

05; 10; 11

© 1992

СПЕКТР ОДНОКРАТНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ  
ЭЛЕКТРОНОВ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУЛЛЕРЕНА  $C_{60}$ 

В.И. Рубцов, Ю.М. Шулга

В настоящее время известен уже ряд работ по исследованию электронной структуры твердых тел на основе бакминстер-фуллеренов методами спектроскопии потерь энергии электронов [1-7]. Однако данные разных авторов о положении и числе максимумов на спектре различаются и часто являются довольно противоречивыми. Так, для положения основного максимума, обусловленного возбуждением  $(\sigma + \pi)$ -плазмона, приводятся значения 29.2 эВ [1]; 27.6 эВ [2, 3]; 26 эВ [4] и 25.5 эВ [5, 6]. В области потерь на возбуждение  $\pi$ -плазмона авторы работы [2] отмечают 5 максимумов, тогда как в работе [4] приводится только одно значение для энергии  $\pi$ -плазмона, равное 6.5 эВ. Причиной отмеченных несовпадений может быть то, что в перечисленных работах изучались разные объекты, хотя их основа одна и та же - молекула  $C_{60}$ . Другой причиной расхождений может быть вклад многократного рассеяния электронов, который искажает форму спектра и эффективно смещает положения максимумов. При исследовании спектров потерь, сопровождающих фотоэлектронный пик *Cis* [2, 3, 7], заметный вклад могут давать потери, происходящие одновременно с возникновением вакансии на внутреннем электронном уровне вследствие фотоионизации (внутренние потери).

Цель настоящей работы - получить спектр однократных потерь энергии электронов для поликристаллического  $C_{60}$ , который можно сопоставлять с функцией потерь, полученной из независимых экспериментов или теоретических расчетов электронной структуры бакминстер-фуллерена  $C_{60}$ .

Методика синтеза и очистки  $C_{60}$  от примеси других фуллеренов была описана в работе [7]. Поликристаллическое покрытие с содержанием  $C_{60}$  не менее 99% наносилось на алюминиевую подложку и имело эффективную толщину 0.1-0.9 мкм.

Для сравнения измерялись также спектры потерь графита, образцы которого для съемки готовили путем прессования поликристаллических порошков. Предполагается, что при такой подготовке не существует преимущественной ориентации кристаллов в зоне анализа.

Электронные спектры измерялись на спектрометре РН1-551, оснащенный анализатором типа двойного цилиндрического зеркала с приставкой для угловых измерений и с коаксиальной анализатору электронной пушкой. Анализатор использовался в режиме задержи-

важущего потенциала с абсолютным разрешением 0.7 эВ. Пучок первичных электронов имел энергию 2000 эВ и полуширину энергетического распределения 0.5 эВ. Угол падения первичных электронов составлял  $42^\circ$  относительно внешней нормали к поверхности, регистрация вторичных электронов велась под прямым углом к поверхности, разрешение по углам составляло  $8^\circ$ . Давление остаточных газов в измерительной камере не превышало  $3 \cdot 10^{-10}$  Тор.

Измеренные спектры корректировались на зависимость коэффициента пропускания анализатора от кинетической энергии анализируемых электронов. Спектры однократных потерь  $y(E)$  определялись из решения интегрального уравнения [8];

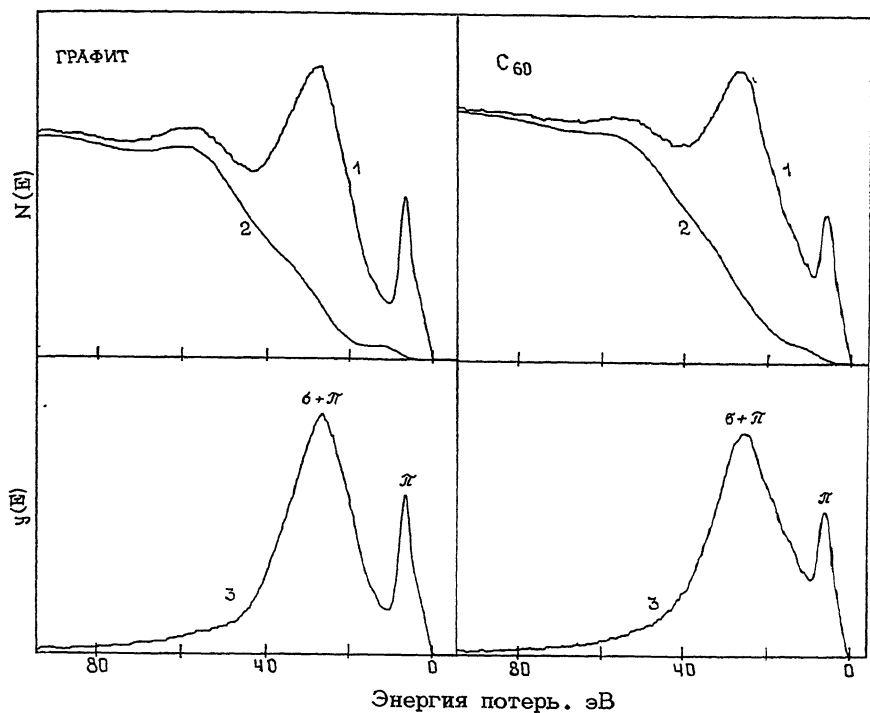
$$N^{in}(E) - ky(E) * N^{in}(E) = ky(E), \quad (1)$$

где  $*$  означает свертку по энергии,  $N^{in}(E)$  - неупругая часть спектра потерь энергии электронов, нормированная на площадь под упругим пиком,  $k$  - фактор, учитывающий геометрию эксперимента по отражению электронов. Методика разделения спектров характеристических потерь на квазиупругую и неупругую части, а также учет влияния аппаратной функции спектрометра аналогичны описанным в работе [9].

Экспериментальные спектры потерь  $N(E)$  и спектры однократных потерь  $y(E)$  для графита и  $C_{60}$  приведены на рисунке. Видно, что спектры обоих веществ имеют два основных максимума, которые обусловлены возбуждением плазменных колебаний всех валентных электронов ( $\sigma + \pi$ -плазмон), и отдельно -  $\pi$ -подсистемы ( $\pi$ -плазмон). Максимумы спектра для  $C_{60}$  находятся при 25.2 и 5.6 эВ, а для графита - при 26.6 и 6.6 эВ. Положения максимумов для графита согласуются с литературными данными [8, 10-15]. В то же время значения для  $C_{60}$  близки к полученным в экспериментах по прохождению электронов высоких энергий (100-200 кэВ) через тонкие слои  $C_{60}$  [4-6], и отличаются от значений, полученных при исследовании спектра отраженных электронов (без вычитания фона многократного рассеяния) [1] и спутанной структуры рентгеновских фотоэлектронных спектров *Cis* [2, 3].

Как видно из рисунка и приведенных цифр, положение максимума ( $\sigma + \pi$ ) на спектре потерь для  $C_{60}$  несколько ниже энергии ( $\sigma + \pi$ )-плазмона для графита. Однако значение 25.2 эВ для этого максимума не отражает значительно более низкую объемную плотность твердого  $C_{60}$  ( $1.65 \text{ г/см}^3$  [16] по сравнению с  $2.25 \text{ г/см}^3$  для графита), что согласуется с выводами работ [5, 7].

Отличие спектров однократных потерь  $C_{60}$  от спектров графита заключается не только в сдвиге основных максимумов в сторону более низких потерь: в области между основными максимумами в) случае  $C_{60}$  наблюдается более высокая интенсивность потерь. Это согласуется с результатами теоретических расчетов функции электромагнитного отклика для кластера  $C_{60}$  [17], где отмечается



Экспериментальные спектры потерь (1) и спектры однократных потерь (3) для поликристаллических образцов графита и  $C_{60}$ : (2) — линия, отделяющая спектр однократных потерь от фона многократного рассеяния,  $E_p = 2$  кэВ.

наличие широкой полосы переходов в „промежуточном” энергетическом диапазоне  $\hbar\omega = 10-20$  эВ.

На спектре однократных потерь  $C_{60}$  можно выделить и другие особенности, интенсивности которых малы по сравнению с основными пиками. Сравнивая спектр на рисунке со спектром потерь, сопровождающим рентгеновский фотоэлектронный спектр *Cis* [2], можно сделать вывод о том, что четыре пика в диапазоне 1–5 эВ, обнаруженные авторами работы [2] вблизи фотоэлектронного пика *Cis*, видимо, являются следствием внутренних потерь, которые происходят одновременно с ионизацией внутреннего *i5*-уровня. При возбуждении спектра потерь внешними по отношению к рассеивающей среде электронами такие процессы также могут иметь место, но их вклад в измеряемый спектр сравнительно мал и на спектре практически не обнаруживается.

- [1] T o n g W.M., O h l b e r g D.A.A.,  
Y o u H.K. et al. // J. Phys. Chem. 1991. V. 95.  
N 12. P. 4709-4712.
- [2] W e a v e r J.H., M a r t i n s J.L., К о -  
m e d a T. et al. // Phys. Rev. Lett. 1991.  
V. 66. N 13. P. 1741-1744.
- [3] J o s t M.B., T r o u l l i e r N., P o i r i -  
e r D.M. et al. // Phys. Rev. B. 1991. V. 44.  
N 4. P. 1966-1971.
- [4] S a i t o Y., S h i n o h a r a H., O h s h i -  
t a A. // Jap. J. Appl. Phys. A. 1991.V. 30.  
N 6. P. L1068-L1071.
- [5] H a n s e n P.L., F a l l o n P.J., K r a t s -  
c h m e r W. // Chem. Phys. Lett. 1991. V. 181.  
N 1. P. 367-370.
- [6] D a v i d V.P., L i n S., К а р р е s M.M. //  
Chem. Phys. Lett. 1991. V. 185. N 1,2.  
P. 75-81.
- [7] Ш у л ь г а Ю.М., М о р а в с к и й А.П., Л о б а ч А.С.,  
Р у б ц о в В.И. // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. В. 2.  
С. 137-140.
- [8] М и х а й л о в Г.М., Р у б ц о в В.И. // Поверхность.  
1987. В. 7. С. 99-105.
- [9] М и х а й л о в Г.М., Б о р о д ь к о Ю.Г. // Поверхность.  
1982. № 6. С. 85-90.
- [10] T a f t E.A., P h i l i p p H.R. // Phys. Rev.  
1965. V. 138. N 1A. P. 197-202.
- [11] C a p u t i L.S., P a r a g n o L. // Phys.  
Lett. A. 1983. V. 93. N 8. P. 417-419.
- [12] C a p u t i L.S., C h i a r e l l o S., S a n -  
t a n i e l l o A. et al. // Phys. Rev. B. V. 34.  
N 9. P. 6080-6085.
- [13] H s i a o - c h a T s a i, B o d i D.B. // J.  
Vac. Sci. Technol. A. 1987. V. 5. N 6. P. 3287-3312.
- [14] B e r g e r S.D., M c K e n z i e D.R., M a r -  
t i n P.J. // Phil. Mag. Lett. 1988. V. 57. N 5.  
P. 285-287.
- [15] M a r t i n P.J., F i l l i p c z u k S.W., N e t -  
t e r f i e l d R.P. et al. // J. Matter. Sci. Lett.  
1988. V. 7. N 4. P. 410-412.
- [16] K r a t s c h m e r W., L a m b L.D., F o s -  
t i r o p o u l o s K., H u f f m a n D.R. //  
Nature. 1990. V. 347. P. 354-356.
- [17] B e r t s c h G.F., B u l g a c A., T o m a -  
n e k D., W a n g Y. // Phys. Rev. Lett. 1991.  
V. 67. N 19. P. 2690-2693.

П о с т у п и л о в Р е д а к ц и ю  
4 а п р е л я 1992 г.