

Сверхпроводниковый пленочный концентратор магнитного поля с наноразмерными ветвями

Л.П. Ичкитидзе, Н.А. Новиков

Национальный исследовательский университет “МИЭТ,

leo852@inbox.ru

Аннотация — Рассматривается сверхпроводниковый пленочный концентратор магнитного поля в форме квадратного кольца с суженной активной полосой, перекрывающей пленочный магниточувствительный элемент с гигантским магнитосопротивлением. Показано, что наноструктурирование активной полосы в виде ее фрагментации на параллельные сверхпроводящие ветви и прорези, имеющие наноразмеры, увеличивает в несколько раз фактор умножения, т.е. концентрацию магнитного поля на магниточувствительном элементе.

Ключевые слова — сверхпроводящие пленки, магнитное поле, концентратор магнитного поля, магниточувствительный элемент, наноструктурирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Замкнутые сверхпроводящие пленочные кольца часто используются в датчиках магнитного поля (ДМП) в качестве трансформатора магнитного потока (ТМП) или концентратора магнитного поля (КМП). Например, они служат ТМП в ДМП, в которых магниточувствительными элементами (МЧЭ) выступают джозефсоновские переходы (СКВИД-магнитометры) [1,2] или джозефсоновская среда (керамические высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП)) [3-7]. Также кольца используются как КМП в ДМП, в которых МЧЭ являются: датчики Холла [8] или датчики на эффекте ГМС [9-11]. В работах [12,13] было показано, как эффективность ТМП увеличивается при оптимальной фрагментации его активной полосы на многочисленные параллельные ветви и прорези, имеющие микронные и субмикронные размеры. Аналогично могут улучшаться и разрешающие способности МЧЭ, и в целом эффективность магнитных систем, часто применяемых в магнитокардиографии и магнитоэнцефалографии [14-16].

В настоящей работе приводятся результаты расчетов для повышения эффективности концентратора магнитного поля при фрагментации его активной полосы на несколько ветвей и прорезей, имеющих нанометровые размеры.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является фактор F умножения (концентрации) магнитного поля на МЧЭ. Рассматривается конструкция ДМП, состоящего из кольцевого сверхпроводникового пленочного КМП с су-

женной активной полосой и МЧЭ в виде пленочной структуры с ГМС. При этом активная полоса КМП перекрывает МЧЭ, отделенный с помощью изолирующей пленки, а все элементы ДМП имеют планарное исполнение, что иллюстративно показано на рис.1. Активная полоса фрагментирована на параллельные, чередующие между собой, сверхпроводящие ветви и прорези с нанометровыми размерами.

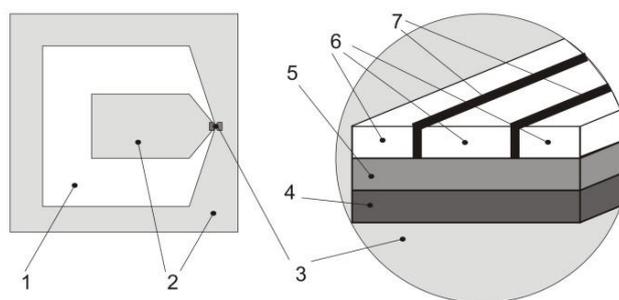


Рис. 1. Иллюстративная схема ДМП и его элементы: 1 – сверхпроводящее кольцо ТМП, 2 – диэлектрическая подложка, 3 – активная ТМП-полоса в увеличенном масштабе (пропорции не сохранены), 4 – МЧЭ, 5 – изолирующая пленка, 6 – ветви активной полосы, 7 – прорези активной полосы.

Для предложенной конструкции значение F оценивалось относительно конструкции ДМП со сплошной активной полосой, т.е. значение $F=1$ соответствует случаю конструкции ДМП с активной полосой без фрагментации. Во внешнем магнитном поле B магнитный поток, который экранирует кольцо 1 (см. рис.1), определяется как: $\phi = B \cdot A$, где A – площадь поверхности 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 , поэтому значением последней пренебрегалось.

Индуктивность кольца КМП, в основном, определяется индуктивностью активной полосы, поскольку выполняется соотношение $D/w_s > 10^3$, где D – длина стороны квадратного кольца и w_s – ширина активной полосы КМП. В случае, когда последняя состоит из нескольких ветвей, каждая с индуктивностью L_i

($i=1,2,\dots,n$, где $n \geq 2$ – число ветвей в активной полосе), их суммарная индуктивность незначительно увеличивается относительно L .

Производился расчет F для КМП при варьировании ширины прорезей w_p , толщины изолирующего слоя h_i и при различных значениях лондоновской глубины λ проникновения магнитного поля. При этом учитывалась только проекция магнитного поля, параллельная поверхности подложки, поскольку именно эта проекция сильно влияет на МЧЭ в виде элемента с ГМС. Использовалась известная формула для определения магнитного поля в пластине, нагруженной током. При этом она модифицировалась для случая сверхпроводника с учетом неоднородного распределения тока в его объеме. Оси системы координат x и y направлены вдоль ширины и толщины соответственно активной полосы, изолирующего слоя и МЧЭ. В расчетах использовались формулы:

$$B_{\parallel} = \frac{\mu_0 \cdot I_s}{8\pi \cdot \lambda \cdot h} \cdot \left[\int_{-2h}^0 \int_{-l}^0 \frac{e^{-\frac{x+l}{\lambda}} \cdot (y_0 - y)}{(y_0 - y)^2 + (x_0 - x)^2} dx dy + \int_{-2h}^0 \int_0^l \frac{e^{-\frac{l-x}{\lambda}} \cdot (y_0 - y)}{(y_0 - y)^2 + (x_0 - x)^2} dx dy \right], \quad (1)$$

$$F = \frac{\langle B_{\parallel}^* \rangle}{\langle B_{\parallel} \rangle} \cdot \frac{1}{K_L}, \quad (2)$$

$$K_L \approx \frac{w_s}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (3)$$

где B_{\parallel} – параллельная составляющая магнитного поля на МЧЭ, созданного активной полосой; l и h – полуширина и полутолщина пленки активной ТМП-полосы, соответственно; μ_0 – постоянная магнитного поля; $I_s/(4\lambda \cdot h) \leq J_c$, I_s – величина экранирующего сверхпроводящего тока в активной КМП-полосе, протекающего над МЧЭ и действующего на него в точке (x_0, y_0) (точка отсчета $(0,0)$ находится в центре верхней поверхности активной КМП-полосы); J_c – плотность критического тока Гинзбурга-Ландау; $\langle B_{\parallel}^* \rangle$ и $\langle B_{\parallel} \rangle$ – усредненные значения магнитных полей, создаваемых активной полосой в случаях с прорезями и без прорезей (сплошная полоса), соответственно; K_L – фактор роста суммарной индуктивности активной полосы; n – количество ветвей в активной полосе; w_i – ширина i -й ветви. Формула (1) использовалась для расчетов магнитных полей, созданных сплошной активной полосой или ее ветвями, с учетом соответствующих размеров и топологических расположений. Величины $\langle B_{\parallel}^* \rangle$ и $\langle B_{\parallel} \rangle$ определялись согласно (1) в середине МЧЭ.

Физический механизм работы данного ДМП 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 раз и улучшить разрешающую способность ДМП. Здесь $S_0 = (R_B - R_0)/(R_0 \cdot B)$,

где R_B – сопротивление МЧЭ во внешнем магнитном поле, т.е. $B \neq 0$, R_0 – сопротивление МЧЭ при отсутствии внешнего магнитного поля, т.е. $B = 0$. Действительно, для конфигураций ДМП, когда в качестве МЧЭ используется элемент с шириной области ГМС, которая по величине приблизительно совпадает с шириной w_s , изменение внешнего магнитного поля на ΔB провоцирует изменение магнитного поля на МЧЭ на $\Delta B_{\text{МЧЭ}}$. Отношение $\Delta B_{\text{МЧЭ}}/\Delta B = F_0$ является фактором умножения (концентрации) магнитного поля, достигаемым за счет действия КМП. Можно ожидать, что при использовании КМП величина $F_0 \sim D/w_s$ характеризует увеличение S_0 до $\sim F_0 \cdot S_0$, и тем самым достигается улучшение положительных показателей (уменьшение минимального регистрируемого магнитного поля δB , т.е. пороговая чувствительность) ДМП. Имеется в виду, что

$$\delta B \approx \frac{\delta U}{IR_0 F_0 S_0}, \quad (4)$$

где δU – минимальный регистрируемый сигнал на МЧЭ, I – измерительный ток в МЧЭ. Видно, что высокое значение величины F_0 приводит к улучшению показателей ДМП за счет уменьшения δB .

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Расчеты показали, что факторы умножения F_0 (сплошная активная полоса) и F (фрагментированная активная полоса) сильно различаются. Максимальное значение величины ($F/F_0 > 1$) зависит от ширины ветвей и их числа, а также их расположения в активной полосе и характерных параметров сверхпроводящего материала КМП.

Выражение (4) справедливо для активной полосы без разбиения, однако для фрагментированной активной полосы в него следует подставить вместо F_0 множитель FF_0 . Следовательно, в F раз уменьшится значение δB , и улучшится разрешение ДМП, т.е. граница пороговой чувствительности сдвигается в сторону меньших значений B .

Согласно (2) количественный расчет F для фрагментированных ветвей производится относительно случая, когда $i=1$ и допускается $F_0=1$ (КМП со сплошной активной полосой). В таблице 1 представлены типичные результаты расчетов размеров ветвей, их расположения в активной полосе и значения F для случая 3-х ветвей и 2-х прорезей. Величина K_L не превосходила 12 %, но она учитывалась в вычислениях F согласно формулам (2) и (3).

В этих расчетах использовались следующие параметры ДМП: $J_c = 10^6$ А/см², $\lambda = 50$ нм, $w_s = 7000$ нм и $h = 25$ нм, $w_p = 20$ нм, $h_i = 20$ нм, толщина слоя МЧЭ – 50 нм.

Получено, что при различных конфигурациях ветвей активной полосы фактор умножения изменяется незначительно – уменьшается в пределах <10% от его максимального значения F_m . Одновременно, при значительном приближении прорезей к краям или середине активной полосы значения F падают в не-

сколько раз, а с ростом w_p и λ они монотонно уменьшаются.

Таблица 1

Размеры ветвей и прорезей в нанометрах после фрагментации активной полосы и соответствующие им значения F

№	Разбиение	F
1	3475 20 10 20 3475	2.62
2	3450 20 60 20 3450	3.15
3	3400 20 160 20 3400	3.66
4	3300 20 360 20 3300	3.92
5	3200 20 560 20 3200	3.96
6	3100 20 760 20 3100	3.96
7	3000 20 960 20 3000	3.96
8	2900 20 1060 20 2900	3.96
9	2750 20 1460 20 2750	3.96
10	2500 20 1960 20 2500	3.96
11	2000 20 2960 20 2000	3.95
12	1500 20 3960 20 1500	3.94
13	1000 20 4960 20 1000	3.92
14	500 20 5960 20 500	3.84

В таблице 2 приведены значения F_m при различных w_p и λ . Видно, что F_m для случая $\lambda=100$ нм и в интервале $w_p=20-500$ нм падает приблизительно на 14%, а для случая $w_p=100$ нм в интервале $\lambda=50-250$ нм подает на 16%. Во всех расчетах учтены значения: $h_i=20$ нм, толщина слоя МЧЭ - 50 нм.

Таблица 2

Значения F_m при различных w_p и λ .

w_p нм	F_m (при $\lambda=100$ нм)	λ , нм	F_m (при $w_p=100$ нм)
20	3,66	50	3,87
50	3,63	100	3,57
100	3,57	150	3,43
200	3,47	200	3,33
500	3,15	250	3,24

На рис.2 представлены зависимости F_m от толщины изолирующего слоя h_i при различных w_p . Видно, что с увеличением ширин прорезей в интервале $w_p=20-200$ нм максимальные значения фактора умножения уменьшаются незначительно <20%. Одновременно, для F_m наблюдаются небольшие максимумы $F_m \sim 4,5$ при $h_i \sim 500$ нм.

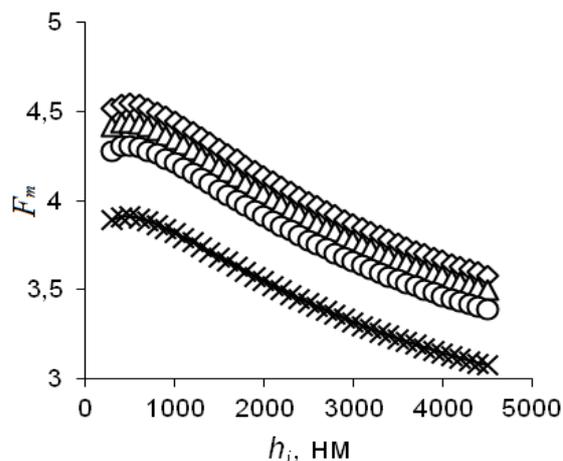


Рис. 2. Зависимость максимальных значений фактора умножения F_m от суммарной толщины изолирующего слоя h_i для случая $\lambda=50$ нм и при различных w_p : \diamond – 20 нм, Δ – 100 нм, \circ – 200 нм, \times – 500 нм.

Положительный эффект, т.е. повышение F при фрагментации активной полосы на наноразмерные ветви, достигается за счет более однородного распределения электрического тока, чем в сплошной полосе. Действительно, для активной полосы имеет место соотношение $w_s \gg \lambda^2/h$, но однородное распределение тока по ширине сверхпроводящей пленки достигается при выполнении условия $w_s \leq \lambda^2/h$. Используемый нами метод фрагментации активной полосы позволяет приблизиться к выполнению этого условия. Плотность тока вблизи краев сверхпроводящей пленки достигает максимального значения, а в середине она значительно уменьшается, следовательно, там фрагментация менее эффективна. Следствием этого является уменьшение F (см. табл. 1), когда при фрагментации прорези приближаются к середине активной полосы.

Таким образом, величина F_m растет с уменьшением значения λ , что означает большую эффективность чистых НТСП материалов (например, ниобия) относительно гранулярных или ВТСП материалов (например, керамической системы $Bi-2223$), используемых в сверхпроводниковых пленочных КМП.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассмотренной схеме ДМП, представляющей структуру КМП-изолирующая пленка-МЧЭ, низкий уровень пороговой чувствительности δB достигается при высоких значениях F_0 согласно формуле (3) для нефрагментированной полосы. Дальнейшее повышение F_0 ограничено из-за трудности сужения ширин активной полосы и МЧЭ до наноразмерных величин, а также соответствующего повышения его сопротивления, индуктивности и уровня шумов. Предложенная нами фрагментация активной полосы на ветви снимает указанные ограничения, поскольку в этом случае общий фактор умножения F_g для КМП будет $F_g = F_0 \cdot F_m$, что следует использовать в (3) вместо F_0 , и его высокое значение можно достигнуть не за счет увеличения F_0 , а

за счет увеличения F_m . Повышение F_0 за счет выбора ширины w_s для сверхпроводящей пленки в наноразмерной области - задача технологически более трудная, чем повышение F_m за счет выбора ширины w_p прорези в наноразмерной области.

Несомненно, при фрагментации активной полосы с помощью нанометровых прорезей достигаются высокие значения F_g , и одновременно сохраняются микрометровые размеры ширины активной полосы КМП и МЧЭ, что значительно упрощает технологию изготовления датчиков слабого магнитного поля. Можно полагать, что с использованием МЧЭ из туннельной структуры ГМС со значением $S_0 \geq 50\%/mTл$ [12], пороговая чувствительность уменьшится значительно, и у датчика будут показатели на уровне НТСП СКВИД.

Полученные результаты будут востребованы в различных магнитных системах, использующих датчики ультраслабых магнитных полей (≤ 10 пТл), в частности: неразрушающем контроле твердых тел, в системах обнаружения дефектов сверхбольших интегральных схем; контроле миграции углеродных нанотрубок и оценке их концентрации в теле; векторной доставке лекарств; в биомедицинской неинвазивной диагностике. В последнем случае в магнитной системе магнитоэнцефалографии используются несколько сотен ДМП, и улучшение их характеристик повысит точность диагностики, расширит список диагностируемых болезней и уменьшит стоимость магнитных систем и диагностики.

Работа выполнена при проведении ПНИР в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Госконтракт 16.740.11.0765), гранта Президента РФ (договор № 16.120.11.5559-МК) и контракта 9610р/16276 с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность проф. Селищеву С.В. за поддержку данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ketchen M.B., Jaycox J.M. Ultra-low-noise tunnel junction dc-SQUID with a tightly coupled input coil // *Applied Physics Letters*. 1982. V. 40. P. 736-738.

[2] Bär L.R., Daalmans G.M., Uhl D., and Bömmel F. A niobium planar SQUID gradiometer operating in an unshielded environment // *Superconductor Science & Technology*. 1996. V. 9. № 4A. P. 109-112.

[3] Ичкитидзе Л.П. Сверхпроводниковый пленочный датчик слабого магнитного поля с трансформатором магнитного потока / Патент: №2289870 RU. Дата публикации: 10.08.2005.

[4] Ichkitidze, L.P. Resistive film sensor of a weak magnetic field based on the HTS $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ ceramics // *Physica C*. 2006. V. 435. P. 140-143.

[5] Ichkitidze L.P. Weak magnetic field superconductor resistive sensors in comparison with semiconductor and magnetoresistive sensors // *Physica C*. 2007. V. 460-462. P. 781-782.

[6] Ичкитидзе Л.П. Резистивный датчик слабого магнитного поля на основе толстых пленок ВТСП-материалов // *Известия РАН. Серия Физическая*. 2007. Т. 71. № 8. С. 1180-1182.

[7] Itoh M., Ishidoh M., Mori K., and et al. Highly sensitive magnetic sensor made with a superconducting Y-Ba-Cu-O thick film // *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*. 1999. V. 2. P. 3085-3089.

[8] Linzen S., Schmidt, F., Schmid F., and et al. A thin film HTSC-Hall magnetometer-development and application // *Physica C*. 2002. V. 372-376. P. 146-149.

[9] Pannetier M., Fermon C., Le Goff G., and et al. FemtoTesla magnetic field measurement with magnetoresistive sensors // *Science*. 2004. V. 304. № 5677. P. 1648-1650.

[10] Pannetier M., Claude F., and Juha S. Device for sensing a magnetic field // *Patent WO 2004/068158*. Publication date: 12.08.2004.

[11] Pannetier M., Claude F., and Juha S. Device for sensing a magnetic field // *Patent WO 2004/068158*. Publication date: 12.08.2004.

[12] Ichkitidze L.P., Mironyuk A.N. Superconducting film flux transformer for a sensor of magnetic field // *Physica C*. 2012. V. 472. Issue 1. P. 57-59.

[13] Ичкитидзе Л.П., Миронюк А.Н. Топологический наноструктурированный пленочный сверхпроводниковый трансформатор магнитного потока // *Нано- и микросистемная техника*. 2012. № 1. С. 47-50.

[14] Fenici R., Brisinda R., and Meloni R. Clinical application of magnetocardiography // *Expert Rev. Mol. Diagn.* 2005. V. 5. № 3. P. 291-313.

[15] Lounasmaa O.V., Seppa H. SQUIDS in Neuro- and Cardiomagnetism // *J. of Low Temp. Phys.* 2004. V. 135. № 5/6.

[16] Измеров Н.Ф., Ушаков И.Б., Бухтияров И.В., Васнев А.В., Масленников Ю.В., Кондратюк Л.Л., Никитина Л.С. Магнитокардиография как новый метод кардиодиагностики для медицины труда // *Медицина труда и промышленная экология*. 2005. № 6. С. 32-37.

[17] Barthelmess H.-J., Halverscheid M., Schiefenhovel B., Heim E., Schilling M., Zimmermann R. Low-noise biomagnetic measurements with a multichannel dc-SQUID system at 77 K // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2002. V. 1. Issue 1. P. 657-660.

[18] Gallop. J. SQUIDS: some limits to measurement // *Supercond. Sci. Technol.* 2003. V. 16. P. 1575-1582.

[19] Reutler P., Bensaid A., Herbstritt F., and Hofener C. Local magnetic order in manganite thin films studied by $1/f$ noise measurements // *Phys. Rev. B*. 2000. V. 62. № 17. P. 11619-11625.