

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 ⁽¹⁾ 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 (χ_{\parallel} — χ_{\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°; 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 ^(2, 3).

Л. Д. Ландау ⁽²⁾ показал, что при низких температурах

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

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, обуславливающих в металле эффект де-Гааза — ван-Альфена ^(4, 5).

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 Робинзон⁽⁶⁾, 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 χ_2 — восприимчивость в направлении бинарной оси кристалла, а χ_1 — восприимчивость в перпендикулярном направлении), они пока-

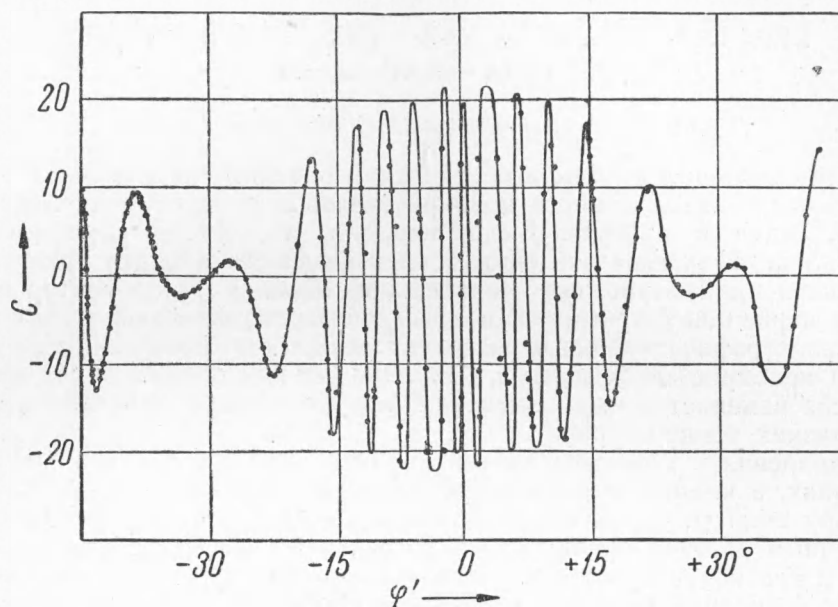


Рис. 1. Диаграмма вращения, т. е. зависимость пары сил, действующей на монокристалл цинка, подвешенный в однородном магнитном поле на тонкой упругой нити, от угла между вектором поля и бинарной осью кристалла. Кристаллографическая ось 6-го порядка перпендикулярна \mathbf{H} . $T = 4,2^\circ \text{K}$, $H = 14\,230$ 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 восприимчивостей, 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 φ' 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° .

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

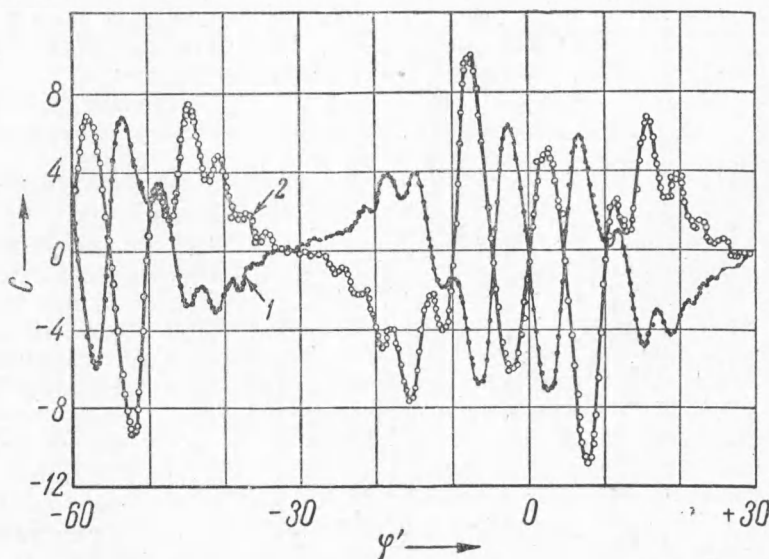


Рис. 2. Диаграмма вращения в базисной плоскости монокристалла берилля. $T=20,4^\circ\text{K}$. 1 — $H = 13\,720$ эрст., 2 — $H = 14\,510$ эрст.

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 $10\,500$ эрст. он равен 180 эрст., а в поле $14\,200$ эрст. он достигает всего 400 эрст. Напомним, что в том случае, когда главная кристаллографическая ось цинка перпендикулярна оси подвеса, период осцилляций в поле $10\,000$ 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 β 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° .

Следующим объектом исследования явился бериллий. При 78°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 бериллия. 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 Bi и Zn , и у бериллия угловая зависимость пары сил в базисной плоскости характеризуется периодом в 60° . $\varphi' = 0^\circ$ соответствует на обоих рисунках тому случаю,

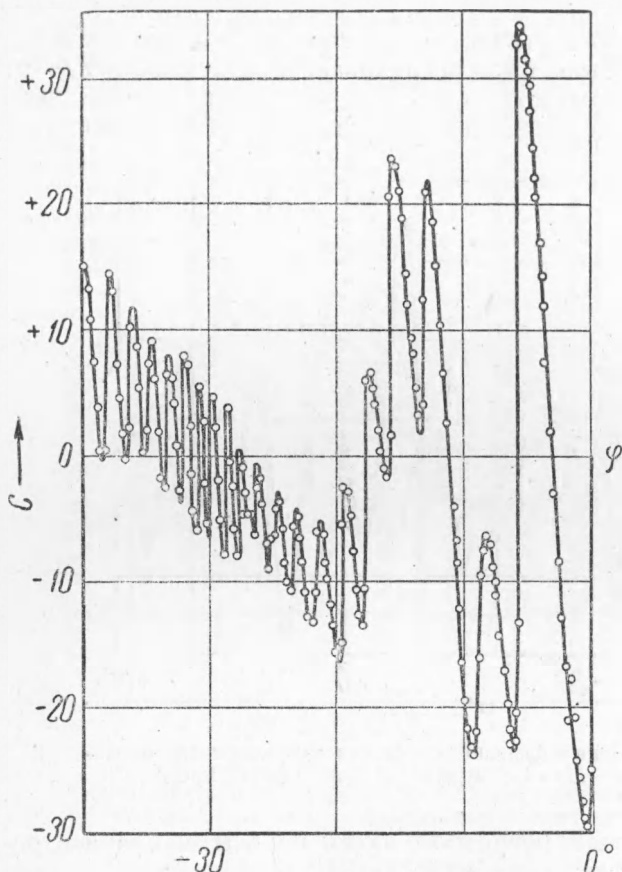


Рис. 3. Диаграмма вращения в базисной плоскости монокристалла бериллия. $T = 4,2^\circ K$. $H = 9500$ эрст.

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 $T = 4,2^\circ K$ 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

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

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

Измерения с монокристаллами бериллия 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

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