

ПЕРЕХОДЫ ЭЛЕКТРОН – ДЫРКА ПРИ РАССЕЯНИИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА ВИСМУТА

И.Ф.Свекло, В.С.Цой

Развита методика поперечной электронной фокусировки (ЭФ) ¹ с использованием трех микроконтактов. В висмуте наблюдаются: 1) фокусировка дырок; 2) электрон-дырочные переходы при рассеянии носителей тока на поверхности; 3) зеркальное отражение дырок от биссекторной плоскости при нормальном падении (при диффузном отражении электронов ²), свидетельствующее о наличии положительного заряда на поверхности.

Ранее с помощью ЭФ исследовались междолинные электрон-электронные переходы при рассеянии на поверхности образца висмута ³⁻⁵. Важным каналом поверхностного рассеяния являются электрон-дырочные переходы, существенно влияющие на кинетические свойства образца ⁶⁻⁸. В настоящей работе с помощью ЭФ проведено прямое наблюдение электрон-дырочных переходов при рассеянии носителей тока на поверхности кристалла висмута.

Образцы представляли собой монокристаллические диски диаметром 10 мм и толщиной 2 мм, нормаль к плоской поверхности диска была параллельна направлению C_2 . Ориентация электронных и дырочных долин поверхности Ферми (ПФ) относительно кристаллографических осей показана на рис. 1а. Измерения проводились следующим способом ² – через эмиттер пропускался синусоидальный ток, измерялось переменное напряжение на коллекторе U_k в зависимости от величины магнитного поля H , параллельного поверхности образца. Эксперименты проводились с использованием трех микроконтактов. Схема эксперимента показана на рис. 1б. Контакты 1 и 2 устанавливались вдоль нормали к большой оси электронного эллипсоида, параллельной плоскости образца; контакты 2 и 3 устанавливались перпендикулярно направлению C_3 .

Использованная схема при соответствующем направлении H представляет следующие методические возможности: 1. Наблюдать фокусировку электронов при использовании контактов 1 и 2. 2. Наблюдать фокусировку дырок при использовании контактов 2 и 3. 3. Наблюдать фокусировку электронов и дырок после переброса электрон-дырка и дырка-электрон при использовании контактов 1 и 3. 4. Наблюдать фокусировку на одном контакте одновременно и электронов и дырок: контакт 2 – коллектор; контакт 3 – эмиттер дырок; контакт 1 – эмиттер электронов.

Линию фокусировки дырок достаточной амплитуды удалось наблюдать лишь при расстояниях коллектор-эмиттер $L_h \lesssim 50$ мкм и $T \lesssim 1,7$ К. Поэтому можно сделать вывод, что определяющей причиной, затрудняющей наблюдение размерных эффектов в висмуте с участием дырок, является малая длина свободного пробега дырок. Из наблюдений фокусировки дырок в кратных полях следует, что в отличие от электронов, которые от исследуемой поверхности отражаются при нормальном падении диффузно ², дырки отражаются зеркально – вероятность зеркального отражения $q \approx 0,8$, что с очевидностью свидетельствует о существовании значительного ($\sim 10^{12}$ электрон/см²) положительного заряда на исследуемой поверхности. Именно поверхностный загиб зон определяет характер отражения носителей тока. Отметим, что ситуация обратная той, которая имеет место в сурьме ⁹, когда от поверхности, перпендикулярной C_3 , электроны отражаются зеркально, а дырки диффузно.

При отклонении H от направления большей оси эллипсоида (линия контактов коллектор-эмиттер L перпендикулярна большой оси эллипсоида) линии ЭФ в висмуте смещаются в сторону больших магнитных полей. По-

этому, несмотря на различие размеров электронного и дырочного эллипсоидов, можно подобрать такое направление магнитного поля H , что электроны, вылетевшие из эмиттера 1 фокусируются на коллекторе 2 при том же значении поля H_0 , при котором дырки, вылетевшие из контакта 2 фокусируются на контакте 3 (рис. 2а, кривые 1 и 2 соответственно). Далее, не меняя направления H , контакт 1 использовался в качестве эмиттера, а контакт 3 в качестве коллектора. При условии $S_e + S_h = L$, где S_e, S_h — векторы экстремального смещения электронов и дырок вдоль поверхности на коллекторе должен появиться всплеск напряжения в том же поле H_0 , обусловленный фокусировкой носителей тока при электрон-дырочном переходе (рис. 2а, кривая 3). При заданном L , вообще говоря, существует еще два возможных механизма возникновения линии ЭФ: 1. Фокусировка носителей нецентральных сечений ПФ. 2. Траекторный перенос поля точечного заряда ¹⁰. Однако учет формы эллипсоидов ПФ висмута и длины свободного пробега носителей тока при заданной геометрии эксперимента однозначно указывает на то, что наблюдаемая линия ЭФ обусловлена именно электрон-дырочными переходами.

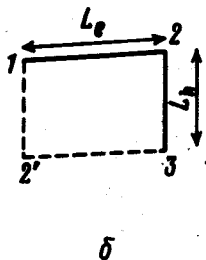
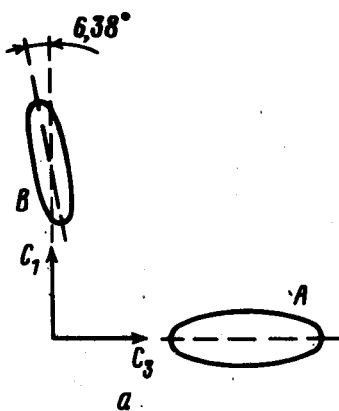


Рис. 1

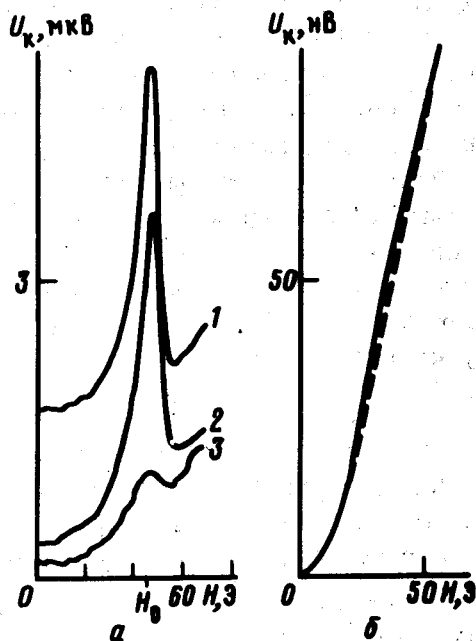


Рис. 2

Рис. 1. а — Проекция дырочного эллипсоида (А) и одного из электронных эллипсоидов (В) ПФ висмута на плоскость, перпендикулярную направлению C_2 . Относительный масштаб не соблюден. б — Проекция траекторий движения электронов эллипсоида В (1 — 2 и 2' — 3) и дырок эллипсоида А (2 — 3 и 1 — 2') на поверхность образца. В точках 1, 2, 3 установлены контакты. Линии 1 — 2 и 2' — 3 перпендикулярны большой оси электронного эллипсоида, линии 2 — 3 и 1 — 2' перпендикулярны большой оси дырочного эллипсоида. Магнитное поле H лежит в плоскости образца

Рис. 2. Зависимости коллекторного напряжения от магнитного поля. а — На поверхности образца установлены три контакта 1, 2, 3: 1 — фокусировка электронов (1 — эмиттер, 2 — коллектор); 2 — фокусировка дырок (2 — эмиттер, 3 — коллектор); 3 — фокусировка электронов (дырок), испытавших переход электрон-дырка (дырка-электрон) (1 — эмиттер, 3 — коллектор). При записи кривых 2 и 3 чувствительность была увеличена в 6,32 и 31,6 раза соответственно. б — На поверхности образца установлены два контакта, их ориентация относительно кристаллографических осей образца совпадает с ориентацией контактов 1 и 3 случая а

В используемой геометрии эксперимента на коллекторе 3 будут фокусироваться носители, вылетевшие из эмиттера 1 и испытавшие переход электрон-дырка в точке 2

и дырка—электрон в точке 2' (рис. 1б). При изменении направления магнитного поля на противоположное и использовании контакта 1 в качестве коллектора, контакта 3 в качестве эмиттера переходы электрон—дырка будут происходить в точке 2', а переходы дырка—электрон в точке 2. Эксперимент показал, что амплитуда линии при этом не изменяется.

Так как при установке контакта (острия) вблизи него в образце возникают структурные дефекты, то условия отражения в точках 2' и 2 различаются. При установке контактов на совершенном участке поверхности в той же геометрии эксперимента, но без установки контакта 2 линия ЭФ обусловленная электрон-дырочными переходами значительно уменьшается по амплитуде и уширяется — рис. 2б (ср. с рис. 2а, кривой 3). Это означает, что дефекты, возникающие вблизи контакта 2 существенно увеличивают вероятность электрон-дырочного перехода.

Расстояние между электронным и дырочным эллипсоидами в зоне Бриллюэна сравнимо с величиной вектора обратной решетки поверхности и переходы электрон—дырка и дырка—электрон должны идти с большим изменением тангенциальной компоненты квазиимпульса, отличающейся от вектора обратной решетки поверхности. А для того, чтобы такие процессы были возможными, необходимо наличие на поверхности шероховатостей атомного масштаба. Именно с этим, по-видимому, связано увеличение вероятности электрон-дырочного перехода после установки контакта 2.

По форме линии ЭФ (рис. 2а, кривые 1 и 2) можно определить размер участка эффективности ПФ, и, учитывая, что амплитуда линии, обусловленной электрон-дырочными переходами (рис. 2а, кривая 3, рис. 2б) пропорциональна числу сфокусированных на коллекторе носителей, в предположении изотропного рассеяния можно найти вероятности перехода электрон—дырка q_{eh} и дырка—электрон q_{he} для дефектного и совершенного участков поверхности:

$$q_{eh} \approx q_{he} \approx 0,04 \text{ — для дефектного участка,}$$

$$q_{eh} + q_{he} \approx 0,02 \text{ — для совершенного участка.}$$

Подбором направления магнитного поля можно добиться также того, что электроны и дырки, вылетевшие из эмиттеров 1 и 3 будут одновременно фокусироваться на коллекторе 2 (рис. 1б). В эксперименте измерялись три зависимости коллекторного напряжения: 1) U_k^e при фокусировке электронов; 2) U_k^h при фокусировке дырок; 3) U_k^{e+h} при одновременной фокусировке электронов и дырок. В пределах погрешности эксперимента ($\sim 1\%$) аддитивность выполнялась: $U_k^{e+h} = U_k^e + U_k^h$. Нелинейных эффектов обнаружить не удалось и при разогреве приколлекторной области путем пропускания через контакт 2 (коллектор) постоянного тока 10 мА (сопротивление коллектора 2 Ом).

Литература

1. Цой В.С. Письма в ЖЭТФ; 1974, 19, 114.
2. Цой В.С., Цой Н.П. ЖЭТФ, 1977, 73, 289.
3. Цой В.С., Колесниченко Ю.А. ЖЭТФ, 1980, 78, 2041.
4. Андриевский В.В., Асс Е.И., Комник Ю.Ф. ФНТ, 1985, 11, 1148.
5. Божко С.И., Свекло И.Ф., Цой В.С. ФНТ, 1989, в печати.
6. Раиба Э.И., Грибников З.С., Кравченко В.Я. УФН, 1976, 119, 3.
7. Песчанский В.Г. Преприят ФТИ-81-82, 1981, Донецк.
8. Копелиович А.И. ЖЭТФ, 1980, 78, 987.
9. Цой В.С., Разгонов И.И. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 107.
10. Колесниченко Ю.А., Песчанский В.Г., Цой В.С. ЖЭТФ, 1982, 82, 1464.