

## Наноструктурированный комбинированный датчик магнитного поля

### Аннотация

Исследован комбинированный датчик магнитного поля, состоящий из магниточувствительного элемента на основе структуры гигантского магнитосопротивления и пленочного сверхпроводящего концентратора магнитного поля. Фрагментация (наноструктурирование, ширина ветвей 20...350 нм) активной полосы концентратора магнитного поля на многочисленные ветви и прорезы, моделирование их размеров (наноразмеров) и расположений позволяют на 1...2 порядка повышать коэффициент концентрации и эффективность датчика (разрешение  $\leq 10$  пТл). При этом более эффективным является концентратор магнитного поля на основе пленок из низкотемпературного сверхпроводника по сравнению с концентратором на основе пленок из высокотемпературного сверхпроводника. Приведены сравнительные параметры рассмотренного датчика и СКВИДов.

### Введение

Многочисленные датчики магнитного поля (ДМП) применяются в биомедицинских системах. Особенно активно разрабатываются магнитные системы на основе ДМП на эффектах спинтроники. Как правило, они доступны, имеют малые массогабаритные размеры и высокие функциональные параметры. Например, ДМП на эффекте гигантского магнитосопротивления (ГМС) имеет толщину  $\leq 2$  мкм, длину  $\leq 2$  мм, плотность  $\sim 1,5$  г/см<sup>3</sup> и удивительную гибкость – выдерживает около 1000 циклов деформации до 270% [1]. Вероятно, что такой ДМП, закрепленный на коже, позволит человеку приобрести чувствительность к магнитному полю и легко ориентироваться в пространстве. Несмотря на то что ДМП на эффектах спинтроники имеют много положительных свойств, для многих биомедицинских задач их основополагающая характеристика – чувствительность – является недостаточной. Например, для ГМС приведенная чувствительность  $\leq 10$  %мТл, а пороговая чувствительность (разрешение по магнитному полю)  $\delta B_0 \geq 1$  нТл. В большинстве ДМП высокое разрешение, т. е. низкое значение  $\delta B_0 \leq 1$  нТл, достигается за счет использования сверхпроводящих концентраторов магнитного поля (КМП)<sup>1</sup>. В этом случае основными составными частями ДМП являются КМП и магниточувствительный элемент (МЧЭ). В качестве МЧЭ могут быть: джозефсоновские переходы (явление сверхпроводимости), датчики Холла, датчики на эффектах спинтроники и др. [2].

Многие биомедицинские задачи решаются с применением наиболее чувствительных ДМП ( $\delta B_0 \geq 1$  фТл) типа сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик (СКВИД), в котором в качестве МЧЭ используются джозефсоновские переходы. СКВИДы чувствительны к магнитному потоку  $\Phi$ , поэтому измерение магнитного поля  $B$  производится при помощи дополнительных элементов; их применение ограничивается высокой стоимостью [2], [3].

Параметры, сравнимые с характеристиками СКВИДов, получены в новом типе датчика – так называемом комбинированном ДМП (КДМП). Он содержит пленочный сверхпроводящий КМП и МЧЭ на основе спинтроники, часто ГМС [4], [5]. В этих работах предложены КДМП, имеющие пленочные КМП на основе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП, рабочая температура  $T_W \sim 4$  К) и высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП,  $T_W \sim 77$  К). Для КДМП достигнутое разрешение  $\delta B_0 \sim 1$  фТл при  $T_W \sim 4$  К заметно лучше по сравнению с разрешением ВТСП СКВИДа:  $\delta B_0 \geq 5$  фТл при  $T_W \sim 4$  К.

В работах [6], [7] показано, что оптимальное фрагментирование (наноструктурирование) активной полосы КМП на параллельные ветви и прорезы с нанометровыми размерами приводит к дополнительному повышению коэффициента концентрации, соответственно повышается эффективность КДМП, в частности, уменьшается его параметр  $\delta B$ .

В рассматриваемой работе исследуется комбинированный датчик магнитного поля, состоящий из магниточувствительного элемента на основе структуры гигантского магнитосопротивления и пленочного сверхпроводящего концентратора магнитного поля. При этом активная полоса концентратора фрагментируется на параллельные сверхпроводящие ветви и прорезы, моделируются их размеры (наноразмеры) и расположение.

### Материалы и методы

Объектом исследования является фактор умножения  $F$  (коэффициент концентрации) магнитного поля пленочного КМП на МЧЭ при наноструктурировании активной полосы на сверхпроводящие ветви и прорезы<sup>2</sup>. При этом считается, что в случае сплошной активной полосы (отсутствует фрагментация) фактор умножения  $F_0 = 1$ . Рассматривается конструкция КДМП, состоящего из пленочного сверхпроводящего кольца с суженной активной полосой и МЧЭ в виде пленки с ГМС. При этом активная полоса КМП перекрывает МЧЭ, отделенный с помощью изолирующей пленки, что иллюстративно показано на рис. 1.

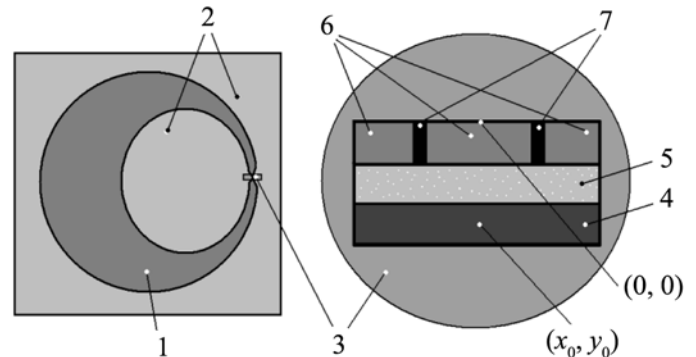


Рис. 1. Иллюстративная схема КДМП и его элементов: 1 – сверхпроводящее кольцо КМП; 2 – диэлектрическая подложка; 3 – активная полоса КМП в увеличенном масштабе (пропорции не сохранены); 4 – МЧЭ; 5 – изолирующая пленка; 6 – ветви активной полосы; 7 – прорезы активной полосы

Во внешнем магнитном поле  $B_0$  магнитный поток, который экранирует кольцо 1 (рис. 1), определяется как  $\Phi = A \cdot B_0$ , где  $A$  – площадь кольца. Экранирующий ток  $I_S$  имеет величину  $I_S = \Phi / (L + M)$ , где  $L$  – индуктивность кольца;  $M$  – сумма взаимных индуктивностей между частями КМП и МЧЭ. Известно, что величина  $L$  на порядок и более превышает суммарную взаимную индукцию  $M$ . Тогда для  $I_S$  напишем

$$I_S = \frac{\pi D^2 \cdot B_0}{4L}. \quad (1)$$

<sup>1</sup> Сверхпроводящее кольцо выполняет функции КМП, когда регистрируемый элемент чувствителен к магнитному полю, и оно выполняет функцию трансформатора магнитного потока (ТМП), когда регистрируемый элемент чувствителен к магнитному потоку.

<sup>2</sup> Фактор умножения  $F$ , используемый нами, и фактор усиления магнитного поля  $g$ , приведенный в [8], являются синонимами.

Индуктивность  $L$  кольца КМП гораздо больше индуктивности  $L_S$  активной полосы. В случае, когда последняя состоит из нескольких ветвей, каждая с индуктивностью  $L_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n + 1$ ), где  $n \geq 0$  – число прорезей в активной полосе), их суммарная индуктивность незначительно увеличивается относительно  $L_S$ .

В расчетах использовались известные формулы:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I_S}{8\pi \cdot \lambda \cdot h} \cdot \left[ \int_{-2h}^0 \int_{-l}^0 \frac{e^{-\frac{x+l}{\lambda}} \cdot (y_0 - y)}{(y_0 - y)^2 + (x_0 - x)^2} dx dy + \int_{-2h}^0 \int_0^{+l} \frac{e^{-\frac{l-x}{\lambda}} \cdot (y_0 - y)}{(y_0 - y)^2 + (x_0 - x)^2} dx dy \right]; \quad (2)$$

$$F = \frac{\langle B \rangle}{\langle B_0 \rangle} \cdot \frac{1}{K_L}; \quad (3)$$

$$K_L = \frac{\left( \sum_{i=1}^{n+1} L_i^{-1} \right)^{-1}}{L} \sim \frac{w_s}{\sum_{i=1}^{n+1} w_i}, \quad (4)$$

где  $l$  и  $h$  – полуширина и полутолщина пленки активной полосы соответственно;  $\mu_0$  – постоянная магнитного поля;  $I_S / (4hl) \leq j_c$ , где  $I_S$  – величина экранирующего сверхпроводящего тока в активной полосе, протекающего над МЧЭ и действующего на него в точке  $(x_0, y_0)$  [точка отсчета  $(0, 0)$  находится в центре верхней поверхности пленки];  $B$  – магнитное поле в активной полосе, созданное током  $I_S$ ;  $j_c$  и  $\lambda$  – плотность критического тока и лондоновская глубина проникновения для пленочного материала КМП соответственно;  $\langle B \rangle$  и  $\langle B_0 \rangle$  – усредненные значения магнитных полей, создаваемых активной полосой в случаях с многочисленными ветвями и без ветвей (сплошная полоса) соответственно;  $K_L$  – фактор роста суммарной индуктивности активной полосы;  $L$ ,  $L_i$  – индуктивность активной полосы и ее  $i$ -й ветви соответственно;  $n$  – количество прорезей,  $n + 1$  – количество ветвей в активной полосе;  $w_s$ ,  $w_i$  – полная ширина активной полосы и ее  $i$ -й ветви соответственно.

Физический механизм работы данного КДМП основан на концентрации магнитного поля с помощью КМП на МЧЭ. Высокая концентрация магнитного поля на МЧЭ позволяет увеличить его относительную магниточувствительность  $S_0$  в  $F_0$  раз и улучшить разрешающие показатели КДМП. Здесь  $S_0 = (R_B - R_0) / (R_0 \cdot B_0)$ , где  $R_B$  – сопротивление МЧЭ во внешнем магнитном поле, т. е.  $B_0 \neq 0$ ;  $R_0$  – сопротивление МЧЭ в отсутствие внешнего магнитного поля, т. е.  $B_0 = 0$ . Величина  $F_0$  увеличивает  $S_0$  как  $\sim F_0 \cdot S_0$ , и тем самым достигается улучшение положительных показателей (уменьшение минимального регистрируемого магнитного поля  $\delta B_0$ ) ДМП. Имеется в виду, что в КДМП со сплошной активной полосой имеет место

$$\delta B_0 \sim \frac{\delta U}{IR_0 F_0 S_0}, \quad (5)$$

где  $\delta U$  – минимальный регистрируемый сигнал на МЧЭ;  $I$  – измерительный ток в МЧЭ. Видно, что высокое значение величины  $F$  приводит к улучшению показателей ДМП, т. е. к уменьшению  $\delta B_0$ . С учетом уравнения (1) по определению для  $F_0$  можно записать:

$$F_0 = \frac{\langle B_a \rangle}{\langle B_0 \rangle}; \quad (6)$$

$$F_0 = \frac{\pi D}{4w_s \cdot \left\{ \ln \left( \frac{4D}{w_L} \right) - 2 + \frac{7w_L}{2D} \right\}}; \quad (7)$$

$$L = \left( \frac{\mu_0 D}{2} \right) \cdot \left[ \ln \left( \frac{4D}{w_L} \right) - 2 + \frac{7w_L}{2D} \right]; \quad (8)$$

$$B_a = \frac{\mu_0 I_S}{2w_s}, \quad (9)$$

где учтены индукция  $L$  кольца, его диаметр  $D$  и ширина  $w_L$ , а также магнитное поле  $B_a$  на поверхности активной полосы, созданное током  $I_S$ .

## Результаты и обсуждение

Во всех расчетах использовались следующие числовые параметры предполагаемого КДМП:  $D = 4$  мм – диаметр кольца;  $w_L = 1,7$  мм – ширина контура;  $w_s = 7$  мкм – ширина активной полосы;  $h = 25$  нм – полутолщина активной полосы;  $\lambda = 50$  нм – лондоновская глубина проникновения для НТСП материала;  $\lambda = 250$  нм – лондоновская глубина проникновения для ВТСП материала;  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – постоянная магнитного поля.

Рассмотрим несколько случаев.

1. Допустим, что внешнее магнитное поле  $B = 10$  мкТл,  $j_c \geq 10^{11}$  А/м<sup>2</sup> и в активной полосе ток распределен однородно. Тогда, согласно приведенным формулам, величина  $F_0 \sim 259$ , т. е. коэффициент концентрации довольно высок. Другими словами, поле в активной полосе превосходит внешнее поле в 259 раз.

2. При использовании реальных сверхпроводящих пленок в качестве концентратора магнитного поля ток в них распределяется неоднородно (особенно по ширине активной полосы) и вследствие этого значение  $F_0$  уменьшается.

На рис. 2 представлена типичная картина распределения магнитного поля по ширине активной полосы при различных значениях  $\lambda$ .

Согласно рис. 2, в активной полосе концентрируется внешнее магнитное поле. В частности, пиковое поле ( $\sim 34$  мТл) в несколько тысяч раз превосходит внешнее магнитное поле ( $\sim 10$  мкТл), однако его среднее значение по ширине активной полосы гораздо меньше. Получены следующие величины факторов умножения: при  $\lambda = 50$  нм – 174, при  $\lambda = 250$  нм – 216 [среднее значение  $\langle B_0 \rangle$  вычислялось по формуле (2)]. Видно, что эти значения  $F_0$  меньше относительно идеального случая  $F_0 \sim 259$  (см. случай 1), когда ток однородно распределен в активной полосе.

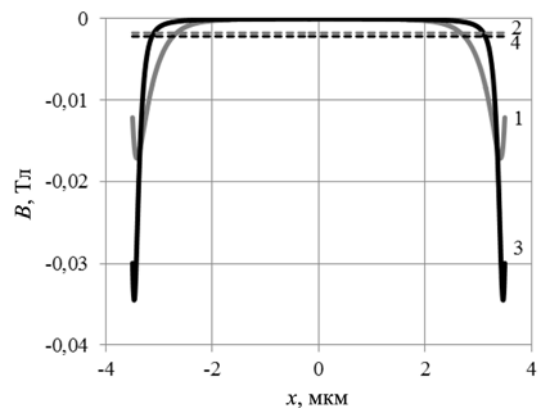


Рис. 2. Неоднородное распределение магнитного поля по ширине активной полосы концентратора магнитного поля и его среднее значение для различных материалов сверхпроводящих пленок: НТСП:  $\lambda = 50$  нм, 1 –  $B$ , 2 –  $\langle B \rangle$ ; ВТСП:  $\lambda = 250$  нм, 3 –  $B$ , 4 –  $\langle B \rangle$

3. В случае  $i = 1$ ,  $n = 0$  считается  $F = 1$ , что соответствует КМП со сплошной активной полосой. Значение  $F$  существенно изменяется, если проводить фрагментирование ( $i > 1$ ) сплошной активной полосы на параллельные ветви и прорези (см. рис. 1). В простом случае, при двух прорезях ( $n = 2$ ), значение фактора умножения увеличивается в 2...4 раза в зависимости от их расположения в активной полосе. Небольшие  $F$  реализуются, когда прорези находятся вблизи краев, а максимальные

значения  $F$  достигаются, когда прорезы находятся далеко от краев активной полосы.

На рис. 3 показаны зависимости  $F(n)$  для различных значений  $\lambda$ . В расчетах использовались те параметры, которые приведены в начале раздела, а также толщина изолирующего слоя  $h_{ins} = 20$  нм и  $j_c \geq 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>.

Получено, что при увеличении числа прорезей, наносящихся на поверхность активной полосы и имеющих нанометровые размеры, происходит значительное увеличение фактора концентрации  $F$ . Однако по достижении определенного числа прорезей данный эффект начинает принимать отрицательное направление. Например, на рис. 3а показано, что для  $\lambda = 50$  нм и прореза шириной  $w_p = 20$  нм удается достичь наибольших значений  $F$ , но когда количество прорезей становится равным 64, монотонное увеличение сменяется уменьшением, т. е. наблюдается максимум ( $F_m = 45$ ). Аналогично, при  $\lambda = 250$  нм и  $w_p = 20$  нм достигается максимум  $F_m = 11$  при  $n = 32$  (см. рис. 3б).

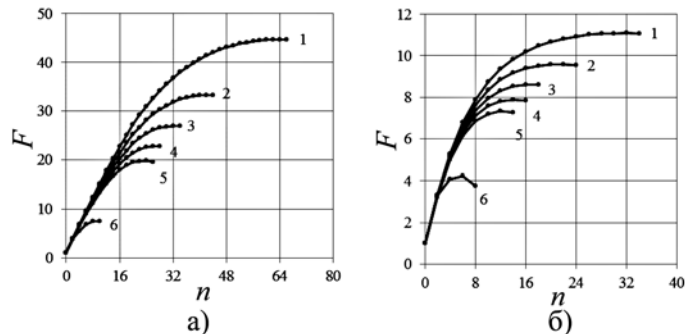


Рис. 3. Зависимость  $F(n)$ : а)  $\lambda = 50$  нм; б)  $\lambda = 250$  нм для различных значений  $w_p$ :

1 – 20 нм, 2 – 40 нм, 3 – 60 нм, 4 – 80 нм, 5 – 100 нм, 6 – 350 нм

При сравнении поведения фактора концентрации для значений  $\lambda = 50$  нм и  $\lambda = 250$  нм обнаруживается, что в первом случае удается получить значения  $F$  в 4 раза более высокие. Высокое значение  $F \sim 44$  при низких значениях  $\lambda$  говорит о большей эффективности чистых НТСП-материалов (например, гетерозрптаксиальные слои – ГЭС – ниобия  $\lambda \sim 60$  нм [9]) относительно гранулярных или ВТСП-материалов, где  $F_m \sim 11$  (например, керамика системы Bi-2223 с  $\lambda \sim 250$  нм [10]), используемых в пленочных КМПП.

В данной статье мы рассмотрели случай, когда активная полоса фрагментируется на сверхпроводящие ветви и прорезы (несверхпроводящие ветви), имеющие наноразмеры. В нашем случае (параметры  $D = 4$  мм,  $w_L = 7$  мкм, остальные параметры те же, что использовались ранее)  $F_0 \sim 200$ ,  $F_m \sim 50$ , общий фактор умножения (коэффициент концентрации)  $F_0 \cdot F_m \geq 10000$  и, согласно выражению (5),  $\delta B \leq 10^{-14}$  Тл. Таким образом, для снижения значения  $\delta B$  не потребовалось увеличения  $D$  или уменьшения  $w_p$ , как это следует из выражения (7).

## Заключение

Основными потребителями ДМП с разрешением по магнитному полю  $\leq 10$  пТл считаются медицинские магнитные системы, например магнитокардиограф, магнитоэнцефалограф (МЭГ), низкополевые магниторезонансные томографы. Эти системы оснащены СКВИДами, имеющими пленочные сверхпроводящие КМПП (корректно называть их ТМПП) с размерами  $D \sim 7 \dots 10$  мм. Большие размеры СКВИДов ограничивают их применение в значительных количествах (несколько сотен) для повышения полезных показателей в указанных магнитных системах.

С другой стороны, в рассмотренном нами КДМП можно в несколько раз уменьшить размер  $D$ , например, сделать  $D \leq 1$  мм и одновременно сохранить показатели, которые достигаются в КДМП со сплошной активной полосой, имеющих размеры  $D \geq 4$  мм. Несомненно, предложенный КДМП будет иметь существенно меньшие массогабаритные размеры, по сравнению со СКВИДами, и не будет уступать им по разрешающим характеристикам. Тем самым появляется возможность суще-

ственно увеличить количество ДМП в магнитных системах. Например, в шлеме МЭГ фирмы «Elekta» вмонтировано 306 СКВИДов [11], однако вместо них можно разместить приблизительно 1000 КДМП и соответственно расширить функциональные возможности магнитоэнцефалографа.

В настоящее время в медицинской практике активно внедряются новые методы лечения и диагностики, новые биосовместимые материалы (наноматериалы с ферромагнитными или супермагнитными частицами, углеродными нанотрубками и др.). Также актуальны неинвазивная диагностика и контроль работы активных имплантированных аппаратов, искусственного сердца, различных стимуляторов, измерение скорости кровотока и т. д. Востребованные задачи, вероятно, будут решены с применением исследованных в рассмотренной работе комбинированных датчиков магнитного поля с наноструктурированными активными полосами.

*Авторы выражают благодарность профессору В.М. Подгаецкому за полезные советы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-39-00044).*

## Список литературы:

1. Melzer M., Raltenbrunner M., Makarov D. et al. Imperceptible magneto-electronics // Nature Communications. 2015. Vol. 6. 6080 (8 p).
2. Robbes D. Highly sensitive magnetometers – A review // Sensors and Actuators A: Physical. 2006. Vol. 129 (1). PP. 86-93.
3. Drung D., Assmann C., Deyer J. et al. Highly sensitive and easy-to-use SDUID sensors // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. Vol. 17. PP. 699-704.
4. Pannetier-Lecoeur M. et al. Femtotesla magnetic field measurement with magnetoresistive sensors // Science. 2004. Vol. 304 (5677). PP. 1648-1650.
5. Pannetier-Lecoeur M. Superconducting-magnetoresistive sensor: Reaching the femtotesla at 77 K / Dissert. – Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2010. PP. 32-34.
6. Ichkitidze L., Mironyuk A. Superconducting film flux transformer for a sensor of a weak magnetic field // Physica C: Superconductivity. 2012. Vol. 472 (1). PP. 57-59.
7. Ичкитидзе Л.П., Миронюк А.Н. Сверхпроводниковый пленочный трансформатор магнитного потока / Патент RU № 2455732.
8. Pannetier-Lecoeur M. et al. Magnetocardiography with sensors based on giant magnetoresistance // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 98 (15).
9. Ичкитидзе Л.П., Скобелкин В.И., Баблидзе П.А. Критический ток в сверхпроводящих пленках ниобия, имеющих различные размеры зерен // Физика твердого тела. 1985. Т. 27. № 10. С. 3116-3119.
10. Ichkitidze L.P. Resistive sensor of weak magnetic fields on the basis of a thick HTSC film // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2007. Vol. 71 (8). PP. 1145-1147.
11. <http://www.mrn.org/collaborate/elekta-neuromag-meg>.

Леван Павлович Ичкитидзе,  
канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,  
Сергей Васильевич Селищев,  
д-р физ.-мат. наук, профессор,  
зав. кафедрой,  
Дмитрий Викторович Тельшев,  
канд. техн. наук, доцент,  
ст. научный сотрудник,  
Николай Юрьевич Шичкин,  
магистр,  
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, г. Зеленоград,  
e-mail: leo852@inbox.ru