

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



Д-64  
4085/2-78

18/IX-78  
13 - 11602

С.А.Долгий, Ю.В.Куликов, В.Т.Паршутков,  
М.И.Яцута

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛАНАРНОГО ЭФФЕКТА  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА

**1978**

13 - 11602

С.А.Долгий, Ю.В.Куликов, В.Т.Паршутов,  
М.И.Яцута

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛАНАРНОГО ЭФФЕКТА  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА

*Направлено в ПТЭ*



Долгий С.А. и др.

13 - 11602

Измерение планарного эффекта преобразователей Холла

Получение пространственных карт магнитного поля с помощью преобразователей Холла при точности не хуже  $10^{-3}$  требует учета планарного эффекта преобразователей Холла. Приведена методика измерения планарного эффекта.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1978

© 1978 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

В настоящее время отсутствуют публикации с описанием достаточно подробно разработанной методики для определения планарного эффекта преобразователей Холла. Имеются только общие указания на то, каким образом должны производиться эти измерения.

Ниже излагается методика измерения планарного эффекта.

Известно, что напряжение на холловских электродах преобразователя Холла в первом приближении пропорционально нормальной составляющей магнитной индукции  $B_n$  к плоскости преобразователя /см. рис. 1/ а именно:

$$U_x = R_n J B_n \frac{1}{d}, \quad /1/$$

где  $R_n$  - постоянная нормального эффекта Холла,  $J$  - ток возбуждения преобразователя,  $B_n$  - составляющая вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ , перпендикулярная к плоскости преобразователя,  $d$  - толщина преобразователя.

На этом свойстве преобразователя Холла основан метод нахождения модуля /абсолютной величины/ вектора магнитного поля  $\vec{B}$  и его направления в прямоугольной системе координат: измеряются проекции  $\vec{B}$  на оси  $x, y, z$ ; модуль находится как

$$|\vec{B}| = \sqrt{B_{nx}^2 + B_{ny}^2 + B_{nz}^2}.$$

Однако формула /1/, дающая функциональную зависимость  $U_x = f(B_n)$  при произвольно ориентированном относительно пластины преобразователя магнитном поле,

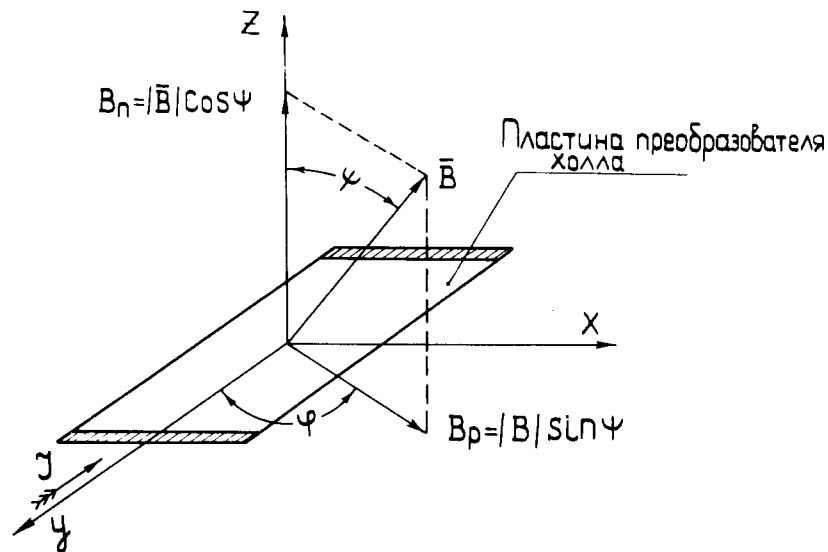


Рис.1. Преобразователь Холла в произвольно ориентированном магнитном поле.

является приближенной. Более точное ее выражение имеет вид

$$U_x = U_0 + R_n \cdot J B_n \frac{1}{d} + \frac{R_p}{2d} J \cdot B_p^2 \sin 2\phi, \quad /2/$$

где  $U_0$  - остаточное напряжение на холловских электродах преобразователя,  $B_p$  - составляющая вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ , параллельная плоскости датчика,  $R_p$  - постоянная планарного эффекта Холла,  $\phi$  - угол между направлением тока возбуждения датчика и планарной составляющей вектора магнитной индукции  $B_p$ .

Обычно / хотя бывают и исключения / третий член уравнения /2/ весьма мал и при измерениях, в которых пренебрегают влиянием  $B_p$  на  $U_x$ ,  $B_n$  определяется из калибровочной кривой  $U_x = f(B_n)$ , измеренной в магнитном поле, перпендикулярном плоскости датчика. В этой калибровочной кривой содержится также и вклад

$U_0$ , поэтому измерение  $\vec{B}$ , когда пластина преобразования Холла перпендикулярна к  $\vec{B}$ , можно производить с той же точностью, с которой производилась и калибровка, если условия при измерении и калибровке одинаковые.

Вообще говоря, влиянием планарной компоненты на точность измерений можно пренебречь, когда  $\vec{B}$  весьма близок к нормали к плоскости преобразователя. Однако в общем случае / когда модуль вектора  $\vec{B}$  определяется по трем измерениям  $U_x$  )  $U_x$  является функцией не только  $B_n$ , но и планарной компоненты  $B_p$ .

Поэтому для полного описания поведения преобразователя Холла в произвольно ориентированном магнитном поле его необходимо калибровать как функцию  $B_n, B_p, \phi$ .

Или иначе: для того чтобы иметь возможность по измеренным напряжениям  $U_x$  определить точно модуль и направление вектора  $\vec{B}$ , для преобразователей Холла следует иметь следующие калибровочные характеристики:

$$U_x = f_1(B_n),$$

$$U_x = f_2(\phi) \quad \text{при нескольких постоянных значениях } B_p;$$

$U_x = f_1(B_n)$  - это обычная калибровочная кривая, и на ней останавливаться не будем.

Рассмотрим подробно, как производится калибровка

$$U_x = f_2(\phi) | B_p = \text{const}.$$

Для этой цели преобразователь Холла устанавливается в положение, при котором направление магнитного поля параллельно пластине преобразователя.

Отметим следующее. Для снятия характеристики  $U_x = f_2(\phi)$  необходимо установить преобразователь в маг-

нитном поле с неравномерностью  $\frac{dB}{dl} \leq 1 \cdot 10^{-4} / \text{Гс}/\text{см}/$

на специально сконструированном для этой цели поворотном устройстве таким образом, чтобы: а/ ось вращения была перпендикулярна к  $\vec{B}$ ; б/ пластина преобразователя Холла была перпендикулярна к оси вращения.

Если бы условия "а" и "б" можно было соблюсти точно, то интересующая нас зависимость получилась бы

просто из формулы /2/, но коль скоро в установке преобразователя ошибки неизбежны, то непосредственно уравнением /2/ воспользоваться не представляется возможным. Как можно выйти из этого положения? Обозначим ошибки в установке преобразователя, как это показано на рис. 2.

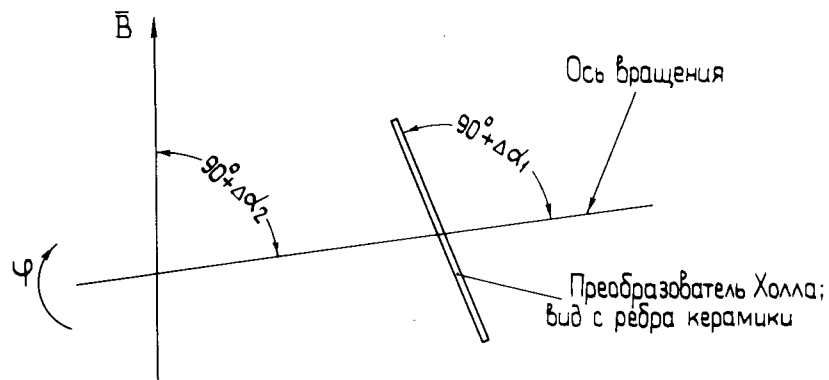


Рис.2. Погрешности при установке преобразователя Холла на устройстве для измерения планарного эффекта:  $\Delta\alpha_1$  - угловая ошибка в установке преобразователя Холла на ось вращения;  $\Delta\alpha_2$  - угловая ошибка в установке оси вращения преобразователя Холла по отношению к  $\vec{B}$ .

Тогда напряжение на холловских электродах при вращении преобразователя вокруг оси /она проходит через центр преобразователя, однако точное прохождение ее через центр в поле с вышеуказанной неравномерностью не обязательно/ можно представить достаточно точно синусным тригонометрическим рядом, состоящим из трех членов:

$$U_x = A_0 + A_1 \sin(\phi + \phi_1) + A_2 \sin 2(\phi + \phi_2). \quad /3/$$

Здесь  $A_0, A_1, A_2$  - константы,  $\phi_1, \phi_2$  - фазовые сдвиги 1-й и 2-й гармоник.

Что представляют собой нулевая, первая и вторая гармоники?

Чтобы определить это, рассмотрим неточность установки преобразователя на поворотном устройстве в двух вариантах /для более удобного рассмотрения/.

$$1/ \quad \Delta\alpha_1 \neq 0; \quad \Delta\alpha_2 = 0 \quad /см. рис. 3/.$$

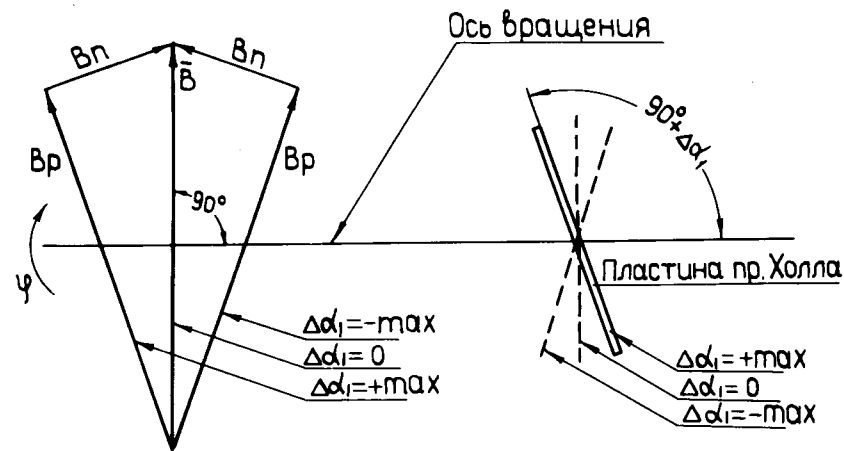


Рис.3. Разложение вектора  $\vec{B}$  на  $B_n$  и  $B_p$  производится в системе координат, связанной с преобразователем Холла /см. рис. 1/.  $\Delta\alpha_1 \neq 0; \Delta\alpha_2 = 0$ .

Очевидно, что в этом частном случае при изменении  $\phi$  напряжение Холла будет иметь вид:

$$U_x = U_0 + K_1 \sin(\phi + \phi_1) + K_2 \sin 2(\phi + \phi_2), \quad /4/$$

$K_1$  и  $K_2$  - константы.

Второй член правой части уравнения /4/ есть напряжение Холла, вызванное нормальной составляющей вектора  $\vec{B}$  к плоскости преобразователя Холла, т.е. вектором  $B_n$ . Вектор  $B_n$  появляется как следствие наличия ошибки

$\Delta a_1$ , он невелик, его максимальная величина зависит от величины  $\Delta a_1$ . При изменении  $\phi$   $V_n$  изменяется по синусоидальному закону. Третий член уравнения - напряжение Холла, обусловленное планарной составляющей вектора  $\bar{V}$ , т.е. вектором  $V_p$ .

Первый член уравнения - остаточное напряжение преобразователя.

$$2/ \Delta a_1 = 0; \Delta a_2 \neq 0$$

/см. рис. 4/

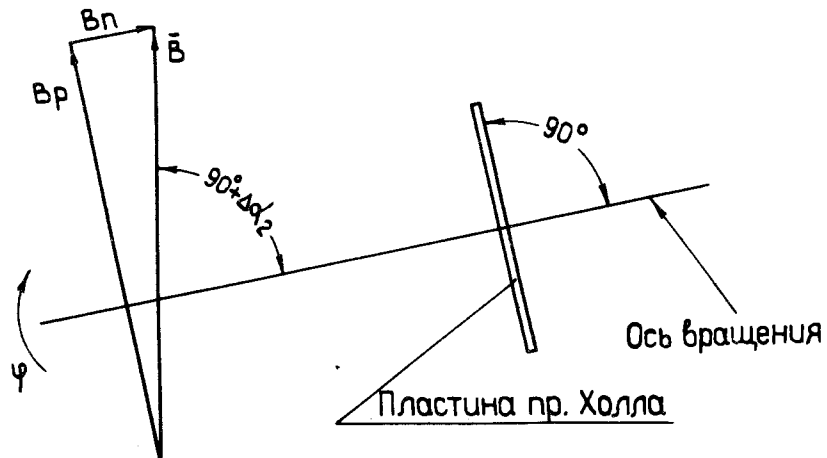


Рис.4. Разложение вектора  $\bar{V}$  на  $V_n$  и  $V_p$  производится в системе координат, связанной с преобразователем Холла /см. рис. 1/.  $\Delta a_1 = 0; \Delta a_2 \neq 0$ .

В этом случае напряжение Холла будет иметь вид:

$$U_x = U_0 + K_3 V_n + K_4 \sin 2(\phi + \phi_2), \quad /5/$$

$K_3, K_4$  - константы.

Второй член правой части уравнения /5/ есть также напряжение Холла, вызванное вектором  $V_n$ , но в отличие от первого случая здесь  $V_n$  при изменении угла  $\phi$  является константой, и поэтому напряжение Холла, им

вызванное, является постоянной величиной. Третий член уравнения /5/, так же как и в /4/, обусловлен планарной составляющей поля  $V_p$ .

Объединяя оба рассмотренных случая в один, можем записать общую зависимость для напряжения  $U_x$  при одновременном  $\Delta a_1 \neq 0$  и  $\Delta a_2 \neq 0$ :

$$U_x = U_0 + K_3 V_n + A_1 \sin(\phi + \phi_1) + A_2 \sin 2(\phi + \phi_2), \quad /6/$$

/здесь коэффициенты при первой и второй гармониках другие, т.к. амплитуды этих напряжений при одновременном  $\Delta a_1 \neq 0$  и  $\Delta a_2 \neq 0$ , естественно, иные, чем в отдельных случаях/. Обозначая  $U_0 + K_3 V_n = A_0$ , получим уравнение /3/ в виде:

$$U_x = A_0 + A_1 \sin(\phi + \phi_1) + A_2 \sin 2(\phi + \phi_2).$$

Теперь нулевой, первой и второй гармоникам принятого нами разложения напряжения Холла в синусный тригонометрический ряд можно приписать определенный физический смысл.

Подведем краткий итог. При измерении планарного эффекта, когда вектор индукции магнитного поля  $\bar{B}$  с некоторым приближением, определяемым величинами погрешностей  $\Delta a_1$  и  $\Delta a_2$ , параллелен плоскости датчика Холла, напряжение на холловских электродах датчика может быть представлено с достаточной точностью первыми членами ряда Фурье /уравнение /3//. В этом уравнении  $A_0$  есть сумма напряжений  $U_0$  и обычного напряжения Холла /постоянного при измерении  $\phi$ /, возникающего из-за неточности установки оси вращения преобразователя по углом  $90^\circ$  к вектору  $\bar{B}$ , т.е. из-за наличия ошибки  $\Delta a_2$ , приводящей к возникновению слабой, нормальной к плоскости датчика составляющей  $V_n$ , постоянной при измерении  $\phi$ .  $A_1 \sin(\phi + \phi_1)$  - это также обычное напряжение Холла, но возникающее уже по другой причине, а именно: из-за наличия ошибки  $\Delta a_1$ . Эта ошибка установки датчика Холла по отношению к оси вращения

также вызывает возникновение слабой составляющей  $V_n$ , нормальной к плоскости датчика, но эта  $V_n$  уже зависит от  $\phi$  по синусоидальному закону, и поэтому напряжение Холла от этой составляющей  $V_n$  изменяется по закону синуса.  $A_2 \sin 2(\phi + \phi_2)$  - напряжение, которое можно идентифицировать с третьим членом уравнения /2/, т.е. с напряжением планарного эффекта.

Что значит определить планарный эффект преобразователя Холла?

Это значит для нескольких значений  $\bar{B} = \text{const}$ , при условии, что  $\bar{B}$  параллелен пластине преобразователя Холла, найти значение  $A_2$  /амплитуда второй гармоники/ и для этих значений  $\bar{B}$  найти обычное напряжение Холла  $U_{xn}$ , когда  $\bar{B}$  перпендикулярен к плоскости датчика.

Отношение

$$\frac{A_2}{U_{xn}} \cdot 100\%$$

является количественным выражением планарного эффекта.

Как выделить из экспериментально снятой характеристики

$$U_x = A_0 + A_1 \sin(\phi + \phi_1) + A_2 \sin 2(\phi + \phi_2) \quad /3/$$

амплитуду второй гармоники  $A_2$ ?

Для этого поступаем так. Вначале находим величину  $A_0$ . Устанавливаем  $\phi + \phi_2 = 0$  и  $\phi + \phi_2 = 180^\circ$  /это можно сделать достаточно точно, устанавливая продольную керамику датчика на поворотном устройстве параллельно вектору  $\bar{B}$ /. Тогда

$$U_x = \frac{U_x(0^\circ) + U_x(180^\circ)}{2} = A_0,$$

т.к. вторая гармоника при этом равна нулю, а первая из-за изменения знака  $V_n$  не вносит вклада в уравнение /3/.

Теперь мы имеем график функции /см. рис. 5/, о которой известно, что она состоит из синусоид единичной и двойной частоты. Принимая начальную фазу 2-й гармоники равной нулю и зная ее нулевые точки, а также значения первой гармоники в точках, где вторая равна нулю, можем найти амплитуду и начальную фазу первой гармоники. Вычитая из экспериментальной кривой /без  $A_0$ / первую гармонику, находим вторую гармонику.

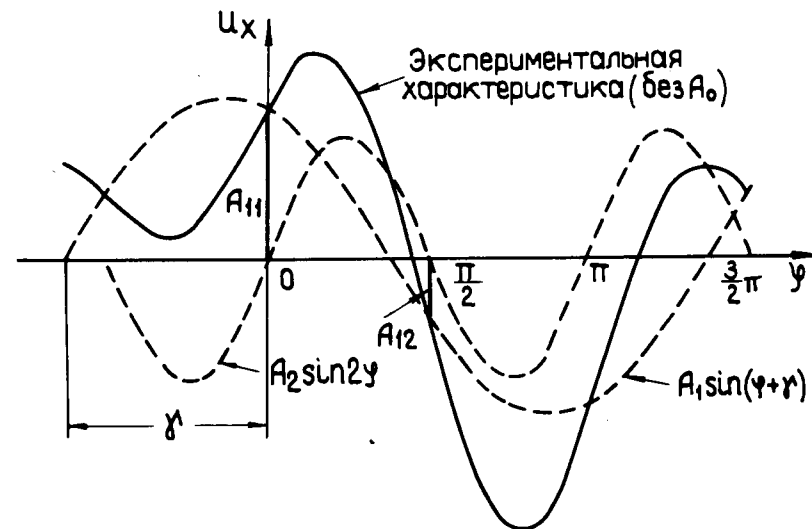


Рис.5. Выделение из экспериментальной характеристики  $U_x = f_2(\phi)$  второй гармоники.  $A_{11}, A_{12}$  - значения первой гармоники в точках  $\phi = 0, \phi = \pi/2$ .

Аналитически это выглядит так. Уравнение для первой гармоники запишем как

$$A_1 \sin(\phi + \gamma), \quad /7/$$

где  $\gamma = \phi_1 - \phi_2$ . Т.к.  $A_{11}$  и  $A_{12}$  - значения первой гармоники в точках  $\phi = 0$  и  $\phi = \pi/2$  известны, то, используя /7/, можем написать:

$$A_{11} = A_1 \sin(0 + \gamma), \quad /8/$$

$$A_{12} = A_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right). \quad /9/$$

Решая /8/ и /9/ относительно  $A_1$  и  $\gamma$ , имеем

$$A_1 = \sqrt{A_{11}^2 + A_{12}^2}, \quad /10/$$

$$\gamma = \text{Arc sin } \frac{A_{11}}{\sqrt{A_{11}^2 + A_{12}^2}}. \quad /11/$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бетко Ю. и др. ОИЯИ, Б2-13-7464, Дубна, 1973.
2. Киселев Ю.Г. и др. Препринт ИТЭФ-13, Москва, 1974.
3. Вайс Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов и их применение. "Энергия", М., 1974.
4. Polak M., Hlausnik I. *Solid State Electronics*, 1970, v.13, p.219-227.
5. Goldberg C., Davies R.E. *Phys.Rev.*, 1954, v.94, No.5.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 мая 1978 года.