

Призматические модификации одностенных углеродных нанотрубок и их электронные свойства: регулярная адсорбция атомов фтора на графеновых поверхностях нанотрубок

© О.Б. Томилин¹, И.В. Станкевич², Е.Е. Мурюмин¹, С.А. Лесин¹, Н.П. Сыркина¹

¹ Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия

² Институт элементоорганических соединений РАН, Москва, Россия

E-mail: tomlinob@mail.ru

(Поступила в Редакцию 8 февраля 2010 г.
В окончательной редакции 1 июня 2010 г.)

Показано, что регулярная адсорбция атомов фтора на поверхностях одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) вдоль их осей может привести к модификации углеродных остовов ОСУНТ цилиндрической формы к углеродным остовам, которые имеют приближенно формы призмы (призматические модификации). В гранях таких модифицированных ОСУНТ образуются квазиодномерные изолированные углеродные сопряженные подсистемы (треки) различного строения. Установлено, что основные характеристики модифицированных указанным выше способом ОСУНТ достаточно близки к аналогичным характеристикам родственных им изоструктурных углеводородных полимерных сопряженных систем (таких как цисполиены, полифенилены, поли(периацены) или полифенантрены. Полуэмпирическим методом РМЗ (Parametric Method 3) проведены расчеты фрагментов модельных нанотрубок типа (n, n) и $(n, 0)$, содержащих до 360 атомов углерода, и их производных, допированных атомами фтора.

1. Введение

Синтез разнообразных наноструктур углерода стимулировал проведение многочисленных экспериментальных и теоретических исследований кластеров углерода и создание на их основе новых материалов для электроники. Отметим, в частности, работы [1–6], в которых использовались различные теоретические модели и квантово-химические методы для прогнозирования физико-химических свойств новых наноструктур.

В настоящее время основные электронные характеристики многих углеродных наноструктур достаточно надежно установлены. Однако для практики важно, чтобы эти характеристики наноматериалов менялись в определенных пределах. В связи с этим возникает задача направленной модификации структуры и электронного строения исходных углеродных наноструктур и прогнозирования их свойств. Отметим, что основные физические и химические свойства углеродных наноструктур, например, таких как фуллерены или нанотрубки с однородной sp^2 -гибридизацией атомов, главным образом определяются их π -электронными системами. Эти квази- π -электронные системы возникают в результате взаимодействия p -орбиталей атомов углерода, ориентированных перпендикулярно поверхности соответствующего углеродного кластера. В результате возникает так называемое ρ -сопряжение [7], приводящее к появлению в случае фуллеренов сферической ароматичности [8,9]. Особый интерес представляют модификации углеродных наноструктур, в результате которых сохраняются достаточно протяженные сопряженные подсистемы, ответственные за их электропроводящие свойства.

Деформации базовых углеродных наноструктур в результате таких модификаций должны обеспечивать наиболее благоприятные геометрические характеристики для образования сопряженных подсистем, расположенных на искривленных поверхностях. Деформации исходного углеродного каркаса без нарушения степени связанности его узлов могут возникать в результате генерации в исходной углеродной наноматрице либо за счет регулярных изменений гибридизации атомов углерода (с sp^2 на sp^3), либо в результате замещений атомов углерода иными атомами. В первом случае модификация углеродного каркаса может происходить в результате регулярной хемосорбции атомов или функциональных групп на атомах исходной углеродной наноматрицы, во втором — в результате регулярных замещений атомов исходной углеродной наноструктуры трехвалентными гетероатомами.

Различные способы модификации углеродных нанотрубок и фуллеренов атомами фтора (или водорода) с помощью адсорбции, приводящие к пространственной деформации исходного углеродного каркаса, рассматривались в [10–15], однако вне внимания исследователей оставался вопрос о свойствах образующихся изолированных сопряженных π -электронных подсистем и их влиянии на свойства молекулярной системы в целом. Только в работе [16] отмечалось, что в результате регулярной хемосорбции атомов водорода на поверхности углеродной нанотрубки происходит образование двух или большего числа изолированных одномерных сопряженных подсистем. В рамках модели, использованной в [16], показано, что энергетический спектр модифицированной наносистемы в основном определя-

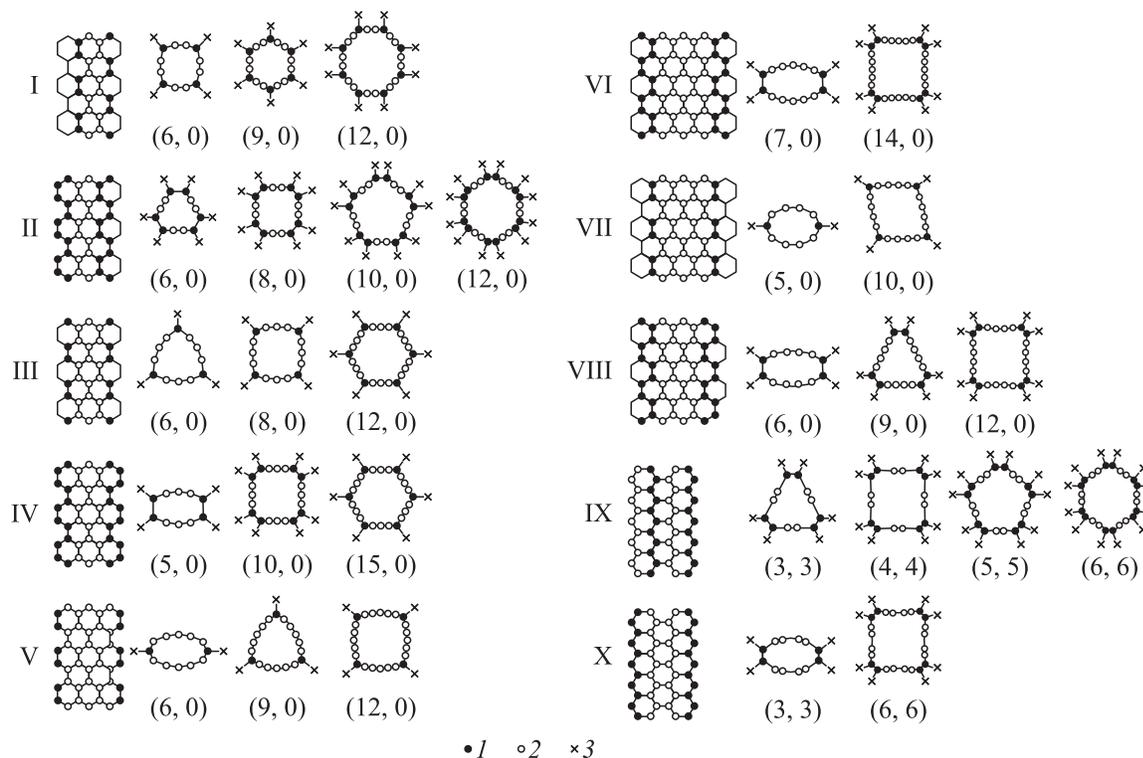


Рис. 1. Варианты модификации (первая схема для каждой модели) и изменение профиля поперечного сечения ОСУНТ при регулярной адсорбции атомов фтора. 1 — атомы углерода ОСУНТ, соединенные с атомами фтора, 2 — атомы углеродного трека, 3 — атом фтора.

ется образующимися изолированными сопряженными π -электронными подсистемами.

В настоящей работе обсуждаются несколько вариантов модификации одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) с индексами хиральности $(n, 0)$ и (n, n) , образующихся в результате регулярной хемосорбции атомов фтора на поверхностях нанотрубок и приводящих к такой пространственной деформации ОСУНТ, что их поперечные сечения становятся топологически подобными сечениям призм, на гранях которых располагаются протяженные изолированные квазиодномерные сопряженные углеродные подсистемы — треки различного строения.

Исследование призматических модификаций ОСУНТ имеет также и методологическое значение, так как в известном смысле они моделируют модифицированные графеновые поверхности, которые рассматривались в [17,18].

2. Модель и метод расчета

В качестве моделей углеродных нанотрубок использовались фрагменты ОСУНТ конечной протяженности с индексами хиральности $(n, 0)$ ($n = 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15$) и (n, n) ($n = 3, 4, 5, 6$). Число гексагонов, расположенных на боковой поверхности (вдоль оси) ОСУНТ, было принято равным 11 для всех рассмотренных значений индекса хиральности n . Общее число

атомов углерода в ОСУНТ лежит в интервале 120–360. Свободные валентности концевых атомов углерода насыщались атомами водорода.

Число атомных орбиталей атомов углерода в рассматриваемых ОСУНТ достаточно велико (> 500). Поэтому в качестве метода расчета структуры и электронного строения рассматриваемых нанотрубок и их модификаций использовался полуэмпирический метод РМ3 (Parametric Method 3), который достаточно хорошо передает геометрию и относительную стабильность углеродных наноструктур [19].

Формирование изолированных углеродных треков различного строения в призматических модификациях ОСУНТ иллюстрирует рис. 1. На рис. 1 на развертке фрагмента ОСУНТ в конфигурации zigzag показаны варианты формирования изолированных углеродных сопряженных подсистем, образующихся при регулярной хемосорбции атомов фтора на поверхности нанотрубок. Замыкание развертки в модифицированную ОСУНТ осуществляется при таких значениях индекса хиральности n , которые обеспечивают повторение выделенного углеродного трека на поверхности нанотрубки вдоль ее оси. В результате углеродный остов ОСУНТ цилиндрической формы переходит в углеродный остов, приближенно имеющий форму призмы, на гранях которой размещаются эквивалентные изолированные углеродные сопряженные подсистемы (призматическая модификация).

Таблица 1. Энергия адсорбции ΔE_{ads} , отнесенная на один атом F, в модифицированных ОСУНТ (модели I–X)

Модель	Хиральность	ΔE_{ads} , а.у.	Модель	Хиральность	ΔE_{ads} , а.у.
I	(6, 0)	-0.1116	VI	(7, 0)	-0.1140
	(9, 0)	-0.0948		(14, 0)	-0.0943
	(12, 0)	-0.0859	VII	(5, 0)	-0.1328
II	(6, 0)	-0.1136		(10, 0)	-0.1023
	(8, 0)	-0.1003	VIII	(6, 0)	-0.1196
	(10, 0)	-0.0918		(9, 0)	-0.1024
	(12, 0)	-0.0829		(12, 0)	-0.0944
III	(6, 0)	-0.1230	IX	(3, 3)	-0.1210
	(8, 0)	-0.1114		(4, 4)	-0.1103
	(12, 0)	-0.0988		(5, 5)	-0.0957
IV	(5, 0)	-0.1266	X	(6, 6)	-0.0922
	(10, 0)	-0.0981		(3, 3)	-0.1264
	(15, 0)	-0.0873		(6, 6)	-0.1035
V	(6, 0)	-0.1223			
	(9, 0)	-0.1096			
	(12, 0)	-0.1018			

Этим подсистемам соответственно могут быть сопоставлены такие сопряженные макромолекулы, как циклоплены, полифенилены, поли(периацины) или полифенантрены. На рис. 1 на развертке фрагмента ОСУНТ в конфигурации armchair показаны выделяемые углеродные треки, сопряженные системы которых подобны сопряженным системам трансполиеновых цепочек и полиаценов.

3. Результаты и обсуждение

Анализ проведенных расчетов представленных на рис. 1 модельных систем I–X (одноэлектронных уровней энергии $\{\epsilon_i\}$, электронных спектров, молекулярных волновых функций $\{\psi_i\}$, энергий адсорбции ΔE_{ads}) показывает, что регулярная хемосорбция атомов фтора на атомах ОСУНТ приводит к образованию достаточно стабильных структур, углеродные остовы которых действительно имеют форму искаженных призм. На гранях таких призм располагаются изолированные углеродные подсистемы, структуры которых приведены на рис. 1.

Отметим, что, несмотря на большое количество адсорбированных атомов фтора на поверхности ОСУНТ, необходимых для регулярной модификации нанотрубок (до 150 атомов), энергия адсорбции ΔE_{ads} , отнесенная на один атом F, во всех рассмотренных модифицированных молекулах имеет отрицательное значение ($\Delta E_{\text{ads}} < 0$). Величина ΔE_{ads} вычислялась в соответствии с выражением

$$\Delta E_{\text{ads}} = [E_{\text{tot}}^M - E_{\text{tot}}^I - zE_{\text{tot}}(F)]/z, \quad (1)$$

где E_{tot}^M — полная энергия ОСУНТ, модифицированной регулярной адсорбцией атомами фтора, E_{tot}^I — полная энергия исходной ОСУНТ, $E_{\text{tot}}(F)$ — полная энергия свободного атома фтора, z — число адсорбированных атомов фтора на поверхности ОСУНТ.

Из приведенных в табл. 1 значений ΔE_{ads} видно, что во всех рассмотренных моделях энергии адсорбции $|\Delta E_{\text{ads}}|$ уменьшаются с увеличением диаметра исходной углеродной нанотрубки. Полученный результат соответствует данным [12,14].

Как следует из полученных результатов, регулярная адсорбция атомов фтора на поверхности ОСУНТ не приводит к напряжению валентных связей в образующихся призматических модификациях углеродных нанотрубок. Значения валентных углов атомов углерода, расположенных в центральных частях молекул I–X и связанных с атомами фтора (θ_{CCF} , тетрагональная гибридизация), находятся в интервале $108.9\text{--}113.4^\circ$, а валентные углы для атомов углеродных треков (θ_{CCC} , тригональная гибридизация) меняются от 120.0 до 124.6° . Как видно из этих данных, интервалы изменения как θ_{CCF} , так и θ_{CCC} достаточно узки и не превышают $\sim 4.6^\circ$. Можно полагать, что в результате призматической модификации ОСУНТ образуются относительно слабо валентно-напряженные системы с оптимальной комбинацией тетрагональных и тригональных валентных углов атомов углерода.

Для оценки степени отклонения образующихся „граней“ призм от плоской поверхности введем угол φ . Угол φ равен углу в сечении ОСУНТ плоскостью AB , перпендикулярной плоской грани образующейся призмы, и проходит по линии связи $C\text{--}C(F)$, где один атом углерода является атомом углеродного трека, а другой — $C(F)$ — связан с атомом фтора. Плоскость AB располагается под углом к оси ОСУНТ для конфигурации zigzag и перпендикулярна ей для конфигурации armchair (рис. 2, a). Определение углов φ для рассмотренных модельных систем приведено в сечениях ОСУНТ плоскостью AB на рис. 2, b.

Как следует из определения, величина угла φ характеризует отклонение связи $C\text{--}C(F)$ от плоской поверхности грани образующейся призмы. Значение угла φ для

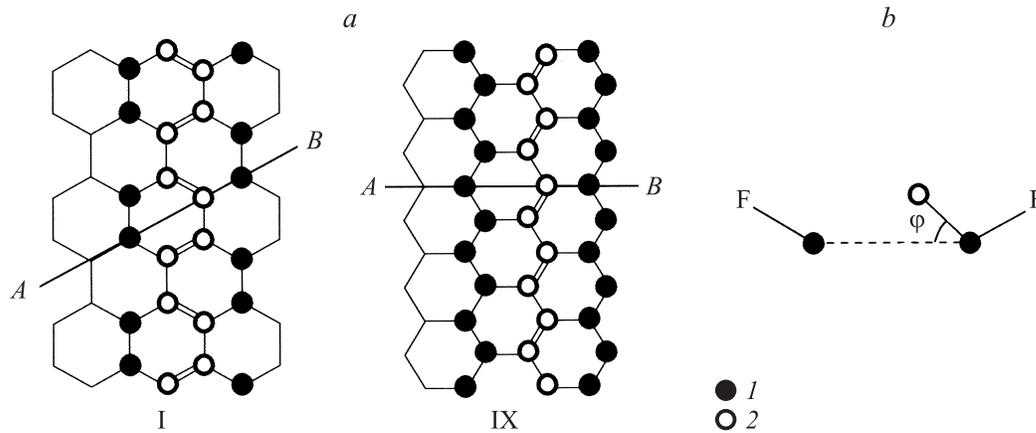


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая определение углов ϕ для оценки степени отклонения образующихся треков от плоскости грани. AB — плоскость сечения ОСУНТ. 1 — атомы углерода, связанные с атомами фтора, 2 — атомы углеродного трека.

всех рассмотренных молекул представлены в табл. 2. Как видно из данных табл. 2, для модифицированных ОСУНТ как хиральности $(n, 0)$, так и хиральности (n, n) с ростом индекса n наблюдается переход от выпуклых граней ($\phi > 0$) образующихся призм к вогнутым ($\phi < 0$). Следует отметить, что указанная тенденция более выражена при большей концентрации атомов фтора по линии, ограждающей выделяемый трек, при одних и тех же значениях индекса хиральности n . Индексы хиральности модифицированных ОСУНТ, в которых достигается максимальная степень уплощения выделенных углеродных треков, набраны в табл. 2 жирным шрифтом. Причиной указанного поведения является оптимальное сочетание величин тетрагональных и тригональных валентных углов атомов углерода, обеспечивающие минимальное напряжение в образующихся каркасных системах.

Следует заметить, что угол ϕ можно также рассматривать как величину, характеризующую взаимодействие образующейся сопряженной подсистемы с sp^3 -гибридизованными орбиталями атомов углерода, располагающихся по линиям, ограждающим выделяемые треки.

Проведем сравнительный анализ энергетических, электронных и структурных характеристик призматических модификаций рассмотренных моделей I–X. Основные характеристики энергетических спектров указанных систем представлены на рис. 3.

Сопоставляя характеристики энергетических спектров рассмотренных ОСУНТ и их призматических модификаций, можно отметить следующие закономерности.

1) Призматическая модификация ОСУНТ приводит к увеличению ширины запрещенной зоны $\Delta E_{\text{gap}}^{\text{mod}}$, разделяющей верхнюю валентную зону и нижнюю зону

Таблица 2. Значения угла ϕ , характеризующего степень отклонения граней призмы в модифицированных ОСУНТ от плоской поверхности

Модель	Хиральность	ϕ , deg	Модель	Хиральность	ϕ , deg
I	(6, 0)	11.8	VI	(7, 0)	27.1
	(9, 0)	4.0		(14, 0)	−9.7
	(12, 0)	−5.6		(5, 0)	41.1
II	(6, 0)	4.2	VII	(10, 0)	14.3
	(8, 0)	−7.9		(6, 0)	27.4
	(10, 0)	−12.5		(9, 0)	8.2
	(12, 0)	−15.6		(12, 0)	−11.9
	III	(6, 0)		24.4	VIII
(8, 0)		12.9	(4, 4)	5.2	
(12, 0)		2.6	(5, 5)	−10.8	
IV	(5, 0)	24.3	IX	(6, 6)	−14.2
	(10, 0)	−8.4		(3, 3)	32.5
	(15, 0)	−18.3		(6, 6)	6.1
V	(6, 0)	49.9			
	(9, 0)	25.5			
	(12, 0)	13.9			

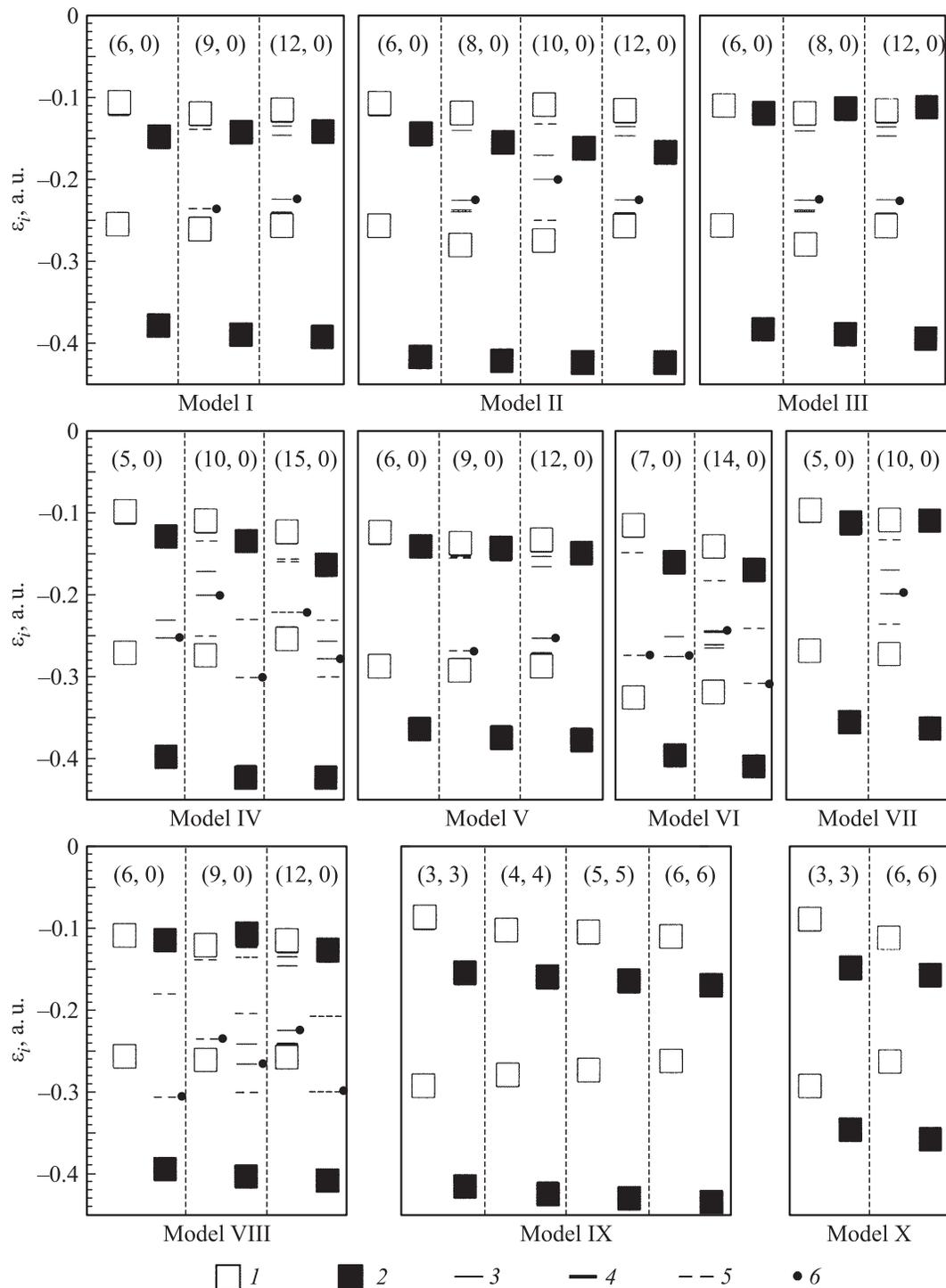


Рис. 3. Энергетические спектры ОСУНТ и их призматических модификаций. 1 — фрагменты верхней валентной зоны и нижней зоны проводимости ОСУНТ, 2 — фрагменты верхней валентной зоны и нижней зоны проводимости призматических модификаций ОСУНТ, 3 — дискретные уровни энергии, 4 — близкорасположенные дискретные уровни энергии, 5 — вырожденные дискретные уровни энергии, 6 — НОМО.

проводимости, по отношению к соответствующим исходным нанотрубкам с индексами хиральности $(n, 0)$. Естественно, что такой эффект обуславливается уменьшением протяженности сопряженной системы при призматической модификации. В то же время модификация

ОСУНТ с индексами хиральности (n, n) , несмотря на отмеченный выше эффект уменьшения протяженности сопряженной системы, не увеличивает величину $\Delta E_{\text{gap}}^{\text{mod}}$, более того, в модели X наблюдается даже некоторое уменьшение величины запрещенной зоны (рис. 3).

2) Увеличение ширины $\Delta E_{\text{gap}}^{\text{mod}}$ в призматических модификациях ОСУНТ происходит за счет значительного уменьшения величины верхнего края верхней валентной зоны, величина нижнего края нижней зоны проводимости также уменьшается при модификации, однако это уменьшение не столь существенно. Указанный характер изменения энергетических спектров в призматических модификациях ОСУНТ, по-видимому, определяется возрастающим акцепторным эффектом атомов углерода, ограждающих выделяемый углеродный трек, благодаря связи этих атомов с атомами фтора.

3) Сравнение энергетических спектров рассмотренных призматических модификаций ОСУНТ и полимерных (или олигомерных) углеводородных аналогов образующихся треков в гранях углеродных нанотрубок показывает, что величины $\Delta E_{\text{gap}}^{\text{mod}}$ и $\Delta E_{\text{gap}}^{\text{mol}}$ (ширина запрещенной зоны углеводородных аналогов, моделирующих углеродные треки в гранях ОСУНТ) достаточно близки между собой, причем наилучшая воспроизводимость ширины запрещенной зоны достигается в основном в случаях, когда степень уплощения углеродного трека в модифицированных ОСУНТ, как следует из табл. 2, минимальна. Такая закономерность естественна, однако связь между $|\Delta E_{\text{gap}}^{\text{mod}} - \Delta E_{\text{gap}}^{\text{mol}}|$ и ϕ достаточно условна и не учитывает в полной мере влияние всех факторов на $|\Delta E_{\text{gap}}^{\text{mod}} - \Delta E_{\text{gap}}^{\text{mol}}|$. Поэтому встречаются призматические модификации с большей кривизной образующейся грани, обладающие запрещенной зоной, величина которой наиболее близка к аналогичной величине исходной ОСУНТ.

4) Как следует из расчетов модельных ОСУНТ, в запрещенной зоне энергетического спектра углеродных нанотрубок с хиральностью $(n, 0)$, начиная с $n \geq 6$, наблюдаются дискретные уровни энергии, которые могут быть заполненными электронами и вакантными, вырожденными и одиночными. Для $n = 6, 9, 12, 15$ (n кратно 3) дискретные уровни энергии в основном отщепляются от краев энергетических зон. Для $n = 7, 8, 10, 14$ (n не кратно 3) часть дискретных уровней энергии, в том числе и занятых электронами, располагается в центральной части запрещенной зоны.

5) Призматические модификации ОСУНТ с хиральностью $(n, 0)$ могут также иметь в запрещенной зоне дискретные уровни энергии, причем этот эффект обнаруживается только при максимальной концентрации атомов фтора по линиям, ограждающим выделяемые в гранях углеродные треки (модели II, IV, VI, VIII). Дискретные уровни энергии распределяются по всей ширине запрещенной зоны и могут быть заполненными электронами и вакантными, вырожденными и одиночными. С увеличением индекса хиральности n число дискретных уровней энергии возрастает. Рассмотренные призматические модификации ОСУНТ с хиральностью (n, n) дискретных уровней энергии в запрещенной зоне не имеют.

6) Из рис. 3 следует, что в рассмотренных ОСУНТ с хиральностью $(n, 0)$ возможно ступенчатое возбуждение проводимости с энергией активации в интервале $0.04-0.095$ а.е., в призматических модификациях

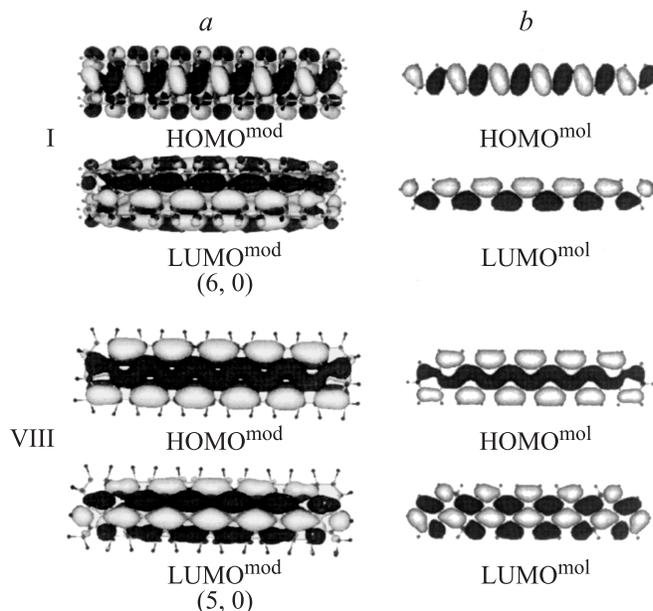


Рис. 4. Распределения по атомам НОМО и LUMO в ОСУНТ (a) и молекулярных углеводородных аналогов (b). Темные и светлые области соответствуют разным знакам вкладов атомных орбиталей.

ОСУНТ энергия активации проводимости лежит в интервале $0.065-0.132$ а.е.

7) На рис. 4 представлены типичные диаграммы, показывающие распределение по атомным орбиталям молекулярных орбиталей, соответствующих верхнему краю верхней валентной зоны (НОМО^{mod}) и нижнему краю нижней зоны проводимости (LUMO^{mod}) призматических модификаций ОСУНТ, и аналогичное распределение верхней занятой (НОМО^{mol}) и нижней вакантной (LUMO^{mol}) молекулярных орбиталей углеводородных аналогов углеродных треков, образующихся в гранях ОСУНТ. Как видно из рис. 4, представленные распределения имеют сходную структуру. Данное сходство структур НОМО^{mod}, LUMO^{mod} и НОМО^{mol}, LUMO^{mol} свидетельствует о действительном образовании сопряженных π -электронных подсистем в модифицированных ОСУНТ. Любопытно отметить, что в моделях VII и VIII с углеродным треком в виде ангулярно-конденсированных гексагонов в НОМО^{mod} выделяется собственная одномерная π -электронная подсистема, связывающая p_z -атомные орбитали углерода по типу хюккелевского сопряжения. НОМО^{mod} моделей VII и VIII приводит к относительно большей стабильности данных модифицированных ОСУНТ, которая выражается в большем значении энергии адсорбции $|\Delta E_{\text{ads}}|$, отнесенной на один атом фтора, по отношению к моделям I и II.

8) Сравнение эффективных зарядов на атомах углеродных треков, выделяемых в гранях призм модифицированных ОСУНТ, и их молекулярных углеводородных аналогов показывает, что атомы углерода в углеводородных системах имеют небольшой по величине (менее 0.1 а.е.) эффективный отрицательный заряд. Этот

результат связан с большей электроотрицательностью атома углерода по отношению к атому водорода.

В зарядовом распределении на атомах углеродных треков модифицированных ОСУНТ происходит смещение величин эффективных зарядов на положительную величину из интервала 0.025–0.04 а.е. В результате атомы углерода, связанные с фторированными атомами С, сохраняют отрицательный заряд, но меньшей величины. Остальные атомы углеродного трека приобретают небольшой по величине положительный заряд. Этот результат обеспечивается увеличением электроотрицательности фторированного атома С по отношению к атому водорода. Указанный эффект имеет небольшую силу, однако может приводить к зарядовому альтернированию в сопряженной системе выделяемого углеродного трека в модифицированной ОСУНТ.

9) Сравнение длин С–С-связей для центральных фрагментов углеродных треков в гранях модифицированных ($n, 0$) ОСУНТ и их молекулярных углеводородных аналогов показывает, что призматическая модификация ОСУНТ с помощью регулярной адсорбции атомов фтора приводит к незначительному увеличению длин С–С-связей выделенных углеродных треков, причем это увеличение не превышает 0.02 Å.

Суммируя изложенное выше, можно утверждать, что модификация одностенных углеродных нанотрубок с помощью регулярной адсорбции атомов фтора благодаря оптимальному сочетанию тетрагональных и тригональных валентных углов атомов углерода приводит к образованию анизотропной сопряженной π -электронной системы в ОСУНТ. Электронные характеристики модифицированных ОСУНТ при достижении достаточно высокой степени уплощения выделяемых углеродных треков в значительной степени совпадают с электронными характеристиками родственных им молекулярных углеводородных аналогов. Предложенный в настоящей работе способ структурной модификации ОСУНТ может быть использован при создании наноматериалов с заданными свойствами.

В заключение выражаем глубокую признательность Л.А. Чернозатонскому за участие в обсуждении полученных результатов.

Список литературы

- [1] V. Zólyomi, J. Kúrti. Phys. Rev. B **70**, 085 403 (2004).
- [2] G. Sun, J. Kúrti, M. Kertesz, R. Baughman. J. Phys. Chem. B **107**, 29, 6924 (2003).
- [3] O. Gülseren, T. Yildirim, S. Ciraci. Phys. Rev. B **65**, 153 405 (2002).
- [4] H. Yorikawa, S. Muramatsu. Phys. Rev. B **52**, 2723 (1995).
- [5] X. Blase, L.X. Benedict, E.L. Shirley, S.G. Louie. Phys. Rev. Lett. **72**, 1878 (1994).
- [6] N. Hamada, S. Sawada, A. Oshiyama. Phys. Rev. Lett **68**, 1579 (1992).
- [7] Д.А. Бочвар, Е.Г. Гальперн. ДАН СССР **209**, 610 (1973).
- [8] J. Aihara, H. Hosoya. Bull. Chem. Soc. Jpn. **64**, 2657 (1988).
- [9] M. Randic, S. Nikolic, N. Trinajstic. Croat. Chem. Acta **60**, 595 (1987).
- [10] K.N. Kudin, H.F. Bettinger, G.E. Scuseria. Phys. Rev. B **63**, 045 413 (2001).
- [11] Л.Н. Сидоров, О.В. Болталина. Успехи химии **71**, 611 (2002).
- [12] O. Gülseren, T. Yildirim, S. Ciraci. Phys. Rev. B **66**, 121 401(R) (2002).
- [13] K.A. Park, Y.S. Choi, Y.H. Lee, C. Kim. Phys. Rev. B **68**, 045 429 (2003).
- [14] H.F. Bettinger. Chem. Phys. Chem **4**, 1283 (2003).
- [15] S. Ciraci, S. Dag, T. Yildirim, O. Gülseren, R.T. Senger. J. Phys: Cond. Matter **16**, R 901 (2004).
- [16] Е.Г. Гальперн, И.В. Станкевич, А.Л. Чистяков, Л.А. Чернозатонский. Изв. АН. Сер. хим. **11**, 2061 (1999).
- [17] Л.А. Чернозатонский, П.Б. Сорокин, Е.Э. Белова, Й. Брюнинг, А.С. Федоров. Письма в ЖЭТФ **84**, 141 (2006).
- [18] Л.А. Чернозатонский, П.Б. Сорокин, Е.Э. Белова, Й. Брюнинг, А.С. Федоров. Письма в ЖЭТФ **85**, 84 (2007).
- [19] С.А. Варганов, П.В. Аврамов, С.Г. Овчинников. ФТТ **42**, 378 (2000).