

ФИЗИКА

Б. И. ВЕРКИН, Б. Г. ЛАЗАРЕВ и Н. С. РУДЕНКО

**КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ЭФФЕКТА  
ДЕ-ГААЗА — ВАН-АЛЬФЕНА**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 3 V 1950)

В предыдущих сообщениях <sup>(1)</sup> были приведены результаты исследования магнитных свойств монокристаллов кадмия, бериллия, магния, олова, индия и висмута. Было показано, что в том случае, когда кристаллографическая ось симметрии наивысшего порядка ориентирована перпендикулярно оси подвеса кристалла и когда вектор поля, также перпендикулярный оси подвеса, образует различные углы с этой кристаллографической осью, разность главных восприимчивостей ( $\chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$ ) монокристаллов кадмия, бериллия, магния, олова и индия периодически изменяется при изменении напряженности магнитного поля при низких температурах.

Измерения с монокристаллами висмута были проведены и в других условиях, а именно, когда его тригональная ось была перпендикулярна вектору поля (т. е. параллельна оси подвеса) и последний мог быть различным образом ориентирован по отношению к бинарной оси в базисной плоскости кристалла. Было показано, что угловая зависимость разности восприимчивостей в базисной плоскости монокристалла висмута характеризуется периодом в  $60^{\circ}$ ; кроме того, было показано, что и при таком расположении кристалла в поле проявляется эффект де-Гааза — ван-Альфена.

Магнитные свойства электронного газа в металлах при низких температурах неоднократно являлись объектом теоретических исследований <sup>(2,3)</sup>.

Л. Д. Ландау <sup>(2)</sup> показал, что при низких температурах

$$\frac{I}{H} = - \left[ \frac{\sqrt{2} m^{3/2} \beta^2 E_0^{1/2}}{12 \pi^2 \hbar^3} + \frac{m^{3/2} k T E_0 (\beta H)^{1/2}}{\pi \hbar^3 H^2} \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p \frac{\sin \left( \frac{2\pi p E_0}{\beta H} - \frac{\pi}{4} \right)}{V p \operatorname{sh} \left( \frac{2\pi^2 p k T}{\beta H} \right)} \right],$$

где  $\beta = e\hbar/mc$ , т. е., рассматривая магнитные свойства электронного газа, он получил результат, качественно объясняющий эффект де-Гааза — ван-Альфена.

Применение его теории к кристаллам сводится к введению, по крайней мере, четырех параметров  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  и  $E_0$ , где первые три — компоненты тензора эффективных электронных масс по трем взаимно перпендикулярным направлениям в кристалле, а  $E_0$  представляет собой максимально возможную энергию электронов, обусловливающих в металле эффект де-Гааза — ван-Альфена <sup>(4,5)</sup>.

Таким образом, сравнение теории с экспериментом возможно только в том случае, если имеются опытные данные, позволяющие правильно и однозначно ответить на вопрос о том, сколько компонент  $m_{ik}$  необходимо оставить в каждом частном случае.

Ясно, что для получения таких экспериментальных данных необходимо прежде всего исследование при низких температурах анизотропии магнитных свойств в базисной плоскости металлических монокристаллов.

Сидоряк и Робинсон<sup>(6)</sup>, изучавшие эффект де-Гааза — ван-Альфена у цинка, исследовали вопрос о магнитной анизотропии в базисной плоскости цинкового монокристалла. Измерив при  $T = 4,2^\circ\text{K}$  и  $H = 5500$  эрст. диаграмму вращения (т. е. угловую зависимость ( $\chi_2 - \chi_1$ ), где  $\chi_2$  — восприимчивость в направлении бинарной оси кристалла, а  $\chi_1$  — восприимчивость в перпендикулярном направлении), они пока-

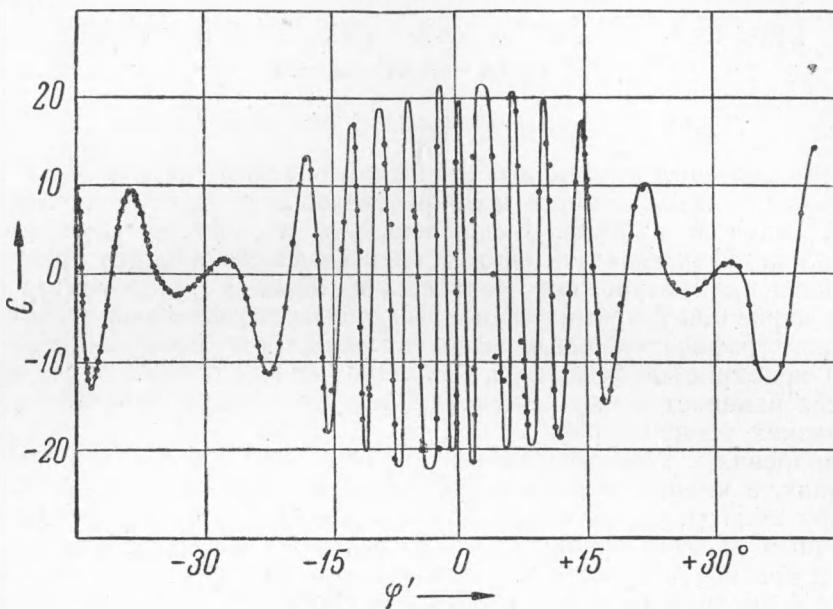


Рис. 1. Диаграмма вращения, т. е. зависимость пары сил, действующей на монокристалл цинка, подвешенный в однородном магнитном поле на тонкой упругой нити, от угла между вектором поля и бинарной осью кристалла. Кристаллографическая ось 6-го порядка перпендикулярна  $\mathbf{H}$ .  $T = 4,2^\circ\text{K}$ ,  $H = 14\,230$  эрст.

зали, что в таких условиях  $\chi_2 = \chi_1$ , и это дало им основание для выбора только трех параметров:  $m_1 = m_2$ ,  $m_3$ ,  $E_0$  и для сравнения своих экспериментальных данных с теорией.

Предпринятое нами исследование анизотропии магнитных свойств в базисной плоскости монокристалла цинка позволило установить новые особенности эффекта де-Гааза — ван-Альфена у этого металла.

Разность восприимчностей, как и во всех предыдущих случаях, измерялась по величине пары сил, действующей на кристалл, подвешенный на тонкой упругой нити в однородном магнитном поле. Взаимное расположение оси подвеса, вектора  $\mathbf{H}$  и кристаллографических осей было таким, что ось симметрии наивысшего порядка была перпендикулярна  $\mathbf{H}$  и параллельна оси подвеса, а вектор поля, располагаясь в базисной плоскости, мог образовывать различные углы с бинарными осями.

Исследования были выполнены с монокристаллами цинка и бериллия при водородных и гелиевых температурах в полях от 3000 до 14 500 эрст. При  $20,4^\circ\text{K}$  существует полная изотропия магнитных свойств в базисной плоскости цинкового монокристалла; вплоть до  $H = 14\,500$  эрст. пара сил равнялась нулю при любой ориентации вектора поля относительно бинарных осей.

Однако исследования при гелиевых температурах привели к новому результату. На рис. 1 изображена диаграмма вращения монокристалла цинка, измеренная при  $4,2^{\circ}\text{K}$  в поле  $H = 14\,230$  эрст. Из рисунка видно, что при гелиевых температурах пара сил, действующая на кристалл, сложнейшим образом зависит от угла  $\varphi'$  между вектором поля и одной из бинарных осей, причем, так же как и в случае исследований с висмутом, угловая зависимость пары сил характеризуется периодом в  $60^{\circ}$ .

Кроме диаграммы вращения, была исследована и зависимость  $\chi_2 - \chi_1$  от напряженности магнитного поля при таком расположении цинкового монокристалла. Разность восприимчивостей периодически изменяется

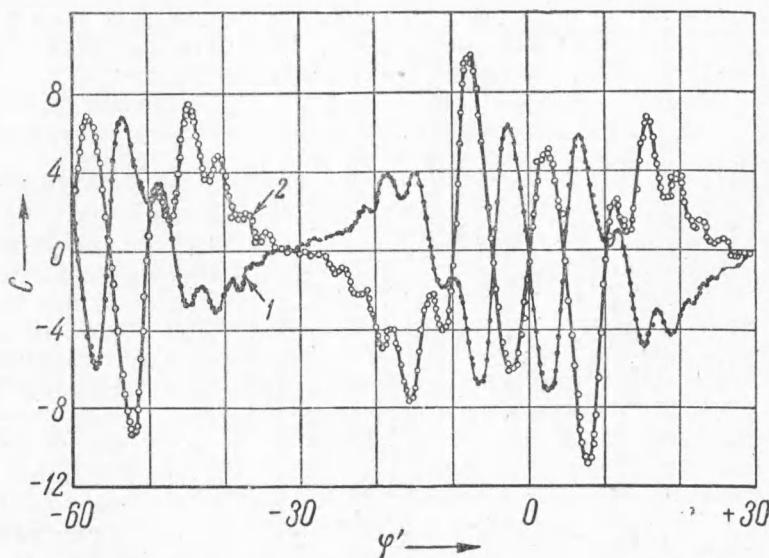


Рис. 2. Диаграмма вращения в базисной плоскости монокристалла берилля.  $T=20,4^{\circ}\text{K}$ . 1 —  $H = 13\,720$  эрст., 2 —  $H = 14\,510$  эрст.

с изменением напряженности магнитного поля, причем как анизотропия магнитных свойств, так и эффект де-Гааза — ван-Альфена проявляются в базисной плоскости при  $4,2^{\circ}\text{K}$ , начиная с  $H = 9500$  эрст. Период осцилляций  $\Delta\chi$  весьма мал: в поле 10500 эрст. он равен 180 эрст., а в поле 14200 эрст. он достигает всего 400 эрст. Напомним, что в том случае, когда главная кристаллографическая ось цинка перпендикулярна оси подвеса, период осцилляций в поле 10000 эрст. составляет более чем 2000 эрст.

Полученный в данной работе результат измерений с цинком свидетельствует о неполноте теоретической обработки опытных данных, предпринятой Сидоряком и Робинзоном.

Период осцилляций разности восприимчивостей при любой ориентации кристалла в поле характеризуется величиной  $2\pi E_0/\beta H$ , где  $\beta$  представляет собой функцию параметров  $m_{ik}$  и углов между вектором поля и кристаллографическими осями. В случае цинка необходимо, пользуясь не тремя, а, по крайней мере, четырьмя параметрами  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  и  $E_0$ , в наиболее общем случае провести сравнение с теорией, учитывая, что явление имеет в базисной плоскости периодичность  $60^{\circ}$ .

Следующим объектом исследования явился бериллий. При  $78^{\circ}\text{K}$  существует полная изотропия магнитных свойств в базисной плоскости бериллиевого монокристалла. Однако уже при  $20,4^{\circ}\text{K}$  картина существенно усложняется. На рис. 2 изображена диаграмма вращения монокристалла берилля. Видно, что понижение температуры до  $20,4^{\circ}\text{K}$  проявляет резкую анизотропию магнитных свойств в базисной плоскости

и у этого металла. Пара сил  $C$  весьма сложным образом зависит от угла, причем совершенно подобно тому, что имело место у  $\text{Bi}$  и  $\text{Zn}$ , и у берилля угловая зависимость пары сил в базисной плоскости характеризуется периодом в  $60^\circ$ .  $\phi' = 0^\circ$  соответствует на обоих рисунках тому случаю, когда вектор поля параллелен какой-либо из бинарных осей кристалла. Заметим, что пара сил обращается вновь в нуль не только через  $\pm 60^\circ$ , но и на половине периода, т. е. через  $\pm 30^\circ$ .

Дальнейшее понижение температуры еще более усложняет угловую зависимость пары сил. На рис. 3 изображена часть диаграммы вращения, измеренной при  $T = 4,2^\circ\text{K}$  и  $H = 9500$  эрст.

Уже из рассмотрения диаграмм вращения, изображенных на рис. 2, видно, что в базисной плоскости бериллиевого монокристалла разность восприимчивостей  $\Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$  периодически изменяется в зависимости от напряженности магнитного поля. Действительно, кривая 1 измерена при  $H = 13720$  эрст., а кривая 2 при  $H = 14510$  эрст., и в

Рис. 3. Диаграмма вращения в базисной плоскости монокристалла берилля.  $T = 4,2^\circ\text{K}$ .  $H = 9500$  эрст.

этих двух случаях пара сил (значит, и  $\Delta\chi$ ) для одних и тех же значений угла  $\phi'$  меняет свой знак.

В базисной плоскости монокристалла берилля угловая зависимость пары сил и периодический характер изменения  $\Delta\chi$  с изменением  $H$  вполне отчетливо проявляются уже при  $20,4^\circ\text{K}$  в поле около 10 000 эрст. Период осцилляций велик: в поле 12 000 эрст. он составляет 900 эрст.

Измерения с монокристаллами берилля и цинка были выполнены на нескольких образцах, и во всех случаях результаты были вполне идентичны.

Физико-технический институт  
Академии наук УССР  
Харьков

Поступило  
30 III 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Б. И. Веркин, Б. Г. Лазарев и Н. С. Руденко, ДАН, **69**, 773 (1949); ЖЭТФ, **20**, 93 (1950). <sup>2</sup> D. Shoenberg, Proc. Roy. Soc., **170**, 341 (1939) (теоретич. часть работы Д. Шенберга). <sup>3</sup> А. И. Ахиезер, ДАН, **23**, 872 (1939); Ю. Б. Румер, ЖЭТФ, **18**, 1081 (1948). <sup>4</sup> M. Blackman, Proc. Roy. Soc., **166**, 1 (1938). <sup>5</sup> Д. Шенберг, ЖЭТФ, **8**, 1178 (1938). <sup>6</sup> S. G. Sydoriak and J. E. Robinson, Phys. Rev., **75**, 118 (1949).