

УДК 6. 29.19.22

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ДИСПЕРСИИ ПЛАЗМОНОВ В ГРАФИТЕ

Е. М. Байтингер (1), М. М. Бржезинская (1),
Н. А. Векесер (1), В. В. Шнитов (2)
e-mail: wekesser@cspi.urch.ac.ru

(1) Челябинский государственный педагогический университет, г. Челябинск, Россия

(2) Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила 14 марта 2008 г.

Введение

Графит является родоначальником большого семейства углеродных материалов: пироуглерода, волокон, стеклоподобного углерода, нанотрубок, фуллеренов и т.д. Многие физические свойства графита сохраняются при модификации (или трансформации) его структуры. Даже существенные изменения структуры монослоя графита, который часто называют графеновым листом (к примеру, скручивание в трубочку небольшого диаметра) часто качественно не изменяет его физических характеристик. Этот вывод можно отнести и к закономерностям плазменных колебаний. Изменение плазменных свойств p -электронов и всего коллектива валентных электронов (π + σ -плазмонов) под влиянием внешних факторов легче понять при детальном сопоставлении с аналогичными свойствами графенового листа. Поэтому, на наш взгляд, целесообразно дальнейшее подробное изучение плазменных колебаний в графите, не смотря на имеющуюся обширную библиографию по этому вопросу (см., например, [1]).

В данной статье докладываются о результатах экспериментального изучения плазмонов методом характеристических потерь энергии электронов (ХПЭЭ) с угловым разрешением. Обсуждаются полученные результаты с точки зрения пространственной дисперсии плазмонов.

Методика эксперимента

Спектры ХПЭЭ с угловым разрешением получены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Подробно методика проведения эксперимента описана в работах [2–4]. Спектры характеристических потерь отраженных от поверхности электронов измерялись с помощью энергоанализатора с угловым разрешением типа коническое зеркало [5]. Регистрация электронов, прошедших через анализатор, осуществлялась с помощью ряда вторичных электронных умножителей (ВЭУ-6), расположенных вдоль выходной щели прибора через равные пространственные промежутки. Угловое разрешение прибора по полярному углу Θ и азимутальному углу ϕ было одинаковым и составляло $1,5^\circ$.

Электронная пушка была расположена в плоскости, перпендикулярной к оси вращения анализатора так, что падающий и отраженный пучки электронов лежат в одной плоскости, совпадающей с плоскостью входной щели анализатора. Энергия первичного пучка составляла 200 эВ. Угол падения первичного пучка электронов на образец в процессе измерений оставался неизменным $\Theta=50^\circ$. Углы сбора отраженных электронов изменялись от 35° до 55° . Анализатор работал в режиме постоянного абсолютного энергетического разрешения $\Delta E=0,6$ эВ, был настроен на энергию пропускания 30 эВ.

Исследуемый образец имел размеры $1,5 \times 6 \times 8$ мм³ и был вырезан из кристалла высоко ориентированного пиролитического графита (HOPG). Для получения «свежей» поверхности перед началом опытов проводилось скалывание небольшой части образца вдоль базисной плоскости непосредственно перед помещением его в аналитическую камеру спектрометра. Термическая очистка поверхности образца проведена при температуре 1200°C в вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ Торр в течение 20 минут. Измерение спектров ХПЭЭ проводилось в дальнейшем в вакууме не хуже $5 \cdot 10^{-10}$ Торр.

Результаты опытов

Основные экспериментальные результаты приведены на рис 1. Для лучшего восприятия спектров потеря упругий пик при энергии потерь $E_p = 0$ не включен. Достаточно узкий пик при 6-7 эВ отвечает π -плазмону. Далее при больших энергиях потерь наблюдается широкий $\pi+\sigma$ плазменный спектр, на левом участке которого при энергии потерь около 14 эВ хорошо различим дополнительный наплыв (отмечен вертикальной стрелкой), который может быть отождествлен либо с поверхностным $\pi+\sigma$ -плазмоном [6], либо с двойным π -плазмоном.

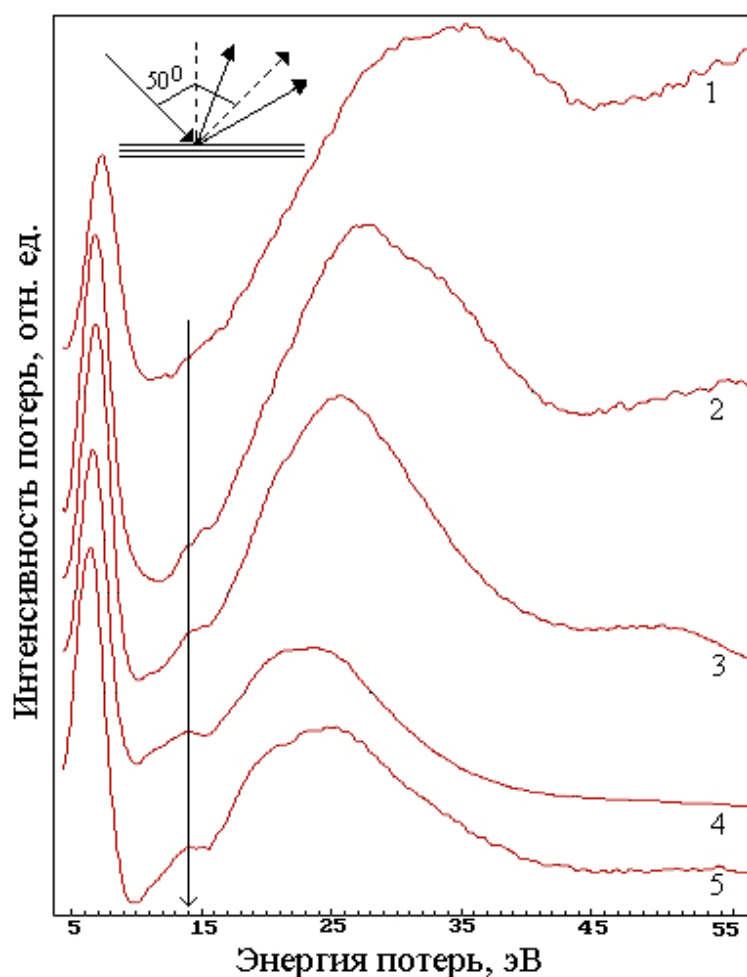


Рис.1. Спектры характеристических потерь энергии электронов при углах регистрации относительно поверхности графита: 1 – 35°; 2 – 40°; 3 – 45°; 4 – 50°; 5 – 55°. На вставке схематически показана геометрия проведения эксперимента

Основной особенностью описываемых спектров является смещение максимумов плазменных потерь в зависимости от угла сбора отраженных электронов. В таблице приведены угловые зависимости положений плазменных максимумов.

Угловые зависимости положений π и $\pi+\sigma$ –плазмонов

$\theta, ^\circ$	$\omega_\pi, \text{эВ}$	$\omega_\sigma, \text{эВ}$
35°	5,60	32,3
40°	6,68	31,0
45°	6,62	26,2
50°	6,38	25,3
55°	6,55	26,1

Переданный графитовому образцу от падающих электронов импульс (в расчете на один электрон) равен:

$$|q| = \sqrt{q_{\parallel}^2 + q_{\perp}^2}, \quad (1)$$

$$q_{\parallel} = \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} \left(\sqrt{E_0} \cdot \cos 50^\circ - \sqrt{(E_0 - \Delta_0)} \cdot \cos i \right), \quad (1a)$$

$$q_{\perp} = \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} \left(\sqrt{E_0} \cdot \sin 50^\circ - \sqrt{(E_0 - \Delta_0)} \cdot \sin i \right). \quad (16)$$

Заключение и выводы

При достаточно больших квазиимпульсах плазмоны внутри твердых тел ведут себя как свободные частицы с квадратичным законом дисперсии [7] и их энергия может быть представлена достаточно простым выражением:

$$\hbar\omega_p \approx \hbar\omega_0 + \frac{\hbar^2 q^2}{2m_p}, \quad (2)$$

где: ω_0 — ленгмюровская частота, m_p — масса плазмона.

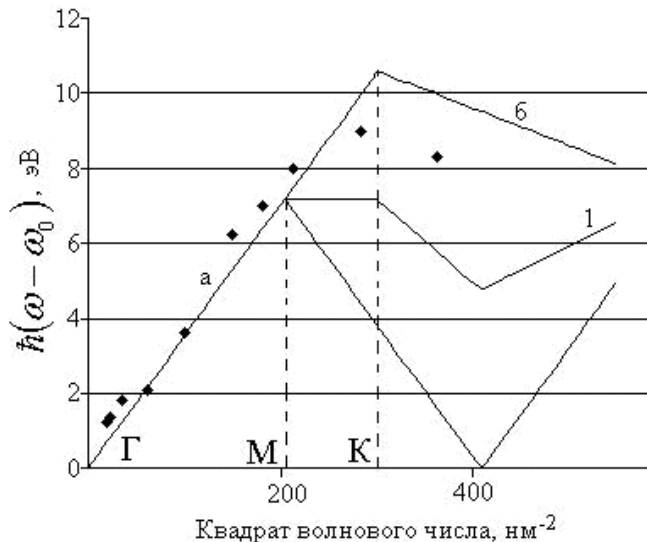


Рис. 2. Сравнение экспериментальной и расчетной дисперсии $\pi+\sigma$ — плазмонов в графите: а — в первой зоне Бриллюэна; б — во второй (Γ — центр зоны Бриллюэна)

В случае справедливости (2) зависимость $\hbar(\omega_p - \omega_0)$ от квадрата квазиимпульса должна быть линейной. На рис. 2 такая зависимость построена не только в первой (а), но также и во второй зоне Бриллюэна графита (б) при допущении, что масса плазмона совпадает с массой

свободного электрона. Вертикальные пунктирные линии (обозначены буквами М и К) определяют значения волнового числа на границах зоны Бриллюэна: соответственно на серединах боковых сторон и в углах. Линия 1 есть усредненная по двум направлениям величина $\hbar(\omega_p - \omega_0)$. Здесь же точками нанесены экспериментальные результаты, полученные в данном исследовании. Значение ω_0 в соответствии с экспериментальными данными равно 23,7 эВ. Обнаружено удовлетворительное согласие не только для относительно небольших квазиимпульсов плазмонов, но также и вблизи краев зон, где дисперсия плазмонов инвертирует и масса $\pi+\sigma$ -плазмона становится отрицательной.

Список литературы

1. Raether H. Excitation of plasmons and interband transition by electrons. Springer-Verlag, 1980. P. 192.
2. Shnitov V. V., Mikoushkin V. M., Zacharevich. Abstracts of 14 th Europ. Conf. On Surface Science (ECOSS-14). Leipzig, 1994. P. 76.
3. Микушкин В. М., Шнитов В. В. Патент РФ №1814427.
4. Байтингер Е.М., Бржезинская М.М., Шнитов В.В. Плазмоны в графите // Химическая физика и мезоскопия, 2002. Т. 4, № 2. С.178-189.
5. Yavor S. Ya., Baranova L. A. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 1990. A298. P. 421.
6. Stephan O., Taverna D., Kosiak M. // Phys. Rev. B., 2002. V. 66. P. 155—422.
7. Клеммоу Ф., Доуэрты Дж. Электродинамика частиц и плазмы: Пер. с англ. М.: Мир, 1996.