

О вращении поверхности Ферми в переходном слое бикристаллов анизотропного полуметалла

© Ф.М. Мунтяну, Ю.А. Дубковецкий, С.Ф. Ким, Г.А. Киоссе

Институт прикладной физики Академии наук Молдавии,
277028 Кишинев, Молдавия

Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур,
Вроцлав, Польша

(Поступила в Редакцию 20 марта 1997 г.)

Исследован эффект Шубникова–де Гааза в бикристаллах сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.063 \leq x \leq 0.088$) p -типа проводимости в стационарных магнитных полях до 15 Т. Обнаружено, что изоэнергетическая поверхность T_{45} -дырок в переходном слое бикристаллов повернута на угол $\sim 90^\circ$ относительно ее положения в моноблоках.

В ряде теоретических работ Бурмистрова и Дубовского [1–3] проведена классификация возможных видов движения носителей заряда на когерентной границе бикристалла анизотропного металла (полуметалла). Показано, что на границе типа плоскости двойникования возникает эффективный потенциал (кинематический по природе), существенно влияющий на поведение носителей заряда в параллельном (относительно границы бикристалла) магнитном поле. В результате на двойниковой границе в сильных магнитных полях появляются дискретные энергетические состояния (за счет расщепления уровней энергии в симметричном двухъямном потенциале), причем при радиусе орбиты носителей заряда $r_B = cp_F/eB$, много меньшем размера переходного слоя (ПС) L между моноблоками ($r \ll L$), должны наблюдаться осцилляции де Гааза–ван Альфена с частотой, отличной от частоты в объеме металла, что в принципе позволит восстановить характер ПС бикристалла.

Недавно в [4] при $B \parallel \text{ПС}$ нами экспериментально зарегистрирована новая низкочастотная гармоника в спектре осцилляций Шубникова–де Гааза (ШдГ) в бикристаллах $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ n -типа проводимости, свидетельствующая о вращении эллипсоидов эффективных масс I -электронов в ПС (относительно их положения в моноблоках) примерно на 74° .

К сожалению, угловые зависимости периодов шубниковских осцилляций в этих бикристаллах не дают однозначной информации об анизотропии поверхности Ферми (ПФ) в ПС (возникают трудности при расшифровке сложной осцилляционной картины, при учете зависимости энергии Ферми от индукции магнитного поля и др.).

В этом аспекте выгодно отличаются бикристаллы сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.06 \leq x \leq 0.09$), легированные небольшими количествами Sn (до 0.01 at.%), в явлениях переноса которых в основном участвуют T_{45} -дырки (ПФ состоит из одного эллипсоида вращения, вытянутого вдоль оси C_3).

В настоящей работе исследован эффект ШдГ в бикристаллах (угол разориентации кристаллитов $5 \leq \theta \leq 75^\circ$) сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.063 \leq x \leq 0.088$)

с интегральной концентрацией примесных дырок $2.2 \cdot 10^{23} \leq p = (p_T + p_L) \leq 8.3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Установлено, что направление вытянутости изоэнергетической поверхности T_{45} -дырок в моноблоках и в ПС составляет угол $\sim 90^\circ$.

Высококачественные бикристаллы сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ (температура Дингла дырок $T_D \leq 0.8 \text{ К}$) получены методом зонной кристаллизации и двойной затравки. Образцы для измерений изготавливались в форме параллелепипедов. Контакты к ПС приваривались электроискровой сваркой (схематическая иллюстрация образца с контактами приведена на вставке к рис. 1). Состав образцов контролировался рентгеновскими методами. Внутренняя граница бикристаллов была типа наклона (поворот кристаллографических осей в ПС происходит в одной плоскости) и имела ширину $140 \leq L \leq 300 \text{ нм}$. Интегральная концентрация дырок определялась по величине коэффициента Холла в сильных магнитных полях (классический предел) $R_{H\infty} = (ep)^{-1}$.

Измерения в стационарных магнитных полях до 15 Т проведены в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (г. Вроцлав, Польша). Эффект ШдГ исследовался в биттеровском и сверхпроводящем магнитах на установках, позволяющих производить запись кривых магнитосопротивления $\rho(B)$ в прямом и обратном полях, компенсировать монотонную составляющую, определять частоты составляющих осцилляционных кривых с помощью Фурье-анализа и др. Всего изучались девять бикристаллических образцов сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.063 \leq x \leq 0.088$) с различным содержанием акцепторной примеси Sn. При гелиевых температурах у четырех из них отчетливо наблюдались шубниковские осцилляции во всем угловом интервале (рис. 1, 2) при вращении магнитного поля в биссекторно-тригональной плоскости моноблоков (продольно-поперечная ориентация B в ПС). Один образец ($x = 0.07$, $p = 8.3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$) исследовался также и при вращении магнитного поля в тригональной и биссекторной плоскостях моноблоков.

Известно, что энергетический спектр сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.06 \leq x \leq 0.09$) характеризуется наличием вблизи уровня Ферми трех эквивалентных электронных экстре-

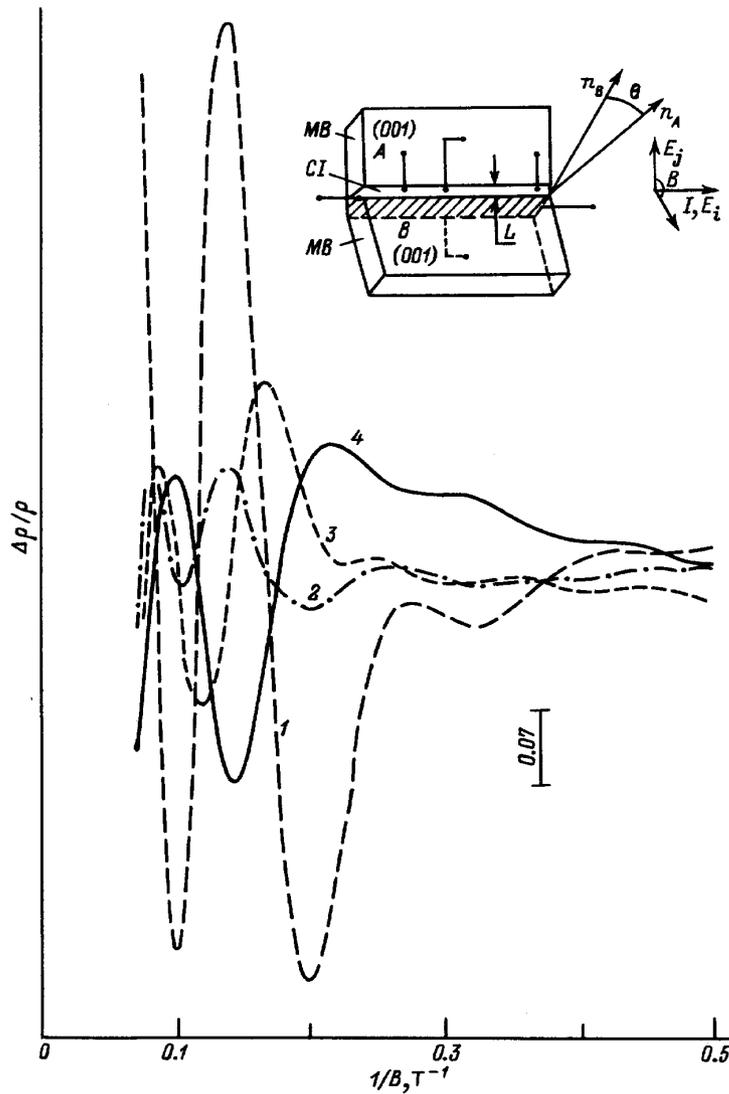


Рис. 1. Квантовые осцилляции магнитосопротивления в бикристалле сплава $\text{Bi}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}$ ($p = 3.8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $p_T = 3.65 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$) при 4.2 К. $\angle B, C_3$ (deg): 1 — 16, 2 — 110, 3 — 79, 4 — 155. На вставке — схема образца с контактами (МВ — моноблоки, СІ — переходный слой).

мумов L_a , трех дырочных экстремумов L_s (L_s отделены от L_a прямой щелью ε_{gl}) и дырочного экстремума T_{45}^- [5]. Сплавы с $x \leq 0.07$ обладают, как и Вi, полуметаллическими свойствами (имеет место слабое перекрытие экстремумов L_a и T_{45}^-). В интервале концентраций $0.07 \leq x \leq 0.22$ эти сплавы становятся узкозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны, не превышающей 30 meV [6] (см. вставку на рис. 2). Изменяя концентрацию акцепторной примеси Sn в сплавах, можно менять положение уровня Ферми и добиться условий, при которых в эффекте ШДГ преимущественно участвует лишь одна группа носителей заряда (например, T_{45}^- -дырки).

В исследованных нами бикристаллических образцах при ориентации магнитного поля в бисекторно-тригональной плоскости моноблоков уверенно регистрировались лишь шубниковские осцилляции от сечений

изоэнергетической поверхности T_{45}^- -дырок (рис. 1, 2). Осцилляции от сечений ПФ L_s -дырок имели очень малую амплитуду и, как правило, наблюдались при $B \ll 3 \text{ Т}$.

Отмечены следующие особенности квантовых осцилляционных зависимостей $\rho(B)$ в бикристаллах сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.063 \leq x \leq 0.088$) p -типа проводимости.

1) Имеются области магнитных полей, где угловые зависимости периодов осцилляций описываются одной ветвью, соответствующей анизотропии сечений ПФ T_{45}^- -дырок в бисекторно (или бинарно)-тригональной плоскости моноблоков (сплошные линии на рис. 3). Циклотронные массы дырок, определенные из температурной зависимости амплитуды осцилляций, практически не зависят от состава бикристаллов ($m^* = (0.22 \pm 0.02)m_0$ при $B \perp C_3$, $m^* = (0.07 \pm 0.01)m_0$ при $B \parallel C_3$), что хорошо согласуется с результатами [7,8], полученными на монокристаллических образцах.

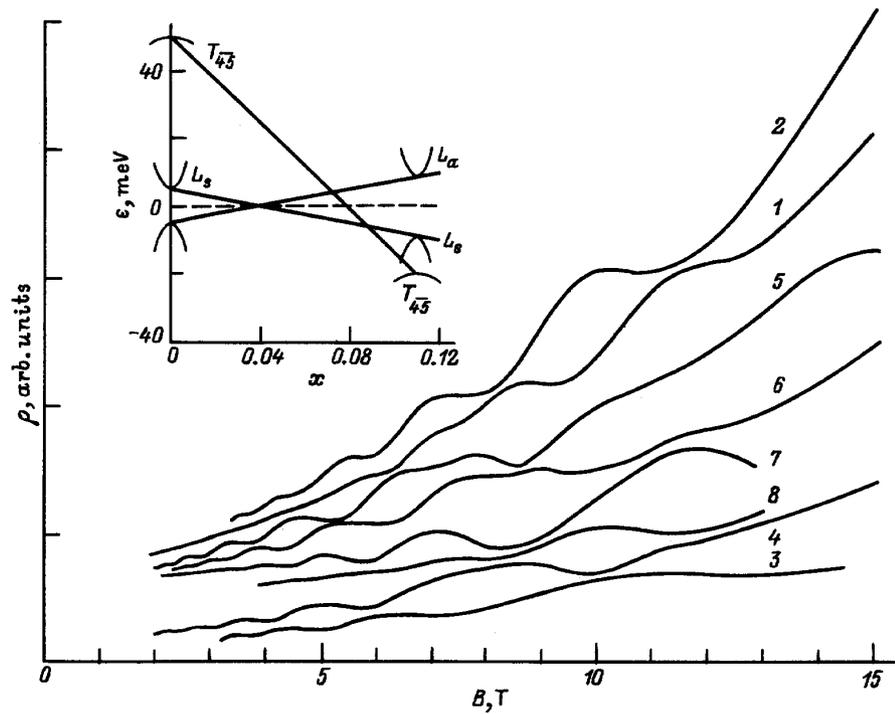


Рис. 2. Магнитосопротивление бикристалла сплава $\text{Bi}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}$ ($p = 8.6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $p_T = 7.66 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$) в квантующем магнитном поле, ориентированном в бисекторно-тригональной плоскости. $\angle B, C_3$ (deg): 1 — 0, 2 — 23, 3 — 47, 4 — 69, 5 — 90, 6 — 119, 7 — 145, 8 — 164. $T = 42 \text{ K}$. На вставке — энергетическая диаграмма перестройки спектра сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x < 0.12$).

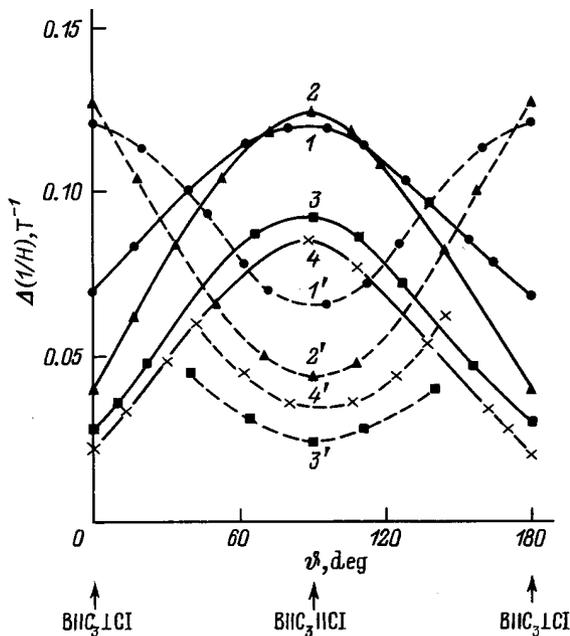


Рис. 3. Угловые зависимости периодов осцилляций бикристаллов сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.063 \leq x \leq 0.088$) в бисекторно-тригональной плоскости. 1, 1' — $x = 0.063$, $p = 3.5 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $p_T = 3.36 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $\theta = 68^\circ$, 2, 2' — $x = 0.07$, $p = 3.8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $p_T = 3.65 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $\theta = 75^\circ$, 3, 3' — $x = 0.07$, $p = 8.6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $p_T = 7.66 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $\theta = 5^\circ$, 4, 4' — $x = 0.008$, $p = 4.9 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $p_T = 4.6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $\theta = 45^\circ$.

2) В сильных магнитных полях при $r_B \ll L$ ($B > 4 \text{ T}$) осцилляционные кривые $\rho(B)$ в широких угловых интервалах представляют собой суперпозицию двух гармоник, при этом угловые зависимости их периодов почти одинаковы по форме, но сдвинуты относительно друг друга примерно на $\pi/2$ (рис. 3).

Наличие в спектре шубниковских осцилляций бикристаллов сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.063 \leq x \leq 0.088$) p -типа новой составляющей и характер ее угловой зависимости свидетельствуют о том, что в ПС изоэнергетическая поверхность T_{45} -дырок повернута (относительно положения в моноблоках) на угол $\sim 90^\circ$. Этот факт подтверждает выводы [1–3] о возможности образования на двойниковой внутренней границе бикристаллов нового типа дискретных уровней энергии, лежащих в разрешенных зонах и вносящих вклад в плотности состояния на уровне Ферми. Наши результаты показывают, что вместе с плотностью состояний на уровне Ферми осциллирует также и вероятность расселения носителей заряда. Как следствие этого появляется новый период шубниковских осцилляций бикристаллов, причем не только в параллельном границе магнитном поле, но и при других его ориентациях.

В заключение заметим, что новый тип осцилляций возникает на границе типа плоскости двойникования бикристаллов анизотропных полуметаллов и сильновырожденных узкозонных полупроводников.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. Я. Клямуту, Т. Палевскому, В. Нижанковскому, Е. Хлыбову за помощь в проведении настоящих исследований в Международной лаборатории.

Список литературы

- [1] С.Н. Бурмистров, Л.Б. Дубовский. Письма в ЖЭТФ **45**, 9, 428 (1987).
- [2] S.N. Burmistrov, L.V. Dubovskii. Phys. Lett. **A127**, 2, 120 (1988).
- [3] С.Н. Бурмистров, Л.Б. Дубовский. ЖЭТФ **94**, 9, 173 (1988).
- [4] F. Muntyanu, M. Onu, Yu. Dubkovetsky, V. Kistol. Czech. J. Phys. **46**, *Suppl. S4*, 2039 (1996).
- [5] S. Golin. Phys. Rev. **176**, 830 (1968).
- [6] Г.А. Миронова, М.В. Судакова, Я.Г. Пономарев. ЖЭТФ **78**, 5, 1830 (1980).
- [7] С.М. Чудинов, Б.А. Акимов, В.В. Мошчалков. ФТТ **17**, 8, 2301 (1975).
- [8] Б.А. Акимов, В.В. Мошчалков, С.М. Чудинов. ФНТ **4**, 1, 60 (1978).