

Эффект Шубникова–де Гааза в трикристаллах сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.1; 0.13$) n -типа проводимости

© Ф.М. Мунтяну, Ю.А. Дубковецкий, Г.А. Киоссе, А. Гилевски*

Институт прикладной физики Академии наук Молдавии,
MD-2028 Кишинев, Молдавия

*Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур,
53-529 Вроцлав, Польша

(Поступила в окончательном виде 22 октября 1998 г.)

Исследован эффект Шубникова–де Гааза в трикристаллах сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.1; 0.13$) n -типа проводимости в стационарных (до 14 Т) и импульсных (до 40 Т) магнитных полях. Наблюдались реконструкция внутренней границы трикристаллов, а также ряд новых составляющих осцилляций $\rho(B)$, свидетельствующих о вращении изоэнергетических поверхностей L -электронов на межкристаллитной границе на угол $\sim 74^\circ$ в бинарно-тригональной плоскости.

Недавно обнаружены составляющие осцилляций Шубникова–де Гааза (ШдГ) в бикристаллах сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ n -типа проводимости, свидетельствующие о вращении эллипсоидов эффективных масс L -электронов на границе раздела кристаллитов (относительно их положения в моноблоках (МБ)) примерно на 74° [1,2]. Межкристаллитная граница этих бикристаллов была весьма близка к когерентному двойнику, однако наблюдался [3] разный вклад дислокаций в осцилляционную картину для малоугловых и большеугловых границ. Значительный интерес представляют объекты с более сложными механическими напряжениями, как например трикристаллы (в [4] трикристаллические переходы использовались для исследования симметрии спаренного состояния в ВТСП), где локально встречаются три индивида, имеющие разные углы разворота, и где наблюдаются большие скопления дефектов и дислокаций со сложной картиной их переплетения.

В настоящей работе исследовались два трикристалла полупроводниковых сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.1; x = 0.13$) n -типа проводимости (образцы специально легировались донорными примесями Те). Заметим, что поверхность Ферми (ПФ) этих сплавов состоит из трех разноосных квазиэллипсоидов, центрированных в точках L зоны Бриллюэна и повернутых в бинарной плоскости на угол $\sim 5^\circ$ [5].

Образцы для измерений изготавливались в форме параллелепипеда. Внутренние границы (IB) трикристаллов шириной $140 \leq L \leq 300$ nm были близки к типу наклона. Плоскости внутренних границ (PIB) были почти параллельны тригональной оси C_3 кристаллитов. Углы наклона Θ_i кристаллитов составляли у образца T_1 ($x = 0.13$) $\Theta_1(AC) \sim 12^\circ$, $\Theta_2(CB) \sim 6^\circ$, $\Theta_3(AB) \sim 4^\circ$, у образца T_2 ($x = 0.1$) $\Theta_1(AC) \sim 10^\circ$, $\Theta_2(CB) \sim 4^\circ$, $\Theta_3(AB) \sim 2^\circ$. Контакты к внутренним границам приваривались электроискровой сваркой (схематичная иллюстрация трикристалла с контактами приведена на вставке к рис. 1). Состав образцов контролировался рентгеновскими методами. Интегральная концентрация электронов N определялась по величине коэффициента

Холла в сильном магнитном поле (классический предел) $R_\infty = -(eN)^{-1}$. В наших образцах величина N была порядка $1.2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (T_1) и $1.36 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (T_2). Измерения в стационарных (до 14 Т) и импульсных (до 40 Т) магнитных полях проведены в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (г. Вроцлав, Польша). Эффект ШдГ исследовался на установках, позволяющих производить запись кривых магнитосопротивления в прямом и обратном полях, компенсировать монотонную составляющую, определить частоты гармоник с помощью Фурье-анализа и др. Далее представлены основные результаты измерения эффекта ШдГ на образцах T_1 и T_2 .

Известно, что при ориентации магнитного поля $B \parallel C_2$ у монокристаллов сплава $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ n -типа проводимости наблюдаются две гармоники осцилляций $\rho(B)$: низкочастотная, связанная с минимальными сечениями двух эквивалентных квазиэллипсоидов L -электронов, и высокочастотная, характеризующая максимальное сечение третьего квазиэллипсоида. Осцилляции сильно разнесены по магнитному полю из-за анизотропии ПФ L -электронов. Как видно из рис. 1 и 2, b трикристаллах при направлениях магнитного поля $B \perp PIB$ (близких к оси C_2 кристаллитов) отчетливо проявляются три гармоники осцилляций магнитосопротивления, причем величины их частот не зависят от внутренних границ конкретного трикристалла. Например, у трикристалла T_1 частоты этих осцилляций соответственно равны $\Delta_1(1/H)^{-1} \approx 2.7T$, $\Delta_2(1/H)^{-1} \approx 52.6T$ и $\Delta_3(1/H)^{-1} \approx 29.7T$. Дополнительная частота $\Delta_3(1/H)^{-1}$ на осцилляционных кривых $\rho(B)$, которая на монокристаллах не наблюдается, возникает за квантовым пределом для низкочастотной гармоники. Обнаружено, что фаза этих осцилляций, также как и порядок следования пиков осцилляций для спинов по полю и против поля у низкочастотной гармоники зависят от состояния внутренних границ. Особенно это заметно в осцилляционной картине $\rho(B)$ от внутренней границы между моноблоками B и C ($IB(BC)$), где дополнительная составляющая осциллирует в противофазе и нарушен порядок следования максимумов осцилляций с проти-

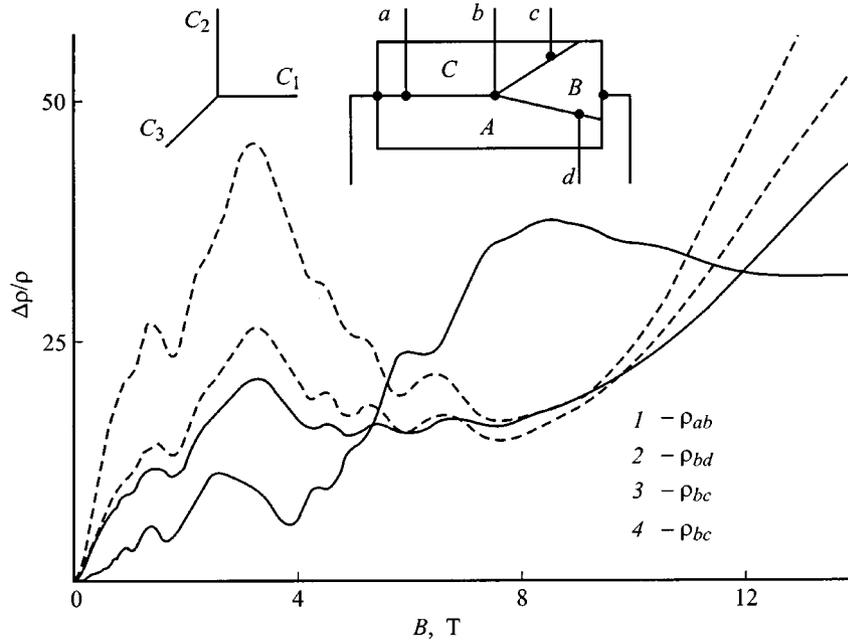


Рис. 1. Эффект ШдГ в трикристалле T_1 (стационарные магнитные поля) при 4.2 К и $B \perp PIB$. Для кривых 2, 4 шкала увеличена в два раза, для кривой 3 — в три раза. Кривая 3 снята до термообработки, кривая 4 — после. На вставке: схема образца с контактами (A, B, C — монокристаллические блоки).

воположной ориентацией спина. После термообработки $IB(BC)$ возвращается в равновесное состояние, при этом меняется фаза осцилляций на π и восстанавливается нормальный порядок следования подуровней Ландау (рис. 1). Процесс реконструкции $IB(BC)$, вероятнее всего, произошел со сдвигом кристаллографических плоскостей на четверть периода в противоположных направлениях соответственно двум направлениям спина [6]. Об этом свидетельствуют и прямые расчеты фактора спинового расщепления $\gamma = \Delta_{sp}/\Delta_{orb}$, и температуры Дингла T_D L -электронов при $B \parallel C_2$, а именно: до термообработки $IB(BC)$ $\gamma \approx 0.32$, $T_D \approx 1.4$ К; после — $\gamma \approx 0.7$, $T_D \approx 0.5$ К.

При ориентации магнитного поля $B \parallel PIB$ (близкой к оси C_3 кристаллитов) у трикристаллов сплавов $Bi_{1-x}Sb_x$ n -типа проводимости, также как и у бикристаллов [1,2], наблюдаются две частоты осцилляций, тогда как у монокристаллов при этой ориентации поля проявляется только одна частота, связанная с большими сечениями ПФ L -электронов. Причем их отношение $k = \Delta_1(1/H)^{-1}/\Delta_2(1/H)^{-1}$ ($k_1 \sim 4(T_1)$; $k_2 \sim 6(T_2)$) зависит от концентрации компонент в сплавах и степени заполнения изоэнергетических поверхностей. У низкочастотной гармоники, специфической для бикристаллов и трикристаллов, максимумы осцилляций в квантовой области полей расщепляются по спину, а фаза осцилляций при $1/B \rightarrow 0$ экстраполируется на целочисленное значение. Высокочастотная гармоника главным образом проявляется (рис. 2) в сильных магнитных полях ($B > 7$ Т), и на последних максимумах осцилляций отсутствует спиновое расщепление.

Отличительной особенностью осцилляционных зависимостей магнитосопротивления в трикристаллах при направлениях магнитного поля вдоль $PIB(AC)$ (близких к направлению биссекторной оси C_1 кристаллитов) является то, что помимо двух типов осцилляций с отношением частот 2:1, которые наблюдаются на монокристаллах и бикристаллах, при $B > 10$ Т появляется составляющая, связанная с большими сечениями ПФ L -электронов.

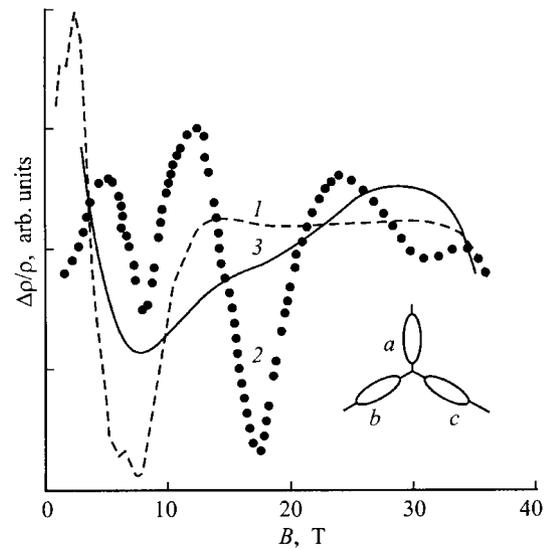


Рис. 2. Эффект ШдГ в трикристалле T_1 (импульсные магнитные поля) при 4.2 К. Монотонная часть $\rho(B)$ скомпенсирована. 1 — $B \perp PIB \perp J$, 2 — $B \parallel PIB \perp J$, 3 — $B \parallel PIB \parallel J$. На вставке: электронная часть поверхности Ферми сплавов Bi-Sb.

Результаты, полученные на трикристаллах при $B \parallel PIB$, фактически подтверждают выводы работ [1,2] об образовании на внутренних границах дискретного спектра электронных состояний [7] и нового типа симметрии, связанного с поворотом главных осей ПФ в пространстве. В связи с этим, новая низкочастотная гармоника характеризует одинаковые по величине сечения квазиэллипсоидов b и c (см. вставку на рис. 2), главные оси которых поворачиваются на внутренних границах на угол $\sim 74^\circ$ относительно положения в МБ. Высокочастотная гармоника связана с площадью экстремального сечения третьего квазиэллипсоида (a), которая практически не изменяется по величине при повороте и все время совпадает с площадью больших сечений трех эквивалентных квазиэллипсоидов МБ при $B \parallel C_3$. Измеренные угловые зависимости периодов осцилляций трикристаллов в бинарно-тригональной плоскости МБ показывают, что низкочастотная гармоника при $B \parallel PIB$ плавно (описывая ветвь эллипсоида) переходит в дополнительную частоту при $B \perp PIB$ в соответствии с концепцией о вращении ПФ на внутренней границе.

Возникновение частоты, связанной с большими сечениями ПФ L -электронов в трикристаллах при направлениях поля вдоль $PIB(AC)$ (у монокристаллов и бикристаллов данная гармоника отсутствует), указывает на вклад в осцилляционную картину $\rho(B)$ ПФ наклонных (относительно $IB(AC)$) межкристаллитных границ. Только в случае вращения ПФ на этих внутренних границах, сечения, близкие к максимальному, могут оказаться ориентированными перпендикулярно направлению магнитного поля.

Авторы выражают глубокую благодарность Я. Клямуту и Т. Палевскому за помощь в проведении настоящих исследований в Международной лаборатории.

Список литературы

- [1] F. Muntyanu, M. Onu, Yu. Dubkovetskii, V. Kistol. Czech. J. Phys. **46**, Suppl. S4, 2039 (1996).
- [2] F.M. Muntyanu, Yu.A. Dubkovetskii. Phys. Stat. Sol. (b) **203**, 473 (1997).
- [3] Ф.М. Мунтяну, М. Глиньски, Г.А. Киоссе, В.Г. Кистол. ФТТ **33**, 6, 1881 (1991).
- [4] Z.G. Zou, Q.Y. Ying, J.H. Miller, jr., J.H. Xu, N.Q. Fan. J. Superconductivity **8**, 5, 679 (1995).
- [5] Г.А. Миронова, М.В. Судакова, Я.Г. Пономарев. ЖЭТФ **78**, 5, 1830 (1980).
- [6] Д. Шенберг. Магнитные осцилляции в металлах. Мир, М. (1986). 678 с.
- [7] С.Н. Бурмистров, Л.Б. Дубовский. ЖЭТФ **94**, 9, 173 (1988).