

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СПЕКТРОСКОПИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОНОВ К ИОННОЙ БОМБАДИРОВКЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Бржезинская М.М., Байтингер Е.М., Шнитов В.В.⁽¹⁾, Смирнов А.Б.⁽¹⁾

Челябинский государственный педагогический университет,
пр. Ленина 69, Челябинск, 454080 Россия

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
ул. Политехническая 26, Санкт-Петербург, 194021 Россия
Fax: 7 (3512) 64-77-53, E-mail: brzhezinskaya@fromru.com

Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются не только интересным объектом для исследований, но также и многообещающим материалом для использования в нанотехнологии. Уникальные свойства УНТ позволяют производить на их основе функциональные элементы для нанoeлектроники (например, диоды и транзисторы). Становится возможным также и изготовление квантовых нуль-размерных структур и конструирование нанолазеров, работающих в очень широком диапазоне спектра.

Ионная бомбардировка является достаточно простой техникой, позволяющей подконтрольно модифицировать структуру УНТ и изменять их физические свойства.

В данной работе представлены результаты изучения взаимодействия ионов аргона с однослойными (ОУНТ) и многослойными (МУНТ) углеродными нанотрубками, посредством использования эффекта зависимости спектра коллективных колебаний электронов от свойств УНТ. Данные результаты были получены посредством спектроскопии характеристических потерь электронов (ХПЭЭ). Для целей контроля за состоянием поверхности УНТ была использована Оже-электронная спектроскопия.

Эксперимент

Эксперименты были проведены на образцах ОУНТ и МУНТ. Оба типа УНТ были получены электро-дуговым методом. Образцы МУНТ были предоставлены закрытым акционерным обществом «Астрин» (Санкт-Петербург, Россия), образцы ОУНТ были предоставлены А.С.Лобачом из Института проблем химической физики РАН (Москва, Россия). МУНТ были ~ 10 нм в диаметре и ~ 10 мкм в длины. ОУНТ имели диаметры 1.2-1.6 нм и длины 1 - 10 мкм.

Образцы МУНТ и ОУНТ были подвергнуты поэтапной бомбардировке ионами

аргона (Ar^+) непосредственно в высоковакуумной камере электронного спектрометра. Энергия Ar^+ составляла 1 кэВ, максимальная доза бомбардировки Ar^+ (Q) равнялась 360 мкКл/см².

После каждой дозы ионной бомбардировки производилась съёмка Оже-спектров в режиме постоянного энергетического разрешения $\Delta E = 0.6$ эВ для определения концентрация аргона, абсорбированного в приповерхностном слое образца [1].

Во время измерений ХПЭЭ спектров энергия первичных электронов составляла 1 кэВ. Угол падения первичных электронов на образец и угол сбора вторичных составляли 45°. Диаметр пятна засветки равнялся ~ 1 мм. Апертура анализатора составляла 12°. Абсолютное разрешение по энергии ($\Delta E = \text{Const}$) было 0.2 эВ, когда энергия пропускания спектрометра составляла 10-25 эВ.

Результаты

Был проведён детальный анализ π - и $\pi^+\sigma$ -плазмонов до и после бомбардировки различными дозами ионами аргона Ar^+ МУНТ и ОУНТ. Были изучены начальные стадии взаимодействия поверхности и объёма МУНТ и ОУНТ с Ar^+ . При малых дозах бомбардировки Ar^+ эффект образования дефектов в стенках УНТ преобладает над рекомбинацией дефектов. Тем не менее, особенности протекания этих процессов в МУНТ и ОУНТ различны [2,3].

В процессе исследований были определены закономерности изменения энергии E_π и полной ширины на половине высоты δE_π π -плазмона вследствие ионной бомбардировки как для МУНТ, так и ОУНТ. Величина E_π уменьшается, а величина δE_π возрастает с увеличением дозы Ar^+ при малых дозах бомбардировки Q ($Q < Q_0 = 60$ мкКл/см²), когда коэффициент абсорбции является наибольшим [4].

Для предварительной интерпретации полученных экспериментально результатов была использована классическая теория дисперсии и абсорбции. Согласно ей, возможны два пути взаимодействия плазмонов с дефектами в атомной структуре УНТ, появившихся за счёт воздействия ионами. Во-первых, созданные в процессе бомбардировки дефекты деформируют не только поверхность, но и объём УНТ, модифицируя тем самым и электронные свойства УНТ. Согласно модели «жёстких» энергетических зон, это приводит к изменению энергии межзонных переходов. Во-вторых, бомбардировка провоцирует значительное рассеяние плазмонов на дефектах. Рассеяние является наиболее интенсивным, когда длина волны де Бройля плазмона равна расстоянию между дефектами. Детали рассеяния различаются для МУНТ и ОУНТ. В случае ОУНТ, энергии межзонных π - π^* переходов варьируется в пределах $1.8 \text{ eV} \leq \overline{E_n} \leq 4.3 \text{ eV}$. Верхний предел ($\overline{E_n} \approx 4.3 \text{ eV}$) очень близок к величине энергии межзонного π - π^* перехода в точке M зоны Бриллюэна графита. В случае МУНТ, разброс энергий межзонных переходов не является столь значительным ($\overline{E_n} \approx 5 \text{ eV}$). Атомное строение МУНТ сходно с атомной структурой изогнутого многослойного кристаллического графита. Меньший разброс величин энергий межзонных переходов $\overline{E_n}$ в случае МУНТ возможно происходит вследствие «трёхмерной» упорядоченности атомной структуры МУНТ (диаметры МУНТ больше, чем таковые у ОУНТ). Наведённые ионной бомбардировкой дефекты вынуждены располагаться в основном в стеснённом межслоевом пространстве и в силу этого графитоподобны. Поэтому и процессы дефектообразования у МУНТ и ОУНТ различны.

В МУНТ обнаружен эффект существенного изменения механизма рассеяния плазмонов при достижении дозы 50 мкКл/см^2 ($Q \geq 50 \text{ мкКл/см}^2$) и превышающих это значение дозах ионного облучения. Оценки показали, что дозе 50 мкКл/см^2 соответствует концентрация ионов аргона, внедрённых в нанотрубки, $\sim 2.5 \text{ ат. \%}$. Возможно, что при такой концентрации аргона расстояние между атомами аргона и связанными с ними дефектами сравнимо с половиной длины волны де Бройля ($\lambda_B \approx 200 - 230 \text{ нм}$) в МУНТ, приводя к появлению дополнительного резонансного рассеяния плазмонов на дефектах.

Высказано предположение, что сложный и широкий плазменный спектр π + σ -плазмонов содержит как минимум четыре компоненты с существенно отличающимися интенсивностями: два квазиповерхностных плазмона (продольный и поперечный) и два квазиобъёмных плазмона (продольный и поперечный). Только один из них демонстрирует немонотонную зависимость от дозы ионного облучения. Его энергия при облучении ионами аргона изменяется в пределах $19 - 23 \text{ эВ}$. В случае поперечного плазмона G_1 , концентрация возбуждённых электронов приблизительно в два раза превосходит таковую для плазмона G_2 . Были вычислены относительные площади S_{G_1}/S_0 и S_{G_2}/S_0 пиков G_1 и G_2 . $S_{G_1}/S_{G_2} \sim 6.3$ для ОУНТ и ~ 2.1 для МУНТ. S_{G_1}/S_0 и S_{G_2}/S_0 пика G_2 почти одинаковы для МУНТ и ОУНТ. Возможно, что причина значительного различия в величине S_{G_1}/S_{G_2} для ОУНТ и МУНТ заключается во вкладе орбитальной составляющей. Необходимы дальнейшие исследования, что интерпретировать выявленное поведение π + σ -плазмонов.

Благодарность

Данная работа была выполнена при поддержке Министерства образования Российской Федерации (грант No.PD02-1.2-170).

Литература

1. Brzhezinskaya M.M., Baitinger E.M., Shnitov V.V. π -plasmons in ion irradiated multiwall carbon nanotubes. *Physica B*, 2004; 348:95-100.
2. Brzhezinskaya M.M., Baitinger E.M., Shnitov V.V., Smirnov A.B. Study of the primary stages of defect formation of carbon nanotubes under ion argon irradiation. *Physics of the Solid State*, 2005; 47(4):745-750.
3. Brzhezinskaya M.M., Baitinger E.M., Shnitov V.V., Smirnov A.B. Determination of ion irradiation influence on π -plasmon properties of carbon nanotubes. *Proceedings of the 2004 MRS Spring Meeting, San Francisco*, 2004; 821.
4. Brzhezinskaya M.M., Baitinger E.M., Shnitov V.V. Destruction of multiwall carbon nanotubes structure under the influence of ion irradiation. *Proceedings of the 2003 MRS Fall Meeting, Boston*, 2003; 792:371-374.