

## НАБЛЮДЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО ЗЕРКАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА

*В.В.Бондарев, В.А.Гаспаров*

Из исследований радиочастотного размерного эффекта на образцах вольфрама с зеркальной поверхностью впервые обнаружены линии, обусловленные циклотронными орбитами возникающими в результате межлентных перебросов скользящих электронов при многоканальном зеркальном отражении, предсказанные ранее Песчанским и Ясемидисом<sup>1, 2</sup>.

В слабом магнитном поле  $\mathbf{B}$  параллельном почти зеркальной поверхности металла аномальный скин-эффект определяется скользящими электронами проводимости, которые сталкиваются с поверхностью под малыми углами  $\varphi$  с сохранением тангенциальной компоненты волнового вектора:  $\mathbf{k}_{\parallel} = \mathbf{k}_{\parallel}^{\text{о.т.}} \mp eB\delta / \hbar c$  ( $e$  – заряд электрона,  $c$  – скорость света,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\delta$  – глубина скин-слоя, знак “–” или “+” зависит от знака кривизны опорной точки с компонентой радиус-вектора  $\mathbf{k}_{\parallel}^{\text{о.т.}}$  сечения поверхности Ферми (ПФ). Таким носителям соответствуют, например, скользящие дырки октаэдра в  $H$  в  $W^3$  (рис. 1), испытывающие отражения из  $A$  в  $B$  определяемые прямой  $\mathbf{k}_{\parallel} = \text{const}$  параллельной нормали  $\mathbf{n}$ . При этом возможны также многоканальные перебросы<sup>4–8</sup>, например, из  $A$  в  $C$  с вероятностью пропорциональной  $\varphi$ :  $P_{AC} = \alpha_{AC}(k_{\parallel}/v_A(k_{\parallel}))v_C(k_{\parallel}) = b_{AC}\varphi$  ( $\alpha_{AC}(k_{\parallel}) \neq 0$  зависит от волновых функций электронов в  $A$  и  $C$ , а  $v_A$  и  $v_C$  – нормальные компоненты скорости в  $A$  и  $C$ , соответственно)<sup>7</sup>. Несмотря на малость  $P_{AC}$ , вероятность покинуть скин-слой за время пробега  $\tau$  не мала:  $b_{AC}\Omega\tau$ , и не зависит от  $\varphi$ , так как велика частота столкновений с поверхностью  $\Omega/\varphi$  ( $\Omega$  – циклотронная частота)<sup>2</sup>.

Двигаясь из  $C$  по электронной орбите носители заряда, набравшие энергию в скин-слое, создают всплеск электромагнитного поля в глубине плоскопараллельной пластинки толщиной  $d$ , выход которого на поверхность в поле  $B_0 = \hbar\Delta k_{\parallel} c/ed$ , приводит к возникновению

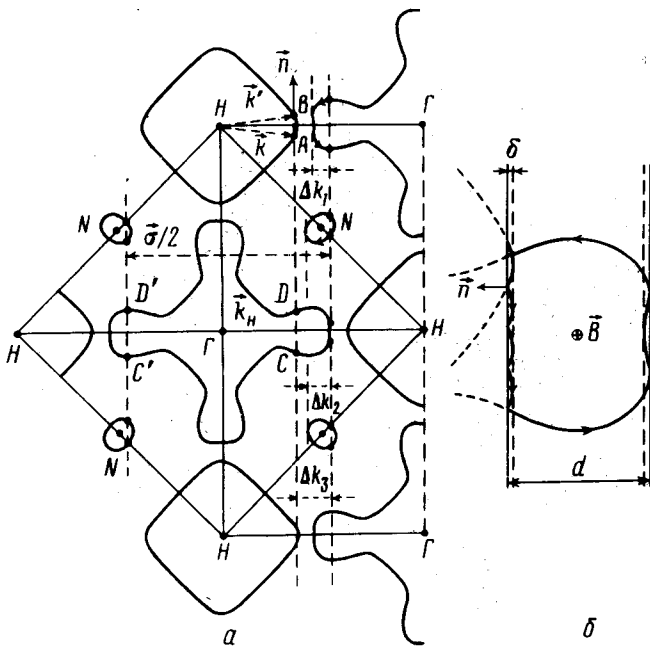


Рис. 1. Центральное сечение ПФВ<sup>3</sup> при  $B \parallel < 100 >$  (а) и траектории электронов и дырок в координатном пространстве – (б)

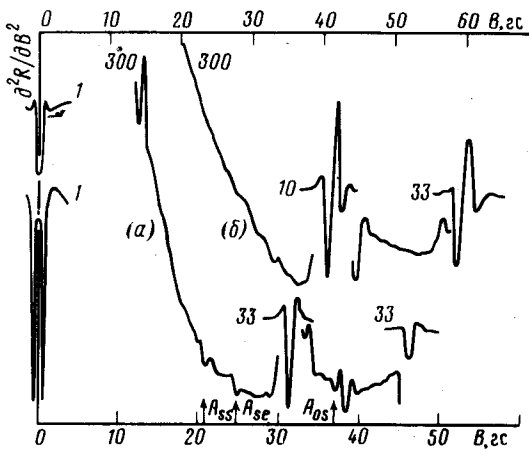


Рис. 2

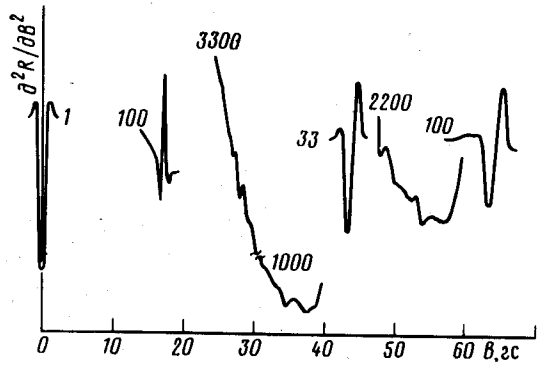


Рис. 3

Рис. 2. Записи линий РРЭ при  $B \parallel < 100 >$ ,  $T = 1,35$  К,  $\omega/2\pi = 2,7$  МГц, на образцах с зеркальной (а;  $d = 0,61$  мм; нижняя шкала  $B$ ) и диффузной (б;  $d = 0,46$  мм, верхняя шкала  $B$ ) поверхностью

Рис. 3. Запись линий РРЭ на образце W, у которого одна сторона зеркальна, а другая диффузна, при  $B \parallel < 100 >$ ,  $d = 0,43$  мм,  $\omega/2\pi = 1,9$  МГц,  $T = 1,35$  К. Числами указана величина коэффициента усиления прибора по сравнению с записью нулевой линии

новой линии РРЭ, определяемой экстремальной по всем  $k_z$  разницей  $\Delta k_{\parallel} = k_{\parallel}^g - k_{\parallel}^s$ . Если предположить, что электронный сфероид несколько вогнут вдоль  $GH$ , то возможны также линии РРЭ, обусловленные перебросами скользящих электронов сфероид на дырочный эллипсоид или на сфероид в соседней зоне Бриллюэна. Как видно из рис. 1 имеется целый ряд других возможных каналов рассеяния, но соответствующие им линии РРЭ накладываются на линии РРЭ от сечений с экстремумом диаметра  $2k_F$  или соответствующих им цепочек орбит, что затрудняет их идентификацию.

Так как конечное состояние  $k_{\parallel}' = k_{\parallel} \pm g$  определено с точностью до вектора обратной поверхностной решетки  $g$ <sup>5, 8</sup>, то отражение от (100) поверхности  $W$ , может происходить с изменением  $k_{\parallel}$  на половину вектора объемной зоны Бриллюэна  $g = G/2$ , так как эта поверхность реконструируется в структуру  $c$  ( $2 \times 2$ ) при  $T < 400$  К<sup>9, 10</sup>. Анализ показывает, что такое многоканальное отражение эквивалентно рассмотренному (см. рис. 1).

Эксперименты проводились на установке<sup>11</sup>, на образцах  $W$ , приготовленных по методике аналогичной<sup>3</sup> из монокристаллического слитка с отношением электросопротивлений  $\rho_{300K} / \rho_{4,2K} \approx 7 \cdot 10^4$ , помещенных в жидкий гелий. Нормаль к поверхности  $n$  устанавливалась на установке ДРОН-1 вдоль  $\langle 100 \rangle$  с точностью  $\pm 10'$ . После химического травления<sup>3</sup> образец вклеивался проводящим клеем в кольцо  $W$  и электролитически полировался в 1%-ном растворе NaOH в  $H_2O$ . В исследованном интервале  $B$  коэффициент зеркальности  $p$  на таких образцах зависел от  $\varphi$  и изменялся в пределах:  $0,8 \geq p \geq 0,6$ <sup>12, 13</sup>.

На рис. 2 представлены примеры записи второй производной активной части поверхностного импеданса по магнитному полю  $\partial^2 R / \partial B^2$  на образце с зеркальной поверхностью и на том же образце подвергнутом дополнительной шлифовке и химическому травлению — диффузная поверхность. Основные линии РРЭ обусловлены экстремальными орбитами перешейка  $x_1$  и двух сечений дырочных эллипсоидов  $d_4^0$  и  $d_{1,2}^0$ , в соответствии с<sup>3</sup>.

На образце с зеркальной поверхностью обнаружены две новые линии в поле 19,6 и 36 Гс, не наблюдавшиеся ранее<sup>3</sup>. Несмотря на то, что амплитуда обычных линий РРЭ на диффузном образце примерно в пять раз больше, новые линии на этом образце также не наблюдаются. Выдерживание образцов на воздухе приводило к исчезновению этих линий. К такому же результату приводил поворот  $B$  от  $\langle 100 \rangle$  на несколько градусов. Изменение частоты  $\omega$  не влияло на положение линий. Из рис. 3. видно, что на более тонком образце новые линии смещаются вместе с основными линиями в область больших полей в меру изменения  $d$ , что позволяет считать их размерными.

Стрелками на рис. 2 показаны ожидаемые положения линий РРЭ обусловленных перебросами сфероид-сфероид  $A_{ss}$ , сфероид-эллипсоид  $A_{se}$  и дырочный октаэдр-сфероид  $A_{os}$ , вычисленные по размерам ПФ из<sup>3</sup>. Видно хорошее согласие положения линии  $A_{os}$  с наблюдаемым. Линию  $A_{se}$  нельзя идентифицировать, так как она совпадает по положению с двойной цепочкой орбит перешейка ( $2x_1$ ). Некоторое несоответствие в положении линии  $A_{ss}$  обусловлено, по-видимому, вогнутостью торца сфероида вдоль  $ГН$ . Величина вогнутости столь мала ( $0,011 \text{ \AA}^{-1}$ ), что не могла быть определена ранее<sup>3</sup>.

Отношение амплитуд перебросных линий и линий от экстремальных сечений равно  $b^2$ , что дает оценку  $b_{os} \approx 0,04$  и соответственно  $P_{os} = 0,005$ . Вероятно с малостью  $P_{os}$  связано то обстоятельство, что в экспериментах по электронной фокусировке в  $W$  перебросы не наблюдались<sup>14</sup>. Вместе с тем сообщалось о наблюдении междолинных перебросов с изменением  $k_{\parallel}$  в  $W$  с помощью этого метода и о влиянии перебросов на магнитосопротивление  $W$  (см. в<sup>8</sup>). Возможно, что это противоречие связано с анизотропией  $\alpha_{ij}(k_{\parallel})$ . Мы надеемся, что дальнейшие эксперименты по РРЭ при различных  $B$  и  $n$ , а также при различных состояниях поверхности, позволят исследовать зависимость  $\alpha_{ij}(k_{\parallel})$ .

Авторы благодарны В.Ф.Гантмахеру, Э.А.Канеру, М.А.Лурье, Н.М.Макарову, В.И.Окулову, В.Г.Песчанскому, В.Е.Старцеву и В.В.Устинову за полезные обсуждения результатов, а также С.В.Плющевой за предоставление слитка сверхчистого  $W$ .

#### Литература

1. Песчанский В.Г., Ясемидис К. ФНТ, 1980, 6, 541.
2. Песчанский В.Г., Карденас В., Лурье М.А., Ясемидис К. ЖЭТФ, 1981, 80, 1645.
3. Бойко В.В., Гаспаров В.А. ЖЭТФ, 1971, 61, 2362.
4. Price P.J. IBM Journ. Res. Develop., 1960, 4, 152.

5. Андреев А.Ф. УФН, 1971, 105, 113.

6. More R.M. Phys. Rev. B., 1974, 9, 392.

7. Устинов В. В. ФММ, 1981, 52, 709.

8. Гантмахер В.Ф., Левинсон И.Б. Поверхность. Физика, химия, механика, 1982, 9, 25.

8. Debe M.K., King D.A. J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1977, 10, L303.

10. Felner T.E., Barker R.A., Estrup P.J. Phys. Rev. Lett., 1977, 38, 1138.

11. Гаспаров В.А., Митряев А.А. ЖЭТФ, 1979, 77, 1167.

12. Гаспаров В.А., Бондарев В.В. Тезисы докладов международной конференции. Электродинамика межфазной границы. Квантовые эффекты в адсорбированных слоях и пленках. Телави 1984, стр. 103.

13. Бондарев В.В., Гаспаров В.А., Лурье М.А., Песчанский В.Г. Поверхность. Физика, химия, механика. (в печати).

14. Разгонов И.И., Цой В.С. ЖЭТФ, 1978, 74, 1137.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
4 января 1985 г