

- [1] Gartner W. — Phys. Rev., 1957, v. 105, N 3, p. 823—829.  
 [2] Равич Ю. И. Фотомагнитный эффект в полупроводниках и его применение. М., 1967. 96 с.  
 [3] Lile D. L. — Phys. Rev. B: Sol. St., 1973, v. 8, N 10, p. 4708—4722.  
 [4] Berndt P., Genezow D., Herman K. H. — Phys. St. Sol. (a), 1976, v. 38, N 2, p. 497—503.  
 [5] Гасан-заде С. Г., Орлецкий В. Б., Прокопчук Л. Ф., Сальков Е. А., Шепельский Г. А. — ФТП, 1976, т. 9, в. 12, с. 2370—2375.  
 [6] Горчаков А. П., Зарифьянц Ю. А., Знаменский И. В. — ФТП, 1982, т. 16, в. 1, с. 134—135.  
 [7] Eintage P. R. — J. Appl. Phys., 1976, v. 47, N 6, p. 2565—2568.  
 [8] Бир Г. Л. — ФТТ, 1959, т. 1, в. 1, с. 67—76.

Институт физики полупроводников  
 СО АН СССР  
 Новосибирск

Получено 6.05.1987  
 Принято к печати 14.12.1987

ФТП, том 22, вып. 7, 1988

## ЭЛЕКТРООТРАЖЕНИЕ АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО УГЛЕРОДА

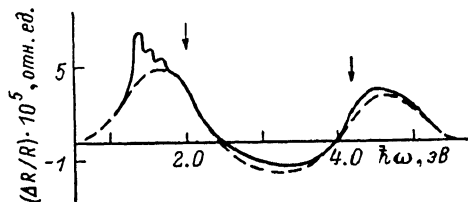
Гавриленко В. И., Клюй Н. И., Литовченко В. Г.,  
 Стрельницкий В. Е.

Исследование электронной энергетической структуры (ЭЭС) аморфного гидрогенизированного углерода ( $a\text{-C}:\text{H}$ ) представляет интерес как с точки зрения понимания процессов фазово-структурных превращений, так и с целью выяснения возможностей получения материалов с особыми свойствами [1]. Перспективным для исследования такого материала является метод электроотражения (ЭО), обладающий высокими чувствительностью и спектральным разрешением, что позволяет фиксировать уже небольшие изменения ЭЭС исследуемого материала [2]. В настоящей работе методом ЭО исследована ЭЭС аморфного гидрогенизированного углерода ( $a\text{-C}:\text{H}$ ), полученного осаждением потока низкоэнергетических частиц. Образец подвергался гидрогенизации в процессе получения. Плотность полученной пленки  $D=2.2$  г/см<sup>3</sup>, электросопротивление  $\rho=10^8$  Ом·см, толщина  $d=1.6$  мкм. Спектр ЭО  $a\text{-C}:\text{H}$  измерялся в неполяризованном свете в спектральном интервале  $1.0\div 5.6$  эВ по стандартной электролитической методике [2] при комнатной температуре. Полученный спектр приведен на рисунке. Наблюдаемая в ИК области осциллирующая структура обусловлена, по-видимому, интерференцией света в пленке  $a\text{-C}:\text{H}$ . В соответствии со стандартной процедурой разложения сложных спектров ЭО на элементарные полосы [3, 4] данный спектр может быть описан с помощью соотношения

$$\Delta R/R = \text{Re} \sum_j C_j (\alpha + i\beta) e^{i\varphi_j} (\hbar\omega - E_j + i\Gamma_j)^{-m_j}, \quad (1)$$

где  $E_j$  и  $\Gamma_j$  — энергия и лоренцевский параметр уширения  $j$ -го перехода,  $\varphi_j$  — фаза, учитывающая наличие кулоновского взаимодействия,  $C_j$  — амплитуда, зависящая от матричного элемента перехода,  $\alpha$ ,  $\beta$  — парциальные коэффициенты, определяемые по дисперсионным зависимостям оптических констант,  $m_j$  — параметр, определяемый размерностью ЭЭС. Наблюдаемый спектр с достаточной точностью описывается с помощью двух осцилляторов, которые соответствуют энергетическим зазорам  $E_1$  и  $E_2$ , причем  $m_1=m_2=3$ , что соответствует двумерной ЭЭС. Значения остальных параметров переходов  $E_1$  и  $E_2$  соответственно равны:  $E_1=2.0$  эВ,  $\Gamma_1=1.3$  эВ,  $\varphi_1=1.8\pi$ ;  $E_2=4.2$  эВ,  $\Gamma_2=1.3$  эВ,  $\varphi_2=1.5\pi$ . Теоретическая кривая, соответствующая приведенным параметрам, изображена на рисунке штриховой линией.

Как следует из полученных данных, в  $a\text{-C}:\text{H}$  имеет место существенное отличие величин  $E_1$  и  $E_2$  от энергий оптических переходов между  $\pi$ -зонами в кристаллическом графите, а также от энергий оптических переходов в аморфном негидрогенизированном углероде [5-7]. Одним из принципиальных в данном случае является вопрос о величине запрещенного энергетического зазора  $\Delta E$  (возникающего в  $a\text{-C}$  вследствие того, что искажения атомной структуры слоев приводят к снятию вырождения  $\pi$ -электронов и к фазовому переходу в углероде типа полуметалл—полупроводник [8, 9]), т. е. совпадает ли  $\Delta E$  с измеренной с помощью ЭО энергией  $E_1=2.0$  эВ. В случае, если в  $a\text{-C}:\text{H}$   $\Delta E=E_1$ , можно ожидать значительно большую величину удельного сопротивления в гидрогенизированном образце ( $\rho_{a\text{-C}:\text{H}}$ ), чем в негидрогенизированном ( $\rho_{a\text{-C}}$ ). Кроме того, при этом в отличие от  $a\text{-C}$  должно отсутствовать поглощение света при  $\hbar\omega < 2.0$  эВ. Действительно, если учесть, что типичное значение  $\rho_{a\text{-C}}$  обычно составляет  $\sim 10^4\text{--}10^5$  Ом·см, величина  $\rho_{a\text{-C}:\text{H}}$  на 3—4 порядка превосходит



Спектр электроотражения  $a\text{-C}:\text{H}$ .

Сплошная линия — эксперимент, штриховая — теория. Стрелками указано энергетическое положение переходов  $E_1$  и  $E_2$ .

$\rho_{a\text{-C}}$  и достигает (при слабом поле)  $\sim 10^8$  Ом·см. С другой стороны, спектры ЭО могут быть измерены только в тех случаях, когда электрическое поле достигает в образце величин порядка  $10^4$  В/см, что возможно при условии  $\rho < 10^2$  Ом·см. Факт уверенной регистрации спектров ЭО на  $a\text{-C}:\text{H}$  означает, что при приложении внешнего электрического поля проводимость  $a\text{-C}:\text{H}$  резко возрастает. Подобный активационный характер проводимости является типичным для аморфных полупроводников [10]. Далее было проведено сопоставительное исследование спектров ИК поглощения в диапазоне  $\lambda=0.5\text{--}15$  мкм. С этой целью пленки  $a\text{-C}:\text{H}$  осаждались на подложки из чистого германия. Измерения показали, что в диапазоне  $\lambda=2\text{--}15$  мкм поглощение в  $a\text{-C}:\text{H}$  практически отсутствует, а при  $\lambda < 2$  мкм наблюдаются рост поглощения и резкое его возрастание при  $\lambda < 1$  мкм ( $\hbar\omega > 1.24$  эВ). Таким образом, энергия перехода  $E_1=2.0$  эВ в измеренном  $a\text{-C}:\text{H}$  близка к запрещенному энергетическому зазору, определяющему электрические свойства данного материала. Проявление перехода  $E_2 \sim 4.2$  эВ в  $a\text{-C}:\text{H}$ , близкого к энергии 4.8 эВ в кристаллическом графите, очевидно, свидетельствует о наличии ближнего порядка (т. е. о микрокристаллитной структуре) в этом материале.

В целом, однако, гидрогенизированный углеродный конденсат следует рассматривать как твердый раствор, т. е. материал, свойства которого могут существенно отличаться от микрокристаллитного (негидрогенизированного) углерода [10].

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Бакай А. С., Стрельницкий В. Е. Структурные и физические свойства углеродных конденсатов, полученных осаждением потоков быстрых частиц. Обзор. М., 1984. 87 с.
- [2] Гавриленко В. И., Грехов А. М., Литовченко В. Г. — В кн.: Квантовая электроника. Киев, 1984, № 26, с. 95—106.
- [3] Brown R. L., Schoonfeld L., Abels L. L., Sundaram S., Raccah P. M. — J. Appl. Phys., 1981, v. 52, N 4, p. 2950—2957.
- [4] Vina L., Cardona M. — Phys. Rev. B, 1984, v. 29, N 12, p. 6739—6751.
- [5] Painter G. S., Ellis D. E. — Phys. Rev. B, 1970, v. 1, N 12, p. 4741—4752.
- [6] Taft E. A., Phillip H. R. — Phys. Rev., 1965, v. 138, N 1A, p. 197—200.
- [7] Staryga E., Lipinski A., Mittra S., Has Z. — Thin Sol. Films, 1986, v. 145, N 1, p. 17—22.
- [8] Levy-Mannheim C., Mering J. — Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris), Ser. B, 1966, p. 1033—1038.
- [9] Grigorovici R., Devenyi A., Gheorgiu A., Belu A. — J. Non-Cryst. Sol., 1972, v. 8-10, p. 793—797.
- [10] Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М., 1982. 419 с.