

## МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ПОЛУМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ $\text{Bi} - \text{Sb}$ В УЛЬТРАКВАНТОВОМ ПРЕДЕЛЕ

*Н. Б. Брандт, Е. А. Свистова, Н. В. Семенов*

Обнаружено резкое возрастание постоянной части поперечной ( $H \perp C_3$ ) дифференциальной магнитной восприимчивости у висмута и полуметаллических сплавов висмут - сурьма при переходе в ультраквантовую область магнитных полей.

Аномально большая величина диамагнетизма у сплавов  $\text{Bi} - \text{Sb}$  и ее значительное увеличение [1, 2] в области концентраций  $\text{Sb}$  от 7 до 21 ат.%, в которой сплавы являются полупроводниками, получили недавно количественное объяснение [3] на основе учета межзонных вкладов, роль которых возрастает при переходе сплавов в полупроводниковое состояние. Менее ясным остается вопрос о поведении магнитной восприимчивости у этих сплавов в ультраквантовой области магнитных полей. Несмотря на то, что отдельные аспекты этого вопроса рассматриваются в теоретических работах [4, 5], в настоящее время, насколько нам известно, нет специальных экспериментальных исследований в этой области.

В настоящей работе исследована магнитная восприимчивость у  $\text{Bi}$  и сплавов  $\text{Bi} - \text{Sb}$  в ультраквантовом пределе магнитных полей при гелиевых температурах. Измерения проводились на индукционном магнитометре, аналогичном описанному в [6]. Магнитное поле до 50 кэ создавалось сверхпроводящим соленоидом. Модулирующее магнитное поле частоты 20 - 30 кГц с амплитудой до 100 э создавалось сверхпроводящей модуляционной катушкой, питаемой от генератора ГЗ-33 через усилитель мощности УМ-50. При таких частотах вклад скин-эффекта у  $\text{Bi}$  и сплавов  $\text{Bi} - \text{Sb}$  проявляется лишь в самых слабых полях (до 300 + 400 э). Сигнал снимается с пары измерительных катушек, намотанных навстречу друг другу и содержащих по несколько тысяч витков провода ПЭВ-0,02. После компенсации оставшейся наводки от модулирующего поля сигнал усиливается на узкополосном усилителе У2-6, синхронно детектируется и подается на двухкоординатный самописец для записи кривых  $\chi(H)$ . При работе с достаточно длинными образцами метод измерения является абсолютным [7]: при введении образца в одну из скомпенсированных измерительных катушек на выходе системы возникает отклонение, пропорциональное дифференциальной магнитной восприимчивости образца  $\chi = dM/dH$ . Так как при увеличении магнитного поля компенсация катушек нарушается, полезный сигнал отсчитывается от смещенного "нуля", соответствующего записи сигнала с измерительных катушек без образца. При соответствующей калибровке системы полученные значения  $\chi$  в слабых полях хорошо совпадают с литературными данными по восприимчивости сплавов  $\text{Bi} - \text{Sb}$  [1, 2].

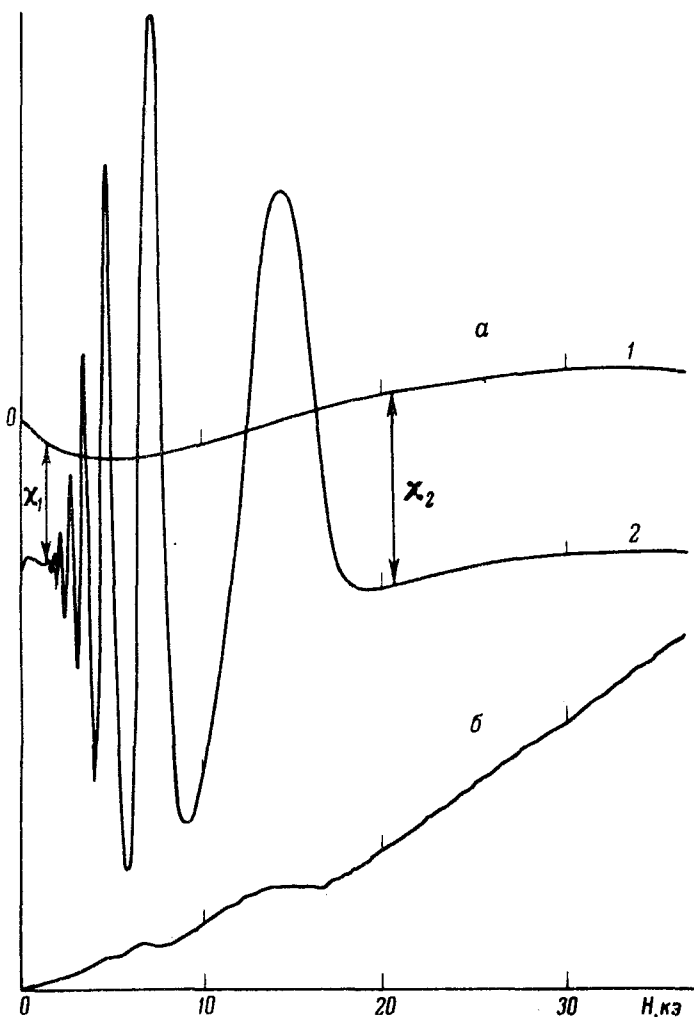


Рис. 1. *a* – Дифференциальная восприимчивость (разность между кривыми 1 и 2) у  $Vi$  от магнитного поля  $H \parallel C_2$ , *б* – зависимость модуля магнитного момента у  $Vi$  от поля  $H \parallel C_2$

На рис. 1, *a* и 2, *a*, *б* приведены результаты измерения при  $T = 4,2^\circ K$  дифференциальной магнитной восприимчивости у  $Vi$  при ориентациях магнитного поля вдоль бинарной ( $C_2$ ) и биссекторной ( $C_1$ ) осей кристалла (кривые получены усреднением нескольких повторных записей на самописце). Резкое изменение сигнала в слабых полях связано с увеличением глубины скин-слоя в магнитном поле. В больших полях величина сигнала характеризует начальную восприимчивость  $\chi_1$ , на которую затем накладываются осцилляции де Гааза – ван Альфена. После выхода последнего уровня Ландау для двух (при  $H \parallel C_2$ ) или всех трех (при  $H \parallel C_1$ ) электронных эллипсоидов достигается ультраквантовая область магнитных полей. Новым и весьма неожиданным явился тот факт, что в этой области дифференциальная восприимчивость  $\chi_2$  заметно больше, чем в слабых полях. Величина  $\chi_2$  не зависит от

ориентации магнитного поля (при  $H \parallel C_2 \cdot C_1$ ) и температуры (в интервале  $2,1 \pm 4,2^\circ \text{K}$ ), и слабо уменьшается с ростом магнитного поля. Максимальное отношение  $\chi_2/\chi_1$  у  $\text{Bi}$  составляет в среднем  $1,66 \pm 0,05$ . Значение восприимчивости  $\chi_2 \approx -3,0 \cdot 10^{-6}$  CGS/г близко к значениям  $\chi_1$  у полупроводниковых сплавов  $\text{Bi-Sb}$  (максимум  $\chi_1 = -3,5 \cdot 10^{-6}$  CGS/г при концентрации  $\text{Sb}$  7–8 ат. %).

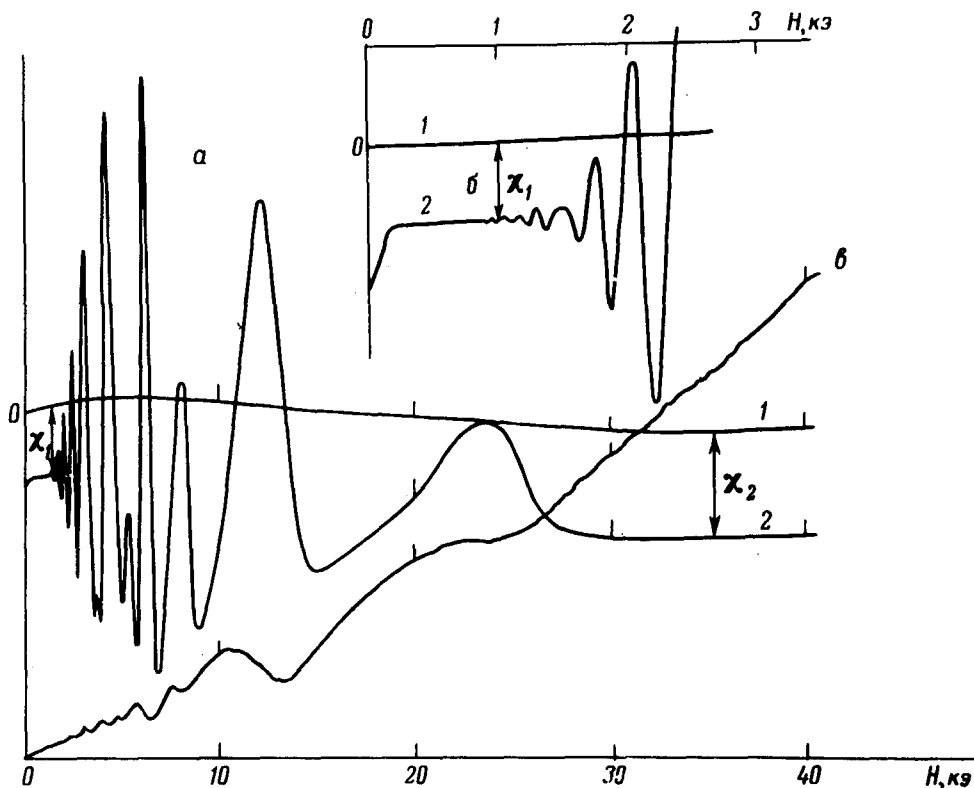


Рис. 2. *a* – Дифференциальная восприимчивость (разность между кривыми 1 и 2) у  $\text{Bi}$  от магнитного поля  $H \parallel C_1$ , *б* – то же – в увеличенном масштабе дан начальный участок кривой, *в* – зависимость модуля магнитного момента у  $\text{Bi}$  от поля  $H \parallel C_1$

Для независимой проверки обнаруженного явления были проведены измерения зависимости магнитного момента  $M$  у  $\text{Bi}$  от поля. В центре соленоида создавался переменный градиент поля до  $4 \cdot 10^2$  э/см. Переменная сила, действующая на образец, передавалась на пьезодатчик, соединенный с образцом тонкой кварцевой трубкой. Сигнал с пьезодатчика через катодный повторитель подавался на регистрирующую систему, описанную выше. Результаты этих измерений представлены на рис. 1, *б* и 2, *в*. Хорошо заметно увеличение угла наклона кривой  $M(H)$  после выхода последней осцилляции при обеих ориентациях поля. Тангенс угла наклона кривой (т. е.  $\chi$ ) возрастает примерно в 1,7 раза, что хорошо согласуется с данными по восприимчивости.

На рис. 3 представлены результаты измерения максимальных значений  $\chi_2/\chi_1$  при  $H \parallel C_2$  для полуметаллических сплавов  $\text{Bi-Sb}$ . Видно, что отношение  $\chi_2/\chi_1$  падает с ростом концентрации сурьмы. Уменьше-

ние  $\chi_2 / \chi_1$  происходит главным образом за счет роста восприимчивости  $\chi_1$ , в то время как абсолютное значение  $\chi_2$  остается для всех исследованных концентраций Sb того же порядка, что и у Bi :  $-(2,9 \div 3,1) \cdot 10^{-6}$  CGS/g. Возможными причинами увеличения диамагнетизма у Bi и сплавов Bi - Sb в ультраквантовой области, по-видимому, могут быть насыщение парамагнитного момента у электронов проводимости, расположенных на нулевом уровне Ландау, или же возрастание диамагнитного межзонного вклада в результате изменения характера плотности состояний в зоне проводимости в ультраквантовой области. Следует также отметить, что большая величина  $\chi_2$ , близкая к  $\chi_1$ , у полупроводниковых сплавов Bi - Sb, может сильно затруднить наблюдение аномалий магнитных характеристик вещества [ 4 ] при электронных переходах в сильных магнитных полях [ 8 ].

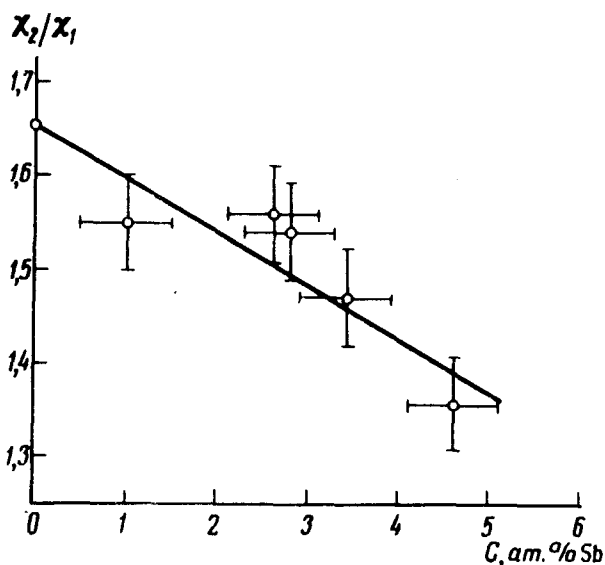


Рис. 3. Зависимость отношения восприимчивости  $\chi_2$  в ультраквантовом пределе и восприимчивости  $\chi_1$  в слабом поле от концентрации Sb в сплавах Bi - Sb

Пользуемся случаем выразить нашу признательность сотрудникам Института металлургии им. Байкова В.С.Земскову, В.В.Рождественской и А.Д.Белой за любезное предоставление образцов, Г.Н.Ронами — за проведение их анализа на установке "Сатеса", а также А.С.Боровику-Романову — за полезное обсуждение результатов работы.

Московский  
государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
10 декабря 1973 г.

#### Литература

- [ 1 ] Б.И.Веркин, Л.Б.Кузьмичева, И.В.Свечкарев. Письма в ЖЭТФ, 6, 757, 1967.  
 [ 2 ] L.Wehrli. Phys. Kondens. Mater., 8, 87, 1968.  
 [ 3 ] F.A.Vuot. J. Phys. Chem. Sol., Suppl., 32, 99, 1971.  
 [ 4 ] М.Я.Азбель, С.Я.Рахманов. ФТТ, 10, 1650, 1968.

- [5] A.Isihara, J.T.Tsai. Phys. Kondens. Mater., 15, 214, 1972.
- [6] A.Goldstain. S.J.Williamson, S.Foner. Rev. Sci. Instr., 36, 1356, 1965.
- [7] Л.Пал. Вестник Моск. Ун-та, сер. физ., №12, 49, 1955.
- [8] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова. УФН, 101, 249, 1970.
-