

**Оценка чувствительности датчика магнитного поля
на основе наногранулированного нитрида ниобия***Н. Д. Кузьмичев, М. А. Васютин, Д. А. Шилкин*

Выполнена оценка чувствительности датчика магнитного поля на основе наногранулированного нитрида ниобия, которая составила порядка 30 фТл/Гц^{1/2}. Принцип работы указанного датчика основан на нарушении нечетной симметрии постоянным магнитным полем намагниченности чувствительного элемента. Приведена математическая модель подобных датчиков.

Ключевые слова: чувствительность, датчик магнитного поля, наногранулированный нитрид ниобия, джозефсоновская среда, гармоники намагниченности.

Ссылка: Кузьмичев Н. Д., Васютин М. А., Шилкин Д. А. // Прикладная физика. 2020. № 4. С. 92.

Reference: N. D. Kuzmichev, M. A. Vasyutin, and D. A. Shilkin, Prikl. Fiz., No. 4, 92 (2020).

Введение

Нелинейные и гистерезисные свойства намагниченности ферромагнетиков давно используются в магнитометрии (см., например, [1, 2]). В настоящее время на основе ферромагнетиков построены магнитометры (феррозонды) с очень высокой чувствительностью порядка 10^{-10} Тл/Гц^{1/2} (см., например, [3]). Феррозонды обладают высокой чувствительностью, точностью и возможностью непосредственно регистрировать составляющие вектора магнитной индукции. Это дает возможность получать полную информации о структуре магнитного поля и его источниках. Описанные магнитометры пригодны для работы при наличии электромагнитных помех.

Хорошо известно, что нелинейными и гистерезисными свойствами обладают сверхпроводники 2-го рода в критическом состоя-

нии, а также сверхпроводники, имеющие гранулярную структуру с многочисленными джозефсоновскими связями между гранулами (среда Джозефсона), например, поликристаллические высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП). В случае гранулярного сверхпроводника нелинейность намагниченности возникает в слабых магнитных полях [4–6]. Туннельный контакт Джозефсона также обладает нелинейной намагниченностью (см., например, [7]). На основе нелинейных свойств намагниченности поликристаллических ВТСП разработан магнитометр [8–10], аналогичный феррозонду для регистрации и измерения слабых магнитных полей. Кроме того, нелинейными свойствами намагниченности и вольт-амперных характеристик обладает наноструктурный сверхпроводящий метаматериал, изготовленный на основе нитрида ниобия (NbN) [11]. Нитрид ниобия в настоящее время широко используется в прикладных и фундаментальных целях, так как NbN обладает высокой механической, химической и радиационной стойкостью (см., например, [12]).

Целью настоящей работы является разработка математической модели датчика магнитного поля на основе нелинейных свойств намагниченности материала и оценка его чувствительности с использованием в качестве материала наногранулированного NbN.

Кузьмичев Николай Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор.
Васютин Михаил Александрович, к.ф.-м.н., доцент.
Шилкин Дмитрий Алексеевич, инженер.
Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарева.
Россия, 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68.
E-mail: kuzmichevnd@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 июля 2020 г.

© Кузьмичев Н. Д., Васютин М. А., Шилкин Д. А., 2020

Теория

Проанализируем нелинейные и гистерезисные свойства физической характеристики материала, например, намагниченности при воздействии на него гармонически модулированного магнитного поля на основе теории рядов Фурье и Тейлора в общем виде, не вникая в физический механизм вызванных этим воздействием явлений. Рассмотренный ниже подход справедлив не только для ферромагнетиков и сверхпроводников, но и для других материалов и их параметров, имеющих нелинейные и гистерезисные свойства, например, вольтамперных характеристик.

При статическом и гармоническом частотой ω воздействии внешним магнитным полем напряженностью $H = H_0 + h \cos \omega t$ на образец с нелинейными и гистерезисными магнитными свойствами намагниченность $M(H(\tau))$ будет ангармонической периодической функцией времени τ . Следуя работам [6, 13] имеем ряд Фурье:

$$M(H) = M(H_0 + h \cos t) = \frac{M_0'}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (M_n' \cos nt + M_n'' \sin nt). \quad (1)$$

В выражении (1) величина $t = \omega\tau$ есть безразмерное время. Амплитуды синфазных составляющих 1-й и 2-й гармоник Фурье для малых амплитуд переменного поля h равны [6, 9, 10, 13, 14]:

$$M_1' \approx h \left. \frac{d \langle M(H) \rangle}{dH} \right|_{H_0} = h \chi_d(H_0), \quad (2)$$

$$M_2'(H_0, h) \approx \frac{h^2}{4} \left. \frac{d^2 \langle M(H) \rangle}{dH^2} \right|_{H_0} \approx \frac{h^2}{4} \frac{d\chi_d(H_0)}{dH_0}. \quad (3)$$

Здесь $\langle M(H) \rangle = [M(H) + M_+(H)]/2$ – средняя кривая намагниченности, $\langle M(H) \rangle^{(k)}$ – производная от $\langle M \rangle$ по H порядка k , $M_-(H)$ – ветвь намагниченности в убывающем поле, а $M_+(H)$ – возрастающем поле.

Для наногранулированных сверхпроводников, обладающих свойствами среды Джо-

зефсона [15] (например, поликристаллические ВТСП), намагниченность не является гистерезисной в малых магнитных полях для $H \leq 1-2$ мТл [4, 6, 16, 17]. Следуя работам [9, 10, 16, 17] имеем:

$$M_2'(h, H_0) \approx M_0 \left(\frac{h}{H_p} \right)^2 \frac{th \left(\frac{H_0}{H_p} \right)}{ch^2 \left(\frac{H_0}{H_p} \right)}. \quad (4)$$

Здесь M_0 – намагниченность насыщения и H_p – характерное поле порядка M_0 . Также в первом приближении $\langle M(H) \rangle$ можно аппроксимировать кубическим нечетно симметричным полиномом: $\langle M(H) \rangle \approx aH + bH^3$. Используя выражение (3) или (4) и учитывая приведенную кубическую зависимость, получим:

$$M_2'(H_0, h) \approx 3h^2 b H_0. \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что независимо от механизма нелинейности намагниченности материала и в силу ее нечетной симметрии синфазная составляющая второй гармоники намагниченности при малых значениях h пропорциональна коэффициенту b кубической нелинейности и величине постоянного поля H_0 . Механизм нелинейности определяется величиной b . Это свойство используется для разработки датчика магнитного поля. Природа линейной зависимости от H_0 четных гармоник $M_{2n}'(H_0)$ ($n = 1, 2, \dots$) заключается в нарушении нечетной симметрии намагниченности материала постоянным полем H_0 .

Для амплитуды четвертой гармоники имеем: $M_4 \sim Ah^4 H_0$ и т. д.

Оценка чувствительности датчика

Чувствительность датчика определяется вольтовой чувствительностью Σ и напряжением шумов в расчете на единичный интервал усиливаемых частот. Величину Σ можно определить следующим образом. Изменяющийся во времени магнитный момент чувствительного элемента датчика (в нашем случае наногранулированного материала) наводит в контуре связи ангармоническую ЭДС. Ам-

плитуды ЭДС четных гармоник, например, второй пропорциональны соответствующим четным гармоникам намагниченности:

$$\varepsilon_2 = 2CM_2. \quad (6)$$

Коэффициент C зависит от конструкции контура связи. Например, для датчика описанного в работах [8–10], величина C равна: $C = \mu_0 NS\omega$, где μ_0 – магнитная постоянная, N – число витков приемной катушки, S – сечение чувствительного элемента и ω – частота.

Используя формулы (3)–(6) получим для вольтовой чувствительности выражение:

$$\Sigma = \delta\varepsilon_2/\delta H_0 = 3Ch^2b. \quad (7)$$

Конструктивно можно менять h и C . Согласно модели критического состояния среды Джозефсона [16, 17] и формулам (4) и (5) величина b определяется характерным полем H_p и равна:

$$b = \frac{1}{3H_p^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{4\pi e\rho}{\Delta th \left(\frac{\Delta}{2kT} \right)} \right)^2. \quad (8)$$

Здесь e – заряд электрона, Δ – энергетическая щель сверхпроводника, ρ – удельное сопротивление среды Джозефсона выше температуры сверхпроводящего перехода T_c , k – постоянная Больцмана и T – температура датчика. При температурах $T \ll T_c$ величина $\Delta th(\Delta/2kT) \approx \Delta$, а при температурах $T \approx T_c (T < T_c)$ величина $\Delta th(\Delta/2kT) \approx \Delta^2/2kT_c$ [7].

На этом принципе на ВТСП разработан магнитометр слабых магнитных полей [8]. Расчет чувствительность датчика магнитного поля приведен в работах [8–10]. Для реально работающего магнитометра, описанного в работах [9, 10], изготовленного на основе YBCO – керамики, погруженной в жидкий азот, чувствительность составила 2×10^{-11} Тл/Гц^{1/2}. В приведенных работах показано, что можно достичь

$$\text{чувствительности} \quad D = \frac{1}{\Sigma} \sqrt{\frac{U_n^2}{\Delta f}} \approx 1 \text{ пТл} / \text{Гц}^{1/2}.$$

Здесь U_n – напряжение шумов и Δf – интервал частот. Чувствительность близких датчиков на

основе керамических ВТСП имеет тот же порядок [18, 19]. Отношение чувствительностей датчиков на основе YBCO – керамики и наногранулированного NbN равно:

$$K = \frac{D_{YBCO}}{D_{NbN}} = \frac{\Sigma_{NbN}}{\Sigma_{YBCO}} = \frac{b_{NbN}}{b_{YBCO}}. \quad (9)$$

Учитывая приблизительно равные значения удельных сопротивлений $\rho \sim 100$ – 1000 мкОм·см для NbN и YBCO – керамики и примерно на порядок более низкую величину Δ для NbN по сравнению с YBaCuO при одинаковых величинах h и C (9), получим, что для $T \ll T_c$:

$$K \approx (\rho_{NbN} \Delta_{YBCO} / \rho_{YBCO} \Delta_{NbN})^2 \approx 30.$$

В итоге мы получим оценку чувствительности датчика магнитного поля на основе наногранулированного NbN: $D \approx 0,03$ пТл/Гц^{1/2}. Для увеличения чувствительности датчика необходимо увеличивать вольтову чувствительность Σ . Согласно формулам (7) и (8), величина Σ пропорциональна квадрату удельного сопротивления ρ^2 среды Джозефсона (наногранулированного материала). Таким образом, увеличение ρ приводит к увеличению чувствительности датчика. Это может быть достигнуто, например, увеличением несверхпроводящей прослойки между гранулами в пределах длины когерентности сверхпроводящих гранул материала (в нашем случае NbN). Увеличение объема несверхпроводящей прослойки между гранулами также может быть достигнуто путем дробления гранул.

Заключение

Таким образом, используя наногранулированный материал на основе NbN с множеством упорядоченных или случайных слабых связей (среда Джозефсона) можно построить магнитометр слабых магнитных полей с чувствительностью порядка 30 фТл/Гц^{1/2}, сравнимой с чувствительностью СКВИДов. Учитывая, как было отмечено во введении, высокую механическую, химическую и радиационную стойкость NbN, предлагаемый датчик найдет широкое применение в медицине, геологоразведке, космических исследованиях и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат. 1986.
2. Сергеев В. Г., Шихин А. Х. Магнитоизмерительные приборы и установки. – М.: Энергоиздат, 1982.
3. Topal U., Can H., Celic O.M., Narman A., Kamis M., Citak V., Cakrak D., Sözeri H., Svec P. // J. Supercond. Novel Magn. 2019. Vol. 32. P. 839.
4. Jeffries C. D., Lam Q. H., Kim Y., Kim C. M., Zettl A., Klein M. P. // Phys Rev. B. 1989. Vol. 39. № 16. P. 11526.
5. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 4. С. 233.
6. Кузьмичев Н. Д. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 7. С. 56.
7. Кулик И. О., Янсон И. К. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах. – М.: Наука, 1970.
8. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., Васютин М. А., Головашкин А. И., Левченко И. С. // Патент № 1827653 от 23.03.1993.
9. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 3. С. 81.
10. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. // Прикладная физика. 2005. № 5. С. 125.
11. Zhang C., Jin B., Han J., Kawayama I., Murakami H., Wu J., Kang L., Chen J., Wu P., and Tonouchiet M. // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102. Iss. 8. P. 081121.
12. Solve S., Chayramy R., Maruyama M., Urano C., Kaneko N-H., Rüfenacht A. // Metrologia. 2018. Vol. 55. № 2. P. 302.
13. Кузьмичев Н. Д. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 12. С. 63.
14. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., Головашкин А. И. // Прикладная физика. 2007. № 4. С. 13.
15. Сонин Э. Б. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. Вып. 8. С. 415.
16. Кузьмичев Н. Д. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. Вып. 5. С. 291.
17. Кузьмичев Н. Д. // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 11. С. 1934.
18. Ичкитидзе Л. П. // Патент № 2289870 от 22.06.2005.
19. Ichkitidze L. P., Belodedov M. V., Selishchev S. V., Telyshev D. V. // IEEE Magnetic Letters. 2019. Vol. 10. P. 3110705.

PACS: 85.25.Ay, 74.25.Ha

Evaluation of the sensitivity of a magnetic field sensor based on nanogranulated niobium nitride

N. D. Kuzmichev, M. A. Vasyutin, and D. A. Shilkin

Ogarev Mordovia State University
68 Bolshevistskaya st., Republic of Mordovia, Saransk, 430005, Russia

Received July 23, 2020

Was estimated the sensitivity of the magnetic field sensor based on nanogranular niobium nitride to be about $30 \text{ fT/Hz}^{1/2}$. The principle of operation of this sensor is based on the violation of odd symmetry by the dc magnetic field of the magnetization of the sensitive of element. A mathematical model of such sensors is given.

Keywords: sensitivity, magnetic field sensor, nanogranular niobium nitride, Josephson medium, magnetization harmonics.

REFERENCES

1. Yu. V. Afanas'ev, *Fluxgate devices* (Energoatomizdat, Leningrad, 1986) [in Russian].
2. V. G. Sergeev and A. Kh. Shikhin, *Magnetic measuring devices and installations* (Energoizdat, Moscow, 1982) [in Russian].
3. U. Topal, H. Can, O. M. Celic, A. Narman, M. Kamis, V. Citak, D. Cakrak, H. Sözeri, and P. Svec, J. Supercond. Nov. Magn. **32**, 839 (2019).

4. C. D. Jeffries, G. H. Lam, Y. Kim, C. M. Kim, A. Zettl, and M. P. Klein, *Phys. Rev. B* **39**, 11526 (1989).
5. A. I. Golovashkin, N. D. Kuzmichev, I. S. Levchenko, G. P. Motulevich, and V. V. Slavkin, *Sol. St. Phys.* **31** (4), 233 (1989).
6. N. D. Kuzmichev, *Tech. Phys. Lett.* **17** (7), 56 (1991).
7. I. O. Kulik and I. K. Yanson, *Josephson effect in superconducting tunnel structures* (Nauka, Moscow, 1970).
8. N. D. Kuzmichev, V. V. Slavkin, M. A. Vasyutin, A. I. Golovashkin, and I. S. Levchenko, Patent № 1827653 from 23.03.93.
9. A. I. Golovashkin, N. D. Kuzmichev, and V. V. Slavkin, *Tech. Phys.* **51** (3), 373 (2006).
10. A. I. Golovashkin, N. D. Kuzmichev, and V. V. Slavkin, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 125 (2005).
11. C. Zhang, B. Jin, J. Han, I. Kawayama, H. Murakami, J. Wu, L. Kang, J. Chen, P. Wu, and M. Tonouchiet, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 081121 (2013).
12. S. Solve, R. Chayramy, M. Maruyama, C. Urano, N-H. Kaneko, and A. Rüfenacht, *Metrologia* **55**, 302 (2018).
13. N. D. Kuzmichev, *Journal of Tech. Phys.* **64** (12), 63 (1994).
14. N. D. Kuzmichev, V. V. Slavkin, and A. I. Golovashkin, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 13 (2007).
15. E. B. Sonin, *JETP Lett.* **47** (8), 496 (1988).
16. N. D. Kuzmichev, *JETP Lett.* **74** (5), 291 (2001).
17. N. D. Kuz'michev, *Sol. St. Phys.* **43** (11), 2012 (2001).
18. L. P. Ichkitidze, Patent № 2289870 from 22.06.2005.
19. L. P. Ichkitidze, M. V. Belodedov, S. V. Selishchev, and D. V. Telyshev, *IEEE Magnetic Letters* **10**, 3110705 (2019).