

## ОСОБЕННОСТИ НЕУПРУГОЙ ДИФРАКЦИИ МЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПОВЕРХНОСТИ (111) СУРЬМЫ

А.А. Москалев, В.С. Цой

Впервые наблюдается сужение рефлекса неупругой дифракции медленных электронов (НДМЭ) относительно соответствующего рефлекса упругой дифракции медленных электронов (УДМЭ). Сужение резонансно по энергии электронов. Направления упругого и неупругого дифракционных пучков совпадают. Объяснение наблюдаемых особенностей основывается на резонансном захвате падающего электрона в поверхностное состояние <sup>1</sup>.

Хорошо известно, что угловое распределение неупруго отраженных от поверхности твердого тела электронов с малой потерей энергии ( $\lesssim 50$  эВ) имеет резко немонотонный характер, напоминающий картину УДМЭ (см., например, <sup>2</sup>). В данной работе приведен ряд результатов по измерению структуры рефлексов при УДМЭ и НДМЭ на поверхности сурьмы.

Измерения структуры рефлексов проводились с помощью высокоскоростной управляемой от ЭВМ системы сбора и обработки данных по ДМЭ <sup>3</sup>, которая позволяла определять  $I(\theta, \varphi, E_T)$  – угловое распределение отраженных от поверхности электронов, имеющих энергию  $E > E_T$ ,  $\theta$  и  $\varphi$  – соответственно полярный и азимутальный углы. В отличие от ранее использованных установок система позволяла проводить экспрессный анализ углового распределения неупруго отраженных электронов в широком телесном угле. Угловое распределение восстанавливалось из анализа оптического изображения дифракционной картины на люминесцентном экране стандартного четырехрешеточного анализатора. Величина  $E_T$  определялась напряжением на задерживающей сетке. Экспериментальные данные представлены для величин:

$$I_3 = I(\theta, \varphi, E_p - \Delta_1), \quad I_{\Pi} = I\left(\theta, \varphi, E_p - E_{\Pi, \text{пл}} - \frac{\Delta_2}{2}\right) - I\left(\theta, \varphi, E_p - E_{\Pi, \text{пл}} + \frac{\Delta_2}{2}\right),$$

где  $E_p$  – энергия электронов падающего пучка,  $E_{\Pi, \text{пл}}$  – энергия поверхностного плазмона в сурьме,  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – заданные величины энергетических щелей, которые выбирались таким образом, чтобы  $I_3, I_{\Pi}$  соответствовали угловому распределению электронов, упруго отраженных от поверхности образца, и электронов, потерявших энергию  $E_{\Pi, \text{пл}}$ , при достаточно высоком отношении сигнал/шум. Из величин  $I_3, I_{\Pi}$  вычтена плавно меняющаяся при изменении  $\theta, \varphi$  компонента фона. Использовалась сверхвысоковакуумная установка фирмы "Рибер", оборудованная дифрактометром медленных электронов, оже- и масс-спектрометрами, камерой подготовки образца. Исследуемая поверхность получалась сколом, очищалась прогревом, рабочее давление в камере  $\sim 10^{-9}$  торр (подробнее см. <sup>3</sup>).

Проведенные ранее исследования показали (см., например, <sup>4</sup> и цитированную там литературу), что особенности НДМЭ удается описать в рамках двуступенчатой модели – упругая дифракция плюс неупругие потери до (после) дифракции. НДМЭ имеет место вследствие сильной вытянутости дифференциального сечения рассеяния в направлении вперед. Используемая схема эксперимента имела ту специфику, что потери на рождение поверхностных плазмонов до дифракции были исключены законами сохранения энергии и тангенциальной компоненты импульса. Рис. 1 поясняет ситуацию. В терминах двуступенчатой модели возможные состояния при НДМЭ есть состояния  $P'_{\pm}$ , в которые электрон переходит из состояний  $P_{\pm}$ , излучив поверхностный плазмон с импульсом  $\pm P_{\Pi, \text{пл}}$ . Энергия объемного плазмона в сурьме равна 16 эВ <sup>5</sup>, соответственно энергия поверхностного плазмона равна 11 эВ. Смещение рефлекса НДМЭ относительно соответствующего рефлекса УДМЭ должно происходить в сторону зеркального пика и уменьшается с увеличением  $E_p$ . При малых  $E_p$  рассматриваемый канал диссипации энергии должен перекрыться, когда  $P_{\Pi, \text{пл}}$  (см. рис. 1) достигнет критической величины <sup>6</sup>. Именно эти особенности НДМЭ наблюдаются для различных рефлексов. Эк-

спериментальные данные для  $I_z, I_{\Pi}$  в окрестностях рефлексов (02), (03) при нормальном падении пучка электронов на поверхность приведены на рис. 2 – 3. При  $E_p \lesssim 80$  эВ рефлексы НДМЭ отсутствуют, в интервале значений  $E_p \approx 100 \div 200$  эВ имеет место существенное различие в положении рефлексов УДМЭ и НДМЭ, что иллюстрирует рис. 2 (правые рефлексы НДМЭ). При больших энергиях НДМЭ имеет место, однако положение рефлексов НДМЭ и УДМЭ практически совпадает. При  $E_p = 306$  эВ (рис. 3) отличия в пространственном направлении для рефлексов УДМЭ и НДМЭ не наблюдается, но имеет место значительное сужение рефлекса НДМЭ по сравнению с аналогичным рефлексом УДМЭ.

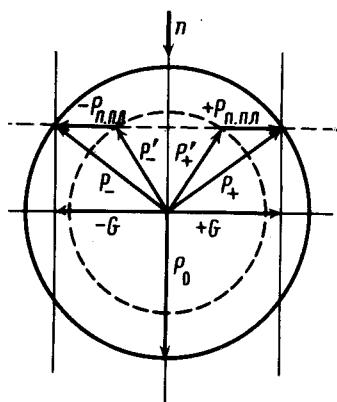


Рис. 1

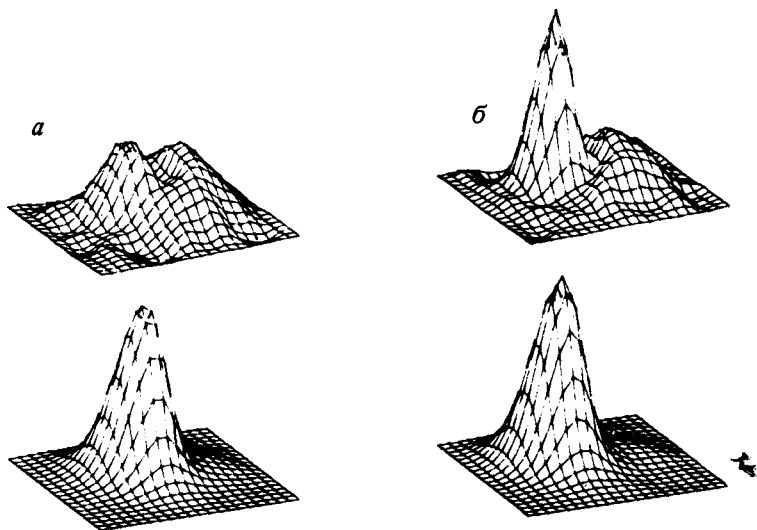


Рис. 2

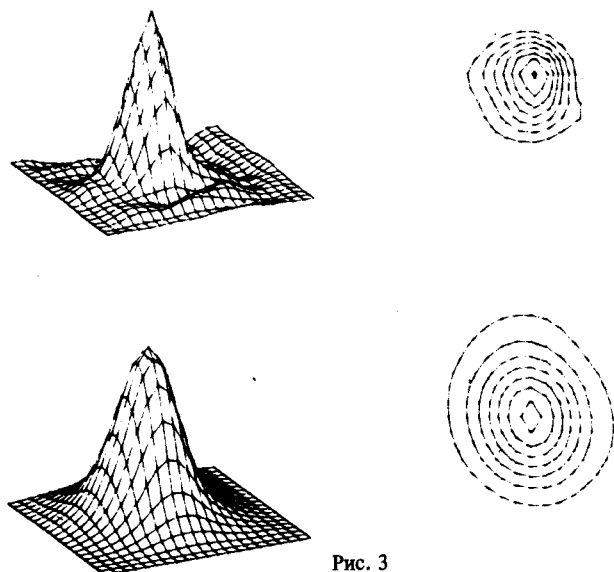


Рис. 3

Рис. 3. Структура (слева) и уровни равной интенсивности в проекции на плоскость образца при УДМЭ (внизу) и НДМЭ рефлекса (03). Вдоль вертикальной оси отложена интенсивность в произвольном масштабе (для рефлекса НДМЭ масштаб увеличен в 5 раз), вдоль горизонтальных осей отложена тангенциальная компонента волнового вектора отраженного электрона (одно деление соответствует  $0,08 \text{ \AA}^{-1}$ ), начало координат смещено вправо от рефлекса УДМЭ.  $\Delta_1 = \Delta_2/2 = 2$  эВ.

Рис. 1. Схема двуступенчатой НДМЭ.  $G$  – вектор обратной решетки поверхности,  $P_0$  – импульс падающих на поверхность электронов,  $P_{\pm}$  – импульсы дифрагированных электронов,  $n$  – нормаль к поверхности образца, окружности – изоэнергетические поверхности для энергий  $E_p$  и  $E_p - E_{\Pi, \text{пл}}$

Рис. 2. Структура рефлекса (02) УДМЭ (внизу) и НДМЭ. Вдоль вертикальной оси отложена интенсивность в произвольном масштабе (для рефлекса НДМЭ масштаб увеличен в 10 раз), вдоль горизонтальных осей отложена тангенциальная компонента волнового вектора отраженного электрона (одно деление соответствует  $0,05 \text{ \AA}^{-1}$ ), начало координат смещено вправо от рефлекса УДМЭ,  $\Delta_1 = \Delta_2/2 = 2$  эВ; а –  $E_p = 120$  эВ; б –  $E_p = 116$  эВ

Обращают на себя внимание две особенности НДМЭ. 1) Существование рефлекса НДМЭ, совпадающего по направлению с соответствующим рефлексом УДМЭ и имеющего сильную зависимость от  $E_p$  (рис. 2). 2) Значительно меньшая угловая ширина пика (03) НДМЭ по сравнению с пиком (03) УДМЭ (рис. 3).

Наблюденные особенности можно объяснить в рамках концепции электронного поверхностного резонанса <sup>1</sup>. При некоторых резонансных значениях  $E_p$  возможен захват падающего электрона в поверхностное состояние. Резонансное значение  $E_p$  достаточно точно определяется выражением:  $E_p = \epsilon_n + G^2/2m_e$ ,  $G$  — вектор обратной решетки поверхности,  $\epsilon_n$  — энергетический уровень поверхностного состояния,  $m_e$  — эффективная масса электрона. НДМЭ происходит по следующей схеме. Нормально падающий на поверхность электрон захватывается в состояние поверхностного резонанса, затем происходит излучение поверхностного плазмона и эмиссия электрона в вакуум. При этом более высокая вероятность эмиссии в направлении близком к направлению рефлекса УДМЭ (с малым изменением тангенциальной компоненты импульса, исключая изменение на вектор обратной решетки) обусловлена, в частности, высокой плотностью состояний плазмонов в окрестности нулевого импульса. В рамках предложенной модели сужение рефлекса НДМЭ обусловлено резонансным характером захвата в поверхностное состояние <sup>1</sup>, приводящим к эффективной монохроматизации и уменьшению угловой расходимости первичного пучка. Очевидно, что кроме предложенного резонансного, имеет место нерезонансное рассеяние, обусловленное электрон-электронным и электрон-фононным взаимодействием <sup>7</sup>, приводящее к нивелировке наблюдаемых особенностей НДМЭ.

#### Литература

1. *McRae E.G.* Rev. of Mod. Phys., 1979, 51, 541.
2. *Шульман А.Р., Фридрихов С.А.* Вторично-эмиссионные методы исследования поверхности твердого тела, 1977, М.: Наука.
3. *Москалев А.А., Цой В.С.* Поверхность, 1985, № 5, 52.
4. *Ohkawa Y., Nishida T., Nagase M., Ichinokawa T.* Journal of the Physical Society of Japan, 1985, 54, 282.
5. *Robins J.L.* Proc. Phys. Soc., 1962, 79, 119.
6. *Пайнс Д.* Элементарные возбуждения в твердых телах, 1965, М.: "Мир".
7. *Румянцев В.В.* ЖЭТФ, 1965, 49, 1126.