

## УНИВЕРСАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПЛОТНОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В СТЕКЛАХ

М.Г.Землянов, В.К.Малиновский, В.Н.Новиков,  
П.П.Паршин, А.П.Соколов

Методом неупругого рассеяния холодных нейтронов определена плотность колебательных состояний (ПКС) стеклообразных материалов разного химического состава. Обнаружено, что в низкоэнергетической области спектра ПКС имеет универсальный, хотя и не дебаевский вид в разных стеклообразных материалах.

Одним из важных нерешенных вопросов в физике аморфного состояния является происхождение избыточной (по сравнению с дебаевской) плотности колебательных состояний в диапазоне энергий  $E \sim 2 - 10$  мэВ. Она приводит к избыточной теплоемкости при  $T \approx 10 - 30$  К<sup>1</sup>, к появлению бозонного пика в низкочастотном комбинационном рассеянии света (КРС)<sup>1, 2</sup>, проявляется в спектрах нейтронного рассеяния<sup>3, 4</sup> и ИК поглощения<sup>5</sup>.

В настоящей работе методом нейтронного рассеяния исследована ПКС в разных по химическому составу и характеру ближнего порядка стеклах. Впервые обнаружено, что низкоэнергетическая (2 – 10 мэВ) ПКС имеет универсальный вид в разных стеклообразных материалах.

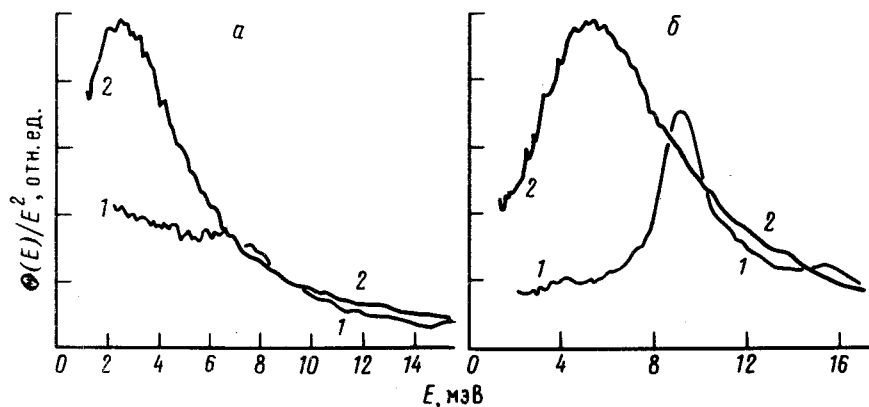


Рис. 1. Энергетическая зависимость  $\Theta(E)/E^2$ : а) кристаллический (1) и стеклообразный (2)  $As_2S_3$ ; б) кристаллический (1) и стеклообразный (2)  $SiO_2$

Измерения выполнены при комнатной температуре на времяпролетном спектрометре с источником холодных нейтронов. Обработка результатов осуществлена по обычной процедуре с учетом всех необходимых поправок<sup>4</sup>. Непосредственно из нейтронного эксперимента для двухатомных систем может быть восстановлен так называемый обобщенный спектр колебаний  $\Theta(E)$ , который связан с обычной плотностью колебательных состояний  $g(E)$  согласно формуле:

$$\Theta(E) = \sum_{i=1,2} (\sigma_i c_i M_i^{-1} |e_i(E)|^2) g(E).$$

Здесь  $\sigma_i$ ,  $M_i$ ,  $c_i$  и  $e_i(E)$  – сечение рассеяния, масса, концентрация и вектор колебаний  $i$ -го компонента.

На рис. 1 приведены результаты измерений  $\Theta(E)/E^2$  для  $As_2S_3$  и  $SiO_2$  в кристаллическом и стеклообразном состоянии. В плотности состояний кристаллических образцов при

низких  $E$  наблюдается значительный участок с дебаевским поведением  $\Theta(E) \propto E^2$ . При энергии  $E \geq 7$  мэВ спектры исследованных кристаллов становятся резко различными. В стеклообразных  $\text{SiO}_2$  и  $\text{As}_2\text{S}_3$  дебаевское поведение не наблюдается даже при самых низких достигнутых энергиях 1 – 2 мэВ. Эти спектры, однако, имеют общую черту – асимметричный пик, максимум которого лежит при  $E_M \approx 5,1$  и 2,65 мэВ для  $\text{SiO}_2$  и  $\text{As}_2\text{S}_3$  соответственно. Мы провели сравнение спектров в масштабе энергий  $E_H = E/E_M$ , приняв  $E_M$  за единицу энергии (рис. 2). Здесь же приведены данные для металлического стекла  $\text{Mg}_{70}\text{Zn}_{30}$ , полученные ранее в <sup>4</sup>. Как видно из рис. 2, форма пика в этих материалах одинакова. Следовательно, несмотря на существенное различие химического состава, характера ближнего порядка и электронных свойств трех стеклообразных материалов, низкоэнергетическая ПКС в них имеет универсальный, хотя и не дебаевский вид. Полученный результат свидетельствует о том, что обсуждаемые аномалии обусловлены универсальными закономерностями в структуре стеклообразных материалов.

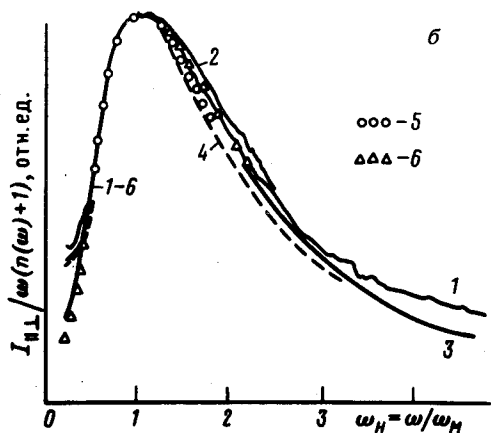
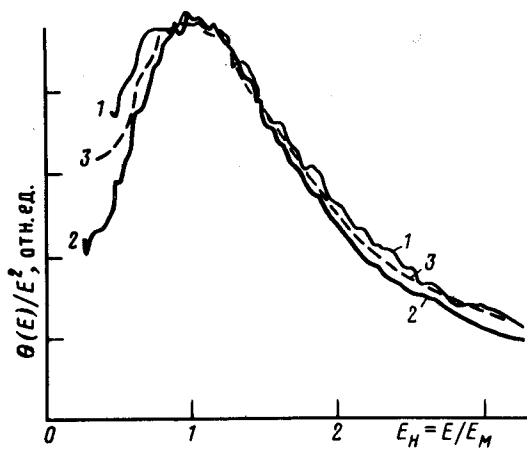


Рис. 2. Низкоэнергетические колебательные спектры стеклообразных материалов в масштабе, нормированном на  $E_M$ : а)  $\Theta(E)/E^2$  в  $\text{As}_2\text{S}_3$  ( $E_M = 2,65$  мэВ) – 1;  $\text{SiO}_2$  (5,1 мэВ) – 2; металлическое стекло  $\text{Mg}_{70}\text{Zn}_{30}$  (5,5 мэВ) – 3; б) нормированная интенсивность спектра КРС в  $\text{As}_2\text{S}_3$  ( $\omega_m = 26 \text{ см}^{-1}$ ) – 1;  $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$  ( $34 \text{ см}^{-1}$ ) – 2;  $\text{SiO}_2$  ( $52 \text{ см}^{-1}$ ) – 3;  $\text{V}_2\text{O}_3$  ( $28 \text{ см}^{-1}$ ) – 4;  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$  ( $42 \text{ см}^{-1}$ ) – 5;  $\text{V}_2\text{O}_3 \cdot 0,7\text{Li}_2\text{O}$  ( $88 \text{ см}^{-1}$ ) – 6

Отметим, что подобная универсальность наблюдается и в спектрах комбинационного рассеяния света в стеклах. Согласно <sup>6</sup> интенсивность рассеянного света в аморфных телах  $I_E/(n+1) = C(E)g(E)$ , где  $C(E)$  характеризует связь между светом и колебательным возбуждением,  $n+1$  – бозевский фактор. Избыточная  $g(E)$  приводит к возникновению в спектрах рассеянного света так называемого бозонного пика <sup>2</sup>. В <sup>2, 6</sup> показано, что форма бозонного пика в координатах, нормированных на частоту максимума, одинакова в широком ряде оксидных, халькогенидных и низкомолекулярных органических стекол (рис. 2б).

С учетом данных настоящей работы естественно предположить, что универсальность отнюдь не ограничивается и к ПКС этих материалов.

Для описания низкоэнергетических возбуждений в стеклах и аморфных телах был предложен ряд различных моделей. Авторы <sup>3, 7</sup> связывают эти возбуждения с колебаниями некоторых структурных фрагментов, характерных для образцов конкретного химического состава, например, с вращением группы тетраэдров  $\text{SiO}_4$  в случае  $\text{SiO}_2$  или с колебаниями остатков слоистой структуры в случае халькогенидных стекол. Эти модели трудно совместить с обнаруженной в настоящей работе универсальностью поведения ПКС.

Необходимой общностью обладают, по-видимому, модель мягких потенциалов <sup>9</sup>, фрактальные модели <sup>10</sup> и модели со структурными корреляциями на масштабах  $10 - 20 \text{ \AA}$  <sup>2, 11</sup>. Однако обсуждение их соответствия с полученными результатами выходит за рамки этого короткого сообщения.

Авторы выражают благодарность С.Попову и Р. Родионовой за предоставленные образцы.

#### Литература

1. Jäckle J. In: Amorphous solids: low-temperature properties. Berlin: Springer, 1981.
2. Malinovsky V.K., Sokolov A.P. Sol. St. Comm., 1986, 57, 757.
3. Buchenau U., Prager M., Nücker N, et al. Phys. Rev. B, 1986, 34, 5665.
4. Землянов М.Г., Сырых Г.Ф., Черноплеков Н.А. Письма в ЖЭТФ, 1986, 42, 176.
5. Shuker R., Gammon R.W. Phys. Rev. Lett., 1970, 25, 222.
6. Malinovsky V.K., Novikov V.N., Sokolov A.P. Phys. Lett. A, 1987, 123, 19.
7. Phillips J.C. J. Non-Cryst. Sol., 1981, 43, 37.
8. Malinovsky V.K., Novikov V.N., Sokolov A. P. J. Non-Cryst. Sol., 1987, 90, 485.
9. Гальперин Ю.М., Карнов В.Г., Соловьев В.Н. ЖЭТФ, 1988, 94, 373.
10. Alexander S., Orbach R. J. de Phys. Lett., 1982, 43, L-625.
11. Graebner J.E., Golding B., Allen L.C. Phys. Rev. B, 1986, 34, 5696.

Институт автоматки и электрометрии  
Сибирское отделение Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
31 марта 1989 г.