

18,12

Симметричные рулонные упаковки многослойных углеродных нанолент

© А.В. Савин¹, Е.А. Корзникова², И.П. Лобзенко², Ю.А. Баимова^{2,3}, С.В. Дмитриев^{2,4}

¹ Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

² Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

³ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: asavin@center.chph.ras.ru

(Поступила в Редакцию 28 октября 2015 г.)

Рулонные упаковки однослойного и многослойного графена могут использоваться для создания суперконденсаторов, наносососов, наночистот и других наноструктур. Полноатомное моделирование графеновых рулонов ограничено рассмотрением относительно небольших систем на малых отрезках времени. Для преодоления этих трудностей была предложена двухмерная цепная модель, позволяющая эффективно рассчитывать статические и динамические характеристики рулонов нанолент, учитывая продольную и изгибную жесткости нанолент. Модель распространена на случай рулонов из многослойного графена. Найдены возможные стационарные состояния симметричных рулонов многослойных углеродных нанолент, скрученных так, что все наноленты в рулоне оказываются эквивалентными. Получены зависимости числа витков, внутреннего и внешнего радиусов, частот низкочастотных собственных колебаний рулонных упаковок от длины нанолент L . Показано, что наименьшая частота собственных колебаний симметричного рулона уменьшается с длиной нанолент пропорционально L^{-1} . Слишком коротким нанолентам энергетически невыгодно сворачиваться в рулон и для них основным состоянием является стопка плоских нанолент. С ростом числа слоев k возрастает необходимая длина нанолент L для создания симметричных рулонов. При достаточно малом числе слоев k и достаточно большой длине нанолент L рулонная упаковка имеет наименьшую энергию по сравнению со стопкой плоских нанолент и складчатыми структурами. Результаты могут использоваться для разработки наноматериалов и наноструктур на основе рулонных упаковок графена.

А.В. Савин и И.П. Лобзенко благодарят за финансовую поддержку Российский научный фонд (грант 14-13-00982). Е.А. Корзникова благодарит Президента РФ за поддержку (грант для молодых ученых МК-5283.2015.2). Ю.А. Баимова благодарит за финансовую поддержку Президента РФ (стипендия молодым ученым и аспирантам СП-4037.2015.1). С.В. Дмитриев благодарит The Tomsk State University Academic D.I. Mendeleev Fund Program, 2014–2015. Расчеты произведены на суперкомпьютере Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

1. Введение

Атомы углерода способны создавать колоссальное разнообразие структур, среди которых в последнее время большое внимание исследователей привлекает моноатомный кристаллический слой — графен [1–7]. Данный наноматериал демонстрирует высокую электро- и теплопроводность, рекордные жесткость и прочность на разрыв, колоссальную удельную поверхность и другие свойства, обеспечивающие большое разнообразие его потенциальных применений. Низкая изгибная жесткость графена приводит к возможности создания складок и рулонов, устойчивость которых обеспечивают относительно слабые ван-дер-ваальсовы взаимодействия атомов углерода в sp^2 структурах. Геометрическая форма складок, рулонов и других вторичных структур определяется балансом выигрыша энергии за счет увеличения числа ван-дер-ваальсовых связей между соприкасаю-

щимися листами графена и потери энергии на изгиб листа [8,9].

Еще в 1960 г. отмечалась возможность образования графеновых рулонов в ходе истирания графитовой смазки [10]. На сегодняшний день разработан целый ряд экспериментальных методов получения рулонов нанолент графена и изучения их структуры и свойств [11–17]. Для исследования свойств графеновых рулонов помимо экспериментальных методов широко применяются первопринципные расчеты [18–20], молекулярная динамика [21–32], молекулярная механика [33] и континуальные модели упругого стержня в форме спирали [21,26,34,35].

Наличие внутренней полости у рулонов графеновых нанолент позволяет использовать их для хранения и транспортировки водорода [36,37], в качестве ионного канала [38], наносососа или наночистоты [35,39]. На основе графеновых рулонов могут быть созданы суперконденсаторы [40,41].

Особый интерес представляют многослойные рулоны графена, получаемые скручиванием многослойного графена [42]. Для таких структур методом рамановского рассеяния были измерены низкие частоты колебаний многослойных рулонов [42].

При моделировании складок и рулонов нанолент до недавнего времени использовались полноатомные модели. В таких моделях межатомные взаимодействия описываются, например, стандартным набором потенциалов, предложенным в [43] и успешно апробированным в работах [44–56]. Модели требуют значительных компьютерных ресурсов и не позволяют рассматривать динамику длинных нанолент на значительных отрезках времени. Сложность полноатомных моделей также затрудняет проведение полного анализа возможных стационарных упаковок длинных нанолент. Для преодоления этих трудностей, авторами была предложена модель наноленты, учитывающая ее продольную и изгибную деформацию, а также ван-дер-ваальсовы взаимодействия ее атомов [57,58]. В рамках этой модели были описаны возможные стационарные состояния рулонных упаковок графеновых нанолент, исследованы их энергетические характеристики, рассчитаны низкие частоты колебаний. В настоящей работе подобный анализ распространяется на многослойные рулоны, скрученные из нескольких нанолент.

2. Модель многослойной наноленты

Графеновая нанолента представляет собой ленту постоянной ширины, вырезанную из плоского листа графена. Для упруго изотропного графена, продольная и изгибная жесткости наноленты слабо зависят от ее ориентации. Для определенности рассмотрим наноленту ориентации зигзаг (см. рис. 1 в работе [58]). Модель цепи, описывающая продольные и изгибные движения одиночной наноленты, подробно представлена в работах [57,58]. Модель может быть легко обобщена на случай k -слойной наноленты.

В цепной модели k -слойной наноленте соответствует система из k цепей. Гамильтониан наноленты из k слоев, каждый из которых содержит N частиц, имеет вид

$$H = \sum_{j=1}^k \left[\sum_{n=1}^N \frac{1}{2} M (\dot{x}_{n,j}^2 + \dot{y}_{n,j}^2) + \sum_{n=1}^{N-1} V(r_{n,j}) + \sum_{n=2}^{N-1} U(\theta_{n,j}) + \sum_{n=1}^{N-4} \sum_{k=n+4}^N W(r_{n,j;k,j}) \right] + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=j+1}^k \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N W(r_{n,j;m,l}), \quad (1)$$

где вектор $\mathbf{u}_{n,j} = (x_{n,j}, y_{n,j})$ задает координаты n -ой частицы j -той цепи, $M = 12m_p$ — масса атома углерода ($m_p = 1.6603 \cdot 10^{-27}$ kg — масса протона). Первый член в сумме (1) задает энергию отдельных k цепей из N звеньев, причем, первое слагаемое — это кинетическая энергия системы, второе — энергия

валентных взаимодействий между ближайшими частицами в цепях, третий — энергия связанная с изменением углов между валентными связями и четвертый — ван-дер-ваальсовы взаимодействия между атомами в пределах каждой цепи. Вторым членом в (1) определяется энергия межцепных взаимодействий. Расстояние $r_{n,j} = |\mathbf{v}_{n,j}|$, где вектор $\mathbf{v}_{n,j} = \mathbf{u}_{n+1,j} - \mathbf{u}_{n,j}$, косинус валентного угла $\cos(\theta_{n,j}) = -(\mathbf{v}_{n-1,j}, \mathbf{v}_{n,j}) / (r_{n-1,j} r_{n,j})$, расстояние $r_{n,j;m,l} = |\mathbf{u}_{n,j} - \mathbf{u}_{m,l}|$. Потенциал

$$V(r) = \frac{1}{2} K(r - a)^2, \quad (2)$$

отвечает за продольную жесткость, а потенциал

$$U(\theta) = \varepsilon [\cos(\theta) + 1] \quad (3)$$

— за изгибную жесткость цепи. Модифицированный потенциал Леннарда–Джонса

$$W(r) = 4\varepsilon [(\sigma/f(r))^{12} - (\sigma/f(r))^6], \quad f(r) = r_0(r/r_0)^\alpha, \quad r_0 = 2^{1/6} \sigma, \quad (4)$$

описывает слабые ван-дер-ваальсовы взаимодействия звеньев цепей. Параметры потенциалов взаимодействия (2), (3), (4) определены в работах [57,58], жесткость $K = 405$ N/m, расстояние $a = 0.1228$ nm, энергии $\varepsilon = 3.50$ eV, $\varepsilon = 0.00834$ eV, параметры $\sigma = 0.3212$ nm, $\alpha = 0.88$.

Для нахождения стационарного состояния многослойной наноленты нужно решить задачу на минимум

$$E = \sum_{j=1}^k \left[\sum_{n=1}^{N-1} V(r_{n,j}) + \sum_{n=2}^{N-1} U(\theta_{n,j}) + \sum_{n=1}^{N-4} \sum_{k=n+4}^N W(r_{n,j;k,j}) \right] + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=j+1}^k \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N W(r_{n,j;m,l}) \rightarrow \min : \{\mathbf{u}_{n,j}\}_{n=1, j=1}^{N, k}, \quad (5)$$

т.е. минимизировать потенциальную энергию системы из k цепей по координатам их звеньев $\{\mathbf{u}_{n,j}\}_{n=1, j=1}^{N, k}$. Пусть $\{\mathbf{u}_{n,j}^0\}_{n=1, j=1}^{N, k}$ — решение задачи на минимум (5), тогда соответствующее стационарная структура из k цепей будет иметь перенормированную энергию (энергию на одну частицу) $E_0 = E(\mathbf{u}_{n,j}^0) / (Nk)$.

Задача на минимум (5) решалась численно методом сопряженных градиентов. Задавая специальным образом начальное расположение цепей, после минимизации энергии можно получить различные стационарные структуры системы из k цепей (из k нанолент). Ими могут быть плоские многослойные структуры (см. рис. 1, c и 2, c), различные типы складок (см. рис. 1, b и 2, b) и различные типы рулонных упаковок нанолент (симметричные рулоны, в которых все наноленты эквивалентны, представлены на рис. 1, a и 2, a).

3. Симметричная рулонная упаковка нескольких нанолент

В поперечном сечении симметричный рулон из k нанолент имеет форму спирали Архимеда из k одинаковых цепей (ветвей) (рис. 1, *a* и 2, *a*). Здесь все цепи эквивалентны, поэтому мы называем такую спираль симметричной.

За центр спирали всегда удобно взять центр ее масс

$$\mathbf{u}_0 = \frac{1}{Nk} \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^N \mathbf{u}_{n,i}^0,$$

где $\{\mathbf{u}_{n,j}^0\}_{n=1, i=1}^{N, k}$ — решение задачи на минимум (5), имеющее форму спирали из k цепей (N — число звеньев каждой цепи). В полярной системе координат

$$u_{n,i,1}^0 = u_{0,1} + R_{n,i} \cos(\phi_{n,i}), \quad u_{n,i,2}^0 = u_{0,2} + R_{n,i} \sin(\phi_{n,i}),$$

где угол $\phi_{n,i}^0$ (фаза n -го узла i -той ветви спирали) монотонно растет с увеличением номера звена цепи n . Для симметричной спирали из k ветвей для радиусов узлов имеем $R_{n,1} = \dots = R_{n,k}$, а фазы узлов соседних цепей связаны соотношением $|\phi_{n,i+1} - \phi_{n,i}| = 2\pi/k$.

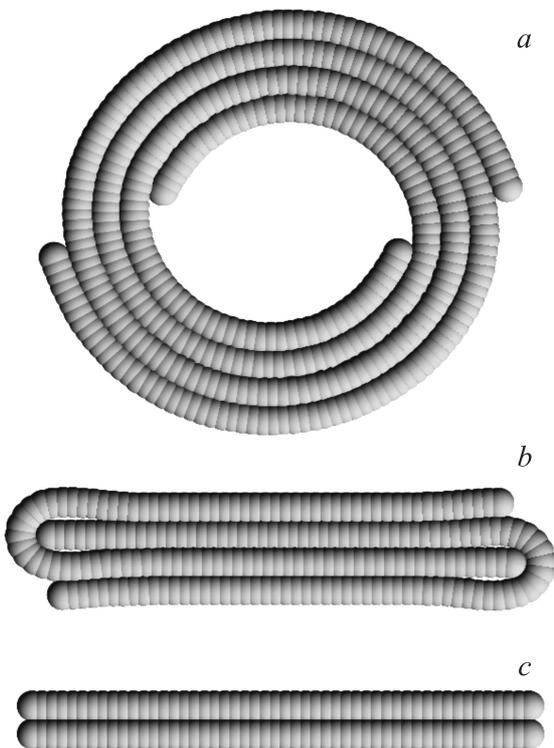


Рис. 1. Симметричная рулонная упаковка (*a*) двухслойной наноленты длины $L = 24.44$ нм (число звеньев одного слоя $N = 200$), (*b*) двойная складка двухслойной наноленты длины $L = 12.16$ нм ($N = 100$), (*c*) плоская двухслойная нанолента длины $L = 6.02$ нм ($N = 50$).

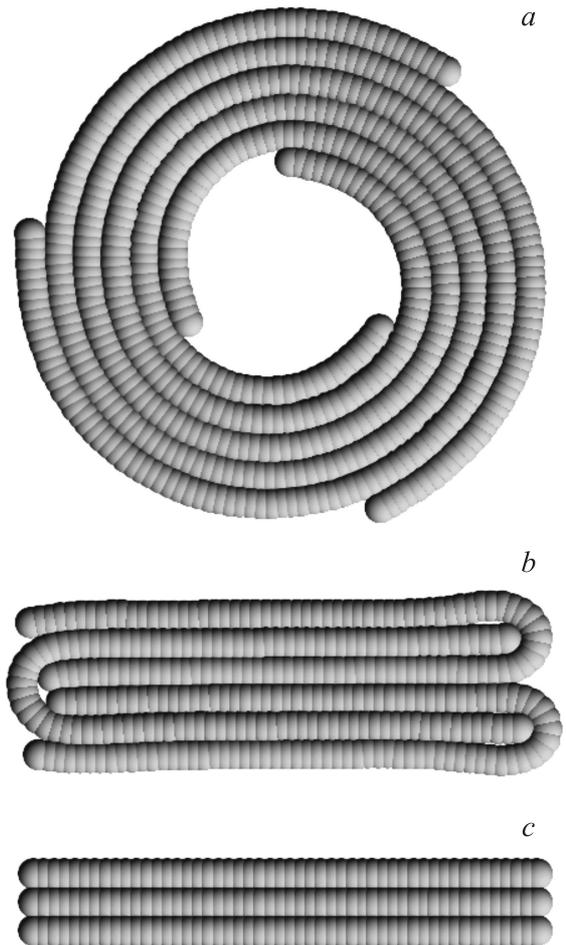


Рис. 2. Симметричная рулонная упаковка (*a*) трехслойной наноленты длины $L = 24.44$ нм (число звеньев одного слоя $N = 200$), (*b*) двойная складка трехслойной наноленты длины $L = 12.28$ нм ($N = 101$), (*c*) плоская трехслойная нанолента длины $L = 6.02$ нм ($N = 50$).

Симметричную спираль из k цепей (ветвей) удобно охарактеризовать числом витков каждой ветви

$$N_c = \sum_{i=1}^k (\phi_{N,i} - \phi_{1,i}) / 2\pi k.$$

При большом числе витков спираль имеет форму круговой шайбы с внутренним отверстием. Границы внутреннего отверстия задают звенья цепей с номером $n < n_1$, где n_1 — максимальное значение номера звена n при котором $\phi_{n,i} - \phi_{1,i} < 2\pi/k$. Поэтому радиус внутреннего отверстия

$$R_1 = \frac{1}{kn_1} \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^{n_1} R_{n,i}.$$

Внешние границы спирали задают звенья с номерами $N - n_2 < n \leq N$, где n_2 — минимальное значение номера звена n при котором $\phi_{N,i} - \phi_{n,i} > 2\pi/k$. Поэтому внеш-

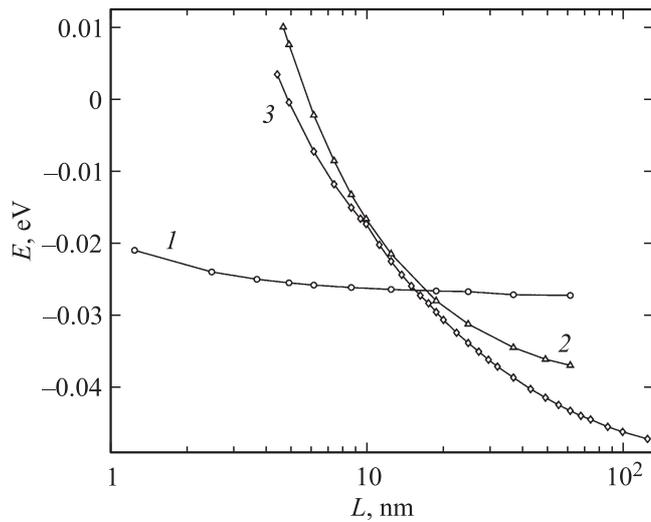


Рис. 3. Зависимость нормированной энергии двуслойной наноленты E от ее длины L для плоской структуры (кривая 1), для двойной складки (кривая 2) и для симметричной рулонной упаковки (кривая 3).

ний радиус спирали

$$R_2 = \frac{1}{(N - n_2 + 1)k} \sum_{i=1}^k \sum_{n=N-n_2}^N R_{n,i}.$$

Рассмотрим вначале двуслойную наноленту, т.е. систему из двух цепей $k = 2$. В поперечном сечении симметричный рулон двуслойной наноленты имеет вид симметричной двухцепной спирали (рис. 1, *a*). Зависимость нормированной энергии двуслойной наноленты E_0 от ее длины $L = (N - 1)a$ для ее различных стационарных упаковок показана на рис. 3. Устойчивая двойная складка для двуслойной наноленты возможна только при длинах $L > 4.54$ nm, а симметричная рулонная упаковка — только для нанолент длины $L > 4.30$ nm. Плоская структура двуслойной наноленты является самой выгодной по энергии при длинах $L < 15.23$ nm, при больших длинах наиболее выгодной по энергии становится ее симметричная рулонная упаковка (симметричная двухцепная спираль). Складка двуслойной наноленты по энергии всегда проигрывает рулонной упаковке.

Жесткость двуслойного рулона (двухцепной спирали) характеризуется наименьшими частотами $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4$ ее собственных колебаний. Для симметричной двухцепной спирали эти колебания соответствуют периодическим смещениям слабо деформированных ветвей спирали относительно друг друга.

Зависимость числа витков N_c , внутреннего R_1 и внешнего радиуса R_2 , а также четырех наименьших частот собственных колебаний двойного рулона от длины нанолент L приведены на рис. 4. Как видно из рисунка с увеличением длины число витков симметричного двойного рулона растет как $L^{0.6}$, внутренние и внешние радиусы растут как $L^{0.23}$ и $L^{0.47}$, а частоты убывают как L^{-1} .

Симметричный рулон трехслойной наноленты в поперечном сечении имеет вид симметричной спирали из трех ветвей (рис. 2, *a*). Зависимость нормированной энергии E_0 различных стационарных упаковок трехслойной наноленты от ее длины $L = (N - 1)a$ показана на рис. 5. Плоская структура трехслойной наноленты устойчива при всех длинах, двойная складка — только при длинах $L > 4.79$ nm, рулонная упаковка — при $L > 3.07$ nm. Плоская структура наноленты является самой выгодной по энергии при длинах $L < 16.30$ nm, при больших длинах рулонная упаковка становится самой выгодной по энергии. Двойная складка трехслойной наноленты по энергии всегда проигрывает рулонной упаковке.

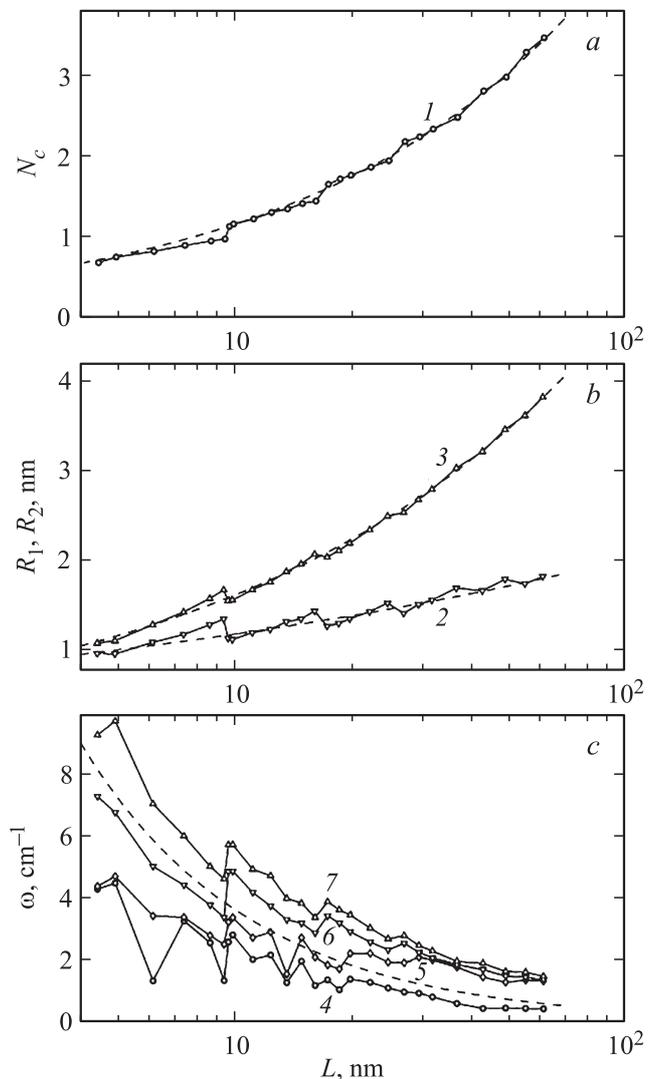


Рис. 4. Зависимость от длины двуслойной наноленты L (а) числа витков стационарного двуслойного рулона N_c (кривая 1), (б) внутреннего R_1 и внешнего R_2 радиусов рулона (кривые 2 и 3), (с) наименьших частот $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4$ собственных колебаний рулона (кривые 4, 5, 6 и 7). Пунктирные кривые дают следующие аппроксимации: $N_c = 0.29L^{0.6}$, $R_1 = 0.7L^{0.23}$, $R_2 = 0.55L^{0.47}$, $\omega_1 = 36/L$.

Внутренний R_1 и внешний R_2 радиусы, а также энергия E_0 симметричной рулонной упаковки k нанолент (цепей) с N частицами в каждой цепи для $k \cdot N = 900$. E_1 — энергия плоского k -слояного листа

$N \cdot k$	R_1 (nm)	R_2 (nm)	E_0 (eV)	E_1 (eV)
900 · 1	1.782	3.626	-0.042374	-0.004664
450 · 2	1.746	3.611	-0.042414	-0.027186
300 · 3	1.586	3.774	-0.042437	-0.035665
225 · 4	1.534	3.758	-0.042451	-0.040565
180 · 5	1.549	3.764	-0.042460	-0.043322
900 · 10	1.570	3.768	-0.042524	-0.048463

Жесткость трехцепной спирали характеризуется четырьмя наименьшими частотами ее собственных колебаний $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4$ при которых происходят смещения слабо деформируемых ветвей спиралей относительно друг друга. Наличие трех эквивалентных друг другу ветвей спирали приводит к кратности части колебаний — колебания с частотами ω_2 и ω_3 всегда двукратны.

Зависимость числа витков N_c , внутреннего R_1 и внешнего радиуса R_2 , четырех наименьших частот собственных колебаний тройного рулона от длины нанолент L приведены на рис. 6. Как видно из рисунка с увеличением длины число витков двойного рулона растет как $L^{0.6}$, внутренние и внешние радиусы растут как $L^{0.26}$ и $L^{0.48}$, а частоты убывают как L^{-1} .

Увеличение числа листов k при сохранении общего числа частиц $N \cdot k$ приводит к уменьшению энергетического выигрыша при образовании рулонной структуры. Возьмем для примера общее число частиц $N \cdot k = 900$. Тогда, как видно из таблицы, все возможные многоли-

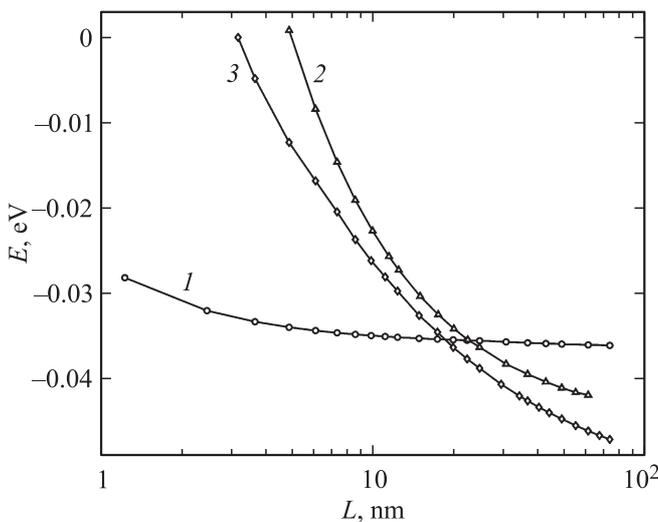


Рис. 5. Зависимость нормированной энергии трехслойной наноленты E от ее длины L для плоской структуры (кривая 1), для двойной складки (кривая 2) и для симметричной рулонной упаковки (кривая 3).

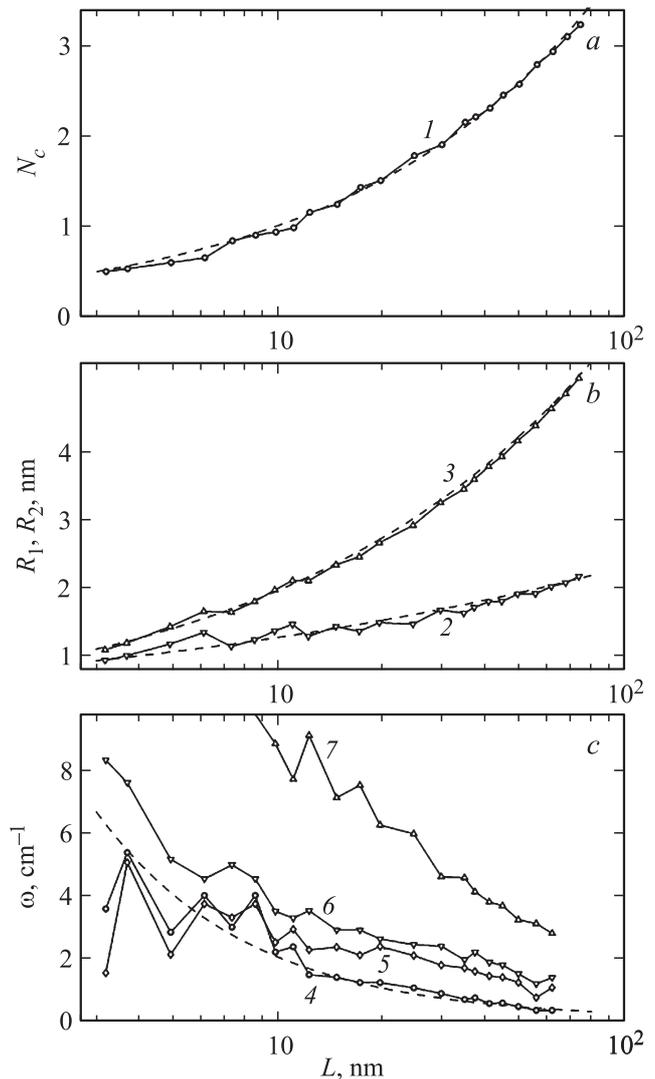


Рис. 6. Зависимость от длины наноленты L (a) числа витков стационарного трехслойного рулона N_c (кривая 1), (b) внутреннего R_1 и внешнего R_2 радиусов рулона (кривые 2 и 3), (c) наименьших частот $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4$ собственных колебаний рулона (кривые 4, 5, 6, 7). Пунктирные кривые дают следующие аппроксимации: $N_c = 0.25L^{0.6}$, $R_1 = 0.7L^{0.26}$, $R_2 = 0.65L^{0.48}$, $\omega = 20/L$.

стовые рулонные упаковки имеют примерно одинаковые геометрические размеры, но энергетический выигрыш от образования рулонной упаковки быстро уменьшается с увеличением числа листов. Так при $k > 4$ плоский k -слойный лист уже энергетически более выгоден по сравнению с рулоном.

4. Заключение

В данной работе цепная модель [57,58], точно описывающая складчатые и рулонные конформации графеновых нанолент, распространена на случай нескольких взаимодействующих нанолент. Гамильтониан модели (1)

учитывает продольную и изгибную жесткости нанолент, а также ван-дер-ваальсовы взаимодействия между слоями каждой из нанолент и между нанолентами. Модель цепи описывает только те моды деформации нанолент, где ряды атомов углерода параллельные оси z перемещаются как жесткое целое в плоскости xy .

Проведенное моделирование показало, что многослойные углеродные наноленты, так же как и однослойные, могут образовывать рулонные упаковки. Проведено сравнение свойств симметричных рулонов, свернутых так, что все наноленты в рулоне эквивалентны. Для таких рулонов с числом нанолент $k = 2$ и $k = 3$ определены равновесные конфигурации в зависимости от длины нанолент L . Рассчитаны внутренний и внешний радиусы и энергии рулонов, а также четыре наименьших частоты собственных колебаний. Показано, что наименьшая частота собственных колебаний симметричного рулона уменьшается с длиной нанолент пропорционально L^{-1} . Слишком коротким нанолентам энергетически невыгодно сворачиваться в рулон и для них основным состоянием является стопка плоских нанолент. С ростом числа слоев k возрастает необходимая длина нанолент L для создания симметричных рулонов. При достаточно малом числе слоев k и достаточно большой длине нанолент L рулонная упаковка имеет наименьшую энергию по сравнению со стопкой плоских нанолент и по сравнению со складчатыми структурами.

Полученные результаты могут быть полезны при создании наноматериалов и наноустройств на основе рулонных упаковок графена.

Список литературы

- [1] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov. *Science* **306**, 666 (2004).
- [2] A.K. Geim, K.S. Novoselov, *Nature Mater.* **6**, 183 (2007).
- [3] C. Soldano, A. Mahmood, E. Dujardin. *Carbon* **48**, 2127 (2010).
- [4] J.A. Baimova, B. Liu, S.V. Dmitriev, K. Zhou. *Phys. Status Solidi R* **8**, 336 (2014).
- [5] J.A. Baimova, B. Liu, S.V. Dmitriev, N. Srikanth, K. Zhou. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**, 19 505 (2014).
- [6] J.A. Baimova, E.A. Korznikova, S.V. Dmitriev, B. Liu, K. Zhou. *Rev. Adv. Mater. Sci.* **39**, 69 (2014).
- [7] A.V. Orlov, I.A. Ovid'ko. *Rev. Adv. Mater. Sci.* **40**, 249 (2015).
- [8] Z. Xu, M.J. Buehler. *ACS Nano* **4**, 3869 (2010).
- [9] W. Li, X. Zheng, B. Liu, X. Sun, T. Wang, J. Zhang, Y. Yan. *Carbon* **89**, 272 (2015).
- [10] W. Bollmann, J. Spreadborough. *Nature* **186**, 29 (1960).
- [11] S. Zhu, T. Li. *J. Phys. D* **46**, 075 301 (2013).
- [12] G. Cheng, I. Calizo, X. Liang, B.A. Sperling, A.C. Johnston-Peck, W. Li, J.E. Maslar, C.A. Richtera, A.R.H. Walker. *Carbon* **76**, 257 (2014).
- [13] H.Q. Zhou, C.Y. Qiu, H.C. Yang, F. Yu, M.J. Chen, L.J. Hu, Y.J. Guo, L.F. Sun. *Chem. Phys. Lett.* **501**, 475 (2011).
- [14] X. Chen, R.A. Boulos, J.F. Dobson, C.L. Raston. *Nanoscale* **5**, 498 (2013).
- [15] M.V. Savoskin, V.N. Mochalin, A.P. Yaroshenko, N.I. Lazareva, T.E. Konstantinova, I.V. Barsukov, I.G. Prokofiev. *Carbon* **45**, 2797 (2007).
- [16] X. Xie, L. Ju, X. Feng, Y. Sun, R. Zhou, K. Liu, S. Fan, Q. Li, K. Jiang. *Nano Lett.* **9**, 2565 (2009).
- [17] A.L. Chuvilin, V.L. Kuznetsov, A.N. Obraztsov. *Carbon* **47**, 3099 (2009).
- [18] H. Pan, Y. Feng, J. Lin. *Phys. Rev. B* **72**, 085 415 (2005).
- [19] R. Ruruli, V.R. Coluci, D.S. Galvao. *Phys. Rev. B* **74**, 085 414 (2006).
- [20] Y. Chen, J. Lu, Z. Gao. *J. Phys. Chem. C* **111**, 1625 (2007).
- [21] X. Shi, N.M. Pugno, Y. Cheng, H. Gao. *J. Appl. Phys.* **95**, 163 113 (2009).
- [22] B.V.C. Martins, D.S. Galvao. *Nanotechnology* **21**, 075 710 (2010).
- [23] S. Huang, B. Wang, M. Feng, X. Xu, X. Cao, Y. Wang. *Surf. Sci.* **634**, 3 (2015).
- [24] E. Perim, R. Paupitz, D.S. Galvao. *J. Appl. Phys.* **113**, 054 306 (2013).
- [25] Y. Wang, H.F. Zhan, C. Yang, Y. Xiang, Y.Y. Zhang. *Comp. Mater. Sci.* **96** 300 (2015).
- [26] X. Shi, Y. Cheng, N.M. Pugno, H. Gao. *J. Appl. Phys.* **96**, 053 115 (2010).
- [27] Z. Zhang, T. Li. *Appl. Phys. Lett.* **97**, 081 909 (2010).
- [28] L. Chu, Q. Xue, T. Zhang, C. Ling. *J. Phys. Chem. C* **115**, 15 217 (2011).
- [29] N. Patra, Y. Song, P. Kral. *ACS Nano* **5**, 1798 (2011).
- [30] H.Y. Song, S.F. Geng, M.R. An, X.W. Zha. *J. Appl. Phys.* **113**, 164 305 (2013).
- [31] Q. Yin, X. Shi. ???
- [32] L.J. Yi, Y.Y. Zhang, C.M. Wang, T.C. Chang. *J. Appl. Phys.* **115**, 204 307 (2014). *Nanoscale* **5**, 5450 (2013).
- [13] Z. Zhang, Y. Huang, T. Li. *J. Appl. Phys.* **112**, 063 515 (2012).
- [34] X. Shi, N.M. Pugno, H. Gao. *Acta Mech. Solida Sin.* **23**, 484 (2010).
- [35] X. Shi, N.M. Pugno, H. Gao. *Int. J. Fract.* **171**, 163 (2011).
- [36] V.R. Coluci, S.F. Braga, R.H. Baughman, D.S. Galvao. *Phys. Rev. B* **75**, 125 404 (2007).
- [37] S.F. Braga, V.R. Coluci, R.H. Baughman, D.S. Galvao. *Chem. Phys. Lett.* **441**, 78 (2007).
- [38] X. Shi, Y. Cheng, N.M. Pugno, H. Gao. *Small* **6**, 739 (2010).
- [39] X. Shi, Q. Yin, N.M. Pugno, H. Gao. *J. Appl. Mech.* **81**, 1014 (2013).
- [40] F. Zeng, Y. Kuang, G. Liu, R. Liu, Z. Huang, C. Fu, H. Zhou. *Nanoscale* **4**, 3997 (2012).
- [41] Y. Pan, F. Zeng, Z. Huang, H. Zhou, Y. Kuang. *Electrochimica Acta* **172**, 71 (2015).
- [42] P.-H. Tan, J.-B. Wu, W.-P. Han, W.-J. Zhao, X. Zhang. *Phys. Rev. B* **89**, 235 404 (2014).
- [43] A.V. Savin, Y.S. Kivshar, B. Hu. *Phys. Rev. B* **82**, 195 422 (2010).
- [44] A.V. Savin, Yu.S. Kivshar. *Europhys. Lett.* **82**, 66 002 (2008).
- [45] A.V. Savin, Y.S. Kivshar, B. Hu. *Europhys. Lett.* **88**, 26 004 (2009).
- [46] A.V. Savin, B. Hu, Y.S. Kivshar. *Phys. Rev. B* **80**, 195 423 (2009).
- [47] A.V. Savin, Y.S. Kivshar. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 111 903 (2009).
- [48] A.V. Savin, Y.S. Kivshar. *Europhys. Lett.* **89**, 46 001 (2010).
- [49] A.V. Savin, Y.S. Kivshar. *Phys. Rev. B* **81**, 165 418 (2010).
- [50] E.A. Korznikova, A.V. Savin, Y.A. Baimova, S.V. Dmitriev, R.R. Mulyukov. *JETP Lett.* **96**, 222 (2012).

- [51] E.A. Korznikova, J.A. Baimova, S.V. Dmitriev. *Europhys. Lett.* **102**, 60 004 (2013).
- [52] J.A. Baimova, S.V. Dmitriev, K. Zhou. *Europhys. Lett.* **100**, 36 005 (2012).
- [53] J.A. Baimova, S.V. Dmitriev, K. Zhou, A.V. Savin. *Phys. Rev. B* **86**, 035 427 (2012).
- [54] S.V. Dmitriev, Y.A. Baimova, A.V. Savin, Y.S. Kivshar?. *JETP Lett.* **93**, 571 (2011).
- [55] Y.A. Baimova, S.V. Dmitriev, A.V. Savin, Y.S. Kivshar?. *Phys. Solid State* **54**, 866 (2012).
- [56] E.A. Korznikova, S.V. Dmitriev. *J. Phys. D* **47**, 345 307 (2014).
- [57] A.V. Savin, E.A. Korznikova, S.V. Dmitriev. *Phys. Rev. B* **92**, 035 412 (2015).
- [58] А.В. Савин, Е.А. Корзникова, С.В. Дмитриев. *ФТТ* **57**, 2278 (2015).