

Сверхпроводящий пленочный наноструктурированный концентратор в датчике магнитного поля

Л.П. Ичкитидзе, Д.В. Тельшев, Н.Ю. Шичкин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», leo852@inbox.ru

Аннотация — Исследован сверхпроводящий пленочный концентратор магнитного поля. Установлено, что наноструктурирование активной полосы (ширина прорезей 20 нм) концентратора на сверхпроводящие ветви и прорези позволяет в несколько раз повысить коэффициент концентрации и, следовательно, понизить пороговую чувствительность и геометрические размеры датчика магнитного поля. При этом более высокие значения коэффициента концентрации достигаются для концентратора на основе плёнок из низкотемпературного сверхпроводника относительно концентратора на основе плёнок из высокотемпературного сверхпроводника.

Ключевые слова — датчик магнитного поля, концентратор магнитного поля, активная полоса, сверхпроводящая плёнка, наноструктурирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

В большинстве датчиков магнитного поля (ДМП) высокое разрешение, т.е. низкая пороговая чувствительность $\delta B_0 \leq 1$ нТл, достигается за счёт 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]. Однако, из-за больших геометрических размеров КМП в целом увеличиваются габариты ДМП. Например, коммерческие ДМП на основе джозефсоновских переходов или на основе джозефсоновской среды имеют форму призмы или кольца толщиной несколько миллиметров и с площадью основания $\sim 10 \times 10$ мм² [2-5].

В [6] показано, что оптимальное наноструктурирование активной полосы КМП приводит к дополнительному повышению его коэффициента концентрации F . Это дополнительно уменьшает δB_0 , и тем самым повышает эффективность ДМП. Многие датчики чувствительны к магнитному потоку (например, феррозондовый преобразователь (ФЗП) или сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик (СКВИД)), и для них КМП играют роль трансформатора магнитного потока (ТМП) [6]. В [7] для планарного ДМП со сверхпроводящим пленочным трансформатором

магнитного потока (ТМП) вычислены значения F , однако не учтены возможности варьирования размеров МЧЭ и индуктивности приемных колец ТМП.

Целью настоящей работы является расчет коэффициента концентрации магнитного поля в планарном датчике, когда активная полоса концентратора находится как в наноструктурированном, так и в ненаноструктурированном состоянии. При этом в F учтены индуктивности приемных колец концентратора.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 приведен эскиз КМП. Здесь показаны: a – КМП в виде сверхпроводящих колец, между которым заключён МЧЭ; b – активные полосы сверхпроводящих колец и МЧЭ в увеличенном масштабе; v – прорези расположены на одинаковом расстоянии по ширине активной полосы; z – прорези расположены на одинаковом расстоянии по половине ширины активной полосы, находящейся далеко от МЧЭ; d – прорези расположены на одинаковом расстоянии по половине ширины активной полосы, находящейся близко от МЧЭ.

Ширина активной полосы w_s концентратора меньше ширины остальных его участков 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 и на МЧЭ [7].

Были рассчитаны коэффициенты концентрации для случаев, когда в активной полосе отсутствуют прорези F_0 , т.е. КМП ненаноструктурирован (рис. 1, b), и F , когда в активной полосе существуют прорези, т.е. КМП наноструктурирован (рис. 1 v, z, d). Варьировалось расположение прорезей на активной полосе, величина ширины МЧЭ и значение лондоновской глубины проникновения λ . При этом учитывалась только проекция магнитного поля, перпендикулярная поверхности подложки.

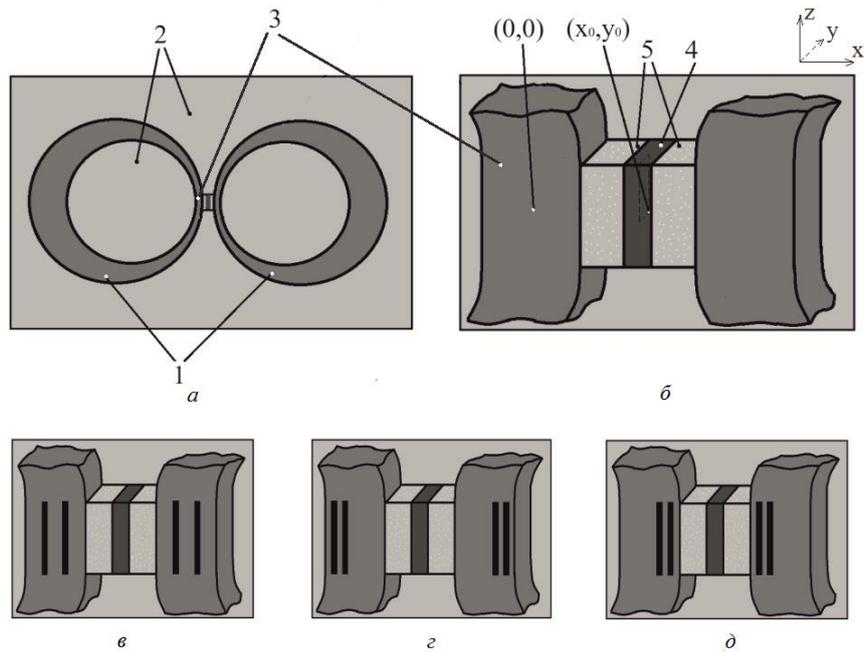


Рис. 1. Эскиз КМП с различными расположениями прорезей по ширине активных полос: *a* – КМП, 1 – сверхпроводящее кольцо КМП, 2 – диэлектрическая подложка; *б* – активные полосы и МЧЭ в увеличенном масштабе (пропорции не соблюдены), 3 – активная полоса, 4 – МЧЭ, 5 – изолирующая пленка; *в, г, д* – прорези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

Во внешнем магнитном поле B_0 магнитный поток, который экранирует кольцо 1 (рис. 1), определяется как: $\phi = A \cdot B_0$, где $A = \pi D^2 / 4$ – площадь кольца, D – диаметр 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:

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

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

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. В случае, когда последняя состоит из нескольких ветвей, каждая с индуктивностью L_i , их суммарная индуктивность незначительно увеличивается относительно L_S . Формула (2) приведена для «тонкого кольца» ($D, w_L \gg d$, d – толщина кольца), но она по порядку логарифмической точности практически совпадает с L для «толстого кольца» ($D, w_L \geq d$).

В расчётах использовались известные формулы, в которых отражены эффект Мейснера-Оксенфельда и зависимость магнитного поля B_i от сверхпроводящего тока I_i в ветви активной полосы [7, 8]:

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

$$F_0 = \frac{\langle B_a \rangle}{B_0}, \quad (4)$$

$$F = \frac{\langle B \rangle}{\langle B_a \rangle} \cdot \frac{1}{K_L}, \quad (5)$$

$$K_L = \frac{\left(\sum_{i=1}^n L_i^{-1} \right)^{-1}}{L} \sim \frac{w_s}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (6)$$

где w_s – ширина активной полосы; w_i – ширина i -ой сверхпроводящей ветви; n – число сверхпроводящих ветвей, $n = 1$ – сплошная (наноструктурированная) активная полоса; $n \geq 2$ – наноструктурированная активная полоса; l и h –

полуширина и полутолщина i -ой 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; $\langle B \rangle$, $\langle B_a \rangle$ – усреднённые по ширине МЧЭ магнитные поля, генерируемые током в активной полосе с прорезьями и без них, соответственно. Величины B_i , B и B_a определялись согласно (1)-(3), усреднялись по ширине активной полосы и их средние значения $\langle B \rangle$ и $\langle B_a \rangle$ использовались в (4) и (5).

Во всех расчетах допускалось, что ширина прорези w_p совпадает с шириной щели w_a между

ближайшими краями КМП и МЧЭ, а ширина активной полосы и её ветвей кратны w_a . Также длины активных полос и прорезей на них гораздо больше геометрических размеров МЧЭ.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Проводилось исследование зависимости величин F_0 и F от ширины w_0 МЧЭ. В табл. 1 приведены результаты расчётов. Рассматривались три значения w_0 : 0,2 мкм, 1 мкм и 5 мкм. Для расчетов были взяты следующие численные значения: $\lambda=50$ нм, 250 нм; $J_c=10^{10}$ А/м², $h=10$ нм, $w_s=30$ мкм, $r_L=D/2=1$ мм – радиус кольца; $w_L=0,8$ мм – толщина кольца; $w_a=w_p=20$ нм – расстояние между КМП и МЧЭ, ширина прорезей, соответственно. Прорези наносились равномерным распределением по ширине активной полосы (см. рис. 1 в).

Таблица 1

Зависимость коэффициента концентрации от ширины МЧЭ

w_0 , мкм	F_0		F		F^*	
	$\lambda = 50$ нм	$\lambda = 250$ нм	$\lambda = 50$ нм	$\lambda = 250$ нм	$\lambda = 50$ нм	$\lambda = 250$ нм
5,0	211	157	1,265	1,350	267	212
1,0	677	438	1,095	1,145	742	502
0,2	1766	954	1,035	1,070	1828	1021

Из табл. 1 видно, что с уменьшением ширины МЧЭ растет F_0 и падает F , но общий коэффициент концентрации $F^* = F_0 \cdot F$ увеличивается. Пороговая чувствительность зависит от коэффициента концентрации как $\delta B_0 \sim 1/F^*$ [7], поэтому использование в качестве КМП пленок из низкотемпературных сверхпроводящих (НТСП) материалов (например, гетероэпитаксиальные слои ниобия, $\lambda=50$ нм) является наиболее эффективным по сравнению с КМП из пленок высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов (например, системы Y-123, и Bi-2223, $\lambda \geq 250$ нм). Особенно низкое значение δB_0 , т.е. высокая эффективность КМП реализуется, когда МЧЭ имеет узкую ширину (0,2 мкм) и $F^* \sim 1828$.

Зависимости $F(w_0)$ при $\lambda=50$ нм и различных расположениях прорезей показаны на рис. 2. Видно, что наиболее оптимальным можно считать разбиение, когда прорези находятся ближе к МЧЭ (см. рис. 1 д). В этом случае F приблизительно в 1,5 раза больше по сравнению со случаем, когда прорези находятся в дальней от МЧЭ части активной полосы.

На основании проделанных вычислений сделано заключение, что наиболее оптимальным можно считать разбиение активной полосы, когда прорези находятся ближе к МЧЭ, а ширина самого элемента $w_0=0,2$ мкм.

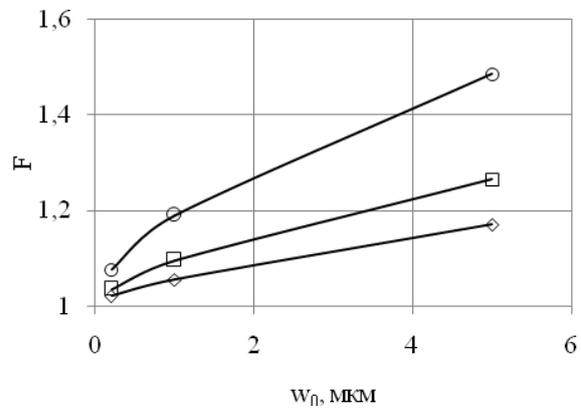


Рис. 2. Зависимость $F(w_0)$ при различных расположениях прорезей в активной полосе: – ближе к МЧЭ (см. рис. 1 д); □ – равномерно (см. рис. 1 в); – дальше от МЧЭ (см. рис. 1 з)

Следующие расчеты проводились в два этапа. На первом этапе проводилась последовательная фрагментация активной полосы на ветви и прорези. Отступ от края активной полосы для нанесения первой прорези определялся величиной шага. Шаг – это также величина, на которую смещалась прорезь вдоль ширины активной полосы при подборе оптимального месторасположения. Этот этап позволял найти первоначальный отступ, т.е. шаг от края или от предыдущей полосы, когда достигается наибольшее значение F , т.е. F_m . На втором этапе при фиксированном значении шага проводились расчеты

зависимости $F(n)$ при различных количествах прорезей n и величинах их ширины w_p .

Этап I. Исследовалась зависимость коэффициента концентрации магнитного поля от расположения и количества прорезей на активной полосе. Было выбрано три шага: 20 нм, 200 нм и 1000 нм. Подбор наиболее оптимального разбиения осуществлялся следующим образом: на активной полосе фиксировалась прорезь на расстоянии шага от края (ближе к МЧЭ), рассчитывался соответствующий коэффициент концентрации. Затем эта прорезь смещалась в направлении от края активной полосы на величину шага. Таким образом прорезь проходила всю активную полосу. Фиксировалось положение прорези, когда коэффициент концентрации F достигал максимального значения F_m . От этой прорези в направлении от МЧЭ на расстоянии шага делалась вторая прорезь, которая также смещалась по ширине активной полосы, и фиксировалось её положение при достижении F_m . Подобным же образом наносились третья, четвертая и т.д. прорези, и вычислялись F_m . Ширина прорезей для всех трёх случаев была одинакова: $w_p = 20$ нм.

Исследовано нанесение прорезей в количестве 20 штук. На рис. 3 и рис. 4 представлены кривые $F_m(n)$, т.е. зависимости коэффициента концентрации от количества прорезей в активной полосе при условии, что прорези имеют оптимальное месторасположение, что выявлялось по ходу проведения вычислений. На рис. 3 рассматривается случай, когда активная полоса создана на основе НТСП ($\lambda = 50$ нм), а на рис. 4 – на основе ВТСП ($\lambda = 250$ нм).

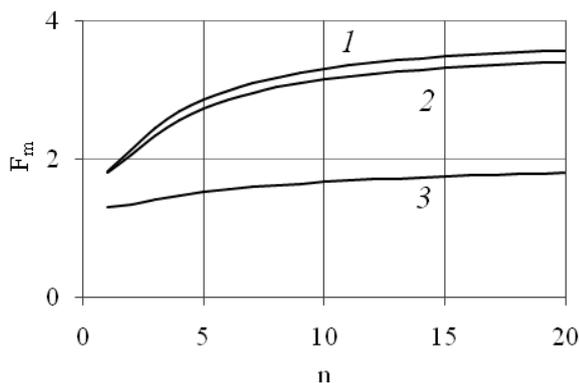


Рис. 3. Зависимость $F_m(n)$ при $\lambda = 50$ нм. Подбор расположения прорезей происходил с различным шагом, нм: 1 – 20; 2 – 200; 3 – 1000

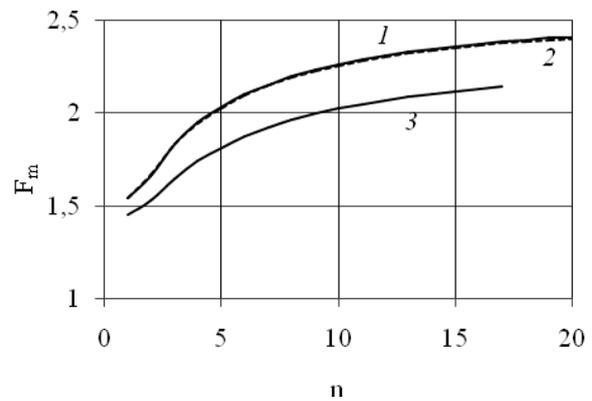


Рис. 4. Зависимость $F_m(n)$ при $\lambda = 250$ нм. Подбор расположения прорезей происходил с различным шагом, нм: 1 – 20; 2 – 200; 3 – 1000

Анализ полученных кривых позволяет сделать вывод о том, что с увеличением количества прорезей удаётся повысить значение коэффициента концентрации F . В связи с этим наблюдаем, что увеличение шага не позволяет обнаружить максимальные значения коэффициента концентрации: чем меньше шаг, тем более высокие показатели F_m . Максимальные значения достигнуты при шаге 20 нм при $\lambda = 50$ нм, т.е. для НТСП сверхпроводника (см. рис. 3): коэффициент концентрации вырос почти в 2 раза с $F_m = 1,83$ для одной прорези до $F_m = 3,57$ для 20 прорезей. Оптимальное разбиение активной полосы одного из колец концентратора магнитного поля при таких параметрах выглядит следующим образом (начало от МЧЭ, цифрами обозначены размеры ветвей в нм, пунктиром обозначены прорези по 20 нм): 140–180–220–240–260–280–300–320–340–340–360–360–380–380–400–400–420–420–420–440–23000. По характеру кривых на рис. 3 и рис. 4 можно судить о том, что дальнейшее увеличение количества прорезей (от 20 штук) не приведёт к значительному увеличению F_m , так как возрастание кривой становится менее ощутимым.

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что при различных шагах 20 нм и 200 нм, коэффициенты концентрации слабо отличаются друг от друга ($\leq 7\%$). Для случая НТСП и в тех же условиях для случая ВТСП кривые $F_m(n)$ практически совпадают с точностью $\sim 1\%$. Заметная разница в величинах F_m наблюдается при шагах 20 нм и 1000 нм для обоих типов сверхпроводников. Такое поведение кривых $F_m(n)$, по-видимому, вызвано влиянием размера шага на однородное распределение тока в активной полосе. Действительно, когда размер шага (20 нм, 200 нм) сопоставим или меньше параметра λ , ток в активной полосе из краев перераспределяется к ее середине, тем самым среднее магнитное поле, создаваемыми сверхпроводящими ветвями на МЧЭ, увеличивается. Коррелированно также растет F_m . Такой эффект менее выразителен

при шаге 1000 нм, так как он гораздо больше, чем λ , и перераспределение тока от краев к середине незначительно.

Этап II. На основании предыдущих вычислений был выбран шаг 20 нм для проведения следующих расчётов. На этот раз ширина прорезей w_p принимала три различных значения: 20 нм, 100 нм и 500 нм. При этом подбор месторасположения прорезей производился аналогично этапу I. На рис. 5 и 6 приведены зависимости $F_m(n)$ для низкотемпературного сверхпроводника и высокотемпературного, соответственно.

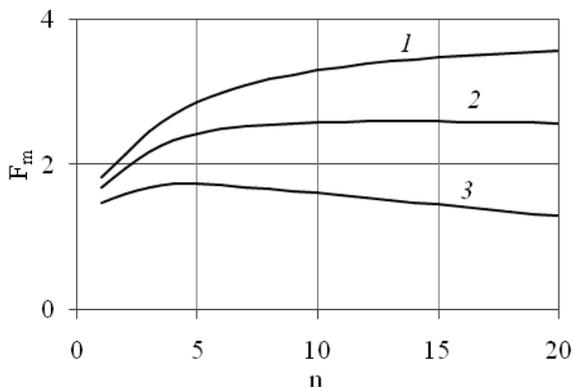


Рис. 5. Зависимость $F_m(n)$ при $\lambda=50$ нм при различных значениях w_p , нм: 1 – 20; 2 – 100; 3 – 500

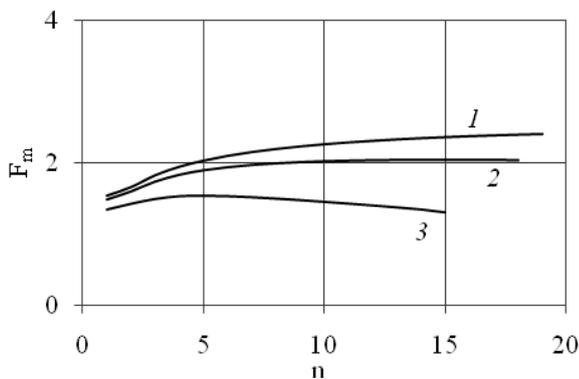


Рис. 6. Зависимость $F_m(n)$ при $\lambda=250$ нм при различных значениях w_p , нм: 1 – 20; 2 – 100; 3 – 500

Как показано на рис. 5 и 6 с увеличением числа прорезей происходит и увеличение коэффициента концентрации магнитного поля. По достижении определённого значения числа прорезей данный эффект уже не наблюдается и происходит падение значения коэффициента концентрации. Например, на рис. 5(2) пик наблюдается, когда число прорезей равно 13, а на рис. 5(3), когда число прорезей равно 4. Таким образом, уменьшение размера прорези приводит к увеличению числа прорезей, необходимых для получения максимальных значений коэффициента концентрации, но эти значения значительно выше. Например, для случая 19 прорезей на рис. 6(1)

коэффициент концентрации $F_m=2,40$, а для случая 5 прорезей на рис. 6(3) $F_m=1,54$ (и это уже максимальное значение), то есть разница почти в 1,5 раза.

Оптимальное разбиение, когда коэффициент концентрации максимален, получено для случая низкотемпературного сверхпроводника (см. рис. 5) $F_m=3,57$ и совпадает с оптимальным разбиением, полученным на этапе I.

Отметим, что сверхпроводящие пленочные КМП или ТМП существенно могут понизить пороговую чувствительность ДМП. В частности, в комбинированном ДМП типа «сендвич», состоящем из сверхпроводящего пленочного концентратора и структуры спинтроники в качестве МЧЭ, удалось получить разрешение $\delta B_0 \leq 5$ фТл на уровне разрешения СКВИД [1, 2, 6]. При этом расчетные F_0 хорошо согласуются с измеренными значениями [6,9,10]. Следует также отметить, что согласно (3), (4) по порядку величины $F_0 \sim D/(w_0 + w_p)$, т.е. для повышения F_0 требуется увеличить диаметр D приемных колец, что приводит к росту геометрических размеров сплошного (ненаноструктурированного) КМП. Однако наноструктурирование КМП позволяет за счет $F > 1$ дополнительно увеличить общий коэффициент концентрации $F^* = F_0 \cdot F$ и необходимость увеличения D для роста F_0 отпадает. Например, для сплошного (ненаноструктурированного) КМП получено расчетное значение $F_0=1766$ при диаметре $D=2$ мм и параметрах, отраженных в табл. 1. Однако после наноструктурирования активной полосы при сохранении прежних параметров и общего коэффициента концентрации $F^*=1766$ величину F_0 можно уменьшить как $F_0 = F^*/F$ и, соответственно, снизить прежнее значение D в F раз. Очевидно, такая ситуация предпочтительна тогда, когда слишком большое значение F^* уже не позволяет уменьшить δB_0 , так как оно ограничено собственными шумами МЧЭ или конструктивными шумами ДМП. Видно, что наноструктурирование активной полосы позволяет уменьшить либо разрешение, либо геометрические размеры КМП, что является существенным фактором для повышения его эффективности. Очевидно, что в последнем случае резко снижаются геометрические размеры ДМП, так как они практически определяются размерами КМП (см. рис. 1).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа полученных результатов следует: наноструктурирование активной полосы сверхпроводящего пленочного концентратора магнитного поля на параллельные ветви и прорези, изменение ширины магниточувствительного элемента, а также использование низкотемпературных

сверхпроводниковых материалов, позволяет добиться значительного увеличения коэффициента концентрации магнитного поля и, тем самым, понижения пороговой чувствительности датчика магнитного поля или уменьшения его геометрических размеров. В частности, при диаметре колец концентратора магнитного поля 2 мм, наноструктурированных (сплошных) активных полосах шириной 30 мкм и магниточувствительном элементе шириной 0,2 мкм достигается значение коэффициента концентрации 1766 (НТСП материал). Однако, наноструктурирование активных полос концентратора в виде чередующихся параллельных сверхпроводящих ветвей и прорезей с однородным распределением по ширине и с наноразмерными ширинами (20 нм) общий коэффициент концентрации увеличивается до $F^* = 1828$. Наноструктурирование позволяет уменьшить диаметр колец концентратора. Положительный эффект становится более весомым, если использовать случай оптимального расположения прорезей в активной полосе и соответствующее значение F_m . Например, при $F_m \approx 3,57$ (см. рис. 5) величина F^* может достигать 6300, или появляется возможность диаметр колец уменьшать до 0,6 мм.

В современной медицине актуальны новые биосовместимые материалы (наноматериалы с ферромагнитными или супермагнитными частицами, углеродными нанотрубками и др.), а также неинвазивная диагностика и контроль работы активных имплантированных аппаратов (искусственное сердце, различные стимуляторы, измерение скорости кровотока, и т.д.). Востребованные задачи, вероятно, будут решены с применением датчиков магнитного поля со сверхпроводящими пленочными концентраторами магнитного поля с наноструктурированными активными полосами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность профессору Селищеву С.В. за обсуждение работы и полезные советы.

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-39-00044).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Robbes D. Highly sensitive magnetometers—a review // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2006. Vol. 129(1). PP. 86-93.
- [2] Ичкитидзе Л.П. Сверхпроводниковый пленочный датчик слабого магнитного поля с трансформатором магнитного потока // Патент RU №22899870.
- [3] URL: <http://www.tristantech.com> (дата проверки: 20.05.2016)
- [4] URL: <http://www.starcryo.com> (дата проверки: 20.05.2016)
- [5] URL: <http://www.elekta.com> (дата проверки: 20.05.2016)
- [6] D. Drung, C. Assmann, J. Beyer, A. Kirste, M. Peters, F. Ruede, and Th. Dchuring. Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2007. Vol. 17. PP. 1-6.
- [7] Ичкитидзе Л.П., Миронюк А.Н. Топологический наноструктурированный пленочный сверхпроводниковый трансформатор магнитного потока // *Нано- и микросистемная техника*. 2012. №1. С. 47-50.
- [8] Ичкитидзе Л.П. Сверхпроводниковые пленочные трансформаторы магнитного потока с микро- и наноразмерными ветвями // *Нано- и микросистемная техника*. 2013. №9. С. 38-44.
- [9] Pannetier-Lecoeur M., Parkkonen L., Sergeeva-Chollet N., Polovy H., Fermon C., Fowley C. Magnetocardiography with sensors based on giant magnetoresistance // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 98(15). pp. 153705.
- [10] Pannetier-Lecoeur M., Herreros Q., Dyvorne H., Campiglio P., Jasmin-Lebras G., Demonti A., Fermon C. Very low field magnetic resonance imaging with spintronics sensors // *Rewiew of scientific instruments*. 2013, №84, 095116. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4821657>

Nanostructured superconducting film concentrator in the magnetic field sensor

L.P. Ichkitidze*, D.V. Telishev, N.Yu. Shichkin

National Research University «MIET», * leo852@inbox.ru

Keywords — magnetic field sensor, magnetic field concentrator, active strip, superconducting film, nanostructuring.

ABSTRACT

Superconducting film magnetic-field concentrator was investigated. Versions a number of the optimal splitting of its active strip in the numerous parallel branches and the cuts was considered. It is established that nanostructuring of the active strip (with the slit width of 20 nm) of magnetic-field concentrator into superconducting branches

and cuts allows the concentration factor of magnetic field to be increased by several times and, therefore, the threshold sensitivity and geometric dimensions of the magnetic field sensor can be reduced. High values of the concentration factor can be achieved with the arrangement of the cuts closer to the magnetically sensitive element. On the basis of this conclusion the concentration factor was calculated in two steps: by changing the width of the cuts and their position on the active strip. The sites of optimal locations of the cuts when the concentration factor reached the maximum values were identified. In this case, higher

values of the concentration factor are achieved for the concentrator based on low-temperature superconductor films in comparison with the concentrator utilizing high-temperature superconductor films.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Professor Selishev S.V. for discussions and helpful tips.

SUPPORT

The study was performed by the grant of Russian Scientific Foundation (project No. 14-39-00044).

REFERENCES

- [1] Robbes D. Highly sensitive magnetometers — a review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, vol. 129(1), pp. 86-93.
- [2] Ichkitidze L.P. Sverhprovodnikovyy plnochnyj datchik slabogo magnitnogo polja s transformatorom magnitnogo potoka // Patent RU №22899870 (in Russian).
- [3] URL: <http://www.tristantech.com> (date accessed: 20.05.2016)
- [4] URL: <http://www.starcryo.com> (date accessed: 20.05.2016)
- [5] URL: <http://www.elekta.com> (date accessed: 20.05.2016)
- [6] Drung D., Assmann C., Beyer J., Kirste A., Peters M., Ruede F. and Dchuring Th. Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors. *IEEE Trans. Appl. Supercond*, 2007, Vol. 17, pp. 1-6.
- [7] Ichkitidze L.P., Mironjuk A.N. Topologicheskij nanostrukturirovannyj plnochnyj sverhprovodnikovyy transformator magnitnogo potoka. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2012. no. 1. pp. 47-50 (in Russian).
- [8] Ichkitidze L.P. Sverhprovodnikovye plnochnye transformatory magnitnogo potoka s mikro- i nanorazmernymi vetvjami // *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2013. №9. pp. 38-44 (in Russian).
- [9] Pannetier-Lecoeur M., Parkkonen L., Sergeeva-Chollet N., Polovy H., Fermon C., Fowley C. Magnetocardiography with sensors based on giant magnetoresistance. *Applied Physics Letters*, 2011., vol. 98(15), pp. 153705.
- [10] Pannetier-Lecoeur M., Herreros Q., Dyvorne H., Campiglio P., Jasmin-Lebras G., Demonti A., Fermon C. Very low field magnetic resonance imaging with spintronics sensors // *Review of scientific instruments*. 2013, no. 84, p. 095116. Available at: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4821657>.