индукции, полученное с помощью Mag-01H, нТл	Напряжение на выходе одноканального магнитометра, В	Коэффициент преобразования, В/мТл
98	$9,703 \cdot 10^{-3}$	99,01
	$9,701 \cdot 10^{-3}$	98,99
	$9,709 \cdot 10^{-3}$	99,07
	$9,705 \cdot 10^{-3}$	99,03
	$9,704 \cdot 10^{-3}$	99,02
1	$98,9 \cdot 10^{-6}$	98,9
	$98,8 \cdot 10^{-6}$	98,8
	$98,7 \cdot 10^{-6}$	98,7
	$99,0 \cdot 10^{-6}$	99,0
	$99,1 \cdot 10^{-6}$	99,1
$0,9 \cdot 10^{-4}$	$89,0922 \cdot 10^{-2}$	98,9913
	$89,0917 \cdot 10^{-2}$	98,9907
	$89,0918 \cdot 10^{-2}$	98,9908
	$89,0924 \cdot 10^{-2}$	98,9915
	$89,0921 \cdot 10^{-2}$	98,9912

В результате установлено значение коэффициента преобразования прототипа одноканального магнитометра. Результаты измерений показали удовлетворительное качество прибора и его пригодность для измерения слабых магнитных полей.

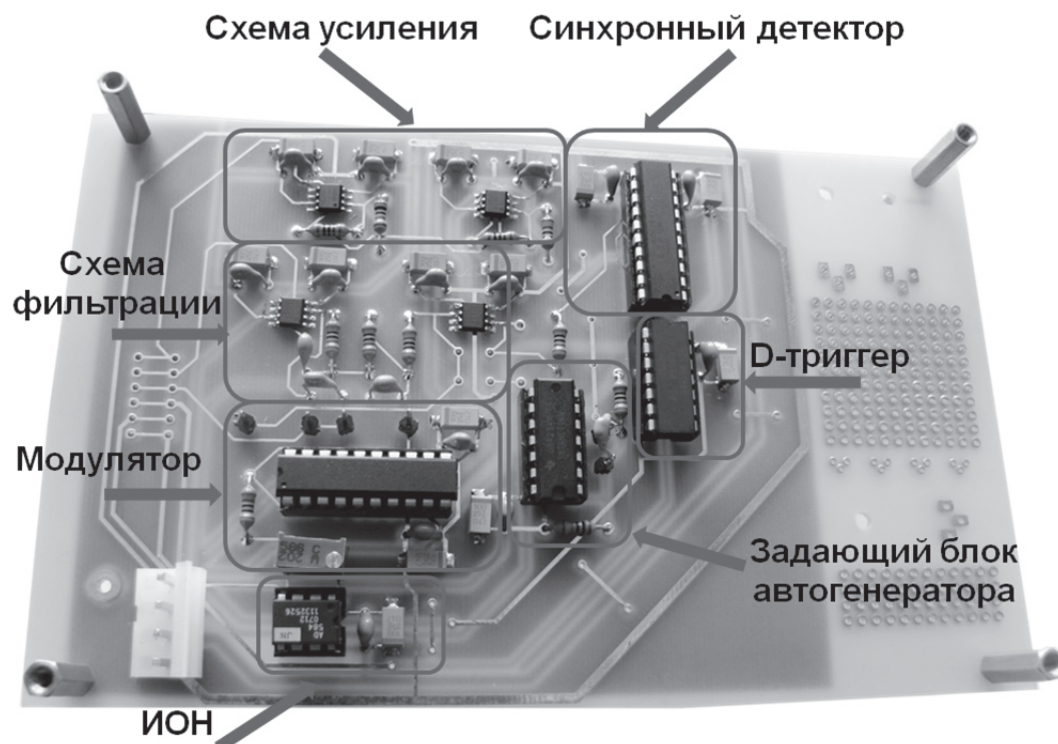


Рис. 5. Устройство кондиционирования сигналов с феррозондового датчика

Дальнейшие исследования имеют целью создание прототипа 3D магнитометра на основе трех расположенных ортогонально друг к другу феррозондовых датчиков и повышение чувствительности магнитометра.

Выводы

1. Предложена конструкция феррозондового датчика с геометрическими размерами $10 \times 6 \times 2$ мм для работы в области сверхнизких температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnson M.W., Amin M.H.S., Gildert S., et al. Quantum annealing with manufactured spins // Nature. – 2011. – V. 473. – Iss. 7346. – P. 194–198.
2. Uchaikin S., Likhachev A., Cioata F., et al. Sample 3D magnetometer for a dilution refrigerator // Proc. of the 26th Intern. Conf. on Low Temperature Physics (LT26). – August 10–17, 2011, Beijing, China, Institute of Physics at Chinese Academy of Sciences. – Beijing, 2011. – P. 332–338.
3. Uchaikin S.V. Fluxgate Magnetometer for Cryogenics // Czechoslovak Journal of Physics. – 1996. – V. 46. – P. 28–29.
4. Ando B., Baglio S., Bulsara A.R., Trigona C. Design and characterization of a microwire fluxgate magnetometer // Sensors and Actuators. – 2009. – V. 151. – P. 145–153.

2. Разработана схема кондиционирования для формирования управляющего воздействия на феррозондовый датчик и считывания с него ЭДС, пропорциональной магнитной индукции измеряемого поля.
3. Испытания магнитометра показали, что он обеспечивает диапазон измерения магнитной индукции от 10 мкТл до 1 нТл.

Работа выполнялась при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. в рамках государственного контракта № 14.740.11.0950.

5. Finemet. EMC Components. 2011. URL: <http://www.hitachi-metals.co.jp/e/prod/prod0/pdf/hl-fm4-f.pdf> (дата обращения: 17.12.2011).
6. Nanocrystalline soft magnetic material. 2011. URL: <http://www.hilltech.com/pdf/hl-fm10-cFinemetIntro.pdf> (дата обращения: 22.11.2011).
7. Mag-01 Single Axis Fluxgate Magnetometer. 2011. URL: <http://www.bartington.com/Default.aspx?PageID=5187129&A=SearchResult&SearchID=176003&ObjectID=5187129&ObjectType=1> (дата обращения: 10.09.2011).

Поступила 21.03.2012 г.