

- [1] Cava R. J., Batlogg B., Chen C. H., Rietman E. A., Zahurak S. M., Werder D. // *Phys. Rev. B.* 1987. V. 36. N 10. P. 5719—5722.
- [2] Johnston D. C., Jacobson A. J., Newsam J. M., Lewandowski J. T., Goshorn D. P. // *Proceedings of the Symposium, Am. Chem. Soc. Nat. Mtg. New Orleans, LA.* 1987. P. 373.
- [3] Александров И. В., Быков А. Б., Зибров И. П., Макаренко И. Н., Мельников О. К., Молчанов В. Н., Мурадян Л. А., Никифоров Д. В., Свистов Л. Е., Симонов В. И., Чигишов С. М., Шапиро А. Я., Стишов С. М. // *Письма в ЖЭТФ.* 1988. Т. 48. № 8. С. 449—452.
- [4] Александров И. В., Володин А. П., Макаренко И. Н., Свистов Л. Е., Стишов С. М. // *Письма в ЖЭТФ.* 1989. Т. 49. № 5. С. 287—289.
- [5] Kubo Y., Ichihashi T., Manako T., Baba K., Tabuchi J., Igarashi H. // *Phys. Rev. B.* 1988. V. 37. N 13. P. 7858—7860.
- [6] Молчанов В. Н., Мурадян Л. А., Симонов В. И. // *Письма в ЖЭТФ.* 1989. Т. 49. № 4. С. 222—226.
- [7] Chaillout C., Alario-Franco M. A., Capponi J. J., Chenavas J., Strobel P., Marcio M. // *Solid State Comm.*, 1988. V. 65. N 4. P. 283—286.
- [8] Котюжанский Б. Я., Свистов Л. Е. // *Письма в ЖЭТФ.* 1988. Т. 47. № 6. С. 317—320.
- [9] Lyubutin I. S., Terziev V. G., Smirnovskaya E. M., Shapiro A. Ya. // *Physica C.* 1990. V. 169. P. 361—370.

Институт кристаллографии АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
12 сентября 1990 г.
В окончательной редакции
29 ноября 1990 г.

УДК 537.533.8

© Физика твердого тела, том 33, № 6, 1991
Solid State Physics, vol. 33, N 6, 1991

ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРОВ ИСТИННО-ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ

С. В. Мурашов, В. П. Пронин, А. М. Тютиков, И. И. Хинич

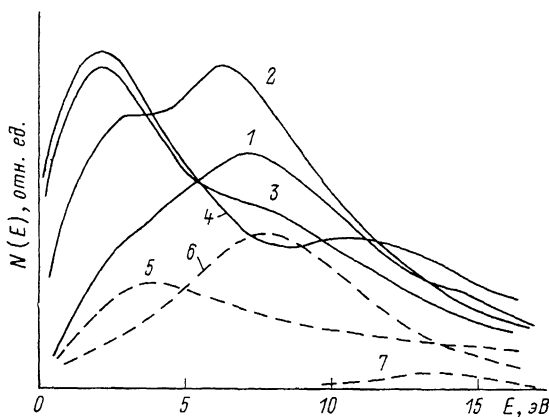
Исследование тонкой структуры (ТС) спектров истинно-вторичных электронов (ИВЭ) может дать ценную информацию об элементарных возбуждениях твердого тела и о механизмах генерации ИВЭ. Для металлов и полупроводников характерно сильное рассеяние ИВЭ на электронах проводимости, и в энергетическом спектре ИВЭ доминирует широкий «каскадный» максимум, вуалирующий особенности, соответствующие различным механизмам генерации. Вследствие этого наблюдение ТС спектра оказывается возможным только при измерениях спектров с угловым разрешением [1] и полученные данные не дают прямой информации о вкладе различных механизмов возбуждения ИВЭ. В диэлектриках основной механизм рассеяния вторичных электронов — фононный с малыми потерями энергии, что позволяет рассчитывать на проявление неискаженной ТС (даже на интегральных по углу отбора энергетических спектрах ИВЭ) и на возможность количественного определения доли вторичных электронов, соответствующих определенным механизмам генерации. Однако измерение энергетических спектров ИВЭ с диэлектриков осложняется зарядкой поверхности, что обычно приводит к их искажению.

Целью настоящей работы является разработка методики измерений ТС спектров ИВЭ диэлектриков, исключающей зарядку поверхности и получение данных о ТС интегральных спектров ИВЭ при энергиях первичных электронов E_p , при которых влиянием транспорта можно пренебречь.

Для измерения энергетических спектров ИВЭ диэлектриков использован прибор, состоящий из двухсеточного квазисферического анализатора, сочлененного с цилиндрическим монохроматором, подобный исполь-

званному в [2]. Возможность сбора вторичных электронов в телесном угле $\sim 130^\circ$ и использование в качестве коллектора ВЭУ, работающего в режиме счета электронов, позволяют снизить рабочую плотность тока первичных электронов до $j < 10^{-14}$ А/см², когда зарядка поверхности становится пренебрежимо малой. Разрешение прибора, определенное по пику упругоотраженных электронов от танталовой фольги, изменяется от 1.5 % при $E_p = 50$ эВ до 0.3 % при $E_p = 400$ эВ.

На рисунке представлены энергетические спектры ИВЭ фтористого лития (кривые 1, 2), хлористого натрия (3) и стеклообразного кварца (4) при нормальном угле падения первичных электронов. На этих спектрах четко наблюдаются особенности при энергиях $E_1 \sim 2$, $E_2 \sim 6 \div 7$ эВ для LiF и NaCl и 11 эВ для кварца (энергии E отсчитывались от уровня вакуума, который определялся по энергии пика упругоотраженных электронов). Двойное дифференцирование спектра ИВЭ для LiF позволило также выделить особенность при $E_3 \sim 12$ эВ. Низкоэнергетичный пик, по-видимому, соответствует электронам, возбужденным в основном в резуль-



Спектры истинно-вторичных электронов при различных E_p для LiF (1 — 40, 2 — 120 эВ), NaCl (3 — 24 эВ), кварца (4 — 30 эВ) и нормальном угле падения первичных электронов и пример разложения спектров ИВЭ LiF на составляющие (5 — E_1 , 6 — E_2 , 7 — E_3) при $E_p = 40$ эВ.

тате ионизации и каскадного процесса, второй пик определяется генерацией и распадом объемных плазмонов, а третий пик — переходом в особые точки зоны проводимости [3]. Плазменная природа второго пика подтверждается его пороговым появлением при E_p , превышающей энергию плазмонов $\hbar\omega_{p1} = 24.8$ эВ для LiF, 15.7 эВ для NaCl [4] и 22.5 для SiO₂ [5], согласуется с предположениями [3], высказанными при анализе спектров фотоэлектронов и с расчетом его положения. Действительно, из закона сохранения энергии и импульса при распаде плазмона на электрон-дырочную пару в пренебрежении квазиимпульсом плазмона получаем

$$E_2 = [m_v / (m_v + m_e)] (\hbar\omega_{p1} - E_g) - \chi, \quad (1)$$

где m_v , m_e — эффективные массы дырки и электрона, E_g — ширина запрещенной зоны, χ — сродство к электрону. При $\chi \sim 1$ эВ и $E_g = 13.6$ эВ для LiF, 8.6 эВ для NaCl [4], 10 эВ для SiO₂ [5] значения E_2 , рассчитанные по (1), соответствуют эксперименту при $m_v / (m_v + m_e) = 0.7$ для LiF и 1.0 для NaCl и SiO₂, что согласуется с данными об энергетической структуре этих веществ [4]. Плазменный пик для NaCl и SiO₂ выражен слабее, чем для LiF. Это объясняется тем, что в NaCl и SiO₂ энергия электронов E_2 близка к E_g и возможно их рассеяние на электронах валентной зоны.

Для разделения спектра ИВЭ LiF на составляющие (с целью определения вклада каждой из групп электронов) использовалась методика,

предложенная в [6]. Группы электронов E_2 и E_3 могут быть описаны симметричными функциями Гаусса—Лоренца

$$f(E) = f_{2,3}(E) = 1/\{[1 + M \cdot (E - E_c)^2/H^2] \times \exp[(1 - M) \cdot \ln 2 \cdot (E - E_c)^2/H^2]\}, \quad (2)$$

где E_c — положение центра пика; H — параметр, характеризующий полуширину пика на полувысоте; M определяет степень смешивания и равен единице для чистой функции Лоренца и нулю для функции Гаусса. Спектр же электронов E_1 должен иметь существенно несимметричный вид, определяемый характером e - e рассеяния.

Функцию, описывающую такой спектр, можно представить в виде

$$f_1(E) = f(E) + [1 - f(E)] \cdot \{TM \cdot CT + (1 - TM) \cdot \exp[(E - E_1) \cdot ET]\}, \quad (3)$$

где искажение пика учитывается параметрами CT , ET и TM . В предложенной модели разложения суммарное распределение ИВЭ

$$N(E) = [f_1(E) \cdot A_1 + f_2(E) \cdot A_2 + f_3(E) \cdot A_3] \cdot [1 - \sqrt{\chi/(E + \chi)}], \quad (4)$$

где A_1 , A_2 , A_3 — амплитуды соответствующих пиков, $[1 - \sqrt{\chi/(E + \chi)}]$ — «функция выхода» [7].

Подбор всех параметров функции осуществлялся ЭВМ, при этом амплитуды пиков подбирались методом дихотомии, а все остальные параметры определялись методом спирального координатного спуска [8]. На рисунке приведены результаты такого разложения спектров ИВЭ LiF при $E_p = 40$ эВ (кривые 5—7). Суммы квадратов отклонений синтезированных спектров от исходных $< 2\%$. Анализ этих разложений показывает, что в исследованной области $E_p < 120$ эВ число электронов, возбужденных при распаде объемных плазмонов, достигает 65% от их общего числа. Удельный вес третьего пика не превышает 5%.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Артамонов О. М., Виноградов А. Г., Терехов А. Н. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 3. С. 702—705.
- [2] Huchital D. A., Rigden J. D. // Appl. Phys. Lett. 1970. V. 16. N 9. P. 348—351; J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 5. P. 2291—2302.
- [3] Burton L. Henke, John Liesegang, Steven D. Smith // Phys. Rev. B. 1979. V. 19. N 6. P. 3004—3021.
- [4] Лущик Ч. Б., Лущик А. Ч. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М.: Наука, 1989. 262 с.
- [5] Griscom D. L. // J. Non-Crystalline Solides. 1977. V. 24. N 2. P. 155—234.
- [6] Бриггс Д., Сих М. П. Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. М.: Мир, 1987. 598 с.
- [7] Шульман А. Р., Фридрихов С. А. Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела. М.: Наука, 1977. 551 с.
- [8] Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. 240 с.

Государственный оптический институт
им. С. И. Вавилова
Ленинград

Поступило в Редакцию
16 июля 1990 г.
В окончательной редакции
3 декабря 1991 г.