



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований

дубна

2328/82

17/v-82

13-82-37

С.А.Долгий, А.В.Карпунин, А.А.Кукушкин,
Ю.В.Куликов, Г.П.Николаевский, В.Т.Паршутов,
М.И.Яцута

ИЗМЕРЕНИЕ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
С ПОМОЩЬЮ НЕТЕРМОСТАТИРОВАННЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА

1982

Исследование пространственных распределений магнитных полей с помощью термостатированных преобразователей Холла позволяет производить точечные измерения с погрешностью не больше $10^{-3} / 1\%$. Однако термостатирование преобразователей Холла приводит к потере одного из их основных преимуществ - малых размеров датчиков магнитного поля, позволяющих исследовать магнитные поля в небольших объемах.

В работе ^{/2/} показано, как, не прибегая к термостатированию, изготовить датчик магнитного поля на основе двух преобразователей Холла, с помощью которого можно также в большой степени уменьшить погрешности измерений.

В таком датчике магнитного поля один из преобразователей Холла является измерительным, второй, установленный неподвижно в некоторой точке магнитного поля, мониторингом, с показаниями которого сравниваются показания измерительного преобразователя.

В случае пространственного исследования магнитного поля целесообразнее использовать /по соображениям экономии времени и затрат электроэнергии/ вместо одного измерительного преобразователя β -компонентный /для одновременного измерения трех компонент магнитного поля - V_x , V_y , V_z / нетермостатированный датчик магнитного поля.

В настоящем сообщении показана конструкция и приведены технические характеристики этого датчика; дана оценка погрешности как при относительном, так и при обычном методе измерений.

КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА

Датчик индукции магнитного поля представляет собой блок из трех стандартных преобразователей Холла, размещенных на кубике из немагнитного материала с размерами $/8 \times 8 \times 8/$ мм³.

Номера одиночных преобразователей /условные/ - 2435 /измеряет основную компоненту магнитного поля/, 2453, 2434.

Преобразователи расположены на кубике во взаимно перпендикулярных плоскостях. Расстояния между центрами их активных поверхностей - 2 мм. Перпендикулярность между активными поверхностями преобразователей составляет $90^\circ \pm 3'$. Блок преобразователей Холла помещен в корпус для защиты от механических повреждений. Размеры датчика - $/16 \times 16 \times 23/$ мм³.

Общий вид датчика показан на рисунке.



Трехкомпонентный нетермоста-
тированный датчик индукции маг-
нитного поля /для сравнения
размеров рядом с датчиком пока-
зана спичка/.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

а/ Погрешность при относительных измерениях

Напряжение на выходе преобразователя Холла в общем случае зависит от нескольких переменных:

$$U_x = f_1(B, i, t, a),$$

U_x - напряжение Холла, B - индукция магнитного поля, i - ток возбуждения преобразователя, t - температура преобразователя, a - угол между вектором индукции магнитного поля B и нормалью к плоскости преобразователя.

Или в случае относительных измерений:

$$\phi = \frac{U_{xи}}{U_{xм}} = \frac{k_1 B_{и}}{k_2 B_{м}} = f_2(B, i, t, a), \quad /1/$$

$U_{xи}$ - напряжение Холла измерительного датчика, $U_{xм}$ - напряжение Холла датчика монитора, $B_{и}$, $B_{м}$ - индукции магнитного поля, соответствующие напряжения Холла измерительного и мониторингового датчиков, k_1 , k_2 - величины, характеризующие чувствительность преобразователей; при малых изменениях индукции B являются константами.

Абсолютная погрешность согласно /1/ имеет вид

$$\Delta\phi = \frac{\partial\phi}{\partial B}\Delta B + \frac{\partial\phi}{\partial i}\Delta i + \frac{\partial\phi}{\partial t}\Delta t + \frac{\partial\phi}{\partial a}\Delta a. \quad /2/$$

В соответствии с /2/ относительная среднеквадратичная ошибка

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\left(\frac{\partial\phi}{\partial B}\Delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial i}\Delta i\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial a}\Delta a\right)^2}. \quad /3/$$

Уравнение /3/ не полностью определяет относительную среднеквадратичную ошибку отдельного измерения, так как не учитывает напряжение шумов преобразователя $\Delta_{ш}$ и класс точности прибора $\Delta_{пр}$,

измеряющего напряжение U_x . Полное выражение для оценки среднеквадратичной погрешности имеет вид:

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\left(\frac{\partial\phi}{\partial B}\Delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial i}\Delta i\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial a}\Delta a\right)^2 + (\Delta_{ш})^2 + (\Delta_{пр})^2}. \quad /4/$$

Рассмотрим слагаемые подкоренного выражения уравнения /4/.

Погрешность, связанная с временной нестабильностью измеряемого поля. При использовании метода относительных измерений предполагается, что малые отклонения /не более нескольких процентов/ абсолютного значения индукции магнитного поля $|B|$ от установленного значения не влияют на пространственное распределение поля в измеряемом объеме, то есть направление вектора поля \vec{B} в любой точке пространства не изменяется при изменении модуля $|\vec{B}|$ на малую величину. Поэтому равенство

$$\phi(B) = \frac{U_{xи}}{U_{xм}} = \frac{K_1 B_{и}}{K_2 B_{м}} = \text{const}$$

остаётся неизменным при малых отклонениях индукции от установленной величины и, следовательно,

$$\frac{\partial\phi}{\partial B}\Delta B = 0.$$

Это предположение нами проверено экспериментально в пределах точности измерений $1 \cdot 10^{-5}$.

Погрешность, связанная с временной нестабильностью тока возбуждения датчика. По току возбуждения i преобразователи измерительный и мониторинговый включаются последовательно, а так как зависимость напряжения Холла от тока возбуждения i линейная /3/, то при $i = \text{var}$ $\phi(i) = \text{const}$, откуда

$$\frac{\partial\phi}{\partial i}\Delta i = 0.$$

Погрешность, обусловленная изменением температуры датчика. Используя температурный коэффициент ЭДС Холла γ , зависимость напряжения Холла от температуры датчика t можно записать в виде

$$U_x = U_{x0} + \gamma U_{x0} \cdot t. \quad /5/$$

Здесь U_{x0} - напряжение Холла при некоторой начальной температуре. Принимая $\gamma = \text{const}$, что справедливо для интервала температур $\approx 50^\circ\text{C}$ /3/, имеем:

$$\phi(t) = \frac{U_{xи}}{U_{xм}} = \frac{U_{xи0} + \gamma_{и} \cdot U_{xи0} \cdot t}{U_{xм0} + \gamma_{м} \cdot U_{xм0} \cdot t},$$

или

$$\phi(t) = \frac{U_{\text{хи}0}}{U_{\text{хм}0}} \cdot \frac{1 + \gamma_{\text{и}} \cdot t}{1 + \gamma_{\text{м}} \cdot t} \quad /6/$$

Из /6/ получаем:

$$\Delta\phi = \frac{U_{\text{хи}0}}{U_{\text{хм}0}} \cdot \frac{\gamma_{\text{и}} - \gamma_{\text{м}}}{(1 + \gamma_{\text{м}} \cdot t)^2} \cdot \Delta t. \quad /7/$$

Из /7/ очевидно, что $\Delta\phi$ тем меньше, чем меньше разность $\gamma_{\text{и}} - \gamma_{\text{м}}$, и при $\gamma_{\text{и}} - \gamma_{\text{м}} = 0$

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} \Delta t = 0.$$

Все три преобразователя Холла 3-компонентного нетермостатированного датчика индукции магнитного поля имеют $\gamma_{\text{и}} (1,2,3) - \gamma_{\text{м}} \leq 0,0003$, и поэтому ошибка от колебания температуры преобразователей в вышеуказанном интервале не будет превышать $7,5 \cdot 10^{-5}$.

Погрешность, связанная с несовпадением нормали к плоскости датчика с направлением магнитного поля. Мониторный датчик жестко крепится в исследуемом объеме магнитного поля /положение его во время измерений не меняется/. Поэтому здесь ошибку измерения индукции поля можно характеризовать только отклонением нормали к плоскости измерительного датчика от направления вектора магнитной индукции - углом α .

Если измеряемое значение $U_{\text{хи}}(\alpha) = U_{\text{хи max}} \cdot \cos\alpha$ /при допущении, что $\alpha = 1^\circ$ /, то, принимая вероятное отклонение $\Delta\alpha = \frac{1}{2}\alpha$, имеем:

$$\frac{\partial U_{\text{хи}}}{\partial \alpha} \Delta\alpha = U_{\text{хи max}} \cdot \sin\alpha \cdot \Delta\alpha = U_{\text{хи max}} \cdot 0,0175 \cdot 0,087 = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U_{\text{хи max}}.$$

То есть ошибка не превышает $1,5 \cdot 10^{-4}$.

При изготовлении прецизионного приспособления для крепления и перемещения датчика можно получить более точный результат.

Влияние уровня шумов преобразователя. Для преобразователей из антимоноида индия /из которых изготовлены преобразователи 3-компонентного датчика/ уровень флуктуации остаточного напряжения Холла $\Delta U_{\text{ш}}$ равен $0,1 \text{ мкВ}^{1/5}$. Следовательно, при чувствительности датчика $\beta = 10 \text{ мкВ/Гс}$ и индукции магнитного поля $B = 10 \text{ Гс}$ относительная погрешность будет равна:

$$\Delta_{\text{ш}} = \frac{\Delta U_{\text{ш}} / \beta}{B} = \frac{0,1/10}{10} = 10^{-3}.$$

При $B = 1000 \text{ Гс}$ $\Delta_{\text{ш}} = 10^{-5}$.

При измерении сильных магнитных полей влияние шумов преобразователей на точность измерений можно не учитывать.

Погрешность, вносимая измерительным прибором. Измерительные приборы /цифровые вольтметры/, используемые для измерений напряжений Холла с помощью 3-компонентного датчика магнитного поля, имеют класс точности 0,01%.

Оценивая по полученным значениям отдельных погрешностей общую среднеквадратичную погрешность, имеем

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} \leq 2 \cdot 10^{-4}.$$

б/ Погрешность при прямом измерении /одним датчиком Холла/

Относительная погрешность измерения пространственного распределения индукции магнитного поля одним датчиком дается выражением

$$\frac{\Delta U_{\text{x}}}{U_{\text{x}}} = \frac{1}{U_{\text{x}}} \sqrt{\left(\frac{\partial U_{\text{x}}}{\partial B} \Delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial U_{\text{x}}}{\partial i} \Delta i\right)^2 + \left(\frac{\partial U_{\text{x}}}{\partial t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial U_{\text{x}}}{\partial \alpha} \Delta \alpha\right)^2 + (\Delta_{\text{ш}})^2 + (\Delta_{\text{пр}})^2}.$$

Расчет для относительной погрешности в данном случае /аналогично предыдущему/ дает

$$\frac{\Delta U_{\text{x}}}{U_{\text{x}}} = (0,6 \div 0,7) \cdot 10^{-3}.$$

в/ Погрешность измерений, обусловленная планарным эффектом преобразователей Холла

Планарный эффект преобразователей Холла /4/, установленных на 3-компонентном датчике индукции магнитного поля, измерялся при $B_z = B_p = 8230 \text{ Гс}$ / B_z и B_p - соответственно перпендикулярный и параллельный к плоскости датчика векторы магнитной индукции /. Получены следующие результаты:

$$\text{а/ } \#2435 \quad \left(\frac{U_{\text{x p}}}{U_{\text{x z}}} \cdot 100\%\right)_{\phi=45^\circ} = 0,057\%,$$

$$\text{б/ } \#2453 \quad \left(\frac{U_{\text{x p}}}{U_{\text{x z}}} \cdot 100\%\right)_{\phi=45^\circ} = 0,026\%,$$

$$\text{в/ } \#2434 \quad \left(\frac{U_{\text{x p}}}{U_{\text{x z}}} \cdot 100\%\right)_{\phi=45^\circ} = 0,036\%.$$

U_{x_p} , U_{x_z} - напряжения Холла, соответствующие индукциям B_p и B_z , ϕ - угол между направлением тока возбуждения преобразователя и вектором B_p . Как видно, планарный эффект всех трех преобразователей 3-компонентного датчика очень мал. Ошибка в измерениях индукции магнитного поля, обусловленная планарным эффектом, в самом неблагоприятном случае / $\phi = 45^\circ$ для всех трех преобразователей и вектор \vec{B} направлен под углом 45° к плоскостям также всех трех преобразователей / не превышает 0,07%. При измерении сравнительно однородных полей / когда основная составляющая магнитного поля отклоняется от нормали к плоскости измеряющего ее преобразователя не более чем на 20° / ошибка, обусловленная планарным эффектом, возникающим при измерении модуля вектора индукции магнитного поля B , не будет превышать / $0,02 \pm 0,03\%$ /.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных расчетов и экспериментов нетермостатированный 3-компонентный датчик индукции магнитного поля может применяться при пространственных измерениях магнитных полей любых типов магнитов, межполюсные расстояния которых не менее / $4 \div 5$ / см, с точностью, достаточной для многих физических экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгий С.А. и др. ОИЯИ, 13-11603, Дубна, 1978.
2. Бетко Ю. и др. ОИЯИ, Р-1689, Дубна, 1964.
3. Вайсс Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов и их применение. "Энергия", М., 1974.
4. Долгий С.А. и др. ОИЯИ, 13-11602, Дубна, 1978.
5. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы. "Энергия", М., 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 января 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D1,2-9224	IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975.	3 р. 60 к.
D-9920	Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976.	3 р. 50 к.
D9-10500	Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976.	2 р. 50 к.
D2-10533	Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976.	3 р. 50 к.
D13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
D17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
D6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
D3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
D13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна. 1978 / 2 тома /	7 р. 40 к.
D1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
D1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 / 2 тома /	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Долгий С.А. и др.

13-82-37

Измерение пространственных магнитных полей с помощью нетермостатированных преобразователей Холла

На основании проведенных расчетов и экспериментов изготовлен нетермостатированный 3-компонентный датчик индукции магнитного поля на основе стандартных преобразователей Холла. С помощью этого датчика погрешность точечных измерений может быть уменьшена при относительном методе до $2 \cdot 10^{-4}$ и при прямом методе до $7 \cdot 10^{-4}$. Преобразователи Холла тщательно подбирались по своим характеристикам /в основном по минимальной величине планарного эффекта, а также минимальной величине и близости температурных коэффициентов ЭДС Холла/, чем в значительной степени объясняется полученная высокая точность. Нетермостатированный 3-компонентный датчик индукции магнитного поля может применяться при пространственных исследованиях магнитных полей любых типов магнитов, межполюсные расстояния которых не меньше $4+5$ см.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Dolgij S.A. et al.

13-82-37

Measurement of Space Magnetic Fields Using Non-Stabilized in Temperature Hall Generators

Based on the calculations and the experiments carried out, a 3-component (for simultaneous measurement of B_x , B_y and B_z components of magnetic field induction) sensor non-stabilized in temperature has been made using standard Hall generators. The error of point measurements can be decreased, by means of this sensor, to $2 \cdot 10^{-4}$ using a relative method and to $7 \cdot 10^{-4}$ by a direct method. When making the sensor, Hall generators were thoroughly chosen according to their characteristics: mainly, minimal value of planar Hall effect, minimal value and closeness of temperature factors of Hall e.m.f. This sensor can be used for space studies of magnetic fields of any type magnets the interpolar distances of which are no less than $(4+5)$ cm.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.