

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **043979**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.07.12

(21) Номер заявки
201991516

(22) Дата подачи заявки
2017.12.21

(51) Int. Cl. **B81B 3/00** (2006.01)
F03G 7/08 (2006.01)
H01L 41/113 (2006.01)
H02N 2/18 (2006.01)

(54) **УСТРОЙСТВА И ДАТЧИКИ ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ И СПОСОБЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ**

(31) **62/438,327**

(32) **2016.12.22**

(33) **US**

(43) **2019.11.29**

(86) **PCT/US2017/067798**

(87) **WO 2018/119180 2018.06.28**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**БОРД ОФ ТРАСТИЗ ОФ ТЕ
ЮНИВЕРСИТИ ОФ АРКАНЗАС (US)**

(72) Изобретатель:
Тибадо Пол, Кумар Прадип (US)

(74) Представитель:
Фелицына С.Б. (RU)

(56) US-A1-20160315561
US-A1-20130313943
US-A1-20130193930
US-A1-20150115767
US-A1-20120267899

(57) В изобретении раскрыты устройства и датчики для аккумуляции энергии, и способы их получения и применения. Устройства для аккумуляции энергии могут содержать мембрану, размещенную на подложке, причем мембрана содержит двумерный (2D) материал и одну или более волн; и компонент, который электрически, магнитно и/или механически соединен с мембраной и/или подложкой, так что компонент выполнен с возможностью аккумуляции энергии из мембраны. Датчики могут содержать мембрану, размещенную на подложке, причем мембрана содержит двумерный материал, одну или более волн; и компонент, который электрически, магнитно и/или механически соединен с мембраной и/или подложкой, так что компонент выполнен с возможностью обнаружения сигнала от мембраны.

B1

043979

043979

B1

Перекрестная ссылка на родственную заявку

По настоящему изобретению заявлен приоритет и право пользования согласно предварительной заявке на получение патента США № 62/438,327, поданной 22 декабря 2016 г., полное содержание которой включено в настоящее изобретение посредством ссылки.

Область техники

Раскрытая технология в целом относится к устройствам и датчикам для аккумуляции энергии, и способам их получения и применения.

Уровень техники

Аккумуляция вибрационной энергии представляет собой практику по захвату вибрационной энергии от внешних источников вибрации (например, транспортных средств, машин, построек и движений человека). Данная захваченная энергия затем может быть использована в различных сферах применения. В некоторых подходах по аккумуляции вибрационной энергии на одном конце фиксируют пластину, и она будет вибрировать вверх и вниз между двумя концами при возбуждении. За счет сгибания и колебания между двумя концами, натяжение/нагрузка, вырабатываемая на поверхности пластины, может быть использована для вырабатывания энергии. Вибрации на атомной шкале присутствуют везде, даже в тихой с точки зрения механики среде. Это происходит вследствие материала, поддерживаемого при некоторой температуре выше абсолютного нуля, и они называются тепловыми вибрациями. Различные варианты реализации, описанные ниже, представлены в отношении этих и других соображений.

Краткое описание изобретения

В соответствии с целями раскрытых устройств и способов, варианты реализации и широкое описание которых представлено в настоящем изобретении, раскрытый объект изобретения относится к устройствам и датчикам для аккумуляции энергии, и способам их получения и применения.

Устройства и датчик для аккумуляции энергии могут содержать мембрану, содержащую двумерный (2D) материал, размещенный на подложке, причем мембрана содержит одну или более волн. Двумерный материал может содержать, например, графен, MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , ReS_2 , ReSe_2 или их комбинацию. В некоторых примерах двумерный материал может содержать графен. Мембрана может иметь среднюю толщину, например, от 0,3 нанометров (нм) до 3,0 нм. Мембрана может иметь средний горизонтальный размер, например, от 0,1 до 100 микрон. В некоторых примерах мембрана может иметь натяжение на единицу длины от 0,0 до 10,0 Н/м. Одна или более волн могут иметь среднюю длину, например, от 1 до 100 нм. В некоторых примерах одна или более волн могут иметь среднюю высоту, например от 0,1 до 2,0 нм.

Подложка может содержать, например, медь, кремний, сапфир или их комбинацию. В некоторых примерах подложка может содержать сетку, содержащую одно или более отверстий.

Устройства для аккумуляции энергии дополнительно содержат компонент, который электрически, магнитно и/или механически соединен с мембраной и/или подложкой, так что компонент выполнен с возможностью аккумуляции энергии из мембраны.

В некоторых примерах подложка является теплопроводящей, а мембрана находится в тепловом контакте с подложкой, причем тепловая энергия подложки может быть преобразована в вибрацию мембраны, так что мембрана имеет вибрационную энергию, и компонент выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны в электрическую, магнитную и/или механическую энергию, тем самым аккумулируя энергию из мембраны. В некоторых примерах тепловая энергия может содержать тепловую энергию окружающей среды. В некоторых примерах мембрана может иметь вибрационную энергию, а компонент выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны в электрическую, магнитную и/или механическую энергию, тем самым аккумулируя энергию из мембраны. В некоторых примерах вибрационная энергия содержит вибрационную энергию окружающей среды. Вибрационная энергия может содержать, например, вибрации с частотой от 0,1 миллигерц (мГц) до 10 гигагерц (ГГц).

В некоторых примерах устройство для аккумуляции энергии может быть выполнено так, что каждая из одной или более волн может вырабатывать мощность от 1 пиковатт (пВ) до 100 пВ. В некоторых примерах устройство для аккумуляции энергии может иметь удельную мощность от 1 до 100000 Вт/м².

В некоторых примерах мембрана может иметь электрический заряд, а компонент содержит конденсатор, размещенный вокруг и электрически соединенный с мембраной, причем конденсатор выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии заряженной мембраны в переменный электрический ток, тем самым аккумулируя энергию из мембраны. В некоторых примерах устройство может дополнительно содержать схему диодного моста для преобразования переменного электрического тока в постоянный электрический ток. Устройство может, например, дополнительно содержать конденсатор, электрически соединенный с диодным мостом, так что постоянный ток может заряжать конденсатор, тем самым сохраняя заряд, выработанный вибрационной энергией заряженной мембраны.

В некоторых примерах мембрана может дополнительно содержать множество магнитных частиц. Множество магнитных частиц может содержать, например, железо, кобальт, ниобий, марганец, никель или их комбинацию. В некоторых примерах множество магнитных частиц может содержать оксид желе-

за, оксид кобальта или их комбинацию. Множество магнитных частиц может иметь, например, средний размер частицы, например, от 0,5 до 10 нм. В некоторых примерах компонент может содержать петлю электрода, магнитно соединенную с мембраной, причем устройство выполнено с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны в переменное по времени магнитное поле, которое индуцирует электрический ток в петле электрода, тем самым преобразовывая вибрационную энергию мембраны в электрический ток и аккумулируя энергию из мембраны. Устройство может, например, дополнительно содержать конденсатор, электрически соединенный с петлей электрода, так что энергия, аккумулированная устройством, может быть сохранена в конденсаторе.

В некоторых примерах компонент может содержать пьезоэлектрическую консоль, а мембрана имеет кромку, которая механически соединена с пьезоэлектрической консолью, причем пьезоэлектрическая консоль выполнена с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны в электрическую энергию, тем самым аккумулируя энергию из мембраны. Устройство может, например, дополнительно содержать конденсатор, электрически соединенный с пьезоэлектрической консолью, так что энергия, аккумулированная устройством, может быть сохранена в конденсаторе.

В некоторых примерах мембрана может быть пьезоэлектрической, а компонент содержит устройство для считывания напряжения, механически и электрически соединенное с мембраной, причем пьезоэлектрическая мембрана выполнена с возможностью преобразования вибрационной энергии в электрическую энергию, которая может быть аккумулирована устройством для считывания напряжения. Устройство может, например, дополнительно содержать конденсатор, электрически соединенный с устройством для считывания напряжения, так что энергия, аккумулированная устройством, может быть сохранена в конденсаторе.

В некоторых примерах компонент может содержать коробочный насос, механически соединенный с мембраной и/или подложкой, причем коробочный насос содержит первый односторонний клапан потока текучей среды и второй односторонний клапан потока текучей среды, и причем коробочный насос выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны в поток текучей среды через коробочный насос через первый односторонний клапан потока текучей среды и второй односторонний клапан потока текучей среды, тем самым преобразовывая вибрационную энергию мембраны в поток текучей среды и аккумулируя энергию из мембраны.

В некоторых примерах мембрана может дополнительно содержать канал, который проходит через мембрану. Компонент может содержать, например, транспортер в виде храповика, механически соединенный с мембраной, причем транспортер в виде храповика выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны в поступательное движение транспортера в виде храповика, так что транспортер в виде храповика может быть перемещен с одной стороны мембраны к другой через канал после вибрации мембраны, тем самым преобразовывая вибрационную энергию мембраны в энергию поступательного движения транспортера в виде храповика и аккумулируя энергию из мембраны.

В настоящем изобретении раскрыты датчики, которые дополнительно содержат компонент, который электрически, магнитно и/или механически соединен с мембраной и/или подложкой, так что компонент выполнен с возможностью обнаружения сигнала от мембраны. В некоторых примерах подложка является теплопроводящей, а мембрана находится в тепловом контакте с подложкой, причем подложка выполнена с возможностью преобразования тепловой энергии в вибрацию мембраны, так что мембрана имеет вибрационную энергию, а компонент выполнен с возможностью обнаружения сигнала, производимого вибрационной энергией мембраны. Тепловая энергия может содержать, например, тепловую энергию окружающей среды. В некоторых примерах мембрана имеет вибрационную энергию, а компонент выполнен с возможностью обнаружения сигнала, производимого вибрационной энергией мембраны. Вибрационная энергия может содержать, например, вибрационную энергию окружающей среды. Вибрационная энергия может содержать, например, вибрации с частотой от 0,1 мГц до 10 ГГц. Компонент может содержать электрод, электрически соединенный с мембраной и/или подложкой. В некоторых примерах электрод может быть выполнен с возможностью обнаружения частоты вибрационной энергии мембраны, так что датчик выполнен с возможностью обнаружения изменения массы мембраны на основе изменения частоты вибрации мембраны. В некоторых примерах электрод может быть выполнен с возможностью обнаружения амплитуды сигнала напряжения от мембраны, так что датчик выполнен с возможностью обнаружения изменения заряда мембраны на основе изменения амплитуды сигнала, обнаруженного от мембраны.

Также в настоящем изобретении раскрыты способы получения устройств и датчиков для аккумулирования энергии, описанных в настоящем изобретении. Например, способы получения устройств и/или датчиков для аккумулирования энергии, описанные в настоящем изобретении, могут содержать: сжатие листа двумерного материала для формирования мембраны; размещение мембраны на подложке; и электрическое, магнитное и/или механическое соединение компонента с мембраной и/или подложкой.

Сжатие листа двумерного материала может содержать, например, приложение боковой силы сжатия к листу, причем боковая сила сжатия имеет амплитуду от 1 наноньютона (нН) до 100 нН. В некоторых примерах лист двумерного материала имеет исходную длину, а сжатый лист двумерного материала имеет сжатую длину, причем сжатая длина короче чем исходная длина на значение от 0,01 до 1%.

Также в настоящем изобретении раскрыты способы применения устройств и/или датчиков для аккумуляции энергии, описанных в настоящем изобретении. Например, также в настоящем изобретении раскрыты способы аккумуляции энергии с использованием устройств для аккумуляции энергии, описанных в настоящем изобретении.

Дополнительные преимущества раскрытых устройств и способов будут изложены в части описания, которая представлена далее, и частично станут очевидными из описания. Преимущества раскрытых устройств будут реализованы и достигнуты посредством элементов и комбинаций, конкретно приведенных в прилагаемой формуле изобретения. Следует понимать, что как приведенное выше общее описание, так и представленное далее подробное описание, приведены лишь в качестве примера и разъяснения, и не являются ограничением раскрытых устройств и способов в том виде, как они заявлены.

Подробности одного или более вариантов реализации изобретения изложены на сопроводительных чертежах и представленном ниже описании. Другие признаки, цели и преимущества изобретения станут ясны из описания и чертежей, а также из формулы изобретения.

Краткое описание чертежей

Сопроводительные чертежи, которые включены и составляют часть настоящего изобретения, иллюстрируют несколько аспектов изобретения и вместе с описанием служат для разъяснения принципов изобретения.

Фиг. 1 представляет собой схематическую диаграмму графеновой мембраны, размещенной на подложке, содержащей медную сетку.

Фиг. 2 представляет собой схематическую иллюстрацию образующихся естественным образом волн на графеновой мембране.

Фиг. 3 представляет собой схематическую диаграмму устройства для аккумуляции энергии.

Фиг. 4 представляет собой схематическую диаграмму переменного тока, вырабатываемого аккумуляцией энергии, показанным на фиг. 3, который преобразуется в постоянный ток и сохраняется в конденсаторе.

Фиг. 5 представляет собой схематическую диаграмму устройства для аккумуляции энергии.

Фиг. 6 представляет собой схематическую диаграмму устройства для аккумуляции энергии.

Фиг. 7 представляет собой схематическую диаграмму устройства для аккумуляции энергии.

Фиг. 8А представляет собой схематическую диаграмму устройства для аккумуляции энергии.

Фиг. 8В представляет собой схематическую диаграмму устройства для аккумуляции энергии.

Фиг. 9А представляет собой схематическую диаграмму устройства для аккумуляции энергии.

Фиг. 9В представляет собой схематическую диаграмму устройства для аккумуляции энергии.

Фиг. 9С представляет собой схематическую диаграмму устройства для аккумуляции энергии.

Фиг. 10 представляет собой схематическую диаграмму датчика.

На фиг. 11 изображен вид сверху и вид сбоку реализации мембраны из двумерного материала, на которых показано формирование одной волны.

На фиг. 12 изображен вид сбоку в поперечном сечении реализации мембраны, на котором показано формирование двух волн с силой сжатия естественного происхождения на двух отдельных концевых точках мембраны.

Фиг. 13 представляет собой схематическую диаграмму сжатия листа двумерного материала.

Фиг. 14 представляет собой изменения высоты у свободностоящего графена с течением времени.

Фиг. 15 представляет собой автокорреляцию данных высота-время с фиг. 14.

Фиг. 16 представляет собой спектральную плотность мощности, вычисленную из данных с фиг. 14 и 15.

Фиг. 17 представляет собой СЭМ-изображение первоначального свободностоящего графена между рельсовыми опорами из Си.

Фиг. 18 представляет собой схематическую диаграмму экспериментальных настроек.

На фиг. 19 показана типичная ось времени высоты мембраны (сверху) и от жесткой выборки (внизу). Вкладка представляет собой увеличенный вид оси времени свободностоящего графена.

На фиг. 20 показан профиль типичного туннельного тока во время измерения.

Фиг. 21 представляет собой среднеквадратичное смещение (СКС) высоты мембраны в зависимости от времени. Пунктирные линии представляют собой аппроксимации с наклонами 1,4 и 0,3. Вкладка представляет собой результат моделирования с использованием экспоненциальных значений времени ожидания и длинны скачков Коши. Вновь, пунктирные линии представляют собой аппроксимации с наклонами 1,4 и 0,3.

Фиг. 22 представляет собой функцию автокорреляции скорости (ФАС) и мгновенную скорость (вкладка), вычисленные из высоты мембраны $z(t)$, показанной на фиг. 19.

Фиг. 23 представляет собой функцию распределения вероятности (ФРВ) измеренной скорости мембраны из свободностоящего графена (ССГ), аппроксимированную под распределения Коши-Лоренца и Гаусса, вместе с жесткой контрольной выборкой (квадратные символы).

Фиг. 24 представляет собой функции распределения вероятности скорости и аппроксимации Коши-Лоренца (сплошные кривые) для различных туннельных токов.

Фиг. 25 представляет собой вариацию ПШПВ функций распределения вероятности скорости с туннельным током для двух различных заданных значений смещающего напряжения.

Фиг. 26 представляет собой высоту центрального атома углерода во времени из моделирования МД для низких температур (100 К) и высоких температур (3000 К). Было обнаружено, что данные по высоким температурам переходят от положительных к отрицательным высотам четыре раза в 1 нс. Также показана высота, отфильтрованная низкочастотной фильтрацией. Эти вычисления выполняли с использованием температурно-ускоренной динамики (ТУД), где 1 нс вычислительного времени является 1 мс в реальном времени.

Фиг. 27 представляет собой функцию распределения вероятности скачка длины для данных высоты, отфильтрованных низкочастотной фильтрацией, показанную с наилучшей аппроксимацией к распределениям Коши-Лоренца и Гаусса.

Фиг. 28 представляет собой вид в перспективе мембраны в изогнутой вниз форме, обозначенной как "(с)" на фиг. 26.

Фиг. 29 представляет собой вид в перспективе мембраны в изогнутой вверх форме, обозначенной как "(d)" на фиг. 26.

Фиг. 30 представляет собой результаты молекулярно-динамического моделирования из уровня техники с использованием МА/ММПС, в которых показаны данные высота-время для заранее изогнутого свободностоящего графена.

Подробное описание

Устройства и способы, описанные в настоящем изобретении, могут быть лучше поняты посредством ссылки на представленное далее подробное описание конкретных аспектов раскрытого объекта изобретения и примеры, включенные в настоящее изобретение.

Перед тем, как настоящие устройства и способы будут раскрыты и описаны, следует понимать, что аспекты, описанные ниже, не ограничены подробностями исполнения и расположения компонентов, изложенными в представленном далее описании или проиллюстрированными на чертежах. Могут быть предусмотрены другие варианты реализации раскрытой технологии, и она может быть реализована или осуществлена на практике различными способами.

В представленном ниже описании сделаны ссылки на сопроводительными чертежи, которые образуют его часть и на которых в качестве примера показаны конкретные варианты реализации или примеры.

Следует также понимать, что терминология, используемая в настоящем изобретении, предназначена для описания лишь конкретных аспектов, и не предназначена для ограничения. При описании примеров вариантов реализации будет сделана ссылка к терминологии из соображений ясности. Предполагается, что каждый термин следует понимать в его наиболее широком значении, как понимает специалист в данной области техники, и включает все технические эквиваленты, которые функционируют подобным образом для выполнения конкретной задачи. Следует также понимать, что указание на один или более этапов способа не препятствует наличию дополнительных этапов способа или не составляет помехи для этапов способа между теми этапами, которые были явным образом идентифицированы. Этапы способа могут выполняться в порядке, отличающемся от описанного в настоящем изобретении, без выхода за рамки объема раскрытой технологии. Подобным образом, следует также понимать, что указание на один или более компонентов в устройстве или системе не препятствует наличию дополнительных компонентов или не составляет помехи для компонентов между теми компонентами, которые были явным образом идентифицированы.

Также, по всему настоящему изобретению сделаны ссылки на различные публикации. Раскрытие полного содержания этих публикаций включено в настоящее изобретение посредством ссылки для того, чтобы более полно описать область техники, к которой относится раскрытый объект изобретения. Описанные ссылки также индивидуально и конкретно включены в настоящее изобретение посредством ссылки для материала, содержащегося в нем, который описан в предложении, в котором сделана эта ссылка.

Определения

В настоящем изобретении и в представленной далее формуле изобретения будет сделана ссылка на ряд терминов, которые следует определять со следующими значениями:

По всему описанию и формуле изобретения настоящего изобретения слово "содержать" и другие формы слова, такие как "содержащий" и "содержит", означает включающий, но без ограничения, и оно не предполагает, например, исключения других добавок, компонентов, целых чисел или этапов.

Используемые в описании и в прилагаемой формуле изобретения грамматические формы единственного числа включают ссылки на множественное число, если контекстом явным образом не указано иное. Таким образом, например, ссылка на "композицию" включает смеси двух или более таких композиций, ссылка на "соединение" включает смеси двух или более таких соединений, ссылка на "агент" включает смесь двух или более таких агентов и тому подобное.

Следует понимать, что по всему настоящему изобретению идентификаторы "первый" и "второй" используются лишь для того, чтобы помочь читателю отличить различные компоненты, признаки или

этапы раскрытого объекта изобретения. Идентификаторы "первый" и "второй" не предназначены для придания какого-либо конкретного порядка, количества, приоритета или важности компонентам или этапам, модифицированным этими терминами.

Термин "или их комбинации", используемые в настоящем изобретении, относится ко всем перестановкам и комбинациям перечисленных элементов, предшествующих термину. Например, предполагается, что "А, В, С или их комбинации" включает по меньшей мере одно из: А, В, С, АВ, АС, ВС или АВС, а если в конкретном контексте важен порядок, также ВА, СА, СВ, СВА, ВСА, АСВ, ВАС или САВ. Продолжая рассматривать данный пример, явным образом включены комбинации, которые содержат повторения одного или более элементов или терминов, таких как ВВ, ААА, АВ, ВВС, АААВСССС, СВВААА, САВВВВ и так далее. Специалист в данной области техники поймет, что, как правило, нет какого-либо ограничения по количеству элементов или терминов в любой комбинации, если только иное не следует явным образом из контекста.

Устройство и датчики для аккумуляции энергии.

В настоящем изобретении описаны устройства 100 и датчики 140 для аккумуляции энергии. Устройство 100 и датчики для аккумуляции энергии содержат мембрану 102, размещенную на подложке 104, причем мембрана 102 содержит двумерный (2D) материал и одну или более волн.

В представленном как пример варианте реализации раскрыто устройство 100 для аккумуляции энергии, имеющее источник питания, для аккумуляции вибрационной энергии окружающей среды, имеющее атомную двумерную мембрану 102 для изгибания при относительно низкой частоте. Аномальная вибрационная кинетическая энергия этих двумерных материалов, при использовании в качестве активного компонента устройства 100 для аккумуляции энергии, может обеспечивать превосходное вырабатывание энергии по сравнению с существующей технологией. Например, в текущей технологии аккумуляции энергии микроэлектромеханической (МЭМ) вибрации кремния активным компонентом может быть платформа из протравленного кремния. Эта платформа не станет спонтанно вибрировать или механически изгибаться, поскольку она является слишком жесткой. В настоящем раскрытии под "механическим изгибанием" следует понимать нелинейное явление. Предыдущие подходы со структурами МЭМ кремния являются устройствами с линейным реагированием. В отличие от этого, мембрана 102 устройств 100 для аккумуляции энергии, описанная в настоящем изобретении, может спонтанно вибрировать и механически изгибаться.

Двумерный материал может содержать, например, графен, MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , ReS_2 , ReSe_2 или их комбинацию. В некоторых примерах двумерный материал может содержать графен.

Принадлежность двумерного материала может быть выбрана исходя из множества факторов. Например, жесткость на изгиб варьируется между различными двумерными материалами и, следовательно, будут доступны различные частоты вибрации. Также, значительно варьируется электрическая проводимость различных двумерных материалов, что может контролировать эффективность аккумуляции энергии с использованием электростатического подхода. Следовательно, принадлежность двумерного материала может быть выбрана для контроля одного или более этих параметров.

В некоторых примерах мембрана 102 может содержать свободностоящий графен, который имеет существенно большую составляющую скорости в распределении вероятности скорости. В некоторых примерах мембрана 102 может проявлять непрерывное нелинейное движение при комнатной температуре.

Мембрана 102 может, например, иметь среднюю толщину, составляющую 0,3 нанометра (нм) или более (например, 0,4 или более, 0,5 или более, 0,6 или более, 0,7 или более, 0,8 или более, 0,9 или более, 1,0 или более, 1,1 или более, 1,2 или более, 1,3 или более, 1,4 или более, 1,5 или более, 1,6 или более, 1,7 или более, 1,8 или более, 1,9 или более, 2,0 или более, 2,1 или более, 2,2 или более, 2,3 или более, 2,4 или более, или 2,5 нм или более). В некоторых примерах мембрана 102 может иметь среднюю толщину, составляющую 3,0 нм или менее (например, 2,9 или менее, 2,8 или менее, 2,7 или менее, 2,6 или менее, 2,5 или менее, 2,4 или менее, 2,3 или менее, 2,2 или менее, 2,1 или менее, 2,0 или менее, 1,9 или менее, 1,8 или менее, 1,7 или менее, 1,6 или менее, 1,5 или менее, 1,4 или менее, 1,3 или менее, 1,2 или менее, 1,1 или менее, 1,0 или менее, 0,9 или менее, 0,8 или менее, 0,7 или менее, 0,6 или менее, или 0,5 нм или менее). Средняя толщина мембраны 102 может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, мембрана 102 может иметь среднюю толщину от 0,3 до 3,0 нм (например, от 0,3 до 2,5, от 0,3 до 2,0, от 0,3 до 1,5, от 0,3 до 1,0 или от 0,3 до 0,6 нм).

Мембрана 102 может, например, иметь средний горизонтальный размер, составляющий 0,1 микрона (мкм) или более (например, 0,5 или более, 1 или более, 1,5 или более, 2 или более, 2,5 или более, 3 или более, 3,5 или более, 4 или более, 4,5 или более, 5 или более, 6 или более, 7 или более, 8 или более, 9 или более, 10 или более, 15 или более, 20 или более, 25 или более, 30 или более, 35 или более, 40 или более, 45 или более, 50 мкм или более, 60 нм или более, 70 мкм или более, 80 мкм или более). В некоторых примерах мембрана 102 может иметь средний горизонтальный размер, составляющий 100 мкм или менее (например, 90 или менее, 80 или менее, 70 или менее, 60 или менее, 50 или менее, 45 или менее, 40 или менее, 35 или менее, 30 или менее, 25 или менее, 20 или менее, 15 или менее, 10 или менее, 9 или менее,

8 или менее, 7 или менее, 6 или менее, 5 или менее, 4,5 или менее, 4 или менее, 3,5 или менее, 3 или менее, 2,5 или менее, 2 или менее, 1,5 или менее, или 1 мкм или менее). Средний горизонтальный размер мембраны 102 может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, мембрана 102 может иметь средний горизонтальный размер от 0,1 до 100 микрон (например, от 0,1 до 50, от 50 до 100, от 0,1 до 20, от 20 до 40, от 40 до 60, от 60 до 80, от 80 до 100, от 0,5 до 95 или от 10 до 90 мкм).

В некоторых примерах мембрана 102 может иметь натяжение на единицу длины, составляющее 0,0 Ньютон на метр (Н/м) или более (например, 0,01 или более, 0,02 или более, 0,03 или более, 0,04 или более, 0,05 или более, 0,06 или более, 0,07 или более, 0,08 или более, 0,09 или более, 0,10 или более, 0,11 или более, 0,12 или более, 0,13 или более, 0,14 или более, 0,15 или более, 0,20 или более, 0,25 или более, 0,30 или более, 0,35 или более, 0,40 или более, 0,45 или более, 0,50 или более, 0,60 или более, 0,70 или более, 0,80 или более, 0,90 или более, 1,0 или более, 1,5 или более, 2,0 или более, 2,5 или более, 3,0 или более, 3,5 или более, 4,0 или более, 4,5 или более, 5,0 или более, 6,0 или более, или 7,0 Н/м или более). В некоторых примерах мембрана 102 может иметь натяжение на единицу длины, составляющее 10,0 Н/м или менее (например, 9,0 или менее, 8,0 или менее, 7,0 или менее, 6,0 или менее, 5,0 или менее, 4,5 или менее, 4,0 или менее, 3,5 или менее, 3,0 или менее, 2,5 или менее, 2,0 или менее, 1,5 или менее, 1,0 или менее, 0,90 или менее, 0,80 или менее, 0,70 или менее, 0,60 или менее, 0,50 или менее, 0,45 или менее, 0,40 или менее, 0,35 или менее, 0,30 или менее, 0,25 или менее, 0,20 или менее, 0,15 или менее, 0,14 или менее, 0,13 или менее, 0,12 или менее, 0,11 или менее, 0,10 или менее, 0,09 или менее, 0,08 или менее, 0,07 или менее, 0,06 или менее, или 0,05 Н/м или менее). Натяжение на единицу длины мембраны 102 может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, мембрана 102 может иметь натяжение на единицу длины от 0,0 до 10,0 Н/м (например, от 0,0 до 8,0, от 0,0 до 5,0, от 0,0 до 3,0, от 0,0 до 1,0, от 0,0 до 0,5, от 0,0 до 0,3 или от 0,03 до 0,12 Н/м). Натяжение может быть измерено с использованием атомно-силовой микроскопии.

Одна или более волн могут, например, иметь среднюю длину, составляющую 1 нм или более (например, 2 или более, 3 или более, 4 или более, 5 или более, 6 или более, 7 или более, 8 или более, 9 или более, 10 или более, 15 или более, 20 или более, 25 или более, 30 или более, 35 или более, 40 или более, 45 или более, 50 или более, 55 или более, 60 или более, 65 или более, 70 или более, 75 или более, или 80 нм или более). В некоторых примерах одна или более волн могут иметь среднюю длину, составляющую 100 нм или менее (например, 95 или менее, 90 или менее, 85 или менее, 80 или менее, 75 или менее, 70 или менее, 65 или менее, 60 или менее, 55 или менее, 50 или менее, 45 или менее, 40 или менее, 35 или менее, 30 или менее, 25 или менее, 20 или менее, 15 или менее, 10 или менее, 9 или менее, 8 или менее, 7 или менее, 6 или менее, или 5 нм или менее). Средняя длина одной или более волн может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, одна или более волн могут иметь среднюю длину от 1 до 100 нм (например, от 1 до 90, от 1 до 80, от 1 до 70, от 1 до 60, от 5 до 50, от 10 до 40 или от 20 до 30 нм). Длина волн может быть измерена, например, с использованием электронной микроскопии.

В некоторых примерах одна или более волн могут, например, иметь среднюю высоту, составляющую 0,1 нм или более (например, 0,11 или более, 0,12 или более, 0,13 или более, 0,14 или более, 0,15 или более, 0,20 или более, 0,25 или более, 0,30 или более, 0,35 или более, 0,40 или более, 0,45 или более, 0,50 или более, 0,60 или более, 0,70 или более, 0,80 или более, 0,90 или более, 1,0 или более, 1,1 или более, 1,2 или более, 1,3 или более, 1,4 или более, или 1,5 нм или более). В некоторых примерах одна или более волн могут иметь среднюю высоту, составляющую 2,0 нм или менее (например, 1,9 или менее, 1,8 или менее, 1,7 или менее, 1,6 или менее, 1,5 или менее, 1,4 или менее, 1,3 или менее, 1,2 или менее, 1,1 или менее, 1,0 или менее, 0,90 или менее, 0,80 или менее, 0,70 или менее, 0,60 или менее, 0,50 или менее, 0,45 или менее, 0,40 или менее, 0,35 или менее, 0,30 или менее, 0,25 или менее, или 0,20 нм или менее). Средняя высота одной или более волн может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, одна или более волн могут иметь среднюю высоту от 0,1 до 2,0 нм (например, от 0,1 до 1,5, от 0,1 до 1,0, от 0,1 до 0,70, от 0,20 до 0,60, от 0,30 до 0,50 или от 0,35 до 0,45 нм). Высота волн может быть измерена, например, с использованием электронной микроскопии.

Мембрана 102 может быть закреплена, например, одним или обоими концами к подложке 104. В некоторых примерах мембрана 102 выполнена с возможностью вибрации через ее центральную часть.

Подложка 104 может содержать, например, медь, кремний, карбид кремния, сапфир или их комбинацию. В некоторых примерах подложка 104 может содержать сетку, содержащую одно или более отверстий.

Представленное ниже обсуждение приведено для некоторого примера, где мембрана 102 содержит графен, а подложка 104 содержит медную сетку, однако те же замыслы могут быть применимы к любым мембранам 102 и/или подложкам 104, описанным в настоящем изобретении.

В некоторых вариантах реализации мембрана 102 может содержать одноатомную пластину углерода из графита в качестве своего активного компонента. Лист графена может быть расположен сверху на

одном или более отверстиях медной сетки. Каждое отверстие, покрытое графеном, может формировать геометрию открытой рамы со свободностоящим графеном между ними. Когда графен размещен на медной сетке, имеется сильное ван-дер-ваальсово взаимодействие ($\sim 0,1$ Дж/м²) между кромкой графена и боковой стенкой медной сетки (фиг. 1). В зависимости от количества избыточного графена, длина контакта, показанная как z_0 , будет естественным образом увеличиваться или снижаться до тех пор, пока не будет установлен баланс усилий. Данное явление известно как самонатяжение. Окончательное натяжение может составлять $\sim 0,1$ Н/м, а окончательная геометрия свободностоящего графена может быть составлена из волн (фиг. 2). Эти волны могут образовываться естественным образом и волны могут иметь распределение типичного размера 20-24 нм в длину и от 0,3 до 0,5 нм в высоту. Для образования волн, графен должен быть свободен для самостоятельного сжатия до окончательного самонатяжения.

Напряжение сжатия, связанное с геометрией волны, представляет собой изменение длины, деленное на первоначальную длину. Напряжение сжатия может составлять, например, 0,01% или более (например, 0,02 или более, 0,03 или более, 0,04 или более, 0,05 или более, 0,06 или более, 0,07 или более, 0,08 или более, 0,09 или более, 0,1 или более, 0,2 или более, 0,3 или более, 0,4 или более, 0,5 или более, 0,6 или более, 0,7 или более, или 0,8% или более). В некоторых примерах напряжение сжатия может составлять 1% или менее (например, 0,9 или менее, 0,8 или менее, 0,7 или менее, 0,6 или менее, 0,5 или менее, 0,4 или менее, 0,3 или менее, 0,2 или менее, 0,1 или менее, 0,09 или менее, 0,08 или менее, 0,07 или менее, 0,06 или менее, 0,05 или менее, или 0,04% или менее). Напряжение сжатия может, например, находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, напряжение сжатия может находиться в диапазоне от 0,01 до 1% (например, от 0,01 до 0,1, от 0,1 до 1, от 0,01 до 0,05, от 0,05 до 0,1, от 0,1 до 0,5, от 0,5 до 1 или от 0,05 до 0,5%).

Представляется возможным применение растягивающей нагрузки к подложке 104 и графену в сборе, а также изменять форму волн, по мере растяжения графена. Изменение формы волн изменяет сжимающее напряжение и изменяет скорость, с которой графен будет спонтанно менять свою кривизну на обратную. Альтернативно, путем настраивания внешней нагрузки, частоты вибрации мембраны 102 могут быть изменены.

При хранении при комнатной температуре (например, 300 К), свободностоящий графен может спонтанно вибрировать вследствие тепловой энергии, которая непрерывно течет от опор медной сетки. На атомном уровне, когда графеновая мембрана 102 хранится при комнатной температуре, каждый атом углерода обладает кинетической энергией ($0,5 m v^2$, где m - это масса атома углерода, а v - это его скорость), равной $k_B T$ или около 25 мэВ. Это является богатым источником энергии, поскольку графен имеет 4×10^{15} атомов/см². Вычисления электрической мощности прогнозируют, что каждый зубец может вырабатывать 10 пВт мощности, эквивалентные 250000 Вт/м², что относит его к категории, подобной выработки энергии ветра и солнца. Поскольку скорость не равна нулю, атомы внутри мембраны 102 находятся в постоянном движении. Поскольку атомы соединены друг с другом в сеть, вся мембрана 102 формирует волны и иногда эти волны меняют свою кривизну на обратную. Каждый зубец имеет тысячи атомов и когда кривизна меняется на обратную, все атомы двигаются согласованно вместе, в фазе, и эта энергия может быть аккумулирована. Естественное движение может быть использовано в качестве активного компонента устройства 100 для аккумулирования энергии, или это естественное движение может быть использовано для приведения в действие активного компонента традиционного устройства 100 для аккумулирования вибрационной энергии.

В некоторых примерах мембрана 102 может иметь один зубец. В некоторых примерах мембрана 102 может иметь множество волн, которые могут образовывать сеть взаимодействующих волн. Мембрана 102, которая отсчитывает 10 микрон по 10 микрон, в некоторых примерах может иметь более 100000 волн. Движение одной волны может повлиять на движение других волн поблизости, тем самым обеспечивая механизм обратной связи, который улучшает способность аккумулирования энергии.

Устройства 100 для аккумулирования энергии дополнительно содержат компонент 106, который электрически, магнитно и/или механически соединен с мембраной 102 и/или подложкой 104, так что компонент 106 выполнен с возможностью аккумулирования энергии из мембраны 102.

В некоторых примерах подложка 104 является теплопроводящей, а мембрана 102 находится в тепловом контакте с подложкой 104, причем тепловая энергия подложки 104 может быть преобразована в вибрацию мембраны 102, так что мембрана 102 имеет вибрационную энергию, и компонент 106 выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны 102 в электрическую, магнитную и/или механическую энергию, тем самым аккумулируя энергию из мембраны 102. В некоторых примерах тепловая энергия может содержать тепловую энергию окружающей среды.

В некоторых примерах мембрана 102 может иметь вибрационную энергию, а компонент 106 выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны 102 в электрическую, магнитную и/или механическую энергию, тем самым аккумулируя энергию из мембраны 102. В некоторых примерах вибрационная энергия содержит вибрационную энергию окружающей среды.

Вибрационная энергия, например, может содержать вибрации с частотой 0,1 миллигерц или более (например, 0,5 или более, 1 или более, 5 или более, 10 или более, 50 или более, 100 или более, 500 мГц

или более, 1 Гц или более, 5 или более, 10 или более, 50 или более, 100 или более, 500 Гц или более, 1 кГц или более, 10 или более, 50 или более, 100 или более, 500 кГц или более, 1 мегагерц (МГц) или более, 5 или более, 10 или более, 50 или более, 100 или более, 500 МГц или более, или 1 гигагерц (ГГц) или более). В некоторых примерах вибрационная энергия может содержать вибрации с частотой 10 гигагерц (ГГц) или менее (например, 5 или менее, 1 ГГц или менее, 500 МГц или менее, 100 или менее, 50 или менее, 10 или менее, 5 или менее, 1 МГц или менее, 500 кГц или менее, 100 или менее, 50 или менее, 10 или менее, 5 или менее, 1 кГц или менее, 500 Гц или менее, 100 или менее, 50 или менее, 10 или менее, 5 или менее, 1 Гц или менее, 500 мГц или менее, 100 или менее, 50 или менее, 10 или менее, или 5 мГц или менее). Частота вибраций вибрационной энергии может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, вибрационная энергия может содержать вибрации с частотой от 0,1 мГц до 10 ГГц (например, от 0,1 мГц до 1 кГц, от 1 кГц до 10 ГГц, от 0,1 мГц до 1 Гц, от 1 Гц до 1 кГц, от 1 кГц до 1 МГц, от 1 МГц до 10 ГГц или от 5 мГц до 1 ГГц).

В некоторых примерах мембрана 102 может вибрировать непрерывно, поскольку она может захватывать энергию окружающей среды при более низких частотах и независимо от шумовых ограничений. В свою очередь, эта энергия окружающей среды может быть захвачена компонентом 106 и преобразована в другие формы энергии, в том числе электричество.

Тогда как традиционные устройства 100 для аккумуляции вибрационной энергии требовали макроскопическое внешнее приводное усилие для захвата вибрационной энергии (например, вибраций в движущемся автомобиле), в некотором примере устройства 100 для аккумуляции энергии, описанные в настоящем изобретении, могут быть приведены в действия с помощью условий окружающей среды. Например, устройства 100 для аккумуляции энергии, описанные в настоящем изобретении, могут аккумулировать энергию в тихой окружающей среде, а также в шумной окружающей среде.

В некоторых примерах устройство 100 для аккумуляции энергии может быть выполнено таким образом, что каждая из одной или более волн может вырабатывать мощность, составляющую 1 пиковатт (пВт) или более (например, 5 или более, 10 или более, 15 или более, 20 или более, 25 или более, 30 или более, 35 или более, 40 или более, 45 или более, 50 или более, 55 или более, 60 или более, 65 пт или более, 70 или более, 75 или более, 80 или более, 85 или более, или 90 пВт или более). В некоторых примерах устройство 100 для аккумуляции энергии может быть выполнено таким образом, что каждая из одной или более волн может вырабатывать мощность, составляющую 100 пВт или менее (например, 95 или менее, 9095 или менее, 8595 или менее, 8095 или менее, 7595 или менее, 7095 или менее, 6595 или менее, 6095 или менее, 5595 или менее, 5095 или менее, 4595 или менее, 4095 или менее, 3595 или менее, 3095 или менее, 2595 или менее, 2095 или менее, 1595 или менее, или 1095 пВт или менее). Мощность, вырабатываемая каждой из одной или более волн, может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, устройство 100 для аккумуляции энергии может быть выполнено таким образом, что каждая из одной или более волн может вырабатывать мощность от 1 до 100 пВт (например, от 1 до 50, от 50 до 100, от 1 до 30, от 20 до 40, от 40 до 60, от 60 до 80, от 80 до 100, от 10 до 90 или от 20 до 80 пВт).

В некоторых примерах устройство 100 для аккумуляции энергии может иметь удельную мощность, составляющую 1 Ватт на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$) или более (например, 2 или более; 3 или более; 4 или более; 5 или более; 10 или более; 50 или более; 100 или более; 500 или более; 1000 или более; 5000 или более; 10000 или более; или 50000 $\text{Вт}/\text{м}^2$ или более). В некоторых примерах устройство 100 для аккумуляции энергии может иметь удельную мощность, составляющую 100000 $\text{Вт}/\text{м}^2$ или менее (например, 90000 или менее; 80000 или менее; 70000 или менее; 60000 или менее; 50000 или менее; 10000 или менее; 5000 или менее; 1000 или менее; 500 или менее; 100 или менее; 50 или менее; 10 или менее; или 5 $\text{Вт}/\text{м}^2$ или менее). Удельная мощность устройства 100 для аккумуляции энергии может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, устройство 100 для аккумуляции энергии может иметь удельную мощность от 1 до 100000 $\text{Вт}/\text{м}^2$ (например, от 1 до 1,000; от 1,000 до 100,000; от 1 до 100; от 100 до 1,000; от 1,000 до 10,000; от 10,000 до 100,000; от 10 до 50,000; или от 100 до 10,000 $\text{Вт}/\text{м}^2$).

Ссылаясь теперь на фиг. 3, в некоторых примерах мембрана 102 может иметь электрический заряд, а компонент 106 содержит конденсатор 108, размещенный вокруг и электрически соединенный с мембраной 102, причем конденсатор 108 выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии заряженной мембраны 102 в переменный электрический ток, тем самым аккумулируя энергию из мембраны 102. Например, движение заряженной мембраны 102 (по центру) индуцирует ток в находящихся поблизости пластинах конденсатора (верхние и нижние пластины) 108. Данная система представляет собой электростатический преобразователь на основе электрета, основанный на исполнении конденсатора с изменчивыми промежутками. Фиксированный заряд на мембране 102 действует в качестве источника фиксированного напряжения и по мере движения мембраны 102, емкость изменяется с течением времени, поскольку расстояние меняется с течением времени. Выходная мощность пропорциональна напряжению, возведенному в квадрат столько раз, сколько было изменений емкости, деленному на изменение времени для одного цикла. Электреты обеспечивают возможность преобразования простой механи-

ческой энергии в электрическую.

Ссылаясь теперь на фиг. 4, в некоторых примерах устройство 100 может дополнительно содержать схему диодного моста 110 для преобразования переменного электрического тока в постоянный электрический ток. Устройство 100 может, например, дополнительно содержать конденсатор 112, электрически соединенный с диодным мостом 110, так что постоянный ток может заряжать конденсатор 112, тем самым сохраняя заряд, выработанный вибрационной энергией заряженной мембраны 102. Сразу после заряда, конденсатор 112 может быть использован, например, для подачи питания на электронное устройство, как, например, для одного цикла применения беспроводного датчика.

В некоторых примерах устройство 100 для аккумуляции энергии может содержать устройство для электромагнитной индукции. Ссылаясь теперь на фиг. 5, в некоторых примерах мембрана 102 может дополнительно содержать множество магнитных частиц 114. Множество магнитных частиц 114 может содержать, например, железо, кобальт, ниобий, марганец, никель или их комбинацию. В некоторых примерах множество магнитных частиц 114 может содержать оксид железа, оксид кобальта или их комбинацию.

Множество магнитных частиц 114 может иметь средний размер частиц. "Средний размер частиц" и "усредненный размер частиц" используются в настоящем изобретении взаимозаменяемым образом и в целом относятся к статистическому усредненному размеру частиц в популяции частиц. Например, средний размер частиц для множества частиц по существу сферической формы может содержать средний диаметр множества частиц. Для анизотропной частицы средний размер частиц может относиться, например, к среднему максимальному размеру частицы (например, длине стержнеподобной частицы, диагонали кубической частицы, биссектрисе частицы треугольной формы и т.д.). Усредненный размер частиц может быть измерен с использованием известных из уровня техники способов, таких как оценка путем сканирующей электронной микроскопии и/или трансмиссионной электронной микроскопии.

В некоторых примерах множество магнитных частиц 114 может быть по существу монодисперсным. "Монодисперсные" и "однородное распределение частиц", как используется в настоящем изобретении, в целом описывают популяцию частиц, где все частицы имеют одинаковый или почти одинаковый размер. Как используется в настоящем изобретении, монодисперсное распределение относится к распределениям частиц, в которых 80% распределения (например, 85 распределения, 90 распределения или 95% распределения) лежит в пределах 25% медианного размера частиц (например, в пределах 20, в пределах 15, в пределах 10 или в пределах 5% медианного размера частиц).

Множество магнитных частиц может содержать частицы любой формы (например, сферы, стержня, четырехугольника, эллипса, треугольника, многоугольника и т.д.). В некоторых примерах множество магнитных частиц 114 может иметь изотропическую форму. В некоторых примерах множество магнитных частиц 114 может иметь анизотропическую форму.

Множество магнитных частиц 114 может, например, иметь средний размер частиц, составляющий 0,5 нм или более (например, 0,6 или более, 0,7 или более, 0,8 или более, 0,9 или более, 1,0 или более, 1,1 или более, 1,2 или более, 1,3 или более, 1,4 или более, 1,5 или более, 1,6 или более, 1,7 или более, 1,8 или более, 1,9 или более, 2,0 или более, 2,5 или более, 3,0 или более, 3,5 или более, 4,0 или более, 4,5 или более, 5,0 или более, 5,5 или более, 6,0 или более, 6,5 или более, 7,0 или более, 7,5 или более, или 8,0 нм или более). В некоторых примерах множество магнитных частиц 114 может иметь средний размер частиц, составляющий 10,0 нм или менее (например, 9,5 или менее, 9,0 или менее, 8,5 или менее, 8,0 или менее, 7,5 или менее, 7,0 или менее, 6,5 или менее, 6,0 или менее, 5,5 или менее, 5,0 или менее, 4,5 или менее, 4,0 или менее, 3,5 или менее, 3,0 или менее, 2,5 или менее, 2,0 или менее, 1,9 или менее, 1,8 или менее, 1,7 или менее, 1,6 или менее, 1,5 или менее, 1,4 или менее, 1,3 или менее, 1,2 или менее, 1,1 или менее, или 1,0 нм или менее). Средний размер частиц во множестве магнитных частиц 114 может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, множество магнитных частиц 114 может иметь средний размер частиц от 0,5 нм до 10,0 нм (например, от 0,5 до 9,0, от 0,5 до 8,0, от 0,5 до 7,0, от 0,5 до 6,0, от 0,5 до 5,0, от 0,5 до 4,0, от 0,5 до 3,0, от 0,5 до 2,5 или от 1,0 до 2,0 нм). Средний размер частиц во множестве магнитных частиц 114 может быть определен, например, с использованием трансмиссионной электронной микроскопии высокого разрешения.

В некоторых примерах компонент 106 может содержать петлю 116 электрода, магнитно соединенную с мембраной 102, причем устройство 100 выполнено с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны 102 в переменное по времени магнитное поле, которое индуцирует электрический ток в петле 116 электрода по закону Фарадея, тем самым преобразовывая вибрационную энергию мембраны 102 в электрический ток и аккумулируя энергию из мембраны 102. Устройство 100 может, например, дополнительно содержать конденсатор, электрически соединенный с петлей 116 электрода, так что энергия, аккумулированная устройством 100, может быть сохранена в конденсаторе.

Ссылаясь теперь на фиг. 6, в некоторых примерах компонент 106 может содержать пьезоэлектрическую консоль 118, а мембрана 102 имеет кромку, которая механически соединена с пьезоэлектрической консолью 118, причем пьезоэлектрическая консоль 118 выполнена с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны 102 в электрическую энергию, тем самым аккумулируя энергию из мем-

браны 102. Устройство 100 может, например, дополнительно содержать конденсатор, электрически соединенный с пьезоэлектрической консолью 118, так что энергия, аккумулированная устройством 100, может быть сохранена в конденсаторе. В некоторых примерах пьезоэлектрическая консоль 118 может содержать элемент традиционного устройства 100 для аккумулирования вибрационной энергии, так что устройства 100 для аккумулирования энергии, описанные в настоящем изобретении, могут быть использованы для подачи питания на традиционное устройство 100 для аккумулирования вибрационной энергии через подсоединенную пьезоэлектрическую консоль 118.

Ссылаясь теперь на фиг. 7, в некоторых примерах мембрана 102 может быть пьезоэлектрической, а компонент 106 содержит устройство 120 для считывания напряжения, механически и электрически соединенное с мембраной 102, причем пьезоэлектрическая мембрана 102 выполнена с возможностью преобразования вибрационной энергии в электрическую энергию, которая может быть аккумулирована устройством 120 для считывания напряжения. В некоторых примерах вибрация пьезоэлектрической мембраны 102 может вырабатывать альтернативное напряжение по мере того, как пьезоэлектрическая мембрана 102 вибрирует и меняет свою кривизну на обратную. Устройство 100 может, например, дополнительно содержать конденсатор, электрически соединенный с устройством 120 для считывания напряжения, так что энергия, аккумулированная устройством 100, может быть сохранена в конденсаторе.

Ссылаясь теперь на фиг. 8А и 8В, в некоторых примерах компонент 106 может содержать коробочный насос 122, механически соединенный с мембраной 102 и/или подложкой 104, причем коробочный насос 122 содержит первый односторонний клапан 124 потока текучей среды, управляющий входом текучей среды, и второй односторонний клапан 126 потока текучей среды, управляющий выходом текучей среды, и причем коробочный насос 122 выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны 102 в поток текучей среды через коробочный насос 122 через первый односторонний клапан 124 потока текучей среды и второй односторонний клапан 126 потока текучей среды, тем самым преобразовывая вибрационную энергию мембраны 102 в поток текучей среды и аккумулируя энергию из мембраны 102.

В некоторых примерах инженерное исполнение конкретных геометрических размеров канала в конкретной мембране 102 вместе с комплементарными компонентами в виде храповика может создавать небольшие искусственные моторы Леви. В некоторых примерах движением объектов через мембрану 102 можно управлять. Ссылаясь теперь на фиг. 9А, 9В и 9С, в некоторых примерах мембрана 102 может дополнительно содержать канал 128, который проходит через мембрану 102. Компонент 106 может содержать, например, транспортер 130 в виде храповика, механически соединенный с мембраной 102, причем транспортер 130 в виде храповика выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны 102 в поступательное движение транспортера 130 в виде храповика, так что транспортер 130 в виде храповика может быть перемещен с одной стороны мембраны 102 к другой через канал 128 после вибрации мембраны 102, тем самым преобразовывая вибрационную энергию мембраны 102 в энергию поступательного движения транспортера 130 в виде храповика и аккумулируя энергию из мембраны 102. Например, по мере того как мембрана 102 меняет свою кривизну на обратную, объекты с инженерно разработанными геометриями (например, транспортер 130 в виде храповика) могут быть протянуты через мембрану 102 и не могут вернуться на другую сторону. Таким образом, это устройство 100 может быть использовано для отделения или очистки образца.

Также в настоящем изобретении раскрыты датчики 140, при этом датчики 140 дополнительно содержат компонент 142, который электрически, магнитно и/или механически соединен с мембраной 102 и/или подложкой 104, так что компонент 142 выполнен с возможностью обнаружения сигнала от мембраны 102.

В некоторых примерах подложка 104 является теплопроводящей, а мембрана 102 находится в тепловом контакте с подложкой 104, причем подложка 104 выполнена с возможностью преобразования тепловой энергии в вибрацию мембраны 102, так что мембрана 102 имеет вибрационную энергию, а компонент 142 выполнен с возможностью обнаружения сигнала, производимого вибрационной энергией мембраны 102. Тепловая энергия может содержать, например, тепловую энергию окружающей среды.

В некоторых примерах мембрана 102 имеет вибрационную энергию, а компонент 142 выполнен с возможностью обнаружения сигнала, производимого вибрационной энергией мембраны 102. Вибрационная энергия может содержать, например, вибрационную энергию окружающей среды.

Вибрационная энергия, например, может содержать вибрации с частотой 0,1 миллигерц или более (например, 0,5 или более, 1 или более, 5 или более, 10 или более, 50 или более, 100 или более, 500 мГц или более, 1 Гц или более, 5 или более, 10 или более, 50 или более, 100 или более, 500 Гц или более, 1 килогерц (кГц) или более, 10 или более, 50 или более, 100 или более, 500 кГц или более, 1 мегагерц (МГц) или более, 5 или более, 10 или более, 50 или более, 100 или более, 500 МГц или более, или 1 гигагерц (ГГц) или более). В некоторых примерах вибрационная энергия может содержать вибрации с частотой 10 гигагерц (ГГц) или менее (например, 5 или менее, 1 ГГц или менее, 500 МГц или менее, 100 или менее, 50 или менее, 10 или менее, 5 или менее, 1 МГц или менее, 500 кГц или менее, 100 или менее, 50 или менее, 10 или менее, 5 или менее, 1 кГц или менее, 500 Гц или менее, 100 или менее, 50 или менее, 10 или менее, 5 или менее, 1 Гц или менее, 500 мГц или менее, 100 или менее, 50 или менее, 10 или ме-

нее, или 5 мГц или менее). Частота вибраций вибрационной энергии может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, вибрационная энергия может содержать вибрации с частотой от 0,1 мГц до 10 ГГц (например, от 0,1 мГц до 1 кГц, от 1 кГц до 10 ГГц, от 0,1 мГц до 1 Гц, от 1 Гц до 1 кГц, от 1 кГц до 1 МГц, от 1 МГц до 10 ГГц или от 5 мГц до 1 ГГц).

Например, в некоторых реализациях датчика 140 компонент 142 может быть функционально соединен с мембраной 102, причем мембрана 102 будет иметь заранее определенную чувствительность, способную захватывать вибрации с относительно низкими частотами. Следовательно, компонент 142 может быть выполнен с возможностью обнаружения частоты изгиба мембраны 102 и когда заранее определенное изменение частоты мембраны 102 обнаружено компонентом 142, например, на основе наличия добавочной массы, выходные данные в отношении обнаружения массы будут определены и переданы за счет чувствительности мембраны 102 устройства.

Ссылаясь теперь на фиг. 10, компонент 142 может содержать электрод 144, электрически соединенный с мембраной 102 и/или подложкой 104. Электрод 144 может быть расположен, например, вблизи мембраны 102 и электрически соединен с мембраной 102 и/или подложкой 104. Электрод 144 может содержать/представлять собой, например, единичный электрод и может содержать захватывающий металл электрод. В некоторых примерах датчик 140 может быть выровнен таким образом, что электрод 144 расположен ниже мембраны 102. Например, электрод 144 может быть выполнен с возможностью непрерывного мониторинга частоты захвата напряжения, так что электрод может обнаруживать любое изменение частоты захвата напряжения и/или амплитуды захвата напряжения.

В некоторых примерах электрод выполнен с возможностью обнаружения частоты вибрационной энергии мембраны 102, так что датчик выполнен с возможностью обнаружения изменения массы мембраны 102 на основе изменения частоты вибрации мембраны 102. Когда избыточная масса добавлена на мембрану 102, это изменяет естественную частоту мембраны 102. Эксперименты калибровки могут обеспечить возможность количественной оценки изменения массы на основе изменения частоты.

В некоторых примерах электрод выполнен с возможностью обнаружения амплитуды сигнала напряжения от мембраны 102, так что датчик выполнен с возможностью обнаружения изменения заряда мембраны 102 на основе изменения амплитуды обнаруженного сигнала напряжения.

Способы получения

Также в настоящем изобретении раскрыты способы получения устройств и датчиков для аккумуляции энергии, описанных в настоящем изобретении. Например, способы получения устройств и/или датчиков для аккумуляции энергии, описанные в настоящем изобретении, могут содержать: сжатие листа двумерного материала для формирования мембраны; размещение мембраны на подложке; и электрическое, магнитное и/или механическое соединение компонента с мембраной и/или подложкой.

Сжатие листа двумерного материала может содержать, например, приложение бокового усилия сжатия к листу, как схематически показано на фиг. 11 и 12. Боковое усилие сжатия, например, может иметь амплитуду, составляющую 1 наноньютон (нН) или более (например, 5 или более, 10 или более, 15 или более, 20 или более, 25 или более, 30 или более, 35 или более, 40 или более, 45 или более, 50 или более, 55 или более, 60 или более, 65 или более, 70 или более, 75 или более, 80 или более, 85 или более, или 90 нН или более). В некоторых примерах боковое усилие сжатия может составлять 100 нН или менее (например, 95 или менее, 90 или менее, 85 или менее, 80 или менее, 75 или менее, 70 или менее, 65 или менее, 60 или менее, 55 или менее, 50 или менее, 45 или менее, 40 или менее, 35 или менее, 30 или менее, 25 или менее, 20 или менее, 15 или менее, или 10 нН или менее). Боковое усилие сжатия может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, боковое усилие сжатия может составлять от 1 до 100 нН (например, от 1 до 50, от 50 до 500, от 1 до 20, от 20 до 40, от 40 до 60, от 60 до 80, от 80 до 100, от 5 до 95, от 10 до 90 или от 20 до 80 нН).

В некоторых примерах лист двумерного материала имеет первоначальную длину, а сжатый лист двумерного материала имеет сжатую длину, например, как схематически показано на фиг. 13, причем сжатая длина меньше первоначальной длины на значение от 0,01 до 1%.

В некоторых примерах предел изгиба мембраны может составлять 0,2 нм или более (например, 0,3 или более, 0,4 или более, 0,5 или более, 0,6 или более, 0,7 или более, 0,8 или более, 0,9 или более, 1,0 или более, 1,5 или более, 2,0 или более, 2,5 или более, или 3,0 нм или более). В некоторых примерах предел изгиба мембраны может составлять 4,0 нм или менее (например, 3,5 или менее, 3,0 или менее, 2,5 или менее, 2,0 или менее, 1,5 или менее, 1,0 или менее, 0,9 или менее, 0,8 или менее, 0,7 или менее, 0,6 или менее, или 0,5 нм или менее). Предел изгиба может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше.

Например, предел изгиба может составлять от 0,2 до 4,0 нм (например, от 0,2 до 2,0, от 2,0 до 4,0, от 0,2 до 1,0, от 1,0 до 2,0, от 2,0 до 3,0, от 3,0 до 4,0 или от 0,5 до 3,5 нм). Предел изгиба в целом равен удвоенной средней высоте одной или более волн. Механическое изгибание представляет собой изменение кривизны волны на обратную.

Формирование мембраны в состоянии перед изгибанием путем сжатия двумерного листа, как раскрыто в настоящем изобретении, может замедлить процесс изгибания, так что мембрана может взаимодействовать и захватывать вибрации более низкой частоты, такие как связанные с условиями окружающей среды. Если мембрана размещена на подложке с помощью способа без напряжения, то мембрана может самостоятельно сжиматься в состояние перед изгибанием. Например, при наличии графена или меди медь может быть стравлена с использованием жидкого раствора хлорида железа. Графен может быть оставлен плавающим на поверхности раствора после удаления меди. Затем графен может быть отфильтрован из раствора и размещен на подложке, содержащей сетку. Сжатие или расширение сетки может изменять размер волн и изменять естественную частоту спонтанного изменения кривизны на обратную.

Способы применения

Также в настоящем изобретении раскрыты способы применения устройств и/или датчиков для аккумуляции энергии, описанных в настоящем изобретении. Например, также в настоящем изобретении раскрыты способы аккумуляции энергии с использованием устройств для аккумуляции энергии, описанных в настоящем изобретении.

Устройства для аккумуляции энергии, описанные в настоящем изобретении, могут быть включены, например, во множество систем, устройств и способов извлечения энергии, в том числе датчики нагнетания, датчики усилия и массы, а также устройства с автономным питанием. Системы, устройства и способы, в соответствии с некоторыми приведенными в качестве примера вариантами реализации, которые включают одно или более устройств для аккумуляции энергии, как описано в настоящем изобретении, могут использовать динамику колебаний атомной шкалы свободностоящей двумерной мембраны. Мембрана может включать случайное внеплоскостное движение, которое проявляет ненормальную динамику и равномерные распределения с удлинненным хвостом динамических переменных, которые характерны для блужданий Леви. Колеблющуюся мембрану можно контролировать, например, с использованием сканирующей туннельной микроскопии (СТМ).

Следует понимать, что любой из компонентов или модулей, на которые делается ссылка в отношении устройств для аккумуляции энергии, и связанных систем и способов раскрытой технологии, могут быть выполнены вместе или отдельно друг от друга. Кроме того, могут быть реализованы дублирующие функции или структуры компонентов или модулей. Любой из описанных в настоящем изобретении признаков и их компонентов, обсужденных в настоящем изобретении, может принимать все формы для обеспечения и удовлетворения нужд со стороны окружающей среды и структуры, а также функциональных требований. Более того, положения и выравнивания различных компонентов могут варьироваться по желанию или требованию.

Описанное выше включает примеры одного или более вариантов реализации. Безусловно, невозможно описать каждую потенциальную комбинацию компонентов или методологий для целей описания приведенных выше вариантов реализации, однако специалист в данной области техники может понять, что возможно большое количество дополнительных комбинаций и перестановок различных вариантов реализации. Следовательно, описанные варианты реализации предназначены для охвата всех таких изменений, модификаций и вариаций, которые подпадают под сущность и объем раскрытия и прилагаемую здесь формулу изобретения, и подлежат подаче в обычных заявках на получение патента.

Примеры

Ниже приведены следующие примеры для иллюстрации способов и результатов, в соответствии с раскрытым объектом изобретения. Эти примеры не предназначены для включения всех аспектов раскрытого в настоящем изобретении объекта изобретения, а для иллюстрации репрезентативных способов и результатов. Эти примеры не предназначены для исключения эквивалентов и вариаций настоящего изобретения, которые являются очевидными для специалиста в данной области техники.

Были предприняты попытки по обеспечению точности в отношении чисел (например, количества, температуры и т.д.), однако следует учитывать некоторые погрешности и отклонения. Если не указано иное, части являются частями по весу, температура выражена в °C или является температурой окружающей среды, а давление является атмосферным или находится вблизи него. Существуют многочисленные вариации и комбинации условий реакции, например, концентраций компонента, температур, значений давления и других диапазонов и условий реакции, которые могут быть использованы для оптимизации чистоты и выхода продукта, полученного описанным процессом. Для оптимизации таких условий процесса будут необходимы только целесообразные и рутинные эксперименты.

Пример 1.

В настоящем изобретении описаны субнанометровые широкополосные измерения внеплоскостного (вертикального) движения атомов в свободностоящем графене с использованием сканирующей туннельной микроскопии. Путем отслеживания вертикального положения в течение длительного периода времени было достигнуто 1000-кратное увеличение способности измерить пространственно-временную динамику атомарно тонких мембран по сравнению с существующими в уровне техники технологиями визуализации. Наблюдалось, что вертикальное движение графеновой мембраны проявляло редкие полномасштабные отклонения, характеризующиеся как ненормальными среднеквадратичными смещениями, так и

распределениями скачка степенного закона Коши-Лоренца.

Стохастические процессы по своей природе являются широко распространенными. Исследования таких стохастических процессов сыграли ключевую роль в разработке современной физики и обеспечили первое доказательство атомной природы материи. Ланжевен инициировал истинно динамическую теорию для Броуновского движения за счет осмысления стохастического дифференциального уравнения движения для частицы. Данная модель, зачастую называемая моделью Орнштейна-Уленбека, предсказывает среднеквадратичное смещение, $\text{СКС}(\tau) \propto \tau$, функцию автокорреляции скорости (ФАС), которая экспоненциально задерживается во время, и равномерное распределение скорости Максвелла-Больцмана (Li T et al. *Science* 2010, 328, 1673). Недавние продвижения в точности измерения и разрешении расширили рамки Броуновского движения до беспрецедентных пространственно-временных шкал и до более широкого множества систем, в том числе атомарной диффузии в оптических решетках и спиновой диффузии в жидкостях (Stapf S et al. *Phys. Rev. Lett.* 1995, 75, 2855; Katori H et al. *Phys. Rev. Lett.* 1997, 79, 2221). Исследования таких систем внедряют знания в механизмы и взаимодействия, которые отвечают за стохастичность. Например, частица может осуществлять классическое Броуновское движение в небольшой окрестности, а затем двигаться внезапно на большое расстояние к новому окружению, где она возобновляет классическое движение. Это является ключом блужданий Леви с конечными скоростями конечным временем ожидания, в которых сегменты с более высокой скоростью и длинами скачка движения дают распределения по степенному закону с удлинненным хвостом (Shlesinger MF et al. *Nature (London)* 1993, 363, 31; Metzler R and Klafter J. *Phys. Rep.* 2000, 339, 1). Была выдвинута гипотеза о том, что блуждания Леви присутствуют в разноплановом наборе систем, варьирующихся от экономики, биомедицинских сигналов, динамики климата и даже добывания пищи животными. Теперь считается, что алгоритм оптимизированного поиска, даже в пределах информационно-продовольственной теории, должен использовать стабильное распределение Леви с бесконечной вариацией (Viswanathan GM et al. *Nature (London)* 1999, 401, 911).

Колебания мембраны, характеризующиеся движением, перпендикулярным поверхности мембраны, также подпадают под сферу действия Броуновского движения. Биомембраны, в которых тепловые колебания способствуют транспортировке химических веществ по каналам во внутреннее пространство клетки (Kosztin I and Schulten K. *Phys. Rev. Lett.* 2004, 93, 238102), были изучены экспериментальным путем с использованием ядерной магнитно-резонансной спектроскопии и оптической микроскопии (Bocian DF and Chan SI. *Annu. Rev. Phys. Chem.* 1978, 29, 307; Pecreaux J et al. *Em. Phys. J. E* 2004, 13, 277). Более того, современные теории структуры и динамики мембраны, которые включают эластичность, а также стохастические эффекты через уравнение Ланжевена, прогнозируют распределение Максвелла-Больцмана для локальных колебаний мембраны (Naji A et al. *Phys. Rev. Lett.* 2009, 102, 138102; Reister-Gottfried E et al. *Phys. Rev. E* 2010, 81, 031903).

Свободностоящий графен может быть кристаллической мембраной, проба которой может быть взята без ухудшения атомарной шкалы с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) в среде ультравысокого вакуума (УВВ). Используя данный подход, было показано, что волны в мембране графена могут быть описаны с использованием модели Изинга путем маппинга изогнутых вверх (вниз) волн в направленные вверх (вниз) состояния изингового спина (Schoelz JK et al. *Phys. Rev. B* 2015, 91, 045413). Составляющей, которой не хватает в этих исследованиях, является измерение динамических колебаний. Здесь была использована сканирующая туннельная микроскопия для отслеживания движения области размером с один атом углерода в колеблющейся графеновой мембране с субнанометрическим разрешением. Мембрана осуществляет Броуновское движение с редкими сильными отклонениями высоты, которые указывают на блуждания Леви. В дополнение, скорость мембраны подчиняется распределению Коши-Лоренца степенного закона с удлинненным хвостом, а не распределению Максвелла-Больцмана.

Монослойный графен, коммерчески выращенный на Ni (менее 10% составляет многослойный графен), переносили непосредственно на 2000-ячеистую ультратонкую медную сетку, имеющую сеть из квадратных отверстий шириной 7,5 мкм с опорами шириной 5 мкм. На изображениях сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показано покрытие графеном 90% медной сетки (фиг. 17). Низкотемпературный микроскоп для сканирующей туннельной микроскопии в омикронном ультравысоком вакууме (базовое давление составляет 10^{-10} мбар), работающий при комнатной температуре, использовали для измерений высоты. Графеновую пленку устанавливали в направлении образцовой пластины на стойках таким образом, чтобы зонд микроскопа для сканирующей туннельной микроскопии приближался к отверстиям сетки для обеспечения более устойчивой опоры. Вся камера для сканирующей туннельной микроскопии расположена на активной, шумопоглощающей системе изолирования вибраций и на нее подводится питание с использованием массивной аккумуляторной батареи с изолированной площадкой заземления для достижения исключительно низкого электрического шума.

Данные извлекали с использованием зондов для сканирующей туннельной микроскопии, изготовленных на месте, в туннельных условиях постоянного тока (с включенной обратной связью), и топографическое отсканированное изображение устанавливали в точечный режим (без сканирования x или y). Систему адаптировали для обеспечения возможности непрерывной записи 16-битных данных как для фактического туннельного тока, так и для высоты зонда, при частоте 800 Гц для промежутка времени 10^4

с, давая 8×10^6 точек данных на канал. Сдвиг зонда-образца при сканирующей туннельной микроскопии подвергали независимому мониторингу и результаты указывали на то, что сдвиг был нестохастическим и составлял меньше чем 1 нм/ч. Данные собирали со множества мембран для фиксированных условий визуализации, охватывая несколько порядков амплитуды в туннельном токе (0,01-10 нА) и напряжение смещения (0,01-10 В), все при комнатной температуре. При визуализации графеновой поверхности с атомным разрешением наблюдали только за монослойным графеном, который не имеет дефектов по шкале микрон.

Схематическое изображение экспериментальной установки показано на фиг. 18. Смещенный зонд для сканирующей туннельной микроскопии, установленный на конце пьезоэлектрического трубчатого сканера, приближается к электрически заземленной мембране из свободностоящего графена снизу. Типичный временной ряд для $z(t)$ показан на фиг. 19 для сканирующей туннельной микроскопии в заданной точке ($I = 0,1$ нА, $V = 0,1$ В). Диапазон движения мембраны (~ 10 нм) является огромным для сканирующей туннельной микроскопии в точечном режиме, и для сравнения также показана дорожка типичной сканирующей туннельной микроскопии, полученной из жесткого образца. Такие большие значения $z(t)$ представляют целесообразными, поскольку неподдерживаемая графеновая мембрана формирует волнистую структуру, которая непрерывно смещается между большим количеством энергетически релевантных конфигураций (Meyer JC et al. Nature (London) 2007, 446, 60; Los JH et al. Phys. Rev. B 2009, 80, 121405(R)). На вкладыше по фиг. 19 показан увеличенный график высоты мембраны (в единицах $\delta_0 = 0,022$ нм) в зависимости от времени (в единицах $\tau_0 = 1,250$ мс) с типичным временем между двумя последовательными скачками (т.е. изменением высоты), обозначенным как τ_k . Распределение вероятности времени ожидания для этих данных вычисляли и оно следует простой экспоненте, показывая, что это является процессом Пуассона. Измеренный туннельный ток на фиг. 20, соответствующим данным, показанным на фиг. 19, оставался существенно ниже уровня насыщения и существенно ниже нуля, даже когда высота мембраны существенно изменялась. Вклад вариации расстояния зонда-образца в высоту мембраны $z(t)$ был ничтожно мал для всех данных. В дополнение, коэффициент взаимной корреляции между измеренной высотой и туннельным током составляет меньше чем 0,05.

Из временного ряда $z(t)$ вычисляли среднеквадратичное смещение, в соответствии со следующим уравнением: $\text{СКС}(\tau) = \langle [z(t+\tau) - z(t)]^2 \rangle$, результат которого показан на фиг. 21. Эти данные, охватывающие около 7 порядков амплитуды времени, характеризуются степенной зависимостью $\text{СКС}(\tau) \sim \tau^\alpha$ с $\alpha \neq 1$, что является экспонентой аномальной диффузии. Для этих данных движение в короткие промежутки времени характеризуется $\alpha = 1,4$ (супердиффузное движение) с последующим диапазоном, для которого $\alpha = 0,3$ (субдиффузное движение). Те же экспоненты наблюдали с другими наборами данных, полученными в различных туннельных заданных точках. Моделирование случайного блуждания с использованием экспоненциальных значений времени ожидания и длин скачков Коши дает СКС с супердиффузией для короткого времени и субдиффузией для продолжительного времени, как показано на вкладке по фиг. 21. Экспериментальное доказательство для распределения Коши также исходит из скорости мембраны.

Мгновенная скорость мембраны, численно вычисленная из временного ряда для $z(t)$, показана на фиг. 19, отображает существенно нерегулярное поведение [вкладка на фиг. 22] с коротким запоминанием. Функция автокорреляции скорости, $\text{ФАС}(\tau) = v(t)v(t+\tau)$, показанная на фиг. 22, быстро снижается, становясь отрицательной около 0,1 с, что указывает на поведение, подобное жидкости, перед окончательным снижением о нуля (в течение 0,5 с из измерения продолжительностью 10000 с), показывая, что колебания скорости мембраны быстро декоррелируются. Данное наблюдение демонстрирует, что представляется возможным измерить равномерное распределение скорости с использованием сканирующей туннельной микроскопии, что поддерживается другими исследованиями одноатомной диффузии с использованием сканирующей туннельной микроскопии (Swartzentruber BS. Phys. Rev. Lett. 1996, 76, 459).

На фиг. 23 показана функция распределения вероятности (ФРВ) скорости мембраны, вычисленная из данных, показанных на фиг. 19. Сплошная кривая представляет собой наилучшее подогнанное распределение Коши-Лоренца с нулевой средней скоростью, $v_0 = 0$, и ПШПВ 2Γ :

$$\mathcal{L}(v; \Gamma) = \frac{1/\pi\Gamma}{1 + [(v - v_0)/\Gamma]^2}$$

Распределение скорости достигает своего пика в нуле и является симметричным относительно него, соответствуя равной вероятности передвижения мембраны вверх или вниз (т.е. сбалансированному передвижению в присутствии зонда для сканирующей туннельной микроскопии), и указывает на то, что система находится в пределе упругости для заданных точек напряжения смещения.

Даже при том, что наблюдались значения скорости мембраны вплоть до 500 нм/с, 98% всех значений скорости попадают в диапазон от -15 до 15 нм/с (фиг. 23). Пунктирная кривая на фиг. 23 представляет собой наилучшее подогнанное распределение Гаусса. Данные на фиг. 23 явным образом показывают распределение Коши-Лоренца, а не Гаусса, особенно для скоростей выше 10 нм/с. Три точки данных (квадраты) для данных по жесткому образцу, показанных на фиг. 19, показаны для сравнения на фиг. 23. На фиг. 24 показана функция данных о распределении вероятности скорости мембраны для туннельных токов, растянутая по множеству порядков амплитуды, вместе с наилучшими подогнанными распределе-

ниями Коши-Лоренца. Эти распределения скорости получали из данных сканирующей туннельной микроскопии, взятых из нового местоположения на образце с увеличивающимся туннельным током. Наиболее точный вывод заключается в том, что во всех случаях скорости мембраны следуют распределению Коши-Лоренца (т.е. устойчивому распределению Леви с бесконечной вариацией и индексом устойчивости 1) намного лучше, чем Гаусса.

Дополнительно можно увидеть на фиг. 24, что распределение скорости расширяется при увеличении туннельного тока. Тот же тренд очевиден на фиг. 25, на которой показана вариация ПШПВ функции распределения вероятности скорости с заданной точкой туннельного тока во всем диапазоне этого исследования. Расширение распределения согласуется с джоулевым нагревом вследствие того, что туннельный ток сканирующей туннельной микроскопии обеспечивает больше кинетической энергии на мембрану (Neek-Amal M et al. *Nat. Commun.* 2014, 5, 4962).

Теория эластичности прогнозирует вибрационные режимы свободстоящего графена; однако она не дает информации о стохастических процессах, лежащих в основе разупорядоченной сети волн, присутствующей на сжатых 2D-мембранах. Атомистические моделирования могут обеспечить объяснение наблюдаемому явлению. Для моделирования молекулярной динамики (МД), представленных в настоящем изобретении, была подготовлена заранее искривленная, изогнутая вниз квадратная мембрана ($15 \times 15 \text{ нм}^2$), содержащая 10000 атомов углерода с фиксированными граничными атомами (без зонда для сканирующей туннельной микроскопии). Моделирования в вакууме проводили в МА/ММПС с использованием потенциала AIREBO. Термостат Нозе-Гувера использовали для поддержания постоянной температуры, а уравнения движений интегрировали с использованием временного шага в 1 фс. Систему сначала уравнивали для 0,5 нс, начиная с исходной конфигурации, и последующую траекторию из продуктивного прогона 1 нс использовали для анализа.

Движение центрального атома с временными шагами 10^6 (1 на фс) при низкой температуре (100 К) демонстрирует колебания высоты при общей высоте 0,35 нм выше фиксированных граничных атомов, как показано на фиг. 26. При более высоких температурах (3000 К) происходит нечто совсем иное. В той же временной шкале случайное движение приводит к зеркальному искривлению всей мембраны из точки над фиксированными граничными атомами до точки под ними. На фиг. 28 и фиг. 29 показано два снимка мембраны для противоположных конфигураций, промаркированных (c) и (d) на фиг. 26. Длинное отклонение от изгиба вниз до изгиба вверх указывает на блуждания Леви. В действительности, если данные на фиг. 26 усреднены по короткому интервалу времени для сглаживания внезапных колебаний (черная кривая на фиг. 26), получают распределение длины скачка Коши, как показано на фиг. 27. Усреднение по времени движения графена с очень высокой частотой в точности является тем, что не может дать измерение с помощью сканирующей туннельной микроскопии. Подобные распределения Коши также получают для пространственного усреднения вокруг центрального атома, что также может естественным образом происходить с любым реальным измерением, имеющим разрешение больше чем 1 нм. Дополнительное моделирование показано на фиг. 30. Здесь представляется, что система спонтанно колеблется во время второй половины моделирования.

Это крупномасштабное движение является следствием того, что графен локально меняет всю кривизну (например, переход от изгиба вниз к изгибу вверх), тогда как мелкомасштабные движения являются простыми вибрациями мембраны без изменения ее кривизны на обратную. То, каким образом это происходит, может быть отслежено при высокотемпературном моделировании: периодическое совместное случайное движение вверх и вниз в одном и том же направлении приводит к длительному отклонению к другой равновесной конфигурации с другой стороны фиксированных граничных атомов. С учетом того, что четыре таких события происходят за 1 нс при 3000 К, можно спрогнозировать, что эти события будут происходить несколько раз при измерениях с помощью сканирующей туннельной микроскопии, выполняемых при комнатной температуре (Sørensen MR and Voter AF. *J. Chem Phys.* 2000, 772, 9599). Таким образом, данные показывают, что спонтанное зеркальное искривление может происходить без градиента температуры.

Эти измерения приоткрывают неизведанную пространственную и временную область в колебаниях мембраны с глубокими последствиями как для фундаментального понимания, так и для технологических вариантов применения мембран. При должном понимании, случайные колебания мембраны могут быть полезно использованы. Например, аккумуляция энергии из непрерывного движения массивной системы является важным вариантом применения стохастических нанорезонаторов (Gammaitoni L et al. *Rev. Mod. Phys.* 1998, 70, 223).

Путем настройки распределения скорости (например, путем изменения туннельного тока), можно активировать некоторые процессы и деактивировать другие. Кроме того, по мере изгибания мембраны, она модифицирует локальное растяжение, химическую реактивность и распределение заряда, что позволяет системе выполнять работу. Инженерное исполнение каналов с конкретной геометрией в мембране, вместе с комплементарными компонентами в виде храповика, может создать небольшие искусственные моторы Леви (Haenggi P and Marchesoni F. *Rev. Mod. Phys.* 2009, 57, 387). Наконец, продвижения в понимании динамики мембраны могут помочь контролировать движение объектов по мембране, что жизненно важно для функционирования белка, а также для самоорганизации искусственных материалов.

В заключение, изучали динамику колебаний по атомной шкале мембраны из свободностоящего графена с использованием сканирующей туннельной микроскопии в точечном режиме и моделирования молекулярной динамики. Измерения выявили изобилие случайного внеплоскостного движения мембран, которое проявляет ненормальную динамику и равномерные распределения с удлинённым хвостом динамических переменных, которые характерны для блужданий Леви. Было также продемонстрировано, что стохастические свойства колеблющихся мембран могут контролироваться с использованием сканирующей туннельной микроскопии. В сочетании со способностью наблюдать движение с разрешением по атомной шкале, это обеспечивает систему для исследования новых режимов Броуновского движения и тестирования различных моделей аномального переноса. В заключение, события искривления в 2D-материалах были продемонстрированы экспериментальным и теоретическим путем для обеспечения искусственных кристаллических мембран с настраиваемыми блужданиями Леви. В конечном счете, это исследование обеспечивает способы прогнозирования, контроля и даже минимизации возникновения крупномасштабных, внезапных изменений в широком многообразии систем.

Пример 2.

Сканирующая туннельная микроскопия также может быть использована для измерения изменений высоты свободностоящего графена во времени (фиг. 14). Из этой информации может быть вычислена скорость с течением времени для генерирования функции распределения вероятности (ФРВ) скорости. ФРВ скорости может проявлять негауссовскую форму и иметь аномально большие скорости. В дополнение, паттерны высоты-времени могут быть найдены путем вычисления функции автокорреляции данных высоты-времени (фиг. 15), а доминантная частота может быть найдена путем вычисления спектральной плотности мощности (фиг. 16), что показывает возможное возникновение ультранизкой частоты.

Другие преимущества, которые очевидны и которые свойственны изобретению, станут ясны специалисту в данной области техники. Следует понимать, что некоторые признаки и подкомбинации могут быть использованы и реализованы без ссылки на другие признаки и подкомбинации. Это предусмотрено объемом формулы изобретения и находится в его пределах. Поскольку много возможных вариантов реализации изобретения могут быть реализованы без выхода за рамки его объема, следует понимать, что все изложенные в настоящем изобретении или показанные на сопроводительных чертежах объекты изобретения следует интерпретировать в иллюстративном, а не в ограничивающем смысле.

Способы, в соответствии с прилагаемой формулой изобретения, не ограничены в своем объеме конкретными способами, описанными в настоящем изобретении, и они предназначены в качестве иллюстраций некоторых аспектов формулы изобретения, а любые способы, которые являются функционально эквивалентными, предназначены для входа в рамки объема формулы изобретения. Различные модификации способов в дополнение к показанным и описанным в настоящем изобретении предназначены для входа в рамки объема прилагаемой формулы изобретения. Кроме того, хотя конкретно описаны только некоторые репрезентативные этапы способа, раскрытые в настоящем изобретении, другие комбинации этапов способа также предназначены для входа в рамки объема прилагаемой формулы изобретения, даже если они конкретно не указаны. Таким образом, комбинация этапов, элементов, компонентов или составляющих может быть явным образом указана в настоящем изобретении или меньше, однако включены другие комбинации этапов, элементов, компонентов или составляющих, даже если они явным образом не указаны.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство для аккумуляции электрической энергии, в котором движение заряженной мембраны индуцирует электрический ток через конденсатор с изменчивыми промежутками, содержащее:

монослойную графеновую мембрану, содержащую фиксированный заряд и размещенную на теплопроводящей медной подложке, содержащей медную сетку с отверстиями, каждое отверстие имеет вид открытой рамы, поддерживающей свободностоящие участки монослойной графеновой мембраны в каждой открытой раме,

причем мембрана содержит одноатомную пластину графена, находящуюся в тепловом контакте с указанной подложкой,

при этом край графеновой мембраны расположен на боковой стенке медной сетки, монослойная графеновая мембрана удерживается на боковой стенке медной сетки за счет ван-дер-ваальсового взаимодействия между графеновой мембраной и указанной боковой стенкой, которое уравнивается натяжением мембраны в состоянии самонатяжения, при этом свободностоящие участки мембраны вибрируют в соответствующих центральных участках,

монослойная графеновая мембрана находится в тепловом контакте с медной подложкой, так что электрический заряд и тепловая энергия могут непрерывно перетекать от медной сетки к монослойной графеновой мембране, вызывая вибрации мембраны;

причем при вибрациях мембрана изгибается, образуя изгибы, при этом кривизна изгибов мембраны меняется на обратную в виде сети волн, в которой движение волн влияет на соответствующее движение соседних волн,

при этом кривизна меняется на обратную с частотой, с которой изменяется распределение заряда в мембране, и формируется переменный электрический ток из электрического заряда, движущегося через мембрану;

при этом волны имеют среднюю длину от 1 до 100 нм, и указанные волны имеют среднюю высоту от 0,1 до 2,0 нм;

схему диодного моста, соединенную с мембраной и преобразующую указанный переменный электрический ток в постоянный электрический ток; и

конденсатор, соединенный со схемой диодного моста и заряжаемый указанным постоянным электрическим током.

2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что мембрана имеет среднюю толщину от 0,3 до 3,0 нм.

3. Устройство по п.1, отличающееся тем, что мембрана имеет средний горизонтальный размер от 0,1 до 100 микрон.

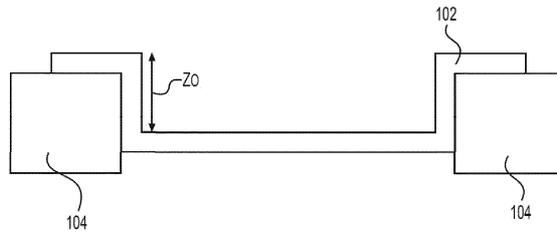
4. Устройство по п.1, отличающееся тем, что концы мембраны соединены с подложкой с боковой силой сжатия, действующей на мембрану, и мембрана имеет натяжение от 0,0 до 10,0 Н/м.

5. Устройство по п.1, отличающееся тем, что одна или более волн имеют среднюю длину от 1 до 80, от 5 до 50, от 10 до 40 или от 20 до 30 нм.

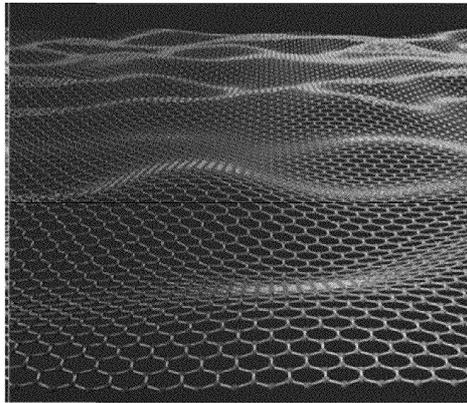
6. Устройство по п.1, отличающееся тем, что одна или более волн имеют среднюю высоту от 0,1 до 1,0, от 0,20 до 0,60, от 0,30 до 0,50 или от 0,35 до 0,45 нм.

7. Устройство по любому из пп.1-6, отличающееся тем, что подложка является теплопроводящей, а мембрана находится в тепловом контакте с подложкой.

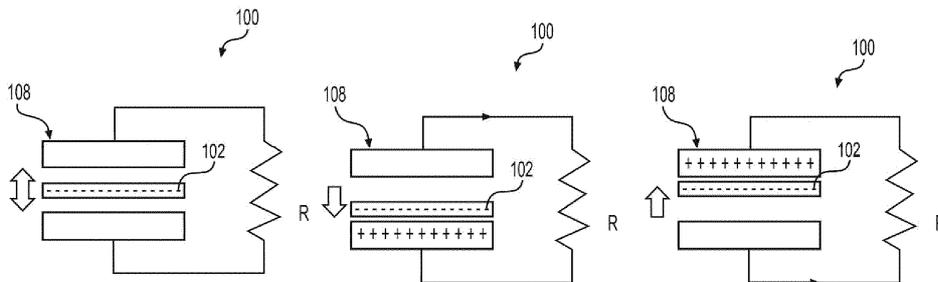
8. Устройство по п.1, отличающееся тем, что тепловая энергия содержит тепловую энергию окружающей среды.



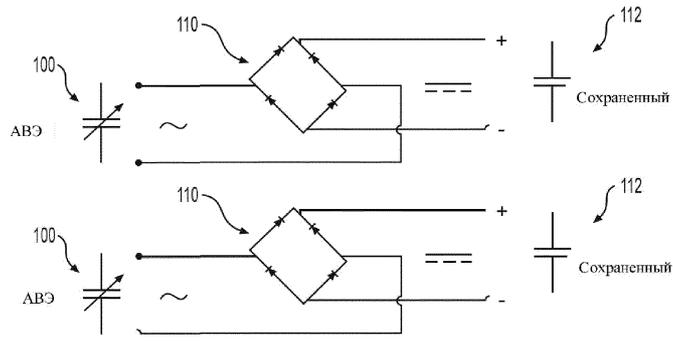
Фиг. 1



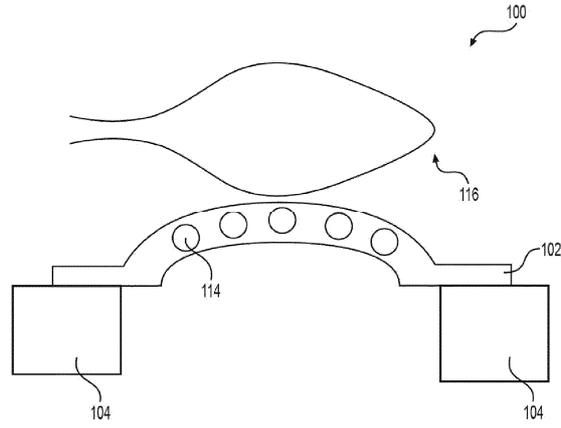
Фиг. 2



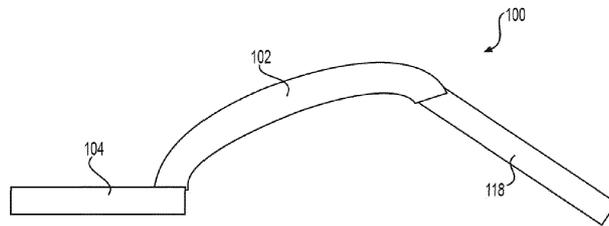
Фиг. 3



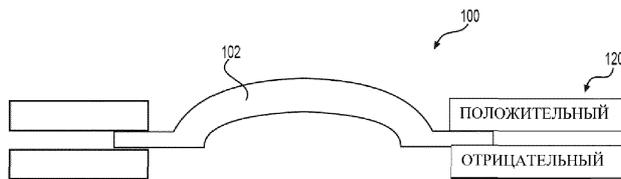
Фиг. 4



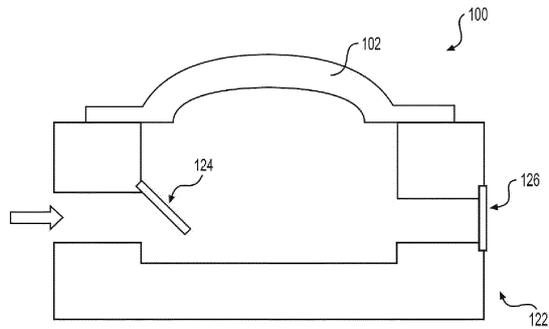
Фиг. 5



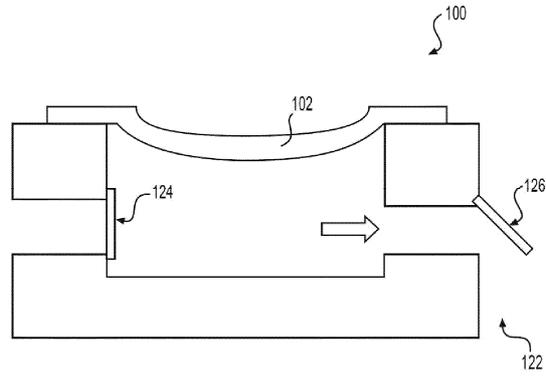
Фиг. 6



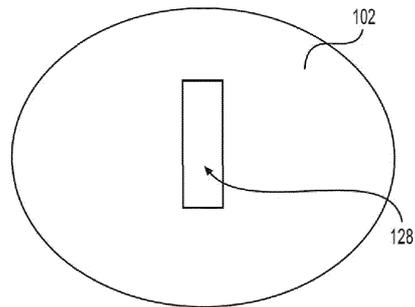
Фиг. 7



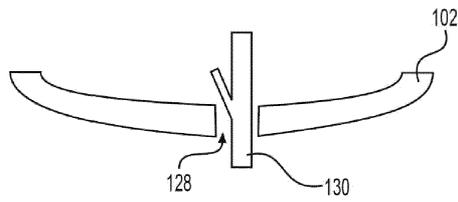
Фиг. 8А



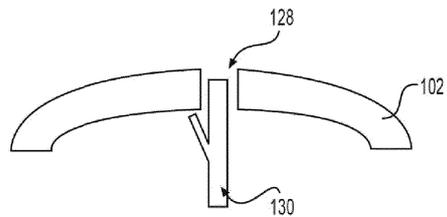
Фиг. 8В



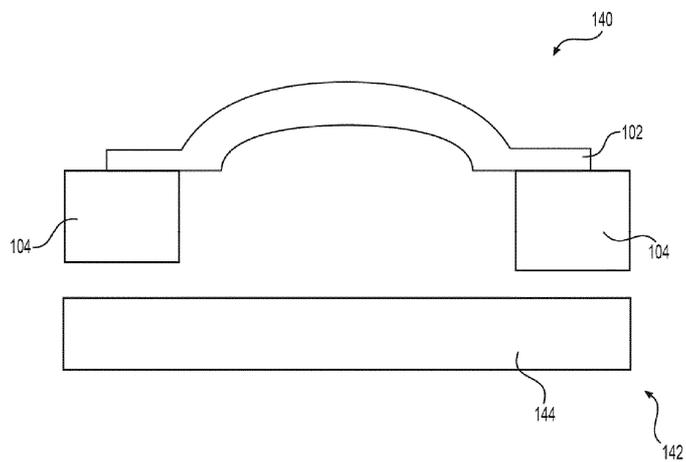
Фиг. 9А



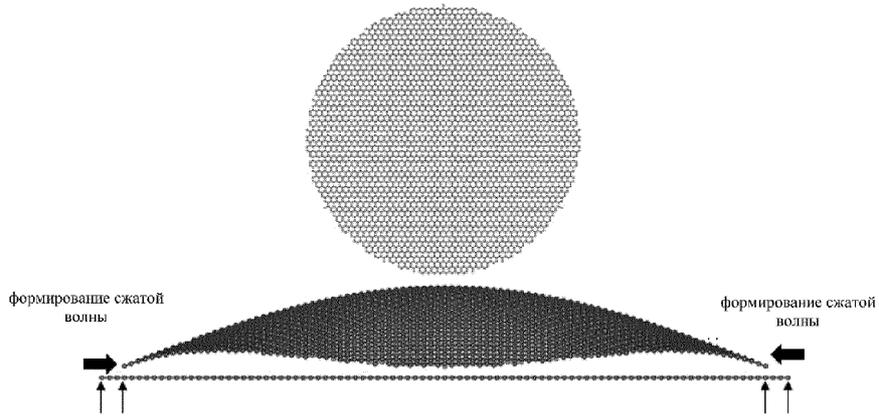
Фиг. 9В



Фиг. 9С



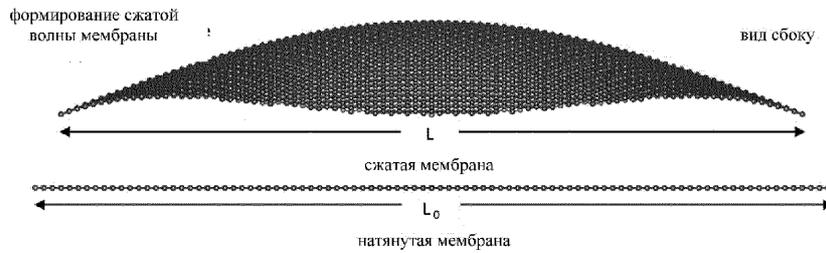
Фиг. 10



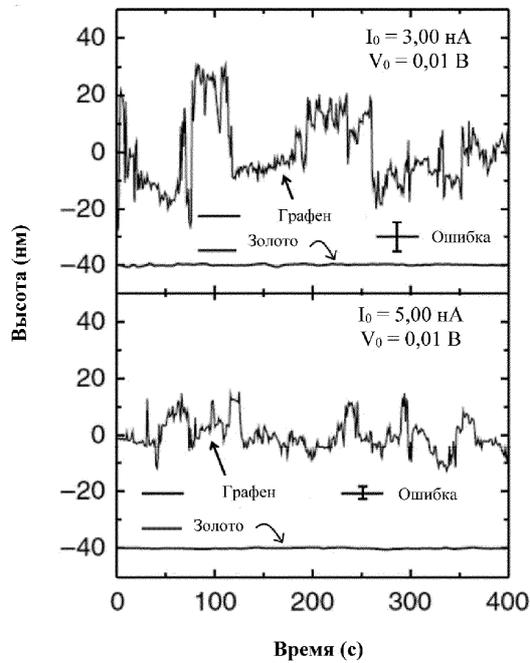
Фиг. 11



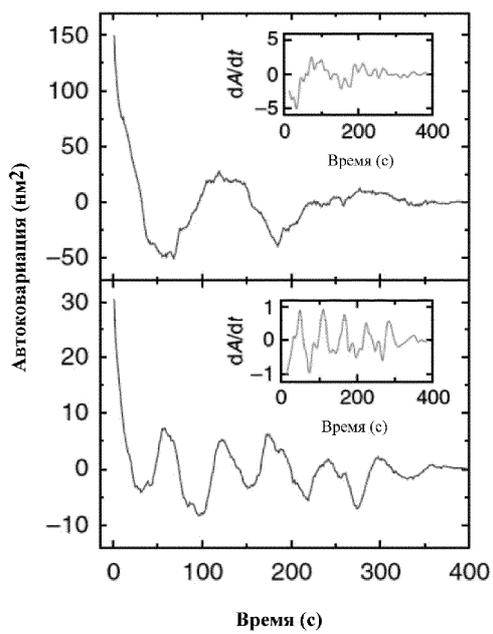
Фиг. 12



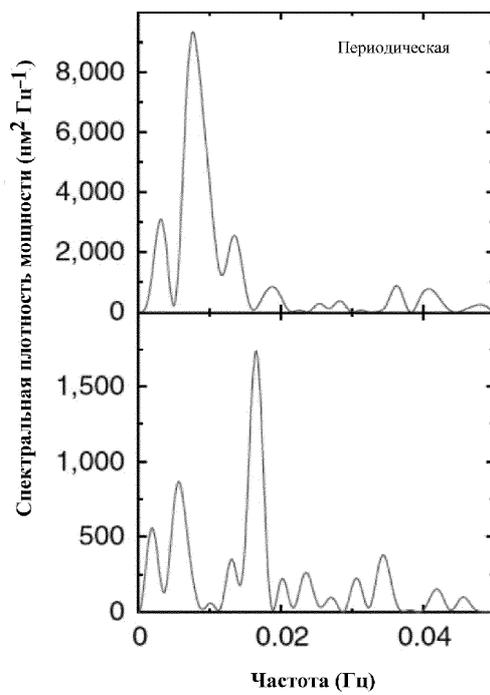
Фиг. 13



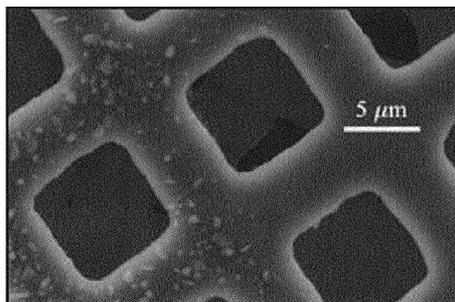
Фиг. 14



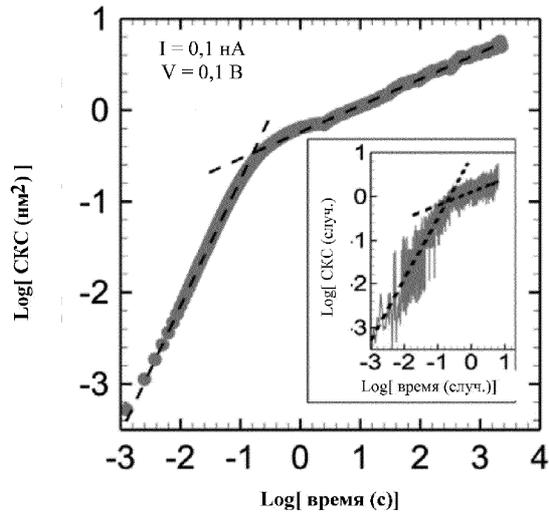
Фиг. 15



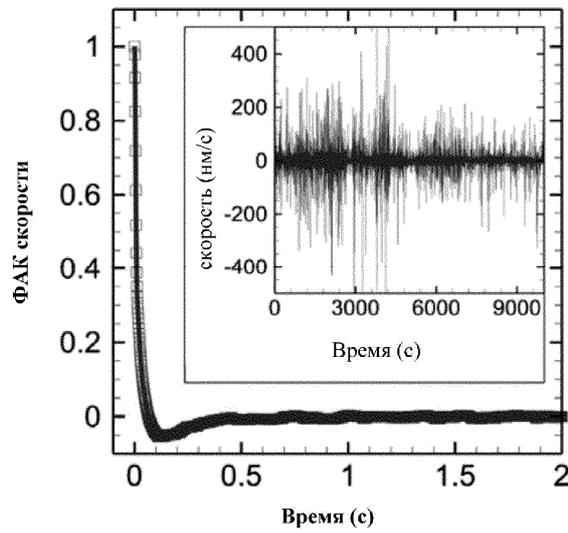
Фиг. 16



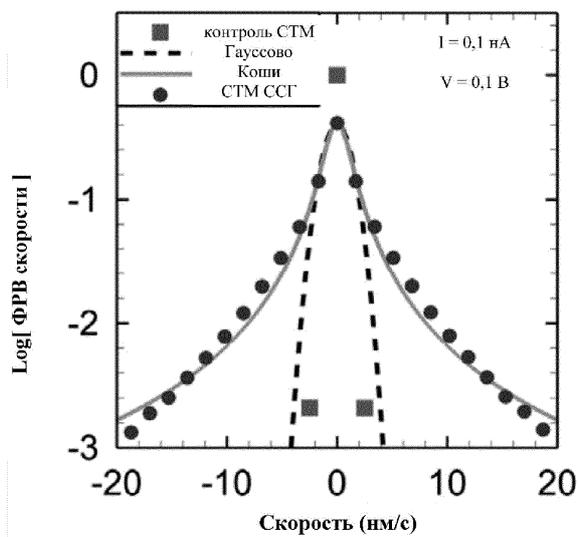
Фиг. 17



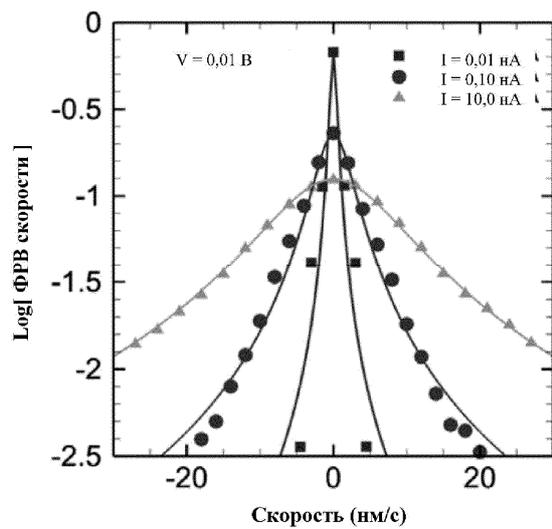
Фиг. 21



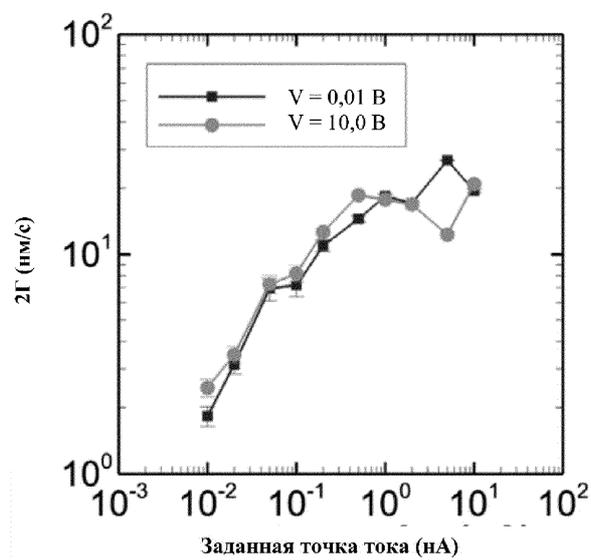
Фиг. 22



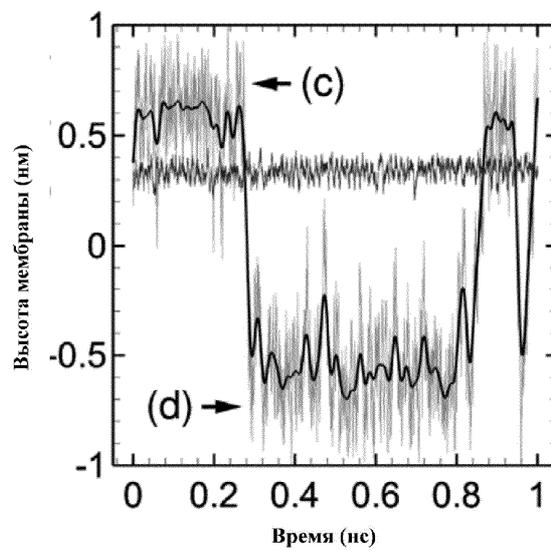
Фиг. 23



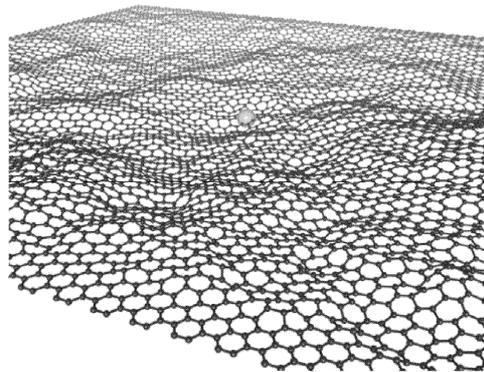
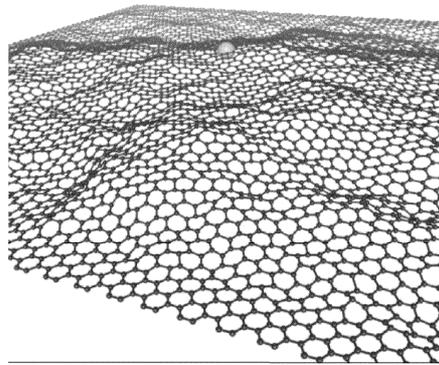
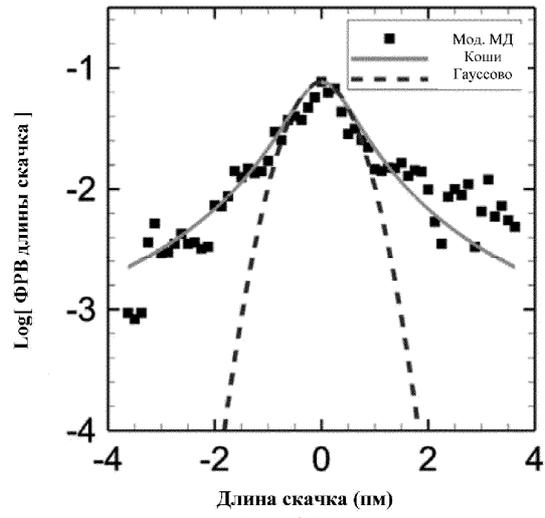
Фиг. 24

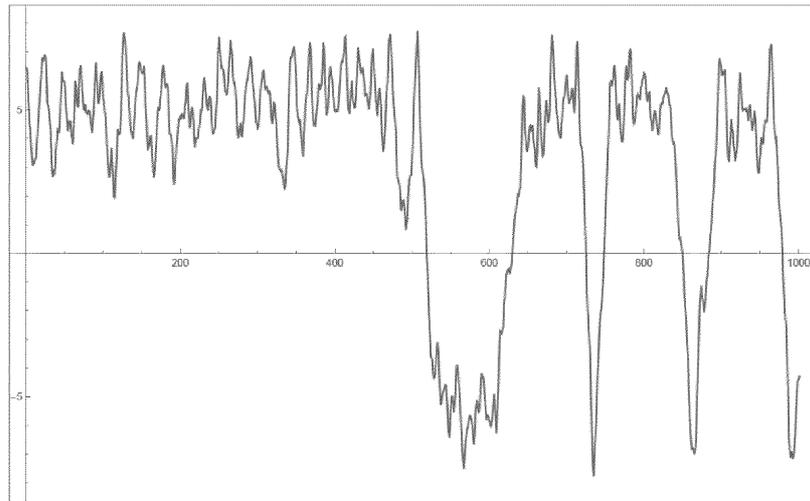


Фиг. 25



Фиг. 26





Фиг. 30

