

АНОМАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЛАВОВ BiSb В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПРОДОЛЬНЫХ КВАНТУЮЩИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Н.Б.Брандт, Н.А.Сидоренко, Г.Д.Яковлев

Обнаружено, что у полупроводниковых сплавов BiSb с узкой запрещенной зоной проводимость в сильном электрическом поле при межзонном пробое резко возрастает под действием продольного квантующего магнитного поля. При этом концентрация неравновесной электрон-дырочной плазмы в поле ~ 50 кэ, возможно, достигает большой величины $10^{17} + 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Влияние квантующего магнитного поля на электропроводность узкозонных полупроводников при межзонном пробое в сильном электрическом поле практически не исследовано. Вместе с тем, такие исследования представляют большой интерес, в частности, в связи с возможностью получения при межзонном пробое больших концентраций электрон-дырочной плазмы (ЭДП). В работе сообщаются результаты измерений проводимости σ у полупроводниковых сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ n -типа ($x = 0,07; 0,1; 0,15$) в сильных электрических полях E до ~ 100 в/см при ориентации тока вдоль тригональной кристаллографической оси C_3 в присутствии продольного магнитного поля B до ~ 50 кэ и $T \approx 4,2\text{К}$. Образцы имели характерные размеры $1 \times 1 \times 5 \text{ см}^{-3}$. Токовые контакты

были омическими, потенциальные — точечными. Особенности монтажа образцов приведены в [1]. Для измерений использовались прямоугольные импульсы тока до ~ 150 а, длительностью ~ 2 мксек и частотой повторения ~ 1 гц, что позволило избежать существенного разогрева образцов измерительным током. Результаты измерений в сильных электрических полях при межзонном пробое у всех исследованных сплавов имеют качественно одинаковый характер и далее иллюстрируются данными по сплаву $\text{Bi}_{0,90}\text{Sb}_{0,10}$. В этом сплаве ширина запрещенной зоны, определяемая расстоянием между практически зеркальными электронными и дырочными экстремумами в точках L зоны Бриллюэна, равна $\epsilon_g \approx 15$ мэв. Электронные изоэнергетические поверхности представляют собой три трехосных эллипсоида (с центрами в точках L), наклоненных под углом $\sim 6^\circ$ к базисной плоскости и повернутых друг относительно друга на угол $\pm 120^\circ$. При выбранной ориентации $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B} \parallel C_3$ эллипсоиды расположены эквивалентно относительно внешних полей. Эффективные массы электронов в главных осях эллипсоида равны $m_1 \approx m_3 \approx 4 \cdot 10^{-3} m_0$; $m_2 \approx 0,3 m_0$, где m_0 — масса свободного электрона [2]. Концентрация электронов в сплаве $n \approx 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, подвижность $\mu \approx 8 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$. Вкладом в проводимость термически возбужденных собственных носителей тока при $T \approx 4,2\text{K}$ можно пренебречь. Вследствие большой диэлектрической проницаемости $\sim 10^2$ [3] и малых эффективных масс полупроводниковые сплавы $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ даже при $n < 10^{14} \text{ см}^{-3}$ оказываются сильнолегированными. В исследованных образцах энергия Ферми электронов $\epsilon_F \approx 2$ мэв.

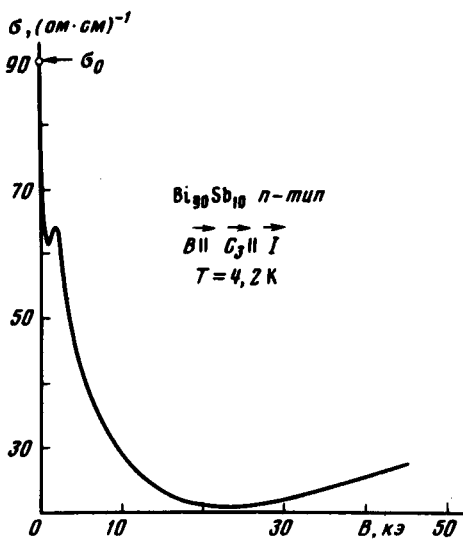


Рис. 1. Зависимость проводимости σ от напряженности продольного магнитного поля \mathbf{B} в области электрического поля, где выполняется закон Ома

На рис. 1 приведена зависимость проводимости σ от напряженности продольного магнитного поля \mathbf{B} , измеренная при 4,2К в слабых электрических полях, где выполняется закон Ома. Ультраквантовый предел магнитного поля достигается в исследованном сплаве уже в полях ~ 1 кэ и наблюдаемая осцилляция проводимости вблизи ~ 1 кэ связана, по-видимому, с выходом нулевого уровня Ландау. С ростом \mathbf{B} проводимость уменьшается и в поле $\mathbf{B} = \mathbf{B}_m \approx 20$ кэ достигает минимума

($\sigma_0/\sigma_m \approx 4$), а затем монотонно возрастает. Подобные зависимости σ от V наблюдались у полупроводниковых сплавов $Bi_{1-x}Sb_x$ при $V \parallel C_3 \parallel E$ в ряде работ [4], однако, достаточно полная их интерпретация до сих пор отсутствует. Заметим, что при $V \parallel C_3$ и в исследованном интервале полей $V \lesssim 50$ кэ магнитное вымораживание электронов из зоны проводимости на примесные уровни в полупроводниковых сплавах $Bi_{1-x}Sb_x$ n -типа не наблюдается [5]. Соотношение спиновых и орбитальных масс в исследованном сплаве при $V \parallel C_3$ таково, что в полях $V \lesssim 50$ кэ изменением ширины запрещенной зоны можно пренебречь [4]. Таким образом, наблюдаемая зависимость σ от V обусловлена зависимостью подвижности электронов μ от поля V . Такая зависимость может быть вызвана изменением характера рассеяния электронов вследствие смены статистики — от фермиевской к бoльцмановской — возникающей в ультраквантовом пределе магнитного поля [6].

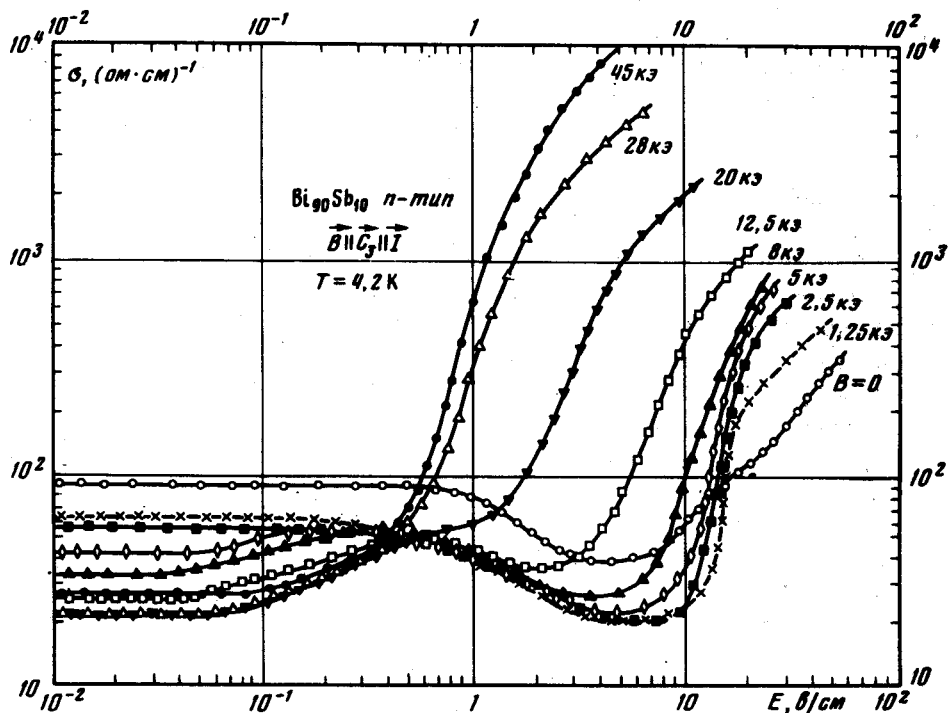


Рис.2. Зависимости проводимости σ от напряженности электрического поля E при различных значениях внешнего продольного поля V

Непосредственно измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов. Как во внешнем магнитном поле, так и без него, дифференциальная проводимость dJ/dE была положительна. Зависимости проводимости $\sigma = J/E$ от электрического поля E , построенные по результатам измерений ВАХ, приведены на рис. 2. При $V = 0$ зависимость σ от E аналогична наблюдавшимся ранее [1] закон Ома выполняется вплоть до полей $E \approx E_0 \approx 0,5$ в/см; в интервале $E_0 \lesssim E \lesssim E_1 \approx 4$ в/см проводимость уменьшается с ростом E по закону, близкому к $\sigma \sim E^{-0,45+0,5}$

что связано, возможно, с рассеянием на акустических фононах. В полях $E \gtrsim E_1^\sigma$ быстро увеличивается с ростом E в результате ударной ионизации валентной зоны ("межзонный пробой") — в образце возникает электрон-дырочная плазма (ЭДП). Некоторое замедление скорости роста σ в полях $E \gtrsim E_{\text{п}} \approx 20$ в/см связано с возникновением в ЭДП пинч-эффекта. Внешнее продольное магнитное поле $B \gtrsim 1$ кэ заметно меняет характер зависимости $\sigma(E)$. С ростом B поле E_0 уменьшается: при $B \approx 45$ кэ $E_0 \approx 5 \cdot 10^{-2}$ в/см, т. е. в ~ 10 раз меньше, чем при $B = 0$. Кроме того, начиная с полей $B \gtrsim 5$ кэ в области $E \gtrsim E_0$ отклонение от закона Ома возникает в сторону возрастания σ , а в полях $B \gtrsim 20$ кэ падающий участок на зависимости $\sigma(E)$ исчезает и проводимость при $E \gtrsim E_0$ всюду увеличивается с ростом E . Изменения σ в интервале $E_0 - E_1$ по порядку величины не превосходят σ_0 . Наиболее интересными при $B \neq 0$ являются, на наш взгляд, результаты в полях $E > E_1$. Из рис. 2 хорошо видно, что зависимость $\sigma(E)$ при $E > E_1$ с ростом B становится все более сильной: если при $B = 0$ проводимость при межзонном пробое в исследованном интервале электрического поля возрастала в ~ 10 раз, то при $B \approx 45$ кэ в том же интервале электрического поля проводимость образца возрастает в $\sim 10^3$ раз! Характер эволюции зависимостей $\sigma(E)$ под влиянием внешнего магнитного поля позволяет предположить, что (как и при $B = 0$), при $B \neq 0$ в поле $E > E_1$ имеет место межзонный пробой, при котором возникает ЭДП. При пробое рост проводимости ЭДП обычно связан с ростом концентраций электронов и дырок. Если это предположение верно, то в поле ~ 50 кэ достигалась концентрация неравновесной ЭДП $5 + 7 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$!. Т. е. достаточно сильное продольное магнитное поле позволяет эффективно увеличивать при пробое концентрацию ЭДП. Насколько нам известно, ранее такой эффект не наблюдался.

При межзонном пробое увеличение концентрации ЭДП под действием магнитного поля может возникать в ультраквантовом пределе¹⁾ за счет того, что с ростом B растет плотность состояний на нулевых уровнях Ландау зоны проводимости и валентной зоны (при этом ϵ_g от B практически не зависит — см. выше). По оценкам, концентрация ЭДП в поле $B \approx 50$ кэ может более чем в 100 раз превышать концентрацию ЭДП при $B = 0$. Кроме того, в полях $B \gtrsim 1$ кэ не должно возникать пинчевание ЭДП, которое наблюдается при $B \approx 0$ [1] и при котором, как известно [7], уменьшаются подвижность и средняя концентрация ЭДП. По оценкам, проводимость за счет этого эффекта может возрасти, по сравнению с $\sigma(B = 0)$ в несколько раз.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Ш.М.Когана и участников его семинара за полезное обсуждение результатов, а также С.Д.Бенеславского за постоянное внимание к работе и ценные замечания.

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
27 мая 1978 г.

¹⁾ При межзонном пробое средняя энергия электронов порядка ϵ_g , но и в этом случае в полях $B \gtrsim 10 + 20$ кэ, по оценкам, достигается ультраквантовый предел.

Литература

- [1] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистов, Е.А. Свистова, Г.Д.Яковлев. ЖЭТФ, 61, 1078, 1971.
- [2] G. Oelgart, R. Herrmann. Phys. Stat. Sol. "B", 58, 181, 1973.
- [3] Т.М.Лифшиц, А.Б.Ормонт, Е.Г.Чиркова, А.Я.Шульман. ЖЭТФ, 72, 1130, 1977.
- [4] Н.Б.Брандт, С.М.Чудинов, Б.А.Корчак. ФНТ, 3, 152, 1977.
- [5] С.Д.Бенеславский, Н.Б.Брандт, Е.М.Голямина, С.М.Чудинов, Г.Д.Яковлев. Письма в ЖЭТФ, 12, 256, 1974; Н.Б.Брандт, Г.Д.Яковлев. ФНТ, 3, 864, 1977.
- [6] S. Askenazy, J-P. Ulmet, J. Leotin. Sol. Stat Comm., 7, 989, 1969.
- [7] А.Е.Стефанович. ФТТ, 11, 599, 1969.
-