

Исследование сверхпроводящего пленочного наноструктурированного концентратора магнитного поля

Л.П. Ичкитидзе, Н.Ю. Шичкин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Study on Superconducting Film Nanostructured Concentrator of Magnetic Field

L.P. Ichkitidze, N.Yu. Shichkin

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Исследован сверхпроводящий пленочный концентратор магнитного поля. Установлено, что наноструктурирование активной полосы концентратора на сверхпроводящие ветви и прорезы (шириной 20 нм) позволяют в несколько раз повысить коэффициент концентрации магнитного поля и, следовательно, понизить пороговую чувствительность датчика магнитного поля или уменьшить его геометрические размеры. При этом более высокие значения коэффициента концентрации достигаются в концентраторе магнитного поля на основе пленок из низкотемпературного сверхпроводящего материала относительно концентратора на основе пленок из высокотемпературного сверхпроводящего материала.

Ключевые слова: датчик магнитного поля; концентратор магнитного поля; активная полоса; сверхпроводящая пленка; наноструктурирование.

The superconducting film magnetic field concentrator has been investigated. It has been determined that nanostructuring of an active strip of the magnetic field concentrator on the superconducting branches and cuts (width of cuts is 20 nm) allows a several times increase of the concentration coefficient of the magnetic field, and, therefore, a reduction of the threshold sensitivity of the magnetic film sensor or its geometric dimensions. Thus, the higher values of the concentration coefficient are achieved in the magnetic field concentrator based on films from a low-temperature superconductor material compared to the concentrator based on films from a high-temperature superconductor material.

Keywords: magnetic field sensor; magnetic field concentrator; active strip; superconducting film; nanostructuring.

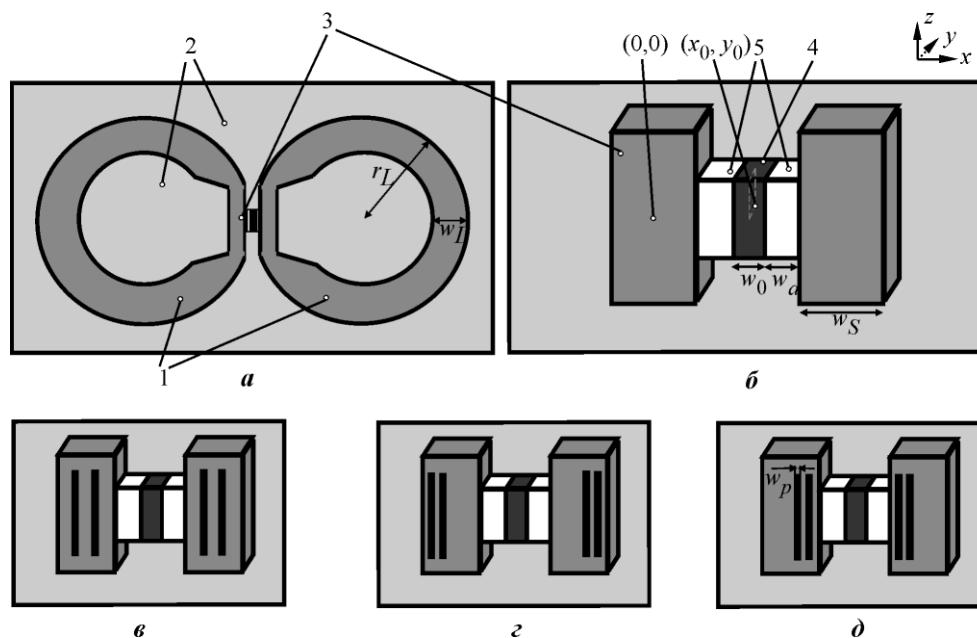
В большинстве датчиков магнитного поля (ДМП) высокое разрешение, т.е. низкая пороговая чувствительность $\delta B_0 \leq 1$ нТл, достигается за счет использования сверхпроводящих пленочных концентраторов магнитного поля (КМП). Они понижают δB_0 в ДМП, в которых в качестве магниточувствительных элементов (МЧЭ) могут служить различные структуры: джозефсоновские переходы, датчики Холла, датчики на эффектах спинтроники и др. [1].

Наноструктурирование активной полосы КМП, т.е. ее разбиение на чередующиеся сверхпроводящие ветви и прорезы, имеющие ширину и толщину наноразмерного порядка, приводит к добавочному повышению его коэффициента концентрации магнитного поля [2], что дополнительно понижает δB_0 . В работе [3] для планарного КМП вычислены значения коэффициента концентрации магнитного поля, однако не учтены индуктивности его приемных колец и возможности варьирования размеров МЧЭ.

Цель настоящей работы – расчет коэффициента концентрации магнитного поля в планарном датчике с активной полосой концентратора, находящейся как в наноструктурированном,

так и в наноструктурированном (сплошная полоса, см. рисунок, б) состояниях. При этом учитываются индуктивности приемных колец концентратора.

На рисунке приведено схематическое изображение КМП в виде сверхпроводящих колец, между которыми заключен МЧЭ.



Схематическое изображение КМП с различными расположениями прорезей по ширине активных полос: а – КМП; 1 – сверхпроводящее кольцо КМП; 2 – диэлектрическая подложка; б – активные полосы и МЧЭ в увеличенном масштабе (пропорции не соблюдены); 3 – активная полоса; 4 – МЧЭ; 5 – изолирующая пленка; в, г, д – расположение прорезей на различных местах активной полосы

Ширина активной полосы КМП w_S меньше ширины остальных участков КМП (диаметр и ширина кольца) на порядок или более. Это приводит к многократному увеличению плотности экранирующего тока в активной полосе, следовательно, к повышенной концентрации внешнего магнитного поля рядом с активной полосой КМП и на МЧЭ [3].

В настоящей работе рассчитаны коэффициенты концентрации F_0 для случаев, когда в активной полосе отсутствуют прорези (см. рисунок, б), и F , когда в активной полосе есть прорези (см. рисунок, в, г, д). Варьировали расположение прорезей на активной полосе, величину ширины МЧЭ и значения лондоновской глубины проникновения магнитного поля λ . При этом учитывалась только проекция магнитного поля, перпендикулярная поверхности подложки.

Во внешнем магнитном поле B_0 магнитный поток, который экранирует кольцо 1 (см. рисунок, а), определяется как $\Phi = AB_0$, где $A = \pi D^2/4$ – площадь кольца; D – диаметр кольца. Экранирующий ток $I_S = \Phi/(L + M)$, 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 имеем

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

$$L = \frac{\mu_0 D}{2} \ln \left(\frac{4D}{w_L} - 2 + \frac{7w_L}{2D} \right), \quad (2)$$

где w_L – ширина кольца; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – постоянная магнитного поля. Индуктивность L кольца КМП гораздо больше индуктивности L_S активной полосы. Формула (2) приведена для

«тонкого кольца» ($D, w_L \gg d$; d – толщина кольца), однако она по порядку логарифмической точности практически совпадает с L для «толстого кольца» ($D, w_L \geq d$) [4].

В расчетах использовали формулу для магнитного поля, созданного прямоугольной полосой с однородным распределением тока I_S [5]:

$$B = \frac{\mu_0 I_S}{8\pi l h} \left[\int_{-2h-l}^0 \int_{-l}^0 \frac{(x_0 - x)}{(y_0 - y)^2 + (x_0 - x)^2} dx dy + \int_{-2h}^0 \int_0^{+l} \frac{(x_0 - x)}{(y_0 - y)^2 + (x_0 - x)^2} dx dy \right]. \quad (3)$$

Однако в сверхпроводнике ток течет неоднородно, и с учетом мейсснеровского эффекта формула (3) принимает вид

$$B_i = \frac{\mu_0 I_i}{8\pi \lambda h} \left[\int_{-2h-l}^0 \int_{-l}^0 \frac{e^{-\frac{x+l}{\lambda}} (x_0 - x)}{(y_0 - y)^2 + (x_0 - x)^2} dx dy + \int_{-2h}^0 \int_0^{+l} \frac{e^{-\frac{l-x}{\lambda}} (x_0 - x)}{(y_0 - y)^2 + (x_0 - x)^2} dx dy \right], \quad (4)$$

$$F_0 = \frac{\langle B_0 \rangle}{B_{ext}}, \quad (5)$$

$$F = \frac{\langle B \rangle}{B_{ext}} \frac{1}{K_L}, \quad (6)$$

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

где w_S – ширина активной полосы; w_i – ширина i -й ветви; n – число сверхпроводящих ветвей; $n = 1$ – наноструктурированная активная полоса; $n \geq 2$ – наноструктурированная активная полоса; l и h – полуширина и полутолщина i -й ветви соответственно; $I_S = \sum_{i=1}^n I_i$; $I_i/4\lambda h \leq J_c$;

J_c – плотность критического тока сверхпроводящей пленки КМП; λ – лондоновская глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник; K_L – фактор роста суммарной индуктивности активной полосы; B_{ext} – внешнее магнитное поле; $\langle B \rangle$, $\langle B_0 \rangle$ – усредненные по ширине МЧЭ магнитные поля, генерируемые током в активной полосе с прорезями и без них соответственно. Величины B_i , B и B_0 определялись согласно (1)–(4), усреднялись по ширине активной полосы, и их средние значения $\langle B \rangle$ и $\langle B_0 \rangle$ использовались в (5) и (6).

Длина активной полосы и прорезей во много раз больше, чем параметры МЧЭ, поэтому в (3) и (4) проекция z не учитывается. Отметим, что случай $i = 1$ соответствует наноструктурированной активной полосе. Во всех расчетах допускалось, что $w_p = w_a$ и ширины активной полосы и ее ветвей кратны w_a .

Исследовали зависимости величин F_0 и F от ширины w_0 МЧЭ. В таблице приведены результаты расчетов. Для расчетов взяты $J_c = 10^{10}$ А/м², $h = 10$ нм, $w_s = 30$ мкм, $w_a = w_p = 20$ нм. При радиусе кольца $r_L = D/2 = 1$ мм и толщине кольца $w_L = 0,8$ мм практически достигается минимальное значение L , что использовалось в (2). Для расчета принято, что две прорези на активную полосу нанесены равномерно (см. рисунок, в).

Зависимость коэффициента концентрации от ширины МЧЭ

w_0 , мкм	F_0		F	
	$\lambda = 50$ нм	$\lambda = 250$ нм	$\lambda = 50$ нм	$\lambda = 250$ нм
5,0	211	157	534	424
1,0	677	438	1483	1003
0,2	1766	954	3656	2042

Из таблицы видно, что с уменьшением ширины МЧЭ увеличивается как F_0 , так и F . Более того, значения F приблизительно в 2 раза выше значений F_0 , что отражает положительный эффект наноструктурирования активной полосы. Пороговая чувствительность зависит от коэффициента концентрации как $\delta B_0 \sim 1/F$ [3], поэтому использование в качестве КМП пленок из низкотемпературных сверхпроводящих материалов (например, гетероэпитаксиальные слои ниобия, $\lambda = 50$ нм) наиболее эффективно по сравнению с применением пленок из высокотемпературных сверхпроводящих материалов (например, системы Y-123 и Bi-2223, $\lambda \geq 250$ нм). Особенно низкое значение δB_0 , т.е. высокая эффективность КМП, реализуется при ширине МЧЭ $w_0 = 0,2$ мкм и $F \sim 3656$.

Также исследована зависимость F от способа нанесения прорезей на активную полосу при $\lambda = 50$ нм. Расчеты показали, что оптимальным можно считать разбиение, когда прорези находятся ближе к МЧЭ. В этом случае $F \sim 3797$ (см. рисунок, *д*). Когда прорези находятся в дальней от МЧЭ части активной полосы, $F \sim 3602$ (см. рисунок, *з*), когда прорези нанесены равномерно по всей полосе, $F \sim 3656$ (см. рисунок, *в*).

Следует отметить, что согласно (4), (5) $F_0 \sim D/(w_s + w_0 + w_p)$, т.е. для повышения F_0 требуется увеличить диаметр D приемных колец, что приводит к росту геометрических размеров наноструктурированного КМП. Однако наноструктурирование КМП позволяет значительно повысить коэффициент концентрации F , и необходимость увеличения D для роста F_0 отпадает. Например, для наноструктурированного КМП получено расчетное значение $F_0 = 1766$ при диаметре $D = 2$ мм и параметрах, приведенных в таблице. Однако после наноструктурирования активной полосы при сохранении прежних параметров и при $F = 1766$ величину F_0 можно уменьшить до ~ 853 и, соответственно, снизить прежнее значение D в F/F_0 раз, т.е. получить $D \sim 1$ мм.

Таким образом, наноструктурирование активной полосы сверхпроводящего пленочного КМП на параллельные ветви и прорези, изменение ширины МЧЭ, а также использование низкотемпературных сверхпроводниковых материалов позволяют добиться значительного повышения коэффициента концентрации магнитного поля, а следовательно, понижения пороговой чувствительности ДМП или уменьшения его геометрических размеров.

Авторы выражают благодарность С.В. Селищеву за полезные советы в процессе работы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.575.21.0089, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0089).

Литература

1. *Robbes D.* Highly sensitive magnetometers: a review // Sensors and Actuators A: Physical. – 2006. – Vol. 129(1). – P. 86–93.
2. *Ичкидидзе Л.П., Миронюк А.Н.* Топологический наноструктурированный пленочный сверхпроводниковый трансформатор магнитного потока // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 1. – С. 47–50.
3. *Ичкидидзе Л.П.* Сверхпроводниковые пленочные трансформаторы магнитного потока с микро- и наноразмерными ветвями // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 9. – С. 38–44.
4. *Савельев А.В., Чубинский Н.П.* Определение индуктивности плоских (печатных) колец при различных способах возбуждения // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2015. – № 2. – С. 1–27. – URL: <http://jre.cplire.ru/mac/feb15/3/text.html> (дата обращения: 29.02.2016).
5. *Вагин Д.В., Касаткин С.И., Поляков П.А.* Исследование полосковых концентраторов магнитного поля магниторезистивных датчиков тока и датчиков Холла // Тр. конф. «Технические и программные средства и системы управления, контроля и измерения» (Москва, 18–20 октября 2010 г.). – М., 2010. – С. 000240–000246.

Поступило после доработки 18 марта 2016 г.

Ичкидидзе Леван Павлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры биомедицинских систем (БМС) МИЭТ. *Область научных интересов:* сверхпроводимость, сверхпроводниковая нано- и микроэлектроника, датчики физических величин, биосовместимые наноматериалы, нанотехнологии. **E-mail: leo852@inbox.ru**

Шичкин Николай Юрьевич – магистрант кафедры БМС МИЭТ. *Область научных интересов:* сверхпроводниковая нано- и микроэлектроника, датчики магнитного поля.