

## НАБЛЮДЕНИЕ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОМПОНЕНТ ТОКА В ВИСМУТЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*И.Н.Жиляев*

При пропускании тока по образцу висмута, помещенному в продольное магнитное поле, при гелиевых температурах наблюдается циркуляционная компонента тока в поперечном сечении образца. Измерения в поперечном поле свидетельствуют о том, что эффект связан с системой магнитных доменов в поперечном сечении.

Методика приготовления образцов и способ измерения аналогичны описанным в <sup>1</sup>. При включении тока  $I$  через образец, помещенный в продольное магнитное поле  $H_{\parallel}$ , фиксировалось изменение магнитного потока  $\Delta\Phi$  через измерительную катушку, намотанную на образец в его средней части. На рис. 1 приведена геометрия эксперимента и результаты измерений эффекта на образце с  $\gamma = \rho_{293\text{K}} / \rho_{4,2\text{K}} = 900$  в зависимости от  $H_{\parallel}$  для температуры  $T = 4,2$  К и  $T = 1,3$  К при пропускании по образцу  $I = 2$  А. По оси ординат отложен удельный магнитный поток  $\Delta\phi = \Delta\Phi/Sn$  ( $S = 1,1 \times 1,1$  см<sup>2</sup> – площадь сечения образца,  $n = 1000$  – число витков в катушке  $K_1$ ), имеющий смысл среднего магнитного поля в сечении образца. Рисунок образца выполнен с сохранением пропорций. Земное магнитное поле компенсировалось с точностью 0,01 Э. С понижением температуры эффект растет. При  $T = 1,3$  К для  $I = 2$  А при малых  $H_{\parallel} \Delta\phi / H_{\parallel} \approx 0,2$ . Эффект меняет знак при изменении направления  $H_{\parallel}$  и не изменяется при изменении знака  $I$ . На рис. 2 приведены результаты измерений  $\Delta\phi(I)$  при  $T = 4,2$  К для  $H = 0,4$  Э (по осям – логарифмы соответствующих величин). Видно, что зависимость квадратична.

Поскольку измерения проводились в продольном магнитном поле, которое препятствует равномерному распределению тока по сечению образца, специальное внимание уделялось электродам, выполнявшимся из медного провода  $\varnothing$  0,5 мм. Для проверки пригодности электродов в данных измерениях использовался следующий способ. Сначала электроды монтировались из одного токоввода в образец: провода, подпаянного к середине торца образца (рис. 1, схема I, точкой обозначено место подпайки провода), и проводились измерения. Затем количество токовводов увеличивалось согласно последовательности схем I, II, III на рис. 1 с тем, чтобы увеличить их плотность на единицу площади торца и улучшить условия

равномерного распределения тока по сечению образца. Измерения показали, что при  $T = 4,2$  К величина эффекта не зависит от геометрии применявшихся электродов, при  $T = 1,3$  К при переходе от схемы I к II величина эффекта увеличивалась ( в максимуме на  $\approx 25\%$  ), при переходе от II к III практически не менялась. В связи с этим электроды, выполненные по схеме II или III считались пригодными для наших измерений при  $T = 1,3$  К.

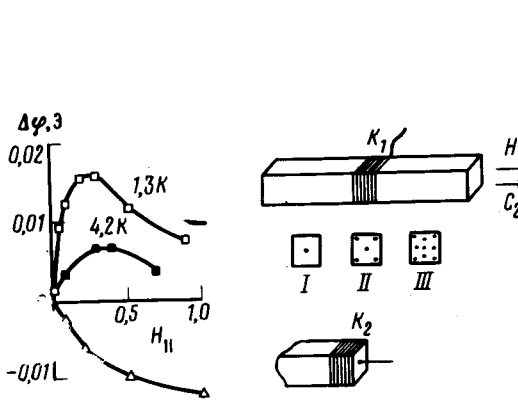


Рис. 1

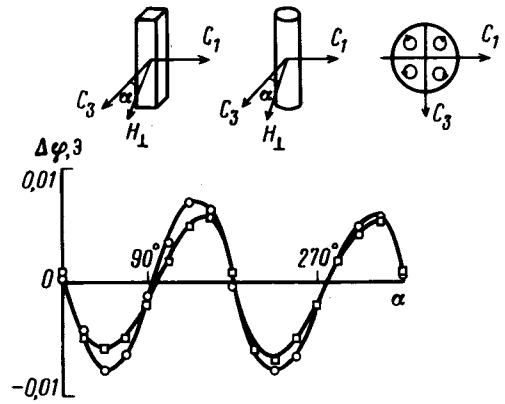


Рис. 3

Рис. 1. Зависимость удельного магнитного потока  $\Delta\phi$ , регистрируемого катушкой  $K_1$ , от продольного магнитного поля  $H_{\parallel}$ , измеренная при токе через образец  $I = 2$  А и температурах  $T = 1,3$  К и  $T = 4,2$  К. Нижняя кривая – зависимость холловской составляющей  $\Delta\phi$  от  $H_{\parallel}$ , измеренная при  $T = 4,2$  К катушкой  $K_2$  при  $I = 2$  А

Рис. 3. Угловая зависимость  $\Delta\phi$ , измеренная при  $T = 4,2$  К, в поперечном поле  $H_{\perp} = 1,2$  Э на образце с квадратным (квадратики) и круглым (кружочки) сечением; вверху справа – схематическое изображение направлений токов в доменах

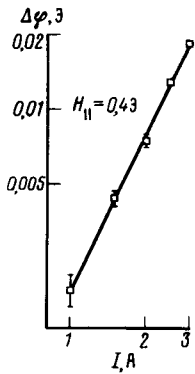


Рис. 2. Зависимость  $\Delta\phi(I)$ , измеренная катушкой  $K_1$  при  $T = 4,2$  К

Наблюдающийся эффект можно объяснить на основе работ <sup>2, 3</sup>. Как показано авторами, при пропускании тока по образцу в его поперечном сечении должна возникать компенсированная система циркуляционных токов – своеобразных магнитных доменов, магнитный поток каждого из которых пропорционален  $I^2$ . Наложение  $H_{\parallel}$  в наших экспериментах приводит, по-видимому, к раскомпенсации системы, давая наблюдаемый эффект. Механизм образования доменов, предлагаемый авторами <sup>2, 3</sup>, состоит в следующем. Проходящий по образцу ток создает азимутальное магнитное поле в образце, которое в свою очередь приводит к холловской составляющей тока в радиальном направлении. Если проводник изотропен, а его сечение некруговое, например квадрат, то радиальная холловская составляющая в направлениях, близких к углам, не будет нормальна к поверхности, что приведет к образованию восьми доменов: по два одинаковых, но имеющих противоположное направление токов, в каждом углу. В случае кругового сечения образца, но анизотропного материала,

(например, в сечении образца есть два перпендикулярных экстремальных направления, характеризующих анизотропию) должно возникнуть четыре домена, границы раздела между которыми проходят через экстремальные направления анизотропии. Величина магнитного потока доменов должна быть пропорциональна радиальной холловской составляющей, которая, в свою очередь, пропорциональна (при небольших токах) тянущему полю  $E$  и азимутальному магнитному полю (пропорциональному  $I$ ), что дает в итоге квадратичную по  $I$  зависимость магнитного потока.

С целью проверки наличия холловских токов в висмуте в наших экспериментальных условиях, а также оценки их величины на том же образце были проведены измерения магнитного потока с помощью катушки  $K_2$  (рис. 1), расположенной возле торца образца с электродом по схеме 1, когда возле торца в образце есть радиальный ток, сравнимый по величине с осевым. Кроме вышеописанного магнитного потока, не зависящего от направления  $I$  и пропорционального  $I^2$ , с помощью катушки  $K_2$  была обнаружена составляющая магнитного потока, связанная, как мы считаем, с холловскими токами: меняющая знак при изменении направления  $I$  и пропорциональная  $I$ . На рис. 1 приведена зависимость холловской составляющей от  $H_{\parallel}$ , измеренная при 4,2 К,  $I = 2$  А (нижняя кривая) для одного из направлений (от  $H_{\parallel}$  зависимость нечетная). Знак холловской составляющей соответствовал электронам. Оценка азимутального поля в образце толщиной  $\sim 1$  см при  $I = 2$  А дает  $0,5 \div 1$  Э. Из графика видно, что величина холловской составляющей магнитного потока при  $H_{\parallel} = 0,5 \div 1$  Э согласуется с максимальной величиной эффекта при  $I = 2$  А.

Наличие доменов в образце при пропускании тока можно проверить, как мы предполагаем, также следующим образом. Как уже отмечалось, оценка азимутального поля в образце при  $I = 2$  А дает  $0,5 \div 1$  Э. Если при этом наложить поперечное магнитное поле  $H_{\perp}$  величиной около 1 Э, то это должно привести к тому, что домен, образованный с помощью азимутального поля, совпадающего по направлению с  $H_{\perp}$ , будет занимать большую площадь в сечении образца, его магнитное поле вырастет, а в результате магнитный поток от него увеличится; магнитный поток от остальных доменов должен уменьшиться. Результирующий же поток во всем сечении должен быть ненулевым и иметь знак соответствующего домена. Действительно, такой поток, квадратичный по  $I$ , наблюдается. На рис. 3 приведена угловая диаграмма  $\Delta\phi$ , измеренная катушкой  $K_1$  в  $H_{\perp} = 1,2$  Э при  $T = 4,2$  К. Видно, что наблюдаемая максимальная величина магнитного потока согласуется с максимальной величиной  $\Delta\phi$  эффекта в  $H_{\parallel}$  (рис. 1). Судя по графику в образце при пропускании тока образуется четыре домена, что указывает на то, что эффект связан не с формой образца (четыре угла должны были бы дать восемь доменов). По-видимому, эффект связан с наличием двух экстремальных направлений анизотропии: вдоль  $C_3$  и перпендикулярно  $C_3$ . На том же рисунке приведена угловая диаграмма, снятая в тех же условиях на образце круглого сечения диаметром 0,9 см, имеющем  $\gamma \approx 800$  и ту же ориентацию продольной оси. Видно, что результаты измерений практически те же, что на образце с квадратным сечением. Это также свидетельствует о том, что эффект связан с анизотропией. На рис. 3 приведено схематическое изображение полученных из эксперимента направлений токов в доменах относительно кристаллографических осей. Знаки направлений, по-видимому, связаны с тем, что электронная холловская составляющая вдоль  $C_3$  больше, чем вдоль  $C_1$ .

#### Литература

1. Жилев И.Н. Письма в ЖЭТФ, 1984, 40, 104.
2. Pipkin A.C., Rivlin R.S. J. Math. Phys., 1961, 2, 865.
3. Pipkin A.C., Rivlin R.S. J. Math. Phys., 1963, 3, 369.