

ОБРАЗОВАНИЕ ФАЗЫ ЭКСИТОННОГО ДИЭЛЕКТРИКА  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ ПЕРЕХОДЕ МЕТАЛЛ – ПОЛУПРОВОДНИК  
• Н.Б.Брандт, С.М.Чудинов

1. При исследовании переходов из металлического в полупроводниковое состояние под действием давления у сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x < 0,065$ ) в магнитном поле обнаружено возникновение фазы экситонного диэлектрика (ЭД), предсказанной Фентоном [1] в 1968 году на основании работы Лфета, Кейса и Адамса [2]. Насколько нам известно, стационарно существующая фаза ЭД до сих пор никем не наблюдалась.

Измерения проводились при гидростатическом давлении  $p$  до 20 кбар, в магнитных полях  $H$  до 65 кэ при температурах  $1,9 + 4,2^\circ\text{K}$ .

2. Как известно, образование экситонов Мотта [3] при переходах из металлического в полупроводниковое состояние может происходить только при температурах, меньших энергии связи экситона  $E_B$ , при условии  $\sigma_B^* < r_D$ , где  $\sigma_B^*$  – эффективный боровский радиус экситона, а  $r_D$  – радиус дебаевского экранирования [4 – 6]. При отсутствии магнитного поля это неравенство для сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  выполняется при концентрациях носителей тока, меньших  $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Поскольку образцов такой чистоты в настоящее время не существует, переход из металлического в полупроводниковое состояние (также, как и обратный переход) при  $H = 0$  [7] ярко выражены переходами 2,5 рода И.М.Лицшица.

В магнитном поле, как было показано в работах [1, 8], в результате уменьшения  $\sigma_B^*$  и увеличения  $E_B$ , а также в результате одномеризации электронного газа, становится возможным образование фазы ЭД при концентрации носителей тока  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , соответствующей чистоте реально существующих образцов сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ . Образование этой фазы характеризуется возникновением растущей в магнитном поле энергетической щели  $\Delta$ , величина которой определяется энергией связи экситонов.

Поскольку магнитное поле смещает границы зон, то для надежной регистрации возникновения фазы ЭД была выбрана такая ориентация  $H$ , при которой щель  $G$  в полупроводниковом состоянии уменьшается в поле (в металлическом состоянии соответственно растет перекрытие –  $G$ ).

3. Измерения проводились на образцах сплавов  $\text{Bi}_{0,9725}\text{Sb}_{0,0275}$  и  $\text{Bi}_{0,954}\text{Sb}_{0,046}$  с концентрацией примесей донорного типа  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  соответственно. Концентрация примесей и их тип определялись путем измерения компонент гальваномагнитного тензора в слабых полях в области перехода под давлением в полупроводниковое состояние. Приведенные ниже экспериментальные результаты относятся к сплаву  $\text{Bi}_{0,954}\text{Sb}_{0,046}$  более высокой чистоты, в котором эффекты, связанные с возникновением фазы ЭД в полях  $H \leq 65$  кэ выражены более отчетливо.

На рис. 1 приведены зависимости от температуры электропроводности  $\sigma_{11}(T)/\sigma_{11}(4,2^\circ\text{K})$ , измеренной в поле, параллельном току вдоль бинарной оси кристалла, при четырех значениях  $p$  вблизи точки перехода из металлического в полупроводниковое состояние и при различных значениях  $H$  от 2,5 до 65 кэ (при  $H = 0$  переход в полупроводниковое состояние в этом сплаве происходит при  $p_c \approx 12$  кбар).

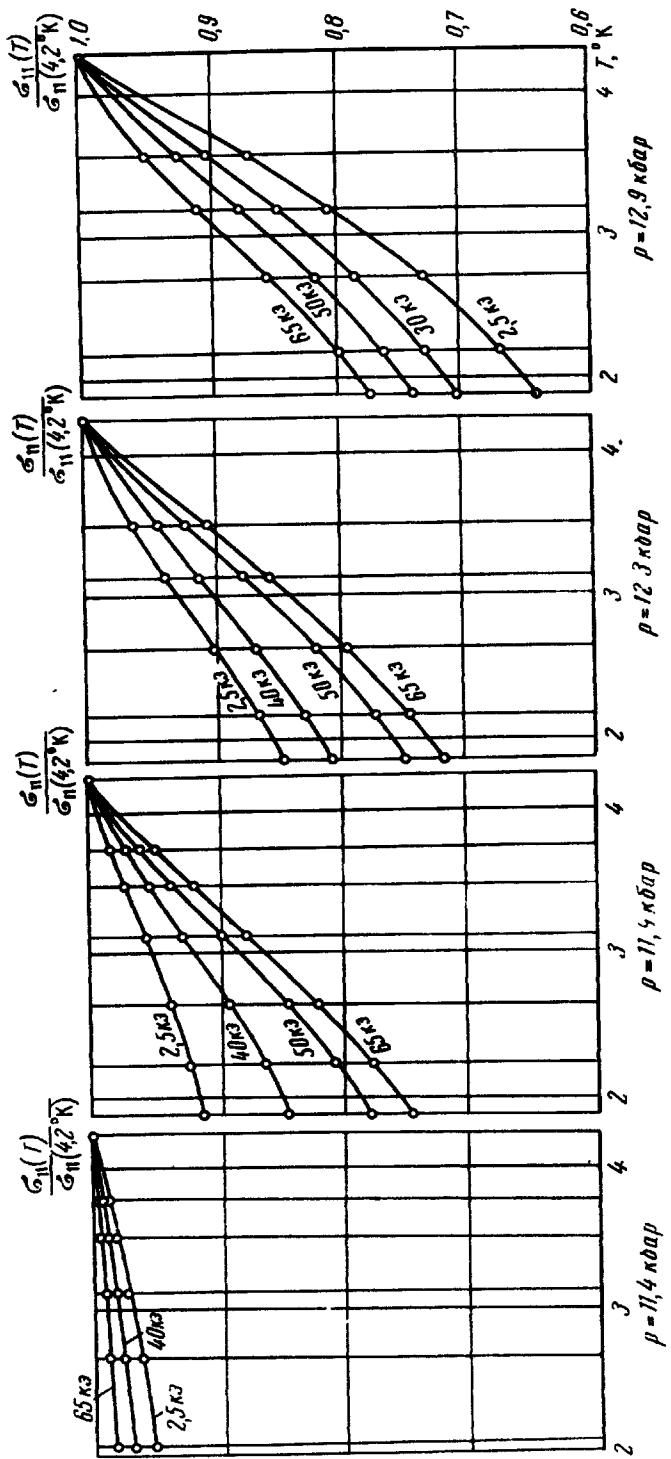


Рис. 1. Зависимость от температуры  $T$  электропроводности  $\sigma_{11}(T)/\sigma_{11}(4,2^{\circ}\text{K})$  в магнитном поле, параллельном току вдоль бинарной оси, при четырех значениях давления вблизи точки перехода в полупроводниковое состояние  $P_k \approx 12 \text{ кбар}$  ( $H = 0$ ) для сплава  $\text{R}_{10.954} \text{Sb}_{0.046}$

Издано, что характер температурной зависимости электропроводности качественно меняется в узкой области давления вблизи  $p_K = 12$  кбар, в которой величина перекрытия —  $G$  (при  $p < p_K$ ) и шели  $C$  (при  $p > p_K$ ) при  $H = 0$  не превышают  $\sim 5$  и  $\sim 10^6$  кэ соответственно; если вне этой области электропроводность увеличивается в магнитном поле при фиксированных температурах, то внутри ее она меняется противоположным образом. Увеличение электропроводности у сплава в металлическом состоянии при  $p \leq 11,4$  кбар, а также в полупроводниковом состоянии при  $p \geq 12,9$  кбар связано с увеличением перекрытия —  $G$  в первом случае и уменьшением шели  $C$  во втором. Рассчитанное из зависимостей  $\ln[\sigma_{11}(T) - \sigma_{11}(0^\circ\text{K})]$  от  $1/T$  при  $p \geq 12,9$  кбар в магнитных полях от 2,5 до 65 кэ значение  $\partial G / \partial H = -0,05$  град / кэ хорошо согласуется со значением  $\partial G / \partial H = -0,06$  град/кэ, полученным на основании данных работ [9, 10].

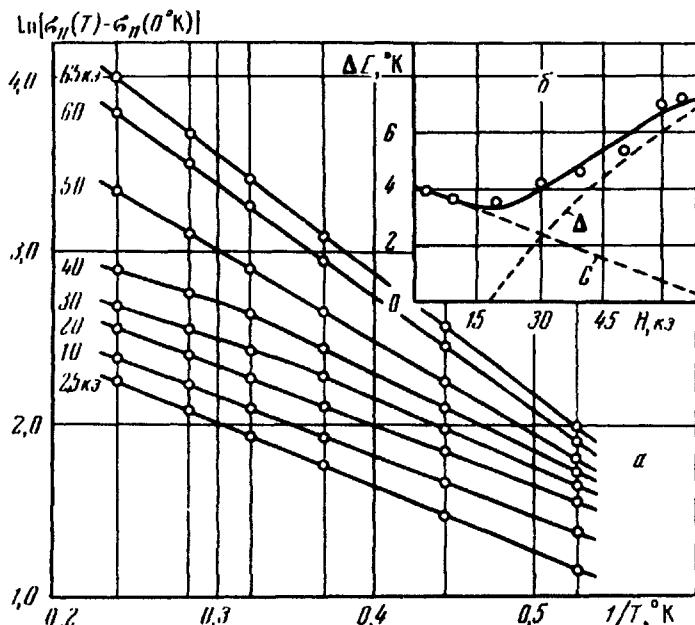


Рис.2. а – зависимости  $\ln[\sigma_{11}(T) - \sigma_{11}(0^\circ\text{K})]$  от  $1/T$  для сплава  $\text{Bi}_{0,954}\text{Sb}_{0,046}$  под давлением  $p = 12,3$  кбар при различных значениях магнитного поля  $H$ , параллельного току вдоль бинарной оси кристалла; свивг кривых по оси ординат произведен; б – зависимость измеренной энергетической шели  $\Delta E$  для сплава  $\text{Bi}_{0,954}\text{Sb}_{0,046}$  от магнитного поля  $H$ , параллельного току вдоль бинарной оси, при  $p = 12,3$  кбар и  $T = 1,9^\circ\text{K}$ . Пунктиром показаны зависимости  $C$  от  $H$  и предполагаемый вид зависимости  $\Delta$  от  $H$

Уменьшение электропроводности в магнитном поле при фиксированной температуре в области давлений  $11,4$  кбар  $< p < 12,9$  кбар свидетельствует о возникновении в энергетическом спектре шели, возрастающей в магнитном поле.

Зависимость  $\ln[\sigma_{11}(T) - \sigma_{11}(0^\circ\text{K})]$  от  $1/T$  при давлении  $p = 12,3$  кбар, приведенная на рис. 2, а, иллюстрирует характер изменения исходной шели  $G$  в полупроводниковом состоянии с ростом  $H$  и появление в магнитном поле шели

**Δ фазы ЭД.** Анализ приведенной зависимости  $\ln[\sigma_{11}(T) - \sigma_{11}(0^\circ\text{K})]$  от  $1/T$  показывает, что измеряемая энергетическая щель  $\Delta E$  вначале слабо уменьшается в поле, а затем возрастает (рис. 2, б). На рис. 2, б пунктиром нанесены функция  $G(H)$  и предполагаемый вид зависимости  $\Delta(H)$ . "Изломы" на кривых  $\ln[\sigma_{11}(T) - \sigma_{11}(0^\circ\text{K})]$  при  $H = 30 \text{ кэ}$  и  $H = 40 \text{ кэ}$  связаны, по-видимому с тем, что при соответствующих им температурах  $\sim 2,7^\circ\text{K}$  и  $\sim 3,2^\circ\text{K}$ <sup>1)</sup> фаза ЭД разрушается и возникает полупроводниковое состояние со значением щели

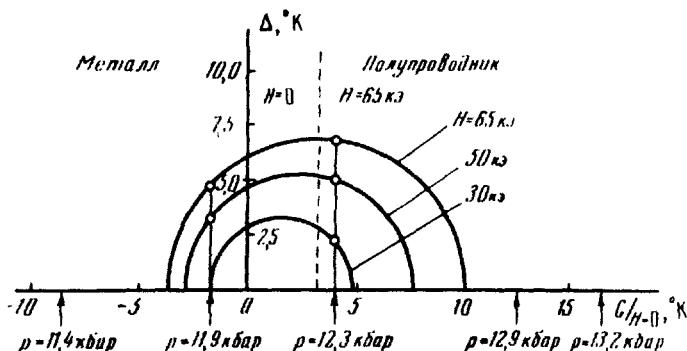


Рис. 3. Схематическая зависимость щели  $\Delta$  экикстонного изолятора при различных значениях магнитного поля  $H$  от щели  $G$  или перекрытия —  $G$  в неперестроенном энергетическом спектре сплава  $\text{Fe}_{0,954}\text{Sb}_{0,046}$  при  $H = 0$  и ( $T = 1,9^\circ\text{K}$ ). Кружками отмечены въ численные значения  $\Delta$  при  $p = 11,9 \text{ кбар}$  и  $p = 12,3 \text{ кбар}$ . Пунктирная прямая соответствует  $G = 0$  при  $H = 65 \text{ кэ}$

$G \sim 2,5^\circ\text{K}$  и  $\sim 2,8^\circ\text{K}$  (последние оценки по наклону прямых на рис. 2 весьма приблизительны, см. рис. 2, б).

Схема образования фазы ЭД в магнитном поле при переходе из металлического в полупроводниковое состояние показана на рис. 3. Стрелки под осью абсцисс указывают значения щели  $G$  или перекрытий —  $G$  (при  $H = 0$ ) при различных давлениях. Величины щели  $G$  при  $p \geq 12,9 \text{ кбар}$  вычислены из соответствующих зависимостей  $\ln[\sigma_{11}(T) - \sigma_{11}(0^\circ\text{K})]$  от  $1/T$  при  $H = 0$ , тогда как меньшие значения щели и перекрытия —  $G$  определены по формуле

$$G = \partial G / \partial p (p - p_K).$$

Значение  $\partial G / \partial p \approx 14 \text{ град/кбар}$ , полученное при  $p > 12,9 \text{ кбар}$ , хорошо согласуется с результатами более точных исследований [7, 10]. Для построения щелевой функции ЭД  $\Delta(G)$  [1, 5, 6] при различных  $H$  использованы значения  $\Delta$  и  $G$  при  $p = 11,9 \text{ кбар}$  и  $p = 12,3 \text{ кбар}$ , вычисленные по экспериментальным данным. Сдвиг щелевых функций ЭД с ростом  $H$  соответствует движению границ зон в магнитном поле. При  $p = 12,3 \text{ кбар}$   $H = 65 \text{ кэ}$  щель  $G$  неперестроенного спектра близка к нулю и, следовательно, энергетическая щель  $\Delta E = 7^\circ\text{K}$ ,

<sup>1)</sup>Заметим, что температура  $T_K$  разрушения фазы ЭД, согласно [5, 6], связана с  $\Delta$  как:  $T_K = \alpha \Delta$ , где  $\alpha \lesssim 1$ .

определенная из зависимости  $\ln[\sigma_{11}(T) - \sigma_{11}(0^\circ\text{K})]$  от  $1/T$ , практически целиком совпадает с максимальным при  $H = 65$  кэ значением  $\Delta$  фазы ЭД.

При  $p \leq 11,4$  кбар и  $p \geq 12,9$  кбар в полях  $H \leq 65$  кэ фаза ЭД не возникает вследствие того, что при этих давлениях  $|\epsilon| > \Delta$ .

В заключение пользуемся случаем выразить нашу искреннюю признательность А.А.Абрикосову и Л.В.Келдышу за обсуждение результатов и В.Г.Кара-ваеву за помощь в проведении измерений.

Физический факультет  
Московского  
государственного университета  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
29 декабря 1970 г.

### Литература

- [1] E.W.Fenton. Phys. Rev., 170, 816, 1968.
- [2] Y.Yafet, R.W.Keyes, E.N.Adams. J. Phys. Chem. Sol., 1, 137, 1956.
- [3] N.F.Mott. Phil. Magazine, 6, 287, 1961.
- [4] Л.В.Келдыш, Ю.В.Копаев. ФТТ, 6, 2791, 1964.
- [5] А.Н.Козлов, Л.А.Максимов. ЖЭТФ, 48, 4, 1184, 1965.
- [6] D.Jérôme, T.M.Rice, W.Kohn. Phys. Rev., 158, 462, 1967.
- [7] Н.Б.Брандт, Я.Г.Пономарев. ЖЭТФ, 55, 4, 1215, 1968.
- [8] А.А.Абрикосов. J. Low Temp., 2, 37, 175, 1970.
- [9] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова. УФН, 101, 2, 249, 1970.
- [10] Н.Б.Брандт, С.М.Чудинов. ЖЭТФ, 59, 1494, 1970.