

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **044689**

(13) **B1**

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

- |  |   |
|--|---|
| (45) Дата публикации и выдачи патента<br><b>2023.09.22</b> | (51) Int. Cl. <i>H01L 41/02</i> (2006.01)<br><i>H01L 41/04</i> (2006.01)<br><i>H01L 41/047</i> (2006.01)<br><i>H01L 41/08</i> (2006.01)<br><i>H01L 41/113</i> (2006.01)<br><i>H02N 2/18</i> (2006.01) |
| (21) Номер заявки<br><b>202092885</b>                      |   |
| (22) Дата подачи заявки<br><b>2019.05.30</b>               |   |

---

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

---

- |   |  |
|---|--|
| (31) <b>62/677,826; 62/741,234</b>  | (56) US-B2-9142857<br>US-A1-20120283807<br>US-B1-7839058 |
| (32) <b>2018.05.30; 2018.10.04</b>  |  |
| (33) <b>US</b>  |  |
| (43) <b>2021.04.05</b>  |  |
| (86) <b>PCT/US2019/034688</b>   |  |
| (87) <b>WO 2019/232232 2019.12.05</b>   |  |
| (71)(73) Заявитель и патентовладелец:<br><b>БОРД ОФ ТРАСТИЗ ОФ ТЕ<br/>ЮНИВЕРСИТИ ОФ АРКАНЗАС (US)</b> |  |
| (72) Изобретатель:<br><b>Тибадо Пол (US)</b>  |  |
| (74) Представитель:<br><b>Фелицына С.Б. (RU)</b>  |  |

- 
- (57) В настоящем изобретении раскрыты устройства и датчики для аккумуляции энергии и способы их получения и применения. Устройства для аккумуляции энергии могут содержать мембрану, размещенную на подложке, при этом мембрана содержит двумерный материал и одну или более волн; и компонент, электрически, магнитно, электромагнитно, электростатически/емкостно, пьезоэлектрически, магнитострикционно и/или механически соединенный с мембраной и/или подложкой таким образом, что компонент выполнен с возможностью аккумуляции энергии из мембраны. Датчики могут содержать мембрану, размещенную на подложке, при этом мембрана содержит двумерный материал, одну или более волн; и компонент, электрически, магнитно, электромагнитно, электростатически/емкостно, пьезоэлектрически, магнитострикционно и/или механически соединенный с мембраной и/или подложкой таким образом, что компонент выполнен с возможностью обнаружения сигнала от мембраны.

**B1**

**044689**

**044689**

**B1**

### **Перекрестная ссылка на родственные заявки**

Данная заявка испрашивает приоритет и преимущество как по предварительной заявке на патент США № 62/677,826, поданной 30 мая 2018 г., так и по предварительной заявке на патент США № 62/741,234, поданной 4 октября 2018 г., обе из которых включены посредством ссылки, как если бы они были полностью изложены в настоящем документе.

### **Заявление относительно исследований, спонсируемых федеральным правительством**

Ни указанные приоритетные заявки, ни настоящая заявка не пользуются государственными средствами и не извлекают выгоду из спонсируемых правительством исследований.

### **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.

### **Сущность изобретения**

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

В одном варианте реализации система для аккумуляции вибрационной энергии содержит свободную мембрану, соединенную с одной или более опорами, и имеет первую поверхность, которая не имеет препятствий и может свободно вибрировать в ответ на энергию окружающей среды. Вибрация мембраны определяет циклические образования волн вдоль первой поверхности, при этом каждое образование волны чередуется между подъемом и спадом в соответствующей области окна совокупности областей окна мембраны. Сканирующий туннельный микроскоп (STM; scanning tunneling microscope) подключен к системе и содержит зонд и источник напряжения. Зонд STM расположен рядом с мембраной для определения соответствующей емкостной области зарядов между зондом STM и областями окна мембраны. Расстояние между концом STM и каждой соответствующей областью окна из областей окна мембраны изменяется в зависимости от соответствующих подъемов и спадов. Емкостная область между зондом STM и каждой областью окна мембраны накапливает и излучает заряды циклически в зависимости от расстояния между зондом и соответствующей областью окна. Постоянный накопительный конденсатор подключен к мембране и принимает излучаемые заряды из емкостной области, когда расстояние между зондом STM и каждой областью окна увеличивается во время периодов подъема волны. Источник напряжения подает заряды в емкостную область, когда расстояние между зондом STM и соответствующей областью окна уменьшается во время периодов спада волны.

В другом варианте реализации настоящее изобретение обеспечивает систему для преобразования вибрационной энергии в выходной ток со свободной мембраной, соединенной с одной или более опорами и содержащей первую поверхность, которая не имеет препятствий и может свободно вибрировать в ответ на энергию окружающей среды. Вибрация мембраны определяет циклические образования волн вдоль первой поверхности, при этом каждое образование волны чередуется между подъемом и спадом в соответствующей области окна совокупности областей окна мембраны. Сканирующий туннельный микроскоп (STM) с зондом расположен рядом с мембраной, и STM содержит источник напряжения, устанавливающий ток с заданным значением между зондом и мембраной для определения соответствующей емкостной области зарядов между зондом и областями окна мембраны. Расстояние между зондом микроскопа и каждой областью окна мембраны изменяется в зависимости от соответствующих подъемов и спадов, а емкостная область накапливает и излучает заряды циклически в зависимости от расстояния между зондом и областями окна, а также в соответствии с туннелированием дополнительных зарядов через емкостную область. Постоянный накопительный конденсатор подключен к мембране и принимает излучаемые заряды и дополнительные туннелирующие заряды из емкостной области, когда расстояние между зондом микроскопа и соответствующей областью окна увеличивается во время периодов подъема волны в соответствующей области окна.

В еще одном варианте реализации система для преобразования вибрационной энергии в выходной ток содержит схему аккумуляции тока в подложке, при этом схема аккумуляции тока содержит общий металлический контакт, соединенный соответствующими согласованными ориентированными диодами с источником напряжения и постоянным накопительным конденсатором. Свободная

мембрана проходит поверх по меньшей мере общего металлического контакта в схеме аккумуляирования тока таким образом, что общий металлический контакт отделен от мембраны установочной опорой и обращен к первой поверхности мембраны для определения емкостной области между общим металлическим контактом и первой поверхностью мембраны. Первая поверхность мембраны не имеет препятствий и может свободно вибрировать в ответ на энергию окружающей среды, при этом вибрация мембраны определяет циклические образования волн вдоль первой поверхности, и при этом каждое образование волны чередуется между подъемом и спадом относительно общего контакта. Емкостная область между общим контактом и мембраной накапливает заряды между общим контактом и мембраной, и общий контакт переключает выходной ток накопленных зарядов через один из соответствующих диодов, чтобы направить выходной ток либо в источник напряжения, либо в постоянный накопительный конденсатор в ответ на циклические образования волн в мембране.

В другом неограничивающем варианте реализации настоящего изобретения способ сборки схемы аккумуляирования энергии включает в себя формирование емкостной области в схеме аккумуляирования энергии путем определения первой пластины конденсатора, имеющей начальное разделительное расстояние по отношению к первой поверхности свободностоящей мембраны, при этом первая поверхность свободностоящей мембраны определяет вторую пластину конденсатора, с последующим соединением первой пластины конденсатора с источником напряжения, выполненным с возможностью индукции накопления заряда в емкостной области. Затем мембрану размещают относительно первой пластины конденсатора таким образом, чтобы мембрана не имела препятствий и могла свободно вибрировать в ответ на энергию окружающей среды, при этом вибрация мембраны определяет циклические образования волн вдоль первой поверхности, и при этом каждое образование волны чередуется между подъемом и спадом относительно первой пластины конденсатора для изменения начального разделительного расстояния. Способ включает разрядку емкостной области через соответствующий диод для направления накопленных зарядов либо к источнику напряжения, либо к нагрузке, при этом разрядка емкостной области включает в себя направление зарядов к источнику напряжения и направление зарядов к нагрузке во время подъема.

Другой вариант реализации раскрывает способ сборки схемы аккумуляирования энергии путем пропитки изолирующего слоя свободностоящей мембраны постоянными носителями заряда и формирования емкостной области в схеме аккумуляирования энергии путем определения первой пластины конденсатора, имеющей начальное разделительное расстояние по отношению к первой поверхности свободностоящей мембраны. Первая поверхность свободностоящей мембраны определяет вторую пластину конденсатора, содержащую постоянные носители заряда. Способ дополнительно обеспечивает размещение мембраны относительно первой пластины конденсатора таким образом, чтобы мембрана не имела препятствий и могла свободно вибрировать в ответ на энергию окружающей среды и изменять емкость емкостной области, при этом вибрация мембраны определяет циклические образования волн вдоль первой поверхности, и при этом каждое образование волны чередуется между подъемом и спадом относительно первой пластины конденсатора для изменения начального разделительного расстояния. Во время периодов вибрации накопленный заряд направляется от первой пластины конденсатора в емкостную область. Накопленный заряд может разряжаться из емкостной области через по меньшей мере одно из резистивной нагрузки и постоянного накопительного конденсатора.

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 графических материалах и представленном ниже описании. Другие признаки, цели и преимущества изобретения станут ясны из описания и графических материалов, а также из формулы изобретения.

#### **Краткое описание графических материалов**

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

На фиг. 1А показан вид в перспективе мембраны, подверженной образованию волн, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 1В схематически показана системы аккумуляирования энергии и измерения энергии, как изложено в настоящем изобретении.

На фиг. 2А показан вид сверху мембраны, подверженной воздействию усилия сжатия, которое взаимодействует с вибрационным образованием волн в соответствии с настоящим изобретением.

На фиг. 2В показан вид сбоку мембраны, подверженной воздействию противоположно направленных боковых усилий сжатия и восходящих вибрационных усилий в точках вдоль края части мембраны, показывающий вибрационное образование волн в соответствии с настоящим изобретением.

На фиг. 2С показан вид сбоку мембраны, подверженной воздействию противоположно направленных боковых усилий сжатия и противоположно направленных вибрационных усилий в точках вдоль края мембраны, показывающий вибрационное образование волн в соответствии с настоящим изобретением.

На фиг. 2D показан вид сбоку натянутой мембраны, смещенной в образование волн под действием усилий сжатия и вибрационных усилий, как описано в настоящем документе.

На фиг. 3А представлен схематический вид схемы переменного конденсатора, содержащей одну фиксированную пластину и одну перемещаемую пластину, как изложено в настоящем документе.

На фиг. 3В показан график тока в наноамперах, разряженного накопительным конденсатором, подключенным к схеме, показанной на фиг. 3А.

На фиг. 4А представлено схематическое изображение переменной емкости через одну фиксированную пластину конденсатора и одну перемещаемую пластину конденсатора, заряжающую за счет источника напряжения, как изложено в настоящем документе.

На фиг. 4В представлено схематическое изображение переменной емкости через одну фиксированную пластину конденсатора и одну перемещаемую пластину конденсатора, разряжающуюся в нагрузку постоянного накопительного конденсатора и заряжающую источник напряжения, как изложено в настоящем документе.

На фиг. 4С представлено схематическое изображение разрядки накопительного конденсатора через резистивную нагрузку амперметра, как изложено в настоящем документе.

На фиг. 5 представлен график заряда, накопленного в нанокуллонах в накопительном конденсаторе после работы схемы, показанной на фиг. 4А и 4В, в течение указанного времени и при заданных значениях туннельного тока для микроскопа, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 6 представлен график энергии в пикоджоулях, накопленной в накопительном конденсаторе, после работы схемы, показанной на фиг. 4А и 4В, в течение указанного времени и при заданных значениях туннельного тока для микроскопа, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 7 представлен график заряда, накопленного в нанокуллонах в накопительном конденсаторе после 50-секундного периода накопления энергии при многочисленных заданных токах для микроскопа, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 8 представлен график заряда, накопленного в нанокуллонах в накопительном конденсаторе после 100-секундного периода накопления энергии при многочисленных заданных токах для микроскопа, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 9 представлен график заряда, накопленного в нанокуллонах в накопительном конденсаторе после 200-секундного периода накопления энергии при многочисленных заданных токах для микроскопа, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 10 представлен график заряда, накопленного в нанокуллонах в накопительном конденсаторе после 500-секундного периода накопления энергии при многочисленных заданных токах для микроскопа, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 11 представлен схематический вид, иллюстрирующий источники разрядного тока и туннельного тока через переменный конденсатор, которому свойственно переменное сопротивление, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 12А представлен схематический вид схемы датчика, в которой используется амперметр для измерения либо одного из излучаемого тока и туннельного тока, либо как излучаемого тока, так и туннельного тока в области переменной емкости, как описано в настоящем документе.

На фиг. 12В представлен график разрядного тока с течением времени от переменного конденсатора через амперметр при использовании свободностоящего графена, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 12С представляет собой график изменения туннельного тока от переменного конденсатора через амперметр во времени при использовании неподвижного графена, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 12D представлен график значений стандартного отклонения разрядного тока как для свободностоящего графена, так и для неподвижного графена как функции заданного туннельного тока для сканирующего туннельного микроскопа, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 12Е представлен схематический вид схемы датчика со свойственной ему паразитной емкостью, в которой используют амперметр для измерения тока в области переменной емкости, как описано в настоящем документе.

На фиг. 12F представлен график аккумулярованного тока с течением времени из переменного конденсатора через амперметр как для свободностоящего графена, так и неподвижного графена, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 12G представлен график значений стандартного отклонения для разрядного тока для мембраны свободностоящего графена и неподвижного образца графена на карбиде кремния как функции заданного тока для сканирующего туннельного микроскопа, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 12H представлен схематический вид схемы датчика, в которой используют амперметр для измерения либо одного из излучаемого тока и туннельного тока, либо как излучаемого тока, так и туннельного тока в области переменной емкости, как описано в настоящем документе.

На фиг. 12I представлен график накопленного тока без туннельного тока с течением времени из переменного конденсатора через амперметр для трех различных напряжений смещения, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 12J представлен график накопленного тока без туннельного тока как функции заданного напряжения смещения для сканирующего туннельного микроскопа, как раскрыто в настоящем документе.

На фиг. 13 представлен график максимального заряда, накопленного в нанокуллонах в накопительном конденсаторе, как описано в настоящем документе, в течение различных периодов аккумуляирования.

На фиг. 14 представлен график максимальной энергии в пикоджоулях, накопленной в постоянном конденсаторе, описанном в настоящем документе, в течение различных периодов времени аккумуляирования.

На фиг. 15 представлен график максимального заряда, накопленного в нанокуллонах в постоянном накопительном конденсаторе, описанном в настоящем документе, в течение различных периодов времени аккумуляирования при различных заданных туннельных токах.

На фиг. 16 представлен график энергии, накопленной в постоянном накопительном конденсаторе, описанном в настоящем документе, в течение различных периодов времени аккумуляирования при различных заданных токах.

На фиг. 17A представлен схематический вид матрицы переменных конденсаторов в схеме аккумуляирования энергии в соответствии с изобретением, описанным в настоящем документе.

На фиг. 17B представлен вид в поперечном разрезе многослойной матрицы переменных конденсаторов в схеме аккумуляирования энергии в соответствии с изобретением, описанным в настоящем документе.

На фиг. 18A проиллюстрированы естественно возникающие волны в свободностоящем графене. На фиг. 18B показаны серии необработанных высотно-временных данных STM, полученные в течение 10000 с, показанные с линией тренда, полученной посредством алгоритма низкочастотного фильтра Винера для выделения крупномасштабных колебаний. На фиг. 18C представлен измеренный туннельный ток, связанный с настоящими, показанными на фиг. 18B. На фиг. 18D представлены высотно-временные данные за вычетом фона, показывающие только колебания по высоте мембраны. Данные, показанные на нулевой высоте, являются контрольными настоящими, полученными для неподвижного образца графена. На фиг. 18E представлена функция автокорреляции высоты (AAAAAA), рассчитанная на основании данных за вычетом фона, показанных на фиг. 18D. На фиг. 18F представлена спектральная плотность мощности (PPPPPP), рассчитанная на основании данных STM, показанных на фиг. 18D.

На фиг. 19A представлена выпуклая геометрическая конфигурация волны молекулярной динамики, на фиг. 19B представлена серия выходных высотно-временных данных моделирования, на фиг. 19C представлена функция автокорреляции высоты и на фиг. 19D представлена спектральная плотность мощности из серий высотно-временных данных.

На фиг. 20A представлены выходные высотно-временные данные моделирования модели спиновой мембраны и конфигураций в три различные периоды времени, на фиг. 20B представлена функция автокорреляции высоты ACF и на фиг. 20C представлена спектральная плотность мощности.

На фиг. 21A-21R представлены итерационные изображения этапов формирования схемы аккумуляирования энергии в соответствии с настоящим изобретением с использованием формирования скрытого изображения электронным лучом.

На фиг. 22A-22R представлены итерационные изображения этапов формирования схемы аккумуляирования энергии в соответствии с настоящим изобретением с использованием фотолитографии.

На фиг. 23 показан вид сверху в перспективе преобразователя энергии, сформированного в подложке, в соответствии с настоящим изобретением.

На фиг. 24 показан вид сбоку в поперечном разрезе преобразователя, показанного на фиг. 23.

На фиг. 25 показан вид сверху левой секции преобразователя, показанного на фиг. 24.

На фиг. 26 показан вид сбоку в поперечном разрезе преобразователя, показанного на фиг. 23.

На фиг. 27 показан вид сверху в перспективе преобразователя энергии, показанного на фиг. 23, с детальным изображением на вставке, показывающим вид в увеличенном масштабе зонда и области лунки в соответствии с настоящим изобретением.

#### **Подробное описание**

устройства и способы, описанные в настоящем документе, могут быть лучше поняты посредством ссылки на представленное далее подробное описание конкретных аспектов раскрытого объекта изобретения и примеры, включенные в настоящий документ.

Перед тем, как настоящие устройства и способы будут раскрыты и описаны, следует понимать, что аспекты, описанные ниже, не ограничены подробностями исполнения и расположения компонентов, изображенными в представленном далее описании или проиллюстрированными на графических материалах. 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 сопроводительные графические материалы, которые образуют его часть и на которых в качестве примера показаны конкретные варианты реализации или примеры.

Следует также понимать, что терминология, используемая в настоящем документе, 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 содержит 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 документе, 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 документу 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 настоящий документ посредством ссылки для материала, содержащегося в нем, который описан в предложении, в котором сделана эта ссылка.

В настоящем описании содержатся ссылки на многочисленные электрические заряды противоположной полярности, а также на совокупность определенных положительных и отрицательных зарядов на идентифицированном оборудовании. Ничто в настоящем описании не ограничивает настоящее изобретение каким-либо одним расположением положительной или отрицательной полярности в обстоятельствах, в которых также может быть установлена противоположная полярность.

В настоящем описании дополнительно упоминаются подъемы и спады свободностоящей мембраны, подверженной воздействию волн из-за действия внешних усилий энергии, и то, является ли определенная структура мембраны подъемом или спадом, зависит от проекции, а также от положения мембраны относительно другой структуры. Соответственно, ничто в настоящем подробном описании не требует какой-либо конкретной ориентации структур или оборудования, и термины "подъемы", "спады" и "волны" не ограничиваются какой-либо одной ориентацией, а предназначены только для целей настоящего описания.

#### 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 настоящей заявки 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 документу 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 документе, относятся 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, САВАВВ 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.

#### Устройства и датчики для аккумуляции энергии

В настоящем документе описаны устройства 100 и датчики 195 для аккумуляции энергии. Устройство и датчики для аккумуляции энергии могут содержать мембрану 265, расположенную на подложке 258, при этом мембрана 225 содержит двумерный (2D) материал и одну или более волн, имеющих подъемы 286 и спады 289, как показано на фиг. 1А. Как дополнительно проиллюстрировано на фиг. 1А, подложка может представлять собой сетку 258, определяющую ячейки сетки по размеру подложки, чтобы очертить области 269 окна перекрывающей мембраны 265 внутри каждой ячейки, как опи-

сано в настоящем документе.

В представленном в качестве примера варианте реализации раскрыто устройство 100 для аккумуляции энергии, содержащее источник 105, 118, 200 питания, для аккумуляции энергии окружающей среды, содержащее атомную двумерную мембрану 265 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 265 устройств 100 для аккумуляции энергии, описанная в настоящем документе, может спонтанно вибрировать и механически изгибаться.

Двумерный материал может содержать, например, графен,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ,  $\text{ReS}_2$ ,  $\text{ReSe}_2$  нитрид бора (BN) или их комбинацию. В некоторых примерах двумерный материал может содержать графен. Графен может включать однослойные материалы, двухслойные материалы, трехслойные материалы и многослойные материалы. Хотя приводимые в настоящем документе в качестве примера варианты реализации указывают, что один неограничивающий материал для свободностоящей мембраны представляет собой графен, любой из материалов, рассматриваемых в настоящем документе, также может представлять собой практичный вариант для свободностоящей мембраны. Эти слои могут быть наложены друг на друга в произвольных или определенных кристаллографических ориентациях, что может улучшить вибрационные свойства.

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 265 может содержать свободностоящий графен, который имеет существенно большую составляющую скорости в распределении вероятности скорости. В некоторых примерах мембрана 265 может иметь непрерывное нелинейное движение при комнатной температуре.

Мембрана 265 может, например, иметь среднюю толщину, составляющую 0,3 нанометра (нм) или более (например, 0,4 нм или более, 0,5 нм или более, 0,6 нм или более, 0,7 нм или более, 0,8 нм или более, 0,9 нм или более, 1,0 нм или более, 1,1 нм или более, 1,2 нм или более, 1,3 нм или более, 1,4 нм или более, 1,5 нм или более, 1,6 нм или более, 1,7 нм или более, 1,8 нм или более, 1,9 нм или более, 2,0 нм или более, 2,1 нм или более, 2,2 нм или более, 2,3 нм или более, 2,4 нм или более, или 2,5 нм или более). В некоторых примерах мембрана 265 может иметь среднюю толщину, составляющую 3,0 нм или менее (например, 2,9 нм или менее, 2,8 нм или менее, 2,7 нм или менее, 2,6 нм или менее, 2,5 нм или менее, 2,4 нм или менее, 2,3 нм или менее, 2,2 нм или менее, 2,1 нм или менее, 2,0 нм или менее, 1,9 нм или менее, 1,8 нм или менее, 1,7 нм или менее, 1,6 нм или менее, 1,5 нм или менее, 1,4 нм или менее, 1,3 нм или менее, 1,2 нм или менее, 1,1 нм или менее, 1,0 нм или менее, 0,9 нм или менее, 0,8 нм или менее, 0,7 нм или менее, 0,6 нм или менее, или 0,5 нм или менее). Средняя толщина мембраны 265 может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, мембрана 265 может иметь среднюю толщину от 0,3 нм до 3,0 нм (например, от 0,3 нм до 2,5 нм, от 0,3 нм до 2,0 нм, от 0,3 нм до 1,5 нм, от 0,3 нм до 1,0 нм или от 0,3 нм до 0,6 нм).

Мембрана 265 может, например, иметь средний горизонтальный размер, составляющий 0,1 микрона (мкм) или более (например, 0,5 мкм или более, 1 мкм или более, 1,5 мкм или более, 2 мкм или более, 2,5 мкм или более, 3 мкм или более, 3,5 мкм или более, 4 мкм или более, 4,5 мкм или более, 5 мкм или более, 6 мкм или более, 7 мкм или более, 8 мкм или более, 9 мкм или более, 10 мкм или более, 15 мкм или более, 20 мкм или более, 25 мкм или более, 30 мкм или более, 35 мкм или более, 40 мкм или более, 45 мкм или более, 50 мкм или более, 60 мкм или более, 70 мкм или более, или 80 мкм или более). В некоторых примерах мембрана 265 может иметь средний горизонтальный размер, составляющий 100 мкм или менее (например, 90 мкм или менее, 80 мкм или менее, 70 мкм или менее, 60 мкм или менее, 50 мкм или менее, 45 мкм или менее, 40 мкм или менее, 35 мкм или менее, 30 мкм или менее, 25 мкм или менее, 20 мкм или менее, 15 мкм или менее, 10 мкм или менее, 9 мкм или менее, 8 мкм или менее, 7 мкм или менее, 6 мкм или менее, 5 мкм или менее, 4,5 мкм или менее, 4 мкм или менее, 3,5 мкм или менее, 3 мкм или менее, 2,5 мкм или менее, 2 мкм или менее, 1,5 мкм или менее, или 1 мкм или менее). Средний горизонтальный размер мембраны 265 может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, мембрана 265 может иметь средний горизонтальный размер от 0,1 микрон до 100 микрон (например, от 0,1 мкм до

50 мкм, от 50 мкм до 100 мкм, от 0,1 мкм до 20 мкм, от 20 мкм до 40 мкм, от 40 мкм до 60 мкм, от 60 мкм до 80 мкм, от 80 мкм до 100 мкм, от 0,5 мкм до 95 мкм или от 10 мкм до 90 мкм).

В некоторых примерах мембрана 265 может иметь натяжение на единицу длины, составляющее 0,0 Ньютон на метр (Н/м) или более (например, 0,01 Н/м или более, 0,02 Н/м или более, 0,03 Н/м или более, 0,04 Н/м или более, 0,05 Н/м или более, 0,06 Н/м или более, 0,07 Н/м или более, 0,08 Н/м или более, 0,09 Н/м или более, 0,10 Н/м или более, 0,11 Н/м или более, 0,12 Н/м или более, 0,13 Н/м или более, 0,14 Н/м или более, 0,15 Н/м или более, 0,20 Н/м или более, 0,25 Н/м или более, 0,30 Н/м или более, 0,35 Н/м или более, 0,40 Н/м или более, 0,45 Н/м или более, 0,50 Н/м или более, 0,60 Н/м или более, 0,70 Н/м или более, 0,80 Н/м или более, 0,90 Н/м или более, 1,0 Н/м или более, 1,5 Н/м или более, 2,0 Н/м или более, 2,5 Н/м или более, 3,0 Н/м или более, 3,5 Н/м или более, 4,0 Н/м или более, 4,5 Н/м или более, 5,0 Н/м или более, 6,0 Н/м или более, или 7,0 Н/м или более). В некоторых примерах мембрана 265 может иметь натяжение на единицу длины, составляющее 10,0 Н/м или менее (например, 9,0 Н/м или менее, 8,0 Н/м или менее, 7,0 Н/м или менее, 6,0 Н/м или менее, 5,0 Н/м или менее, 4,5 Н/м или менее, 4,0 Н/м или менее, 3,5 Н/м или менее, 3,0 Н/м или менее, 2,5 Н/м или менее, 2,0 Н/м или менее, 1,5 Н/м или менее, 1,0 Н/м или менее, 0,90 Н/м или менее, 0,80 Н/м или менее, 0,70 Н/м или менее, 0,60 Н/м или менее, 0,50 Н/м или менее, 0,45 Н/м или менее, 0,40 Н/м или менее, 0,35 Н/м или менее, 0,30 Н/м или менее, 0,25 Н/м или менее, 0,20 Н/м или менее, 0,15 Н/м или менее, 0,14 Н/м или менее, 0,13 Н/м или менее, 0,12 Н/м или менее, 0,11 Н/м или менее, 0,10 Н/м или менее, 0,09 Н/м или менее, 0,08 Н/м или менее, 0,07 Н/м или менее, 0,06 Н/м или менее, или 0,05 Н/м или менее). Натяжение на единицу длины мембраны 265 может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, мембрана 265 может иметь натяжение на единицу длины от 0,0 до 10,0 Н/м (например, от 0,0 Н/м до 8,0 Н/м, от 0,0 Н/м до 5,0 Н/м, от 0,0 Н/м до 3,0 Н/м, от 0,0 Н/м до 1,0 Н/м, от 0,0 до 0,5 Н/м, от 0,0 до 0,3 Н/м или от 0,03 Н/м 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 нм или более, 3 нм или более, 4 нм или более, 5 нм или более, 6 нм или более, 7 нм или более, 8 нм или более, 9 нм или более, 10 нм или более, 15 нм или более, 20 нм или более, 25 нм или более, 30 нм или более, 35 нм или более, 40 нм или более, 45 нм или более, 50 нм или более, 55 нм или более, 60 нм или более, 65 нм или более, 70 нм или более, 75 нм 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 нм или менее, 90 нм или менее, 85 нм или менее, 80 нм или менее, 75 нм или менее, 70 нм или менее, 65 нм или менее, 60 нм или менее, 55 нм или менее, 50 нм или менее, 45 нм или менее, 40 нм или менее, 35 нм или менее, 30 нм или менее, 25 нм или менее, 20 нм или менее, 15 нм или менее, 10 нм или менее, 9 нм или менее, 8 нм или менее, 7 нм или менее, 6 нм 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 нм до 100 нм (например, от 1 нм до 90 нм, от 1 нм до 80 нм, от 1 нм до 70 нм, от 1 нм до 60 нм, от 5 нм до 50 нм, от 10 нм до 40 нм или от 20 нм 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 нм или более, 0,12 нм или более, 0,13 нм или более, 0,14 нм или более, 0,15 нм или более, 0,20 нм или более, 0,25 нм или более, 0,30 нм или более, 0,35 нм или более, 0,40 нм или более, 0,45 нм или более, 0,50 нм или более, 0,60 нм или более, 0,70 нм или более, 0,80 нм или более, 0,90 нм или более, 1,0 нм или более, 1,1 нм или более, 1,2 нм или более, 1,3 нм или более, 1,4 нм 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 нм или менее, 1,8 нм или менее, 1,7 нм или менее, 1,6 нм или менее, 1,5 нм или менее, 1,4 нм или менее, 1,3 нм или менее, 1,2 нм или менее, 1,1 нм или менее, 1,0 нм или менее, 0,90 нм или менее, 0,80 нм или менее, 0,70 нм или менее, 0,60 нм или менее, 0,50 нм или менее, 0,45 нм или менее, 0,40 нм или менее, 0,35 нм или менее, 0,30 нм или менее, 0,25 нм 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 нм до 2,0 нм (например, от 0,1 нм до 1,5 нм, от 0,1 нм до 1,0 нм, от 0,1 нм до 0,70 нм, от 0,20 нм до 0,60 нм, от 0,30 нм до 0,50 нм или от 0,35 нм до 0,45 нм). Высота волн может быть измерена, например, с использованием электронной микроскопии.

Мембрана 265 может быть закреплена, например, одним или обоими концами к подложке 258 мембраны. В некоторых примерах мембрана 265 выполнена с возможностью вибрации через ее центральную часть.

Подложка 258 может содержать, например, медь, кремний, карбид кремния, сапфир или их комбинацию. В некоторых примерах подложка 258 мембраны может содержать сетку, содержащую одно или более отверстий 263. В некоторых описаниях отверстия 263 представляют собой области между боковыми стенками сетки, которые образуют области 264 окна мембраны 265.



Представленное ниже обсуждение раскрывает определенный пример, в котором мембрана 265 содержит графен, а подложка 258 содержит медную сетку, однако те же идеи могут быть применимы к любым мембранам 265 и/или подложкам 258 мембраны, описанным в настоящем документе.

В некоторых вариантах реализации мембрана 265 может содержать одноатомную пластину углерода из графита в качестве своего активного компонента. Лист графена может быть размещен поверх медной сетки, служащей в качестве упомянутой выше подложки 258 мембраны, и может определять одно или более отверстий 263 внутри соответствующих секций мембраны. Каждое отверстие 263, покрытое графеном, может формировать геометрию открытой рамы со свободностоящим графеном между ними. Когда графен размещен на медной сетке, имеется сильное ван-дер-ваальсово взаимодействие ( $\sim 0,1 \text{ Дж/м}^2$ ) между кромкой графена и боковой стенкой 264 ячейки медной сетки (фиг. 1А). В зависимости от количества избыточного графена, длина контакта будет естественным образом увеличиваться или снижаться до тех пор, пока не будет установлен баланс усилий. Данное явление известно как самонатяжение. Окончательное натяжение может составлять  $\sim 0,1 \text{ Н/м}$ , а окончательная геометрия свободностоящего графена может быть составлена из волн (фиг. 1А, 2А-2С). 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 265 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 265 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, как показано на фиг. 1А, когда графеновая мембрана 265 хранится при комнатной температуре, каждый атом углерода обладает кинетической энергией ( $0,5mv^2$ , где  $m$  - это масса атома углерода, а  $v$  - это его скорость), равной кВТ или около 25 МэВ. Это является богатым источником энергии, поскольку графен имеет  $4 \times 10^{15}$  атомов/см<sup>2</sup>. Вычисления электрической мощности прогнозируют, что каждый зубец может вырабатывать 10 пВт мощности, эквивалентные 25,0000 Вт/м<sup>2</sup>, что относит его к категории, подобной выработке энергии ветра и солнца. Поскольку скорость не равна нулю, атомы внутри мембраны 265 находятся в постоянном движении. Поскольку атомы 267 соединены друг с другом в сеть, вся мембрана 265 формирует волны и иногда эти волны меняют свою кривизну с подъемов 286 на спады 289. 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 265 может иметь одну волну. В некоторых примерах мембрана 265 может иметь совокупность волн 271, которые могут формировать сеть взаимодействующих волн. Мембрана 265, которая имеет размер 10 микрон на 10 микрон, в некоторых примерах может иметь более 100000 волн. Движение одной волны 271 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 175 нагрузки, который электрически, магнитно и/или механически соединен с мембраной 265 и/или подложкой 258, так что в неограничивающих примерах компонент 175 выполнен с возможностью аккумулирования или измерения энергии из мембраны 265.

В некоторых примерах подложка 258 мембраны является теплопроводящей, а мембрана 265 находится в тепловом контакте с подложкой 258 мембраны, при этом тепловая энергия подложки 258 мембраны может быть преобразована в вибрацию мембраны 265, так что мембрана 265 имеет вибрационную энергию, и компонент 175, 199, 275 нагрузки выполнен с возможностью преобразования вибрационной

энергии мембраны 265 в электрическую, магнитную и/или механическую энергию, тем самым аккумулируя энергию из мембраны 265. В некоторых примерах тепловая энергия может содержать тепловую энергию окружающей среды и/или кинетическую энергию окружающей среды.

В некоторых примерах мембрана 265 может иметь вибрационную энергию, а компонент 275 выполнен с возможностью преобразования вибрационной энергии мембраны 265 в электрическую, магнитную и/или механическую энергию, тем самым аккумулируя энергию из мембраны 265. В некоторых примерах вибрационная энергия содержит вибрационную энергию окружающей среды.

Вибрационная энергия, например, может содержать вибрации с частотой 0,1 миллигерц (мГц) или более (например, 0,5 мГц или более, 1 мГц или более, 5 мГц или более, 10 мГц или более, 50 мГц или более, 100 мГц или более, 500 мГц или более, 1 Гц или более, 5 Гц или более, 10 Гц или более, 50 Гц или более, 100 Гц или более, 500 Гц или более, 1 кГц или более, 10 кГц или более, 50 кГц или более, 100 кГц или более, 500 кГц или более, 1 мегагерц (МГц) или более, 5 МГц или более, 10 МГц или более, 50 МГц или более, 100 МГц 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 ГГц или менее, 1 ГГц или менее, 500 МГц или менее, 100 МГц или менее, 50 МГц или менее, 10 МГц или менее, 5 МГц или менее, 1 МГц или менее, 500 кГц или менее, 100 кГц или менее, 50 кГц или менее, 10 кГц или менее, 5 кГц или менее, 1 кГц или менее, 500 Гц или менее, 100 Гц или менее, 50 Гц или менее, 10 Гц или менее, 5 Гц или менее, 1 Гц или менее, 500 мГц или менее, 100 мГц или менее, 50 мГц или менее, 10 мГц 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 265 способна 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 175, 275 и преобразована в другие формы энергии, в том числе электричество.

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

В некоторых примерах устройство 100 для аккумуляирования энергии может быть выполнено таким образом, что каждая из одной или более волн может вырабатывать мощность, составляющую 1 пиковатт (пВт) или более (например, 5 пВт или более, 10 пВт или более, 15 пВт или более, 20 пВт или более, 25 пВт или более, 30 пВт или более, 35 пВт или более, 40 пВт или более, 45 пВт или более, 50 пВт или более, 55 пВт или более, 60 пВт или более, 65 пВт или более, 70 пВт или более, 75 пВт или более, 80 пВт или более, 85 пВт или более, или 90 пВт или более). В некоторых примерах устройство 100 для аккумуляирования энергии может быть выполнено таким образом, что каждая из одной или более волн может вырабатывать мощность, составляющую 100 пВт или менее (например, 95 пВт или менее, 9 095 пВт или менее, 8 595 пВт или менее, 8 095 пВт или менее, 7 595 пВт или менее, 7 095 пВт или менее, 6 595 пВт или менее, 6 095 пВт или менее, 5 595 пВт или менее, 5 095 пВт или менее, 4 595 пВт или менее, 4 095 пВт или менее, 3 595 пВт или менее, 3 095 пВт или менее, 2 595 пВт или менее, 2 095 пВт или менее, 1 595 пВт или менее, или 1 095 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 аккумуляирования энергии может быть выполнено таким образом, что каждая из одной или более волн может вырабатывать мощность от 1 пВт до 100 пВт (например, от 1 пВт до 50 пВт, от 50 пВт до 100 пВт, от 1 пВт до 30 пВт, от 20 пВт до 40 пВт, от 40 пВт до 60 пВт, от 60 пВт до 80 пВт, от 80 пВт до 100 пВт, от 10 пВт до 90 пВт или от 20 пВт до 80 пВт).

В некоторых примерах устройство 100 для аккумуляирования энергии может иметь удельную мощность, составляющую 1 Ватт на квадратный метр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) или более (например, 2  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 3  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 4  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 5  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 10  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 50  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 100  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 500  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 1 000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 5 000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; 10000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более; или 50000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или более). В некоторых примерах устройство 100 для аккумуляирования энергии может иметь удельную мощность, составляющую 100000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее (например, 90000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 80000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 70000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 60000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 50000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 10000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 5000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 1000  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 500  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 100  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 50  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; 10  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее; или 5  $\text{Вт}/\text{м}^2$  или менее). Удельная мощность устройства 100 для аккумуляирования 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 Вт/м<sup>2</sup> до 100000 Вт/м<sup>2</sup> (например, от 1 Вт/м<sup>2</sup> до 1000 Вт/м<sup>2</sup>; от 1000 Вт/м<sup>2</sup> до 100000 Вт/м<sup>2</sup>; от 1 Вт/м<sup>2</sup> до 100 Вт/м<sup>2</sup>; от 100 Вт/м<sup>2</sup> до 1000 Вт/м<sup>2</sup>; от 1000 Вт/м<sup>2</sup> до 10000 Вт/м<sup>2</sup>; от 10000 Вт/м<sup>2</sup> до 100000 Вт/м<sup>2</sup>; от 10 Вт/м<sup>2</sup> до 50000 Вт/м<sup>2</sup>; или от 100 Вт/м<sup>2</sup> до 10000 Вт/м<sup>2</sup>).

Далее со ссылкой на фиг. 3, в некоторых примерах мембрана 265 может иметь электрический заряд, а компонент 175 нагрузки (явно показанный на фиг. 4) представляет собой конденсатор, электрически связанный с мембраной 265, при этом схема, содержащая мембрану 265, выполнена с возможностью преобразования вибрационной энергии заряженной мембраны 265 в переменный электрический ток, тем самым аккумулируя энергию из мембраны 265. Например, движение заряженной мембраны 265 индуцирует ток в соседнем компоненте нагрузки.

В некоторых примерах мембрана 265 имеет вибрационную энергию, а схема выполнена с возможностью обнаружения сигнала, производимого вибрационной энергией мембраны 265. 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 мГц или более, 1 мГц или более, 5 мГц или более, 10 мГц или более, 50 мГц или более, 100 мГц или более, 500 мГц или более, 1 Гц или более, 5 Гц или более, 10 Гц или более, 50 Гц или более, 100 Гц или более, 500 Гц или более, 1 кГц или более, 10 кГц или более, 50 кГц или более, 100 кГц или более, 500 кГц или более, 1 мегагерц (МГц) или более, 5 МГц или более, 10 МГц или более, 50 МГц или более, 100 МГц 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 ГГц или менее, 1 ГГц или менее, 500 МГц или менее, 100 МГц или менее, 50 МГц или менее, 10 МГц или менее, 5 МГц или менее, 1 МГц или менее, 500 кГц или менее, 100 кГц или менее, 50 кГц или менее, 10 кГц или менее, 5 кГц или менее, 1 кГц или менее, 500 Гц или менее, 100 Гц или менее, 50 Гц или менее, 10 Гц или менее, 5 Гц или менее, 1 Гц или менее, 500 мГц или менее, 100 мГц или менее, 50 мГц или менее, 10 мГц 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).

Например, в некоторых вариантах реализации датчика 100 схема может быть функционально соединена с мембраной 265, причем мембрана 265 будет иметь заранее определенную чувствительность, способную захватывать вибрации с относительно низкими частотами. Следовательно, схема может быть выполнена с возможностью обнаружения частоты изгибания мембраны 265, и, когда схемой обнаружено заранее определенное изменение частоты мембраны 265, например, на основании наличия добавочной массы, выходные данные в отношении обнаружения массы будут определены и переданы за счет чувствительности мембраны 265 устройства.

#### Способы получения

Также в настоящем документе раскрыты способы получения устройств и датчиков для аккумуляции энергии, описанных в настоящем документе. Например, способы получения устройств и/или датчиков для аккумуляции энергии, описанные в настоящем документе, 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 включать, например, приложение бокового усилия 271 сжатия к листу, как схематически показано на фиг. 2А-2С. Боковое усилие сжатия, например, может иметь амплитуду, составляющую 1 наноньютон (нН) или более (например, 5 нН или более, 10 нН или более, 15 нН или более, 20 нН или более, 25 нН или более, 30 нН или более, 35 нН или более, 40 нН или более, 45 нН или более, 50 нН или более, 55 нН или более, 60 нН или более, 65 нН или более, 70 нН или более, 75 нН или более, 80 нН или более, 85 нН или более, или 90 нН или более). В некоторых примерах боковое усилие сжатия может составлять 100 нН или менее (например, 95 нН или менее, 90 нН или менее, 85 нН или менее, 80 нН или менее, 75 нН или менее, 70 нН или менее, 65 нН или менее, 60 нН или менее, 55 нН или менее, 50 нН или менее, 45 нН или менее, 40 нН или менее, 35 нН или менее, 30 нН или менее, 25 нН или менее, 20 нН или менее, 15 нН 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 нН до 100 нН (например, от 1 нН до 50 нН, от 50 нН до 500 нН, от 1 нН до 20 нН, от 20 нН до 40 нН, от 40 нН до 60 нН, от 60 нН до 80 нН, от 80 нН до 100 нН, от 5 нН до 95 нН, от 10 нН до 90 нН или от 20 нН до 80 нН).

В некоторых примерах лист двумерного материала имеет исходную длину, а сжатый лист двумерного материала имеет сжатую длину, например, как схематично показано на фиг. 2С, причем сжатая длина короче, чем исходная длина, на значение от 0,01% до 1%.

В некоторых примерах предел изгибания мембраны 265 может составлять 0,2 нм или более (например, 0,3 нм или более, 0,4 нм или более, 0,5 нм или более, 0,6 нм или более, 0,7 нм или более, 0,8 нм или

более, 0,9 нм или более, 1,0 нм или более, 1,5 нм или более, 2,0 нм или более, 2,5 нм или более, или 3,0 нм или более). В некоторых примерах предел изгибания мембраны может составлять 4,0 нм или менее (например, 3,5 нм или менее, 3,0 нм или менее, 2,5 нм или менее, 2,0 нм или менее, 1,5 нм или менее, 1,0 нм или менее, 0,9 нм или менее, 0,8 нм или менее, 0,7 нм или менее, 0,6 нм или менее, или 0,5 нм или менее). Предел изгибания может находиться в диапазоне от любого из минимальных значений, описанных выше, до любого из максимальных значений, описанных выше. Например, предел изгибания может составлять от 0,2 нм до 4,0 нм (например, от 0,2 нм до 2,0 нм, от 2,0 нм до 4,0 нм, от 0,2 нм до 1,0 нм, от 1,0 нм до 2,0 нм, от 2,0 нм до 3,0 нм, от 3,0 нм до 4,0 нм или от 0,5 нм до 3,5 нм). Предел изгибания 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 документе и проиллюстрировано примером, показанным на фиг. 2, может замедлить процесс изгибания, так что мембрана 265 может взаимодействовать и захватывать вибрации более низкой частоты, такие как связанные с условиями окружающей среды. Если мембрана 265 размещена на подложке 258 мембраны с помощью способа без напряжения, то мембрана может самостоятельно сжиматься в состоянии 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 258 мембраны, содержащей сетку. Сжатие или расширение сетки может изменять размер волн и изменять естественную частоту спонтанного изменения кривизны на обратную.

В одном варианте реализации, показанном на фиг. 3А, мембрана 265 представляет собой свободностоящую мембрану 265, имеющую первую поверхность 125А и вторую поверхность 125В. Первая поверхность мембраны 265 подвергается смещению из-за воздействия волн 261, формирующихся в мембране 265 и формирующих подъемы 286 и спады 289, как описано выше.

На фиг. 3А проиллюстрирован один неограничивающий вариант реализации некоторых основных механизмов аккумуляции энергии с использованием электростатического способа постоянного напряжения. На фиг. 3А показан переменный конденсатор 120 сверху, присоединенный проводниками к аккумуляторной батарее 105 внизу [2]. Переменный конденсатор 120 содержит первую пластину 135А конденсатора и вторую пластину 135В конденсатора. Вторая пластина 135В конденсатора подвергается смещению из-за воздействия усилия  $F_{th}$ , действующего на вторую пластину 135В конденсатора. Как отмечалось выше, вторая пластина 135В конденсатора выполнена из материала, который накапливает заряд и является достаточно пластичным, чтобы его можно было сместить под действием либо тепловых, либо кинетических внешних усилий. Аккумуляторная батарея 105 первоначально передает заряд в конденсатор 120, забирающий энергию из аккумуляторной батареи. Поскольку каждая из двух пластин 135А, 135В имеет противоположный заряд, они притягиваются друг к другу из-за действия электростатической силы. Тем не менее, опорная конструкция переменного конденсатора 120 удерживает их отдельно друг от друга. Затем вторая пластина 135В конденсатора (например, правая сторона на фиг. 3А) перемещается под действием внешнего усилия вправо. Примечательно, что это усилие должно преодолевать электростатическое притяжение, которое две пластины 135А, 135В имеют друг к другу. Это усилие воздействует на электромеханическую систему. Если пластины 135А, 135В конденсатора 120 расположены дальше друг от друга, тогда конденсатор может сохранять меньше заряда, чем он в настоящее время имеет на первой и второй пластинах 135А, 135В конденсатора. Этот заряд действует с учетом уравнения  $C=Q/V$ , где  $C$  представляет собой емкость емкостной области 141, значение которой уменьшилось с увеличением расстояния между пластинами 135А, 135В (т.е. при увеличении расстояния ( $d$ ) между пластинами 135А, 135В емкость уменьшается и наоборот).  $V$  представляет собой постоянное напряжение аккумуляторной батареи 105, а  $Q$  представляет собой полный заряд на пластинах и в емкостной области 141. Следовательно, при увеличении расстояния ( $d$ ) ток (обозначенный в соответствии со стандартным обозначением направления от положительного к отрицательному) перемещается от первой пластины 135А (например, от левой пластины, как показано) обратно внутрь аккумуляторной батареи 105 (подзаряжающей аккумуляторной батареи), с другой стороны аккумуляторной батареи 105 на вторую перемещаемую пластину 135В переменного конденсатора 120. Смещение, вызванное усилием  $F_{th}$ , проиллюстрированным на фиг. 3А, уменьшает общий заряд переменного конденсатора 120. Внешнее усилие отвечает за работу или энергию, необходимую для перемещения заряда. На этой иллюстрации показан основной физический механизм, с помощью которого внешнее усилие можно использовать для перемещения электрических зарядов из переменного конденсатора 120.

В одном варианте реализации и в соответствии с приведенным выше описанием вторая пластина 135В конденсатора (например, смещаемая пластина с правой стороны переменного конденсатора 120 на фиг. 3) представляет собой свободностоящий графен, и внешнее усилие, перемещающее свободностоящий графен, происходит в результате термически индуцированного и/или кинетического движения атомов в свободностоящем графене. На фиг. 3В проиллюстрирован пример токовой характеристики для варианта реализации переменного конденсатора в соответствии с фиг. 3А. На фиг. 3В представлен в качестве примера график тока, проходящего через компонент 175, 275 нагрузки, который аккумулирует энер-

гию в виде накопленного заряда из приведенной в качестве примера схемы, показанной на фиг. 3А. После аккумуляции энергии используют испытательную схему для измерения накопленного заряда путем подключения конденсатора ( $C=0,9$  мкФ), который служил в качестве компонента 175, 275 нагрузки, к измерительной схеме, управляемой компонентом 175, 275 нагрузки через 33 МОм резистор. На основании измерений на фигуре  $I_{\text{макс}}=30$  нА, а общий накопленный заряд  $Q_{\text{макс}}=I_{\text{макс}} RC=900$  нКл. Кроме того, общая аккумуляционная энергия составляет  $U_{\text{макс}}=Q^2/2C=450$  нДж. Средняя мощность источника  $P=U_{\text{макс}}/T=Q^2/2CT$ , где  $T$  представляет собой время, затраченное на аккумуляцию энергии. В примере на фиг. 3В переменный конденсатор 120 заряжался от источника питания с напряжением 1 В.

Ничто в настоящем изобретении не ограничивает варианты реализации какой-либо одной конфигурацией смещения заряда. Например, в другом варианте реализации мембрана 265 представляет собой изолирующий материал, который пропитан заряженными частицами, которые в этом случае не могут двигаться вдоль мембраны. В этом случае вибрация мембраны вызывает прохождение тока без использования источника напряжения. Как описано ниже, в этом варианте реализации может преобладать туннелирование тока от проксимального электрода или переменная емкость, индуцированная постоянным зарядом на мембране (т.е. вариант реализации с внутренней поляризацией). Кроме того, как и в других вариантах реализации, приведенных ниже, индуцированный ток может заряжать постоянный накопительный конденсатор или питать резистивную нагрузку.

На фиг. 4 показан другой вид электронной схемы аккумуляции энергии. Данная схема воспроизводится трижды (фиг. 4А, фиг. 4В, фиг. 4С), чтобы показать три различных функции [3, 4]. Схема содержит один источник напряжения (например, аккумуляторную батарею 105), один переменный конденсатор 120 (включая первую пластину 135А конденсатора и вторую пластину 135В конденсатора), два диода 150А, 150В, переключатель 153, один постоянный накопительный конденсатор 175, подключенный как первый компонент нагрузки, и другую схему подключаемой нагрузки, содержащую один резистор 199 и амперметр 195, подключенный к заземлению 118. Первая пластина 135А конденсатора может находиться в фиксированном положении, а вторая пластина 135В конденсатора может быть смещаемой, как мембрана 265, описанная выше. В варианте реализации, в котором используют мембрану для пластины 135В конденсатора, первая поверхность 125А мембраны обращена к первой пластине 135А конденсатора. Вторая поверхность 125В мембраны расположена напротив первой поверхности 125А.

Верхняя принципиальная схема на фиг. 4А иллюстрирует поток начального заряда, поступающий на переменный конденсатор 120. Ток течет только по часовой стрелке, показанной в левой части схемы - от аккумуляторной батареи 105 к переменному конденсатору 120 через диод 150А и обратно к аккумуляторной батарее 105. Энергия  $U$ , необходимая для зарядки конденсатора, составляет  $U=0,5C_{\text{макс}} V$ , где  $C_{\text{макс}}$  представляет собой максимальную емкость переменного конденсатора 120, а  $V$  представляет собой напряжение источника 105 питания. Эта энергия поступает от источника 105 питания. Данная схема, имеющая начальный заряд (по часовой стрелке на фиг. 4А), устанавливает начальный заряд на первом расстоянии ( $d$ ) между пластинами 135А, 135В переменного конденсатора 120. Левая сторона схемы, на которой показано течение тока по часовой стрелке в соответствии с фиг. 4А, также устанавливает максимальную емкость  $C_{\text{макс}}$ , которую может достичь емкостная область 141. Чем ближе пластины 135А, 135В конденсатора расположены друг к другу в данном цикле смещения пластины 135В конденсатора, тем большая емкость между пластинами будет достигнута.

В средней схеме, проиллюстрированной на фиг. 4В, внешнее усилие перемещает одну пластину 135В переменного конденсатора 120 от другой стороны (т.е. от первой пластины 135А конденсатора) и тем самым снижает общую емкость до  $C_{\text{мин}}$ . Конденсатор меньшего размера имеет меньший заряд, поэтому избыточный заряд должен выходить из переменного конденсатора 120 через аккумуляторную батарею 105 в непредусмотренном направлении (перезарядя ее). Этот избыточный заряд должен выходить из батареи 105 с другой стороны, а затем течь к постоянному накопительному конденсатору 175 в середине схемы, через переключатель 153, через второй диод 150В и обратно к переменному конденсатору 120 для замыкания схемы. Такой поток заряда аккумулирует заряд в постоянном накопительном конденсаторе 175. Каждый раз при повторении цикла в постоянном накопительном конденсаторе 175 размещается дополнительный заряд.

Когда постоянный накопительный конденсатор 175 достаточно заряжен, переключатель 151 можно повернуть вправо, и постоянный накопительный конденсатор 175 можно использовать для питания схемы справа. В этом случае ток проходит через резистор 199, а затем через амперметр 195, чтобы измерить, какое количество заряда было аккумуляровано схемой переменного конденсатора. Следующие формулы в иллюстрированных таблицах могут использовать для иллюстрации изменений тока и заряда, присутствующих в схеме, показанной на фиг. 4А-4С.

Таблица 1

Переменный конденсатор

$$C(t) = \frac{\varepsilon_0 A}{d(t)}$$

$$\Delta C(t) = \frac{\varepsilon_0 A}{d_0^2} \Delta d(t)$$

$$\Delta Q(t) = \frac{\varepsilon_0 A}{d_0^2} \Delta d(t) V_{stm}$$

$$I_{\Delta C}(t) = \frac{\varepsilon_0 A}{d_0^2} \Delta d(t) V_{stm} f$$

Таблица 2

Переменное туннелирование

$$I_T(t) = I_{stm} e^{-k G_{stm} \Delta d(t)}$$

$$I_{\Delta T}(t) = I_{stm} - I_{stm} e^{-k G_{stm} \Delta d(t)}$$

$$I_{\Delta T}(t) = I_{stm} k G_{stm} \Delta d(t)$$

Таблица 3

Добавление параллельных токов

$$I_{ch}(t) = \frac{\varepsilon_0 A f \Delta d(t)}{d_0^2} V_{stm} + k G_{stm} \Delta d(t) I_{stm}$$

$$\langle I_{ch} \rangle = \frac{\varepsilon_0 A f \langle \Delta d \rangle}{d_0^2} V_{stm} + k G_{stm} \langle \Delta d \rangle I_{stm}$$

$$Q_{ch}(t) = \frac{\varepsilon_0 A f \langle \Delta d \rangle}{d_0^2} V_{stm} t + k G_{stm} \langle \Delta d \rangle I_{stm} t$$

$$Q_{ch}^{max}(I_{stm}) = \frac{\varepsilon_0 A f \langle d(t) \rangle}{d_0^2} V_{stm} T + k G_{stm} \langle d(t) \rangle T I_{stm}$$

На фиг. 5-10 показаны данные, полученные в результате использования схемы, показанной на фиг. 4А-4С, когда первая пластина 135А конденсатора является зондом 138А сканирующего туннельного микроскопа (STM), как показано на фиг. 1В. Ничто в настоящем изобретении не ограничивается какой-либо пластиной переменного конденсатора, состоящей из зонда STM, и настоящее изобретение включает в себя переменный конденсатор 120, содержащий пластины 135А, 135В любой конструкции с металлическим контактом, сформированные в любой функциональной форме и/или являющиеся частью других подключенных устройств. Однако в одном неограничивающем примере сканирующий туннельный микроскоп (STM) содержит металлический зонд 138А, который изготовлен из проводящего материала и выполнен с возможностью передачи и/или приема носителей заряда на принимающую поверхность, как описано в настоящем документе. Как показано в примере на фиг. 1В, STM размещает зонд 138А над образцом (в этом примере мембраной 265) на незначительных расстояниях - всего лишь несколько ангстрем в некоторых случаях. Фактически, расстояния настолько незначительны, что одно из применений STM состоит в том, чтобы отслеживать изменения атомного уровня в топографии, которые могут быть отображены путем сканирования зондом образца в растровом режиме. При стандартном применении STM расстояние от зонда до образца можно регулировать по оси z, поскольку сканирование происходит поперек образца в плоскости x-y. Между зондом 138А STM и образцом прикладывают напряжение, причем зонд имеет определенную форму, которая в некоторых неограничивающих вариантах реализации сужается к зонду проводящего металла до ширины в атом, как показано в форме пирамиды зонда 138А на фиг. 1В. В дополнение к стандартным применениям сканирующих туннельных микроскопов (STM), применение STM в контексте настоящего изобретения включает, без ограничений, стационарный STM, расположенный в фиксированном пространстве относительно мембраны 265, как описано выше. Туннелирование электронов между зондом 138А и образцом, в настоящем случае мембраной 265, генерирует ток, который может поддерживаться в цепи обратной связи, которая управляет источником 105 питания. В одном неограничивающем варианте реализации применения для сканирующего туннельного микроскопа (STM) STM также может быть выполнен с возможностью размещения зонда в непосредственной близости от образца, т.е. мембраны 265, и измерения изменений в накоплении заряда при многочисленных заданных токах, поступающих на STM. Затем изменения в накоплении заряда в переменном конденсаторе используют для определения уровней энергии квантовых состояний в образце (т.е. измерение уровня энергии и наличия заряда для событий атомного уровня в образце). На фиг. 5-10 проиллюстрировано, что в случаях, когда зонд 138А STM служит в качестве первой пластины 135А конденсатора, мож-

но использовать различные уставки для заданного тока STM, чтобы проверять способность вибрирующей мембраны аккумулировать энергию, как описано выше. В этих примерах переменный конденсатор 120 содержит первую пластину 135А конденсатора, состоящую из зонда 138А STM, и вторую пластину 135В конденсатора, состоящую из мембраны 265 или ее части, которая в этом примере представляет собой графен. Более конкретно, и без ограничения настоящего изобретения каким-либо одним вариантом реализации, вторая пластина 135В конденсатора включает первую поверхность 125А мембраны 265, на которой аккумулируется заряд. А в еще одном неограничивающем варианте реализации зонд 138А сканирующего туннельного микроскопа (STM) сканирует поверхность мембраны и собирает данные относительно заряда в переменном конденсаторе и энергии, возникающей в результате этого заряда в областях 264 окна мембраны 265, при этом области 264 окна, составляющие общую поверхность мембраны, могут иметь индивидуальные атомные размеры, определенные заранее. Учитывая, что в определенных вариантах реализации зонд 138А STM является неподвижным относительно мембраны 265, наиболее проксимальные области окна могут быть проанализированы как имеющие большие размеры, чем области окна в частях мембраны, более удаленных от зонда 138А. В других вариантах реализации области 264 окна, которые удалены от зонда, могут быть статистически проанализированы как вносящие меньший заряд в общий процесс аккумулирования энергии. Размеры рассматриваемых областей окна и аккумулирование заряда в каждой области окна могут быть заранее запланированы путем стратегического размещения зонда относительно мембраны 265. Одно неограничивающее назначение установки STM и мембраны 265 состоит в том, чтобы управлять накоплением заряда на переменном конденсаторе 120, образованном между зондом и мембраной, и обеспечивать компоненты нагрузки, которые аккумулируют и/или используют это накопление заряда для получения энергии.

На фиг. 5 показан заряд, накопленный в нанокрулогах на переменном конденсаторе 120 от кинетической энергии свободностоящей графеновой мембраны 265, как функция времени аккумулирования в секундах. Каждая кривая получена при другом заданном токе STM в наноамперах и рассчитывается по следующему уравнению:

$$Q_{ch}(t) = \frac{\varepsilon_0 A f(\Delta d)}{d_0^2} V_{stm} t + k G_{stm}(\Delta d) I_{stm} t$$

На фиг. 6 показана энергия, накопленная в пикоджоулях на переменном конденсаторе 120 от кинетической энергии свободностоящей графеновой мембраны 265, как функция времени аккумулирования в секундах. Каждая кривая получена при другом заданном токе STM в наноамперах и рассчитывается по уравнению:

$$\text{Энергия} = Q^2/2C$$

На фиг. 7 показан заряд, накопленный в нанокрулогах на переменном конденсаторе 120 от кинетической энергии свободностоящей графеновой мембраны 265, как функция заданного тока STM в наноамперах, для периода аккумулирования, составляющего 50 с. Наклон и точка пересечения равны членам математического выражения.

На фиг. 8 показан заряд, накопленный в нанокрулогах на переменном конденсаторе 120 от кинетической энергии свободностоящей графеновой мембраны 265, как функция заданного тока STM в наноамперах, для периода аккумулирования, составляющего 100 с. Наклон и точка пересечения равны членам математического выражения.

На фиг. 9 показан заряд, накопленный в нанокрулогах на переменном конденсаторе 120 от кинетической энергии свободностоящей графеновой мембраны 265, как функция заданного тока STM в наноамперах, для периода аккумулирования, составляющего 200 с. Наклон и точка пересечения равны членам математического выражения.

На фиг. 10 показан заряд, накопленный в нанокрулогах на переменном конденсаторе 120 от кинетической энергии свободностоящей графеновой мембраны 265, как функция заданного тока STM в наноамперах, для периода аккумулирования, составляющего 500 с. Наклон и точка пересечения равны членам математического выражения.

Фиг. 7-10 представлены в соответствии со следующим уравнением:

$$Q_{ch}^{max}(I_{stm}) = \frac{\varepsilon_0 A f(d(t))}{d_0^2} V_{stm} T + k G_{stm}(d(t)) T I_{stm}$$

В целом, фиг. 4-10 настоящего изобретения представляют собой неограничивающие примеры устройства аккумулирования энергии для накопления заряда в постоянном накопительном конденсаторе 175. В других вариантах реализации, когда схему на фиг. 4 применяют вместе с STM, схема также выполнена с возможностью измерения энергии, задействованной в динамическом событии атомного масштаба. Энергетическая разрешающая способность может составлять по меньшей мере один фемтоджоуль. Испытательная схема, описанная выше в отношении фиг. 3В, иллюстрирует один пример того, как компонент нагрузки может быть присоединен к переменному конденсатору 120 согласно настоящему изобретению и как может быть измерен перенос заряда в атомном масштабе для моделирования события, которое изменяет кинетическую и термодинамическую реакцию образца, подверженного воздействию

физических явлений окружающей среды.

Фиг. 11 расширяет концепции, проиллюстрированные в неограничивающем примере схемы на фиг. 4-10, для более широкого использования во множестве вариантов применения благодаря новым способам моделирования переменного конденсатора 120 согласно настоящему изобретению. В соответствии с проиллюстрированным на фиг. 4, секция переменного конденсатора 120 всего устройства 100 схема, показанного на фиг. 4, фактически находится внутри камеры STM. Одна сторона переменного конденсатора 120 представляет собой зонд 138А STM, а другая сторона переменного конденсатора представляет собой свободностоящую графеновую мембрану 265. Зонд 138А STM подключен к положительно заряженной стороне источника 105 питания, подающего на зонд постоянный ток, который поддерживается источником 105 питания, управляемым схемой обратной связи. Когда свободностоящая графеновая мембрана 265 вибрирует, образуя волны 271, расстояние (фиг. 3А, обозначение "d") между графеновой мембраной 265 и ближайшим металлическим электродом (зонд 138А STM), естественно, будет изменяться, поскольку соответствующие волны меняют положение между подъемами 286 и спадами 289. При наименьшем расстоянии между мембраной 265 и металлическим электродом 138А емкость будет самой большой, составляя около 1 фемтофарада. При наибольшем расстоянии между пластинами 135А, 135В переменного конденсатора 120 емкость будет наименьшей, составляя около 0,1 фемтофарада. Это изменение емкости является одним из источников аккумулирования энергии, когда компонент 175, 195, 199 нагрузки подключен к переменному конденсатору в конфигурации схемы (т.е. с приводимыми в качестве примера диодами), позволяя переменному конденсатору разряжаться циклически через компонент нагрузки.

Как уже упоминалось, схема на фиг. 4 подключена к сканирующему туннельному микроскопу (STM). Свободностоящий графен является образцом, который по своей природе всегда должен находиться в движении [5], причем его нагревание также вызывает механическое изгибание [6], и каждая волна спонтанно меняет его кривизну [7]. Кроме того, было независимо прогнозировано, что можно аккумулировать тепловое движение наноструктурированного графена для обеспечения 10 пиковатт постоянной мощности для волны размером 1 нм на 17 нм [8].

В качестве примеров испытаний на фиг. 11 и 12 в настоящем изобретении показаны результаты использования STM в низкотемпературной сверхвысоковакуумной системе Omicron®, которая была модифицирована на заказ [9]. В частности, электрическое соединение 225 с образцом свободностоящей графеновой мембраны 265 изолировано от системы и может быть подключено к электронной схеме 100 аккумулирования энергии вне вакуума камеры 219 STM. Это также проиллюстрировано выше на фиг. 3В, где показаны примеры оборудования. Как обсуждалось выше, минимальная и максимальная емкости переменного конденсатора 120 могут быть рассчитаны для установки STM с зондом 138А STM и графеновой мембраной 265, образующей пластины 135А, 135В переменного конденсатора 120. Следует отметить, что заданный ток STM подают через источник 105 напряжения, управляемый схемой обратной связи, на зонд 138А STM для подзарядки переменного конденсатора 120 до первого уровня емкости (С). Как показано ниже, изменение расстояния (фиг. 3А, расстояние "d") между графеновой мембраной 265 и зондом 138А вызывает соответствующие изменения емкости переменного конденсатора 120. В случае, когда зонд и мембрана расположены максимально близко друг к другу, емкость между ними составляет  $C_{\text{макс}}$ , а когда зонд и мембрана максимально удалены друг от друга, переменный конденсатор 120 имеет минимальную емкость. Базовая емкость С может быть экспериментально определена для использования в конкретных вариантах применения, поскольку "С" зависит от выбранного заданного тока для STM, а также от диапазона движения зонда 138А STM для размещения в фиксированном положении относительно мембраны 265. Приведенная ниже информация объясняет взаимосвязи компонентов на фиг. 11, приводящие к определенным характеристикам переменного конденсатора 120.

Во время фазы увеличения емкости переменного конденсатора 120, когда мембрана 265 и зонд 138А STM находятся достаточно близко, как в течение периода 289 спада мембраны, графеновая мембрана 265 нагружается зарядом Q до  $Q_{\text{макс}}$ . Это событие было описано ранее в связи с фиг. 4А, на которой через диод 150А был пропущен заряд, что также показано стрелкой на фиг. 11 в качестве тока, протекающего по часовой стрелке через диод 150А. Фаза уменьшения емкости на фиг. 4А происходит во время образования подъема 286 в мембране 265, разделяющей пластины 135А, 135В переменного конденсатора, и графеновая мембрана 265 теряет заряд  $Q_{\text{макс}}$  до  $Q_{\text{мин}}$  обратно в STM. В примере на фиг. 4А с диодом 150А, заданным током STM и источником 105 напряжения, управляемым схемой обратной связи, поддерживающим заданный ток, величина заряда, доступного в схеме, стабилизируется до постоянного значения  $Q_{\text{макс}}$ , а заряд в схеме на фиг. 4А переносится посредством волнового эффекта на мембрану вместо того, чтобы ориентироваться лишь на электрическую динамику в источнике напряжения как единственном источнике энергии в схеме. В конце концов, в схеме на фиг. 4А источник напряжения постоянно пополняется и перезаряжается за один цикл подъемов 286 и спадов 289 в мембране. Мембрана выполняет функцию в схеме, показанной на фиг. 4А.

На фиг. 11 более детально показаны электрические явления, возникающие в схеме, показанной на фиг. 4А. В схеме на фиг. 11 переменный конденсатор 120 циклически переключается между высокой и низкой емкостью с волновым эффектом на мембране 265. В периоды спада, когда мембрана и зонд STM



находятся в непосредственной близости друг от друга, переменный конденсатор выполнен с возможностью накопления заряда до  $Q_{\text{макс}}$ . Когда емкость переменного конденсатора 120 уменьшается во время периодов подъема волн на мембране, направленный ток от положительного к отрицательному принудительно направляют из зонда STM 138A обратно в аккумуляторную батарею 105, и, как также показано на фиг. 4А, диод 150А позволяет току течь только в одном направлении. На фиг. 11 показано, что при использовании схемы аккумулятирования энергии с STM был обнаружен новый механизм аккумулятирования энергии. При перемещении свободностоящей графеновой мембраны 265, из-за чего образуются подъемы 286 и спады 289, первый механизм аккумулятирования заряда исходит из емкости перехода 138А, 265 образца зонда, изменяющегося во времени, как уже было описано выше. Второй механизм аккумулятирования заряда исходит из квантово-механического туннелирования электронов между зондом 138А и образцом, таким как, без ограничений, графеновая мембрана 120. Величина туннельного тока колеблется при колебаниях расстояния между зондом и образцом. Этот второй механизм исходит из теории туннелирования [10]. Однако, как и в случае с переменной емкостью, когда тепловое усилие отталкивает образец 265 от зонда 138А, именно тепловое усилие способствует перемещению заряда. Это фаза аккумулятирования энергии движения. Использование существующей тепловой энергии и вызванных вибрацией подъемов и спадов на мембране обеспечивает возможность добавления энергии к схемам, описанным в настоящем изобретении, таким образом перемещая заряд, не ориентируясь только на энергию, накопленную в аккумуляторной батарее или обеспечиваемую другим внешним источником напряжения.

Если расстояние между пластинами переменного конденсатора является достаточно минимальным, чтобы создать высокую вероятность туннелирования электронов, усиливается сигнал аккумулятирования энергии. Другими словами, первоначальное размещение зонда 138А в пределах известного диапазона движения по оси  $z$  зонда относительно оси  $x$ - $y$  поперек образца 265 может быть отрегулировано для обеспечения туннелирования заряда при заданных условиях.

Переменный конденсатор 120, который также пропускает ток по запланированному пути через компоненты схемы, может быть смоделирован как эквивалентная схема на фиг. 11, в которой переменный резистор 133 и переменный конденсатор 120 соединены между собой параллельно, как показано. В примере на фиг. 11 и конденсатор, и резистор являются переменными, и напряжение в каждом из них одинаковое.

Настоящее изобретение показывает, что суммарный ток  $I$ , доступный для аккумулятирования заряда за счет действия волнового эффекта на мембране 265, поступает как от переменного конденсатора 120 ( $I_C$ ), так и от переменного резистора 133 (туннелирование -  $I_R$ ). По сути, это обусловлено моделью переменного конденсатора и переменного резистора, соединенных между собой параллельно. В различных пределах электростатика переменного конденсатора или туннельный ток преобладает в аккумулятировании энергии. На минимальных расстояниях будет преобладать туннелирование. Это применимо к типичной, но не ограничивающей, установке STM. Использование существующей тепловой энергии и вызванных вибрацией подъемов 286 и спадов 289 мембраны обеспечивает путь перемещения заряда к постоянному накопительному конденсатору без использования аккумуляторной батареи 105 в качестве единственного источника питания в системе.

На фиг. 12А проиллюстрирован вариант реализации, показанный на фиг. 11, но с амперметром 195 в качестве нагрузочного устройства, который также последовательно подключен ко второму диоду 250В, направляющему ток обратно на вторую пластину 135В (например, образец или мембрану 265) переменного конденсатора. В варианте реализации, показанном на фиг. 12А, переменный конденсатор 120 снова сформирован с помощью зонда 138А STM в качестве первой пластины 135А конденсатора и графеновой мембраны 265 в качестве второй пластины 135В конденсатора в вакуумной камере 219 STM. Электрическое соединение 225 с мембраной может находиться вне камеры 219 для доступа при подключении диодов 250А, 250В. Амперметр 195 может измерять ток в режиме реального времени, что, в свою очередь, могут использовать для отображения накопления заряда на переменном конденсаторе 120, емкости накопления заряда на переменном конденсаторе и энергии, присутствующей в переменном конденсаторе 120. Эти измерения могут быть выполнены во время рассматриваемого события атомного уровня на образце, который может представлять собой мембрану 265, описанную выше. Примечательно, что на фиг. 12А представлена первая фигура согласно настоящему изобретению, на которой нагрузочное устройство, такое как амперметр 195, соединено напрямую параллельно с переменным конденсатором 120 и зарядным диодом 250А без переключателя, разделяющего схему зарядки (фиг. 4А, 4В) и схему разрядки (фиг. 4С). Положительные направления тока на фиг. 12А будут соответствовать направлениям на фиг. 4А в периоды спада на образце, или мембране 265, т.е. при зарядке переменного конденсатора, а затем соответствуют направлениям тока на фиг. 4В во время периодов подъема на мембране, разряжающей переменный конденсатор. Зарядка и разрядка переменного конденсатора 120 (первый механизм аккумулятирования заряда), наряду с эффектом переменного резистора, обсуждаемым в отношении фиг. 11 (второй механизм аккумулятирования заряда), работают совместно, предоставляя заряд компоненту нагрузки, который на фиг. 12А представляет собой амперметр 195. Таким образом, конфигурация схемы на фиг. 12А обеспечивает путь тока в первом направлении через аккумуляторную батарею 200 во время периодов максимальной емкости (т.е. спады на мембране, приближающие мембрану к зонду), а затем второй путь

тока через амперметр 195 во время периодов минимальной емкости (т.е. подъемы на мембране, отдающие мембрану от зонда). Таким образом, вибрация мембраны, приводящая к вышеописанному волновому эффекту, позволяет переменному конденсатору 120 перемещать заряд на пластины 135А, 135В переменного конденсатора 120 и снимать его с них, чтобы менять направление тока. В результате переменный конденсатор, действующий как первый механизм аккумуляции энергии, обеспечивает источник переменного тока.

Токовая характеристика первого механизма аккумуляции энергии, т.е. заряд от переменного конденсатора 120, показана на фиг. 12В для тока, проходящего через амперметр 195 в течение 100-секундного периода аккумуляции. Ток, показанный на фиг. 12В, представляет в качестве примера ток, накопленный и излучаемый через переменный конденсатор 120 в течение периода времени для образца свободностоящей графеновой мембраны 265. На фиг. 12С показан второй механизм, доступный для аккумуляции энергии за счет дополнительного тока в системе, обеспечиваемого туннелированием заряда через переменный конденсатор 120, и, как отмечалось выше, этот второй механизм может быть смоделирован как туннельный ток между зондом STM (или любым другим металлическим электродом, описанным в настоящем документе) и мембраной 265. Туннелирование заряда через переменный конденсатор 120 пропорционально, но не идентично, заданному току, который в одном неограничивающем примере должен отслеживаться STM в установившемся режиме работы зонда микроскопа. Фиг. 12С и 12D показывают разницу, когда свободностоящая графеновая мембрана 265 служит образцом и второй пластиной 135В конденсатора. Другими словами, варианты реализации настоящего изобретения показывают, что для различных рассматриваемых вариантов применения и условий можно использовать зонд 138А STM в качестве первой пластины 135А конденсатора и использовать мембрану, которая по своей природе подвержена воздействию тепловых усилий и кинетической энергии, вызванной вибрацией, в качестве второй пластины 135В конденсатора. Окружающие усилия, действующие на систему, включая, без ограничений, тепловую энергию и вибрацию, вызываемые окружающими конструкциями (такими как опорные стойки 210 в многослойных конфигурациях, подложка 258 мембраны), могут обеспечивать энергию, необходимую для перемещения зарядов внутрь системы или из нее. Общее накопление аккумуляированных зарядов включает заряды от переменного конденсатора 120 и дополнительные заряды, доступные для аккумуляции посредством туннелирования носителей через пластины 135А, 135В переменного конденсатора, как смоделировано с переменным резистором 133 на фиг. 11. В некоторых вариантах реализации туннельные заряды преобладают над общим средним зарядом, доступным для аккумуляции, и туннельные заряды, как правило, пропорциональны заданному току источника напряжения STM, как показано на фиг. 12D.

Диапазон аккумуляции энергии можно модулировать путем выбора соответствующих уставок STM, положения зонда STM, диапазона движения зонда STM относительно противоположной пластины конденсатора и мембраны 265. Как показано на фиг. 2, мембрана может быть выбрана и/или спроектирована для требуемого образования волн (например, расстояния между подъемами и спадами) путем выбора конкретной подложки 258 сетки для мембраны 260, размера отверстия или ячеек для сетки и любых усилий сжатия на мембране. Эти факторы доступны для настройки системы, которая обеспечивает аккумуляцию тока, проходящего через систему, который колеблется около значения туннельного тока с образованием подъемов и спадов в мембране. На фиг. 12С проиллюстрирован один пример туннельного тока, проходящего через конденсатор на протяжении того же 100-секундного периода аккумуляции, что и на фиг. 12В. Как показано на фиг. 12D, заданный ток от STM имеет постоянное значение, которое STM стремится поддерживать, а стандартное отклонение для заданного тока близко к нулю. Такое же нулевое отклонение показано для механизма туннельного тока, который представляет собой описанную выше вторую составляющую любой операции аккумуляции энергии. Также примечательно, что излучаемый ток заряда от переменного конденсатора 120, как показано на фиг. 12В, в значительной степени сосредоточен вокруг значений туннельного тока, показанных на фиг. 12С. Опять же, это значение туннельного тока на фиг. 12С напрямую связано с заданным током STM. Наконец, график, показанный на фиг. 12D, иллюстрирует, что при увеличении заданного тока STM стандартное отклонение значений тока, доступных для аккумуляции из излучаемого заряда из переменного конденсатора 120, намного больше. Эти характеристики доступны как точки данных для проектирования систем аккумуляции или систем измерения энергии с описанными в настоящем документе схемами. Результаты испытаний показывают, что для схемы на фиг. 12А в случае, когда зонд 138А находится на расстоянии 2 нм или ближе к образцу (т.е. мембране 265), преобладает туннельный ток электронов (смоделированный как переменный резистор 133 на фиг. 11). Когда зонд находится на расстоянии 2 нм или дальше от образца, преобладает составляющая переменной емкости.

Компоновка компонентов, представленная на фиг. 12А-12D, дополнительно иллюстрирует варианты поляризации схемы зарядки, показанной на фиг. 4А, либо с компонентами с внутренней поляризацией, либо с компонентами с внешней поляризацией. На фиг. 12А источник 200 напряжения подключен как устройство с внешней поляризацией, которое не только подает заряд в схему, но и играет важную роль в направлении тока через диоды 250А, 250В, а также общей энергии, доступной носителям, вставленным в переменный конденсатор 120. В других вариантах реализации продукт в соответствии с настоящим изо-

бретением может быть выполнен с возможностью функционирования после того, как источник 200 напряжения будет убран из схемы, а остальные компоненты будут подключены к металлическому электроду, служащему в качестве первой пластины 138А конденсатора. В этом сценарии источник напряжения обеспечивает схему зарядом, который остается в ней после удаления источника напряжения, делая схему предварительно поляризованной зарядом для использования с образцами при отсутствии источника постоянного напряжения, подключенного во время использования.

На фиг. 12Е, 12F и 12G проиллюстрированы дальнейшие подробности физических явлений при работе, когда туннельный ток преобладает в схеме, как описано в настоящем документе. На этих графиках показан ток, протекающий через диод 250В, когда в системе преобладает туннелирование. Важным открытием является то, что ток в значительной степени колеблется, когда образец представляет собой свободностоящий графен. Когда образец является неподвижным, эти колебания исчезают.

Мера колебаний определяется стандартным отклонением (ст. откл.). На нижнем графике показано, что стандартное отклонение намного больше для свободностоящего графена по сравнению с неподвижным графеном, и что оно изменяется линейно с заданным током, как показано в приведенной выше теории. При экстраполяции этой линии на нулевой туннельный ток колебания все еще сохраняются и дают значение, составляющее около 10 пА. Эти 10 пА тока можно использовать в качестве источника питания. Туннельный ток преобладает в схеме в соответствии с приведенной ниже формулой:

$$I_{\Delta T}(t) = I_{stm} e^{-k\Delta d(t)}$$

На фиг. 12Н, 12I, 12J проиллюстрированы дальнейшие подробности физических явлений при работе, когда переменный конденсатор является преобладающим источником энергии в схеме. На этих графиках показан ток, протекающий через диод 250В, когда в системе преобладает переменный конденсатор 120. Электроны не текут от зонда 138А к образцу 265, однако сила электростатической индукции создает ток. Важным открытием является то, что ток протекает через диод 250В просто потому, что свободностоящая графеновая мембрана 265 постоянно движется и имеет источник напряжения, заряжающий ее. Нижний график показывает зависимость тока от напряжения. И это соответствует приведенной выше теории. Весь этот ток можно использовать как источник питания. Переменный конденсатор преобладает в схеме в соответствии со следующей формулой:

$$I_{\Delta C}(t) = \frac{\varepsilon_0 A f \Delta d(t)}{d_0^2} V_{stm}$$

На фиг. 13-16 показаны данные, собранные системой, показанной на фиг. 4, 11 и 12А, с учетом того, что энергия и накопленный заряд происходят от двух механизмов, описанных выше: разряда переменного конденсатора и туннельного тока, проходящего через переменный конденсатор. На фиг. 13 показана соответствующая энергия в пикоджоулях, накопленная на накопительном конденсаторе от свободностоящего графена, как функция времени аккумуляции энергии в секундах. На фиг. 14 показано измерение заряда в нанокюлонах, накопленного на накопительном конденсаторе от свободностоящего графена, как функция времени аккумуляции энергии в секундах. Показаны различные уставки тока STM, составляющие 0,1, 0,2, 0,4 и 1,0 наноампера. На фиг. 15 показан измеренный заряд в нанокюлонах, накопленный на накопительном конденсаторе от свободностоящего графена, как функция времени аккумуляции энергии в секундах. Опять же показаны различные уставки STM, составляющие 0,1, 0,2, 0,4 и 1,0 наноампера. На фиг. 16 показаны измеренные значения энергии в пикоджоулях, накопленной на накопительном конденсаторе от свободностоящего графена, как функция времени аккумуляции энергии в секундах. Показаны различные уставки туннельного тока  $F_{the}$ , составляющие 0,1, 0,2, 0,4 и 1,0 наноампер.

На фиг. 17А и 17В представлены схематические изображения кремниевой интегральной схемы 400 с потенциальными миллионами элементов аккумуляции энергии (225). Эта конструкция имеет только один источник 200 питания и один накопительный конденсатор 275. Первый путь (обозначен пунктирной линией "----") представляет собой вариант, когда ток добавляет заряд в графеновую мембрану, а второй путь (обозначен точками "••••") представляет собой вариант, когда ток добавляет заряд в накопительный конденсатор 275. Кремний имеет матрицу пар 250 диодов с металлическим контактом 225 между каждой парой диодов. Металлические контакты 225 служат в качестве упомянутых выше элементов аккумуляции энергии в системе. Над металлическим контактом 225 находится свободностоящий графен 265, который находится в постоянном движении, образуя подъемы 286 и спады 289, как описано выше. Каждый небольшой электрод 225 будет использован для переноса заряда в накопительный конденсатор 275 при колебании графеновой мембраны. Это один из способов аккумуляции энергии на наноуровне с миллионами графеновых волн, каждая из которых приносит электрический заряд в конденсатор.

В целях иллюстрации и без ограничения настоящего изобретения какой-либо одной конфигурацией вариант реализации, показанный на фиг. 17А и 17В, примечателен тем, что контакты 225А-225I (или до 225n, где n представляет собой любое количество контактов) служат в качестве точки направления потока для переменного конденсатора 120, который необходимо заряжать и разряжать в соответствии с ранее

описанными вариантами реализации. Графеновую мембрану 265, покрывающую основные компоненты, можно использовать как первую пластину 335 конденсатора, а металлический контакт 225 можно использовать как вторую пластину 235 конденсатора для образования переменного конденсатора 120. Мембрана может покрывать всю схему, как показано, или по меньшей мере металлические контакты 225 для образования переменного конденсатора. Этот переменный конденсатор 120 работает так же, как и описанные выше варианты реализации в отношении волнистости на мембране 265, возникающей из-за окружающей тепловой и вибрационной кинетической энергии, вызывающей смещение и последующий возврат мембраны 265 и, следовательно, одной из пластин конденсатора (циклическое излучение и накопление заряда). Циклы вызывают соответствующее изменение заряда на металлическом контакте 225 таким образом, что при увеличении емкостной области между металлической пластиной 225 и мембраной 265 на расстоянии между пластинами, заряд, накопленный на металлическом контакте, смещается в сторону накопительного конденсатора для аккумуляции. Когда емкостная область между пластинами 235, 335 переменного конденсатора 120 является минимальной (т.е. пластины находятся ближе всего друг к другу во время спада волны), емкостной заряд составляет  $C_{\text{макс}}$  с зарядом, накопленным на металлическом контакте 235. В примере, показанном для интегральной схемы 400, в периоды подъемов волн в области окна графеновой мембраны 265 положительные носители заряда, накопленные на металлическом контакте, направляются в накопительный конденсатор для протекания тока в направлении стрелки вверх (т.е. заряжая постоянный накопительный конденсатор 275). Во время периодов волнистости в области окна графеновой мембраны 265 положительные носители заряда дополнительно накапливаются на металлическом контакте с отрицательными носителями, направляемыми на графеновую мембрану 265 для протекания тока в направлении стрелки вниз (т.е. заряжая источник 200 напряжения). На фиг. 17В показан вид сбоку в поперечном разрезе интегральной схемы, показанной на фиг. 17А. Многослойная интегральная схема 400 содержит вышеописанный источник напряжения или аккумуляторную батарею 200, постоянный накопительный конденсатор 275 и схему аккумуляции энергии, сформированную в подложке, такой как, без ограничений, кремниевая пластина 205. Свободностоящая мембрана 265 сформирована поверх данной структуры, и в этом неограничивающем примере мембрана выполнена из графена. Диоды 250 сформированы в подложке 205 кремниевой пластины. Установочные опоры 210 обеспечивают надлежащее разделение и являются источниками тепловой, а также кинетической энергии окружающей среды. Свободностоящая графеновая мембрана 265 имеет те же самые описанные выше первую поверхность 125А и вторую поверхность 125В, причем первая поверхность служит в качестве пластины 335 конденсатора. Кремниевая пластина содержит металлический контакт 225, который является другой пластиной 235 конденсатора, как описано выше. В определенных вариантах реализации, которые не ограничивают настоящее изобретение, свободностоящая графеновая мембрана 265 может быть включена в сетку 258, которая определяет области окна для сопряжения с металлическими контактами при формировании переменного конденсатора, описанного в настоящем документе.

Многочисленные компьютеризированные компоненты могут быть включены во все варианты реализации настоящего изобретения, и, в частности, STM будет содержать процессоры, запоминающее устройство и компьютеризированные инструкции для выполнения функций сканирования, как описано и показано на фиг. 1В, в виде компьютера 180. Другие компьютеры могут быть использованы вместе с STM, и настоящее изобретение включает все необходимые процессоры, аппаратные средства, запоминающие устройства, программируемые интерфейсы и т. п. для достижения целей вариантов реализации, изложенных в настоящем документе.

### Пример

Кинетическая теория броуновского движения Эйнштейна позволила количественно оценить огромный возобновляемый ресурс тепловой энергии Земли [E1]. Эта энергия обнаруживается в случайном, пульсирующем движении каждого атома и молекулы жидкости и газа. Эти зашумленные колебания атомного масштаба наблюдают с помощью сканирующей туннельной микроскопии (STM) [E2, E3]. Их обычно используют, чтобы вызвать регулярное движение в механическом осцилляторе, когда они связаны через стохастический резонанс [E2]. Кроме того, также был получен цикл Карно с одной броуновской частицей, и было показано, что он подчиняется условиям стохастической термодинамики [E4, E5]. Тем не менее, получение энергии в результате этого движения было трудным для понимания [E6, E7]. Для аккумуляции тепловой энергии исторически использовали термоэлектрический эффект. В настоящем документе количество аккумуляции энергии пропорционально разнице температур между концами проводящего материала. Новаторское расширение этой идеи было недавно сделано Cottrill et al. [E8]. С помощью графена, металлической пены и октадекана большая площадь материала с высокой теплопроводностью была объединена с материалом с изменяемым фазовым состоянием. Это замедляло передачу тепла и создавало постоянный температурный градиент, связанный с суточным циклом.

Фейнман в своей серии лекций 1964 года отклонил возможность получения практической пользы из броуновского движения. Почти тридцать лет спустя Маньяско подтвердил, что, хотя Фейнман был прав, его механизм была погружен в идеальную термальную ванну, в которой временные корреляции пренебрежимо малы. Затем Маньяско показал, что, если термальная ванна имеет длительные корреляции, она может выполнять работу [E7]. С тех пор термодинамика систем с длительными корреляциями стала ак-

тивной областью исследований. Например, теоретически было показано, что такие системы производят избыточное тепло без нарушения второго закона термодинамики [E9]. В этом труде на первых трех фигурах показано, что двумерные волнистые мембраны имеют движение с долговременными корреляциями и что это происходит из-за многочастичного эффекта. На последней фигуре показано, что этот новый тип теплового движения достаточно велик, чтобы выполнять полезную работу.

Новое исследование показало, что свободностоящие двухмерные материалы открывают большие перспективы для доступа к структурированным источникам вибрационной энергии. Эти кристаллические мембраны имеют прочно связанные взаимосвязанные решетчатые структуры, которые естественным образом генерируют когерентное движение тысяч атомов [E10]. Например, нерастянутый свободностоящий графен (один из таких двухмерных материалов) имеет волнистую морфологию, причем соседние области чередуются между вогнутой и выпуклой кривизной [E11]. Волны нанометрового размера являются результатом взаимодействия между едва уловимым натяжением сильных углеродных связей графена при его изгибе [E12] и электрон-фононным взаимодействием [E13]. Более того, эти атомные мембраны постоянно перемещаются между большим количеством эквивалентных низкоэнергетических волнистых морфологических конфигураций [E14], визуально похожих на движение поверхности океана. Ключевой динамический процесс происходит, когда локальная кривизна волн самопроизвольно меняет форму с вогнутой на выпуклую: возникающая деформация решетки сообщает новую ориентацию волны другим волнам, находящимся поблизости, образуя сеть стохастической обратной связи [E15, E16]. Понимание этих сложных динамических свойств имеет решающее значение для аккумуляции тепловой энергии из автономного графена и других двухмерных материалов.

В этом исследовании исследователи подтверждают, что волнистые свободностоящие графеновые мембраны имеют когерентное движение и демонстрируют аккумуляцию своей совокупной кинетической энергии (см. дополнительные материалы в отношении материалов и способов) [E17]. Упрощенная кристаллическая модель свободностоящего графена с множественными вогнутыми и выпуклыми волнами показана на фиг. 18А. Смещенный зонд STM, установленный на конце сканера пьезоэлектрической трубки, приближается к мембране снизу (STM не показан). Типичный временной ряд для высоты, измеренной с помощью STM, взятой от центра графена, показан на фиг. 18В. Следует обратить внимание на значительную величину наблюдаемого движения по сравнению с типичными волнообразованиями атомов размера 0,01 нм и измерением неподвижного графена, показанного в положении нулевой высоты на фиг. 18В. Было рассчитано распределение вероятности времени ожидания для этого набора данных. Оно следует простой показательной функции ( $\tau > 0,995$ ), идентифицируя его как процесс Пуассона. Одновременно измеренный туннельный ток, показанный на фиг. 18С, оставался значительно выше нуля и значительно ниже уровня насыщения усилителя даже при значительном изменении высоты мембраны. Таким образом, было продемонстрировано успешное отслеживание его движения. Было обнаружено, что вклад колебаний туннельного тока в изменения расстояния между зондом и образцом является незначительным по сравнению с вкладом колебаний высоты мембраны. Кроме того, абсолютное значение коэффициента взаимной корреляции между измеренной высотой и туннельным током оказалось меньше 0,01.

Одна из целей этой работы заключается в том, чтобы показать, что крупномасштабные колебания происходят в свободностоящем графене по сравнению с неподвижным графеном. Чтобы выделить эти колебания из общего смещения, исследователь применил низкочастотный фильтр Винера к исходным данным, в результате чего была получена линия соответствия, показанная на фиг. 18В. В результате этого после вычитания указанного смещения общее колебание высоты оставалось на уровне  $\sim 5$  нм. Для сравнения также показана типичная траектория STM, полученная на основании неподвижного образца (т.е. монослойного графена, выращенного на SiC). В предыдущей работе исследователи наблюдали двукратные автокорреляции высоты примерно в 10% исходных наборов данных STM по высоте и времени [E14]. В настоящем документе исследователи показывают, что временные корреляции часто скрываются за крупномасштабными сдвигами высот, требуя вычитания фона, чтобы стать очевидными. Из серии высоты-времени  $z(t)$ , показанной на фиг. 18D, исследователи вычисляют ее функцию автокорреляции высоты ACF (см. дополнительные материалы в отношении материалов и способов), которая показана на фиг. 18E. Значительные изменения высоты и колебательная ACF свидетельствуют о значительном когерентном коллективном движении атомов в мембране. Фактически, физически невозможно, чтобы атом углерода с одинарной связью переместился настолько далеко без того, чтобы соседние атомы также перемещались вместе с ним. Спектральная плотность мощности PSD  $z(t)$  показана на фиг. 18F. Она имеет преобладающий подъем в диапазоне около 5-10 мГц, что намного ниже основной моды колебаний свободностоящего графена в диапазоне ГГц [E18]. Факторы, вызывающие такую неожиданно низкую частоту, которая преобладает в значительном когерентном движении графена, рассмотрены в следующем разделе.

Теория упругости дает частоту изгиба  $\sim 10$  ГГц для типичной волны размером 10 нм на 10 нм, что на двенадцать порядков выше экспериментального результата (см. дополнительный материал в отношении теории упругости для изогнутого свободностоящего графена) [E17]. Эта разница возникает из-за длительного периода ухода, необходимого для преодоления энергетического барьера между вогнутой и выпуклой ориентациями волн [E18]. Чтобы подтвердить организованное движение волн, исследователи выполнили моделирование молекулярной динамики (MD; molecular dynamics) на предварительно изо-

гнутой квадратной графеновой мембране ( $15 \times 15 \text{ nm}^2$ ) в вакууме. Образец содержал 10000 атомов углерода с фиксированной границей и без зонда STM (см. дополнительные материалы в отношении моделирования молекулярной динамики) [E17]. Снимок мембраны в выпуклой геометрии показан на фиг. 19А. Движение центрального атома с временными шагами  $3 \times 10^6$  (1 на фс) при высокой температуре (3000 К) показывает колебания высоты выше и ниже фиксированной границы на фиг. 19В. Высокие температуры использовали для ускорения моделирования с использованием ускоренной под воздействием температуры динамики [19]. В настоящем документе 1 нс соответствует примерно 1 мс. Хотя шкала времени моделирования MD отличается от шкалы экспериментов STM, исследователи действительно обнаруживают, что все события волновой кривизны включают аналогичную динамику инверсии, независимо от шкалы времени. Случайное движение приводит к многочисленным инверсиям кривизны сверху фиксированной границы до низа. Серию данных высоты-времени  $z(t)$ , показанную на фиг. 19В, использовали для вычисления его функции автокорреляции ACF, которая показана на фиг. 19С. На ней видны затухающие колебания, аналогичные наблюдаемым в эксперименте. Спектральная плотность мощности PSD  $z(t)$  показана на фиг. 19D. Видно несколько преобладающих низкочастотных подъемов. Таким образом, сложная внутренняя динамика графеновой мембраны, естественно, приводит к низкокогерентному движению с двукратной автокорреляцией высоты, аналогичной данным STM.

Моделирование методом MD показывает, что волновая динамика соответствует движению в двухлучном потенциале с длительным временем ухода. Вся мембрана последовательно перемещается из выпуклого состояния к вогнутое. Следует обратить внимание, что в моделировании граничные атомы зафиксированы, а образец предварительно напряжен, в то время как фактическая граница волны представляет собой еще одну волну, что влияет на внутреннюю динамику через деформацию решетки. Тем не менее, было показано, что ненапряженный свободностоящий графен самопроизвольно образует волны [E12]. Кроме того, электрон-фононное взаимодействие создает напряжения, вызывающие изгибание и волнистость [E20]. Чтобы еще больше подтвердить экспериментальные результаты и получить более полное представление о сложной динамике этих переходов, исследователи также смоделировали графен как упругую мембрану точечных масс. Они представляют собой волны на гексагональной решетке, причем каждую из них действует случайная сила, направленная вверх или вниз. Последняя возникает из-за взаимодействия между волнами через спины с двумя состояниями, которые взаимодействуют антиферромагнитным способом. В то время как массы размером с точку удовлетворяют второму закону Ньютона, спины с двумя состояниями обмениваются энергией с термальной ванной и перебрасываются в соответствии с обновлением типа Монте-Карло Глаубера [E15, E16]. В настоящем документе спины моделируют внутренние взаимодействия, которые способствуют неплоской конфигурации: электрон-фононное взаимодействие, а также эффект кратности химических связей [E12, E13, E20]. См. дополнительные материалы в отношении антиферромагнитной двухмерной спин-мембранной модели [E17].

Таким образом, данные STM вместе с моделированием MD и моделью антиферромагнитной спин-упругой мембраны подтверждают, что волнистые свободностоящие графеновые мембраны демонстрируют когерентное коллективное движение. В этом разделе исследователи показывают, что это движение можно использовать для генерирования электрического тока. Существует четыре известных способа аккумуляции электрической энергии от источников вибрации: электромагнитный, пьезоэлектрический, магнитострикционный и электростатический. Исследователи используют электростатику с проявлением эффекта переменной емкости, встраивая переход STM зонд-образец в электронную схему. Насколько известно, схемы такого типа никогда раньше не подсоединяли к STM. Для этого систему сначала настраивали на электрическую изоляцию образца STM от остальной части камеры и от заземления [E21]. Вакуумный электрический ввод давал доступ к образцу извне камеры. Эта необычная схема [E22, E23] была впервые разработана как сверхвысокоэффективный механизм переменной емкости для выработки электроэнергии, приводимый в движение ветром или людьми. С помощью диодов схема отделяет работу, выполняемую при добавлении заряда к переменному конденсатору, от работы, выполняемой при снятии заряда с переменного конденсатора [E22, E24]. Переход зонд-образец STM представляет собой переменный конденсатор для данной схемы.

Для четкого описания данной электрической схемы исследователи игнорируют туннелирование электронов между зондом и образцом (см. дополнительный материал в отношении аккумуляции вибрационной энергии во время туннелирования) [E17]. Кроме того, исследователи ограничивают обсуждение одним циклом вибрации, когда образец сначала удаляют от неподвижного зонда STM, а затем возвращают в его исходное положение. По мере увеличения расстояния между зондом и образцом  $d(t)$  емкость перехода уменьшается. При постоянном напряжении смещения общий статический заряд, накопленный на переходе зонд-образец, должен уменьшаться с уменьшением емкости. Таким образом, по мере увеличения расстояния между зондом и образцом избыточный положительный заряд стекает с зонда и движется обратно по схеме в источник питания, через амперметр, который его регистрирует, через диод 2 и далее к образцу. Если источником питания является перезаряжаемая аккумуляторная батарея, она перезаряжается во время этого цикла [24]. Важно понимать, что объем работы, выполняемой во время этой части цикла, определяется не аккумуляторной батареей, а усилием, которое отделяло образец от

зонда, преодолевая их электростатическое притяжение (например, ветер, человек или в этом случае термическая сила). Следует обратить внимание, что ток, протекающий через диод 2 (D2C), был использован для зарядки конденсатора (не показан), что позволило накопить аккумулярованный ток.

В течение другой половины цикла при уменьшении расстояния между зондом и образцом и увеличением емкости общий заряд, накопленный на переходе зонд-образец, будет увеличиваться. Далее заряд проходит через диод 1, а не через амперметр. Энергия, израсходованная источником питания в этой половине цикла, была пополнена в течение другой половины цикла (рассмотрено выше). Для этой схемы источник питания не играет никакой роли в чистом обмене энергией с системой [E23].

Схема обратной связи STM может подавать энергию в систему путем перемещения зонда STM от образца, что приведет к возникновению D2C. Исследователи избежали этого, собирая данные без управления с использованием обратной связи. Для этого исследователи постепенно отодвигали зонд STM от образца, используя стадию грубого движения, пока расстояние не стало слишком большим для того, чтобы электроны могли туннелировать через вакуумный барьер. В этом положении для обеспечения того, чтобы обратная связь STM не перемещала зонд STM, исследователи подняли заданный ток (SPC) до максимума (5 нА или 50 нА). Затем исследователи увеличили напряжение смещения и систематически наблюдали скачкообразный, зависящий от времени ток, протекающий через диод 2. Представлены три различных результата напряжения смещения, показывающие, что ток увеличивается с увеличением напряжения смещения. Зависимость является более наглядной, когда показан средний ток для большого количества наборов данных. Эти результаты согласуются с ожиданием того, что возрастающее напряжение смещения добавляет заряд к переходу конденсатора зонд-образец, тем самым увеличивая электростатически индуцируемый ток. Исследователи повторили этот эксперимент с многочисленными зондами STM в разных местах образца и со многими различными образцами. Кроме того, исследователи обнаружили, что при использовании неподвижного графенового образца получают либо нулевой индуцированный ток, либо заданный ток для всех напряжений. Набор данных о неподвижном графене также подтверждает отсутствие автоэлектронной эмиссии, что является разумным, учитывая относительно низкие температуры и низкие напряжения, используемые в экспериментах.

Есть несколько примечательных аспектов демонстрации аккумулярования энергии. Коллективная кинетическая энергия изгибания, которая преобразуется в накопленный электрический заряд, равна локальной температуре. Во всех других способах аккумулярования тепловой энергии, таких как термоэлектрический эффект, энергию получают за счет разницы температур. Кроме того, этот способ исключает из измерения схему обратной связи STM, которая бы постоянно регулировала положение зонда STM для поддержания требуемого расстояния между иглой и образцом и эффективно сводила к минимуму перемещение образца. Поскольку обратная связь STM не может перемещать зонд STM, роль движущегося свободностоящего графена выделена и количественно оценена. Соответственно, в данной конфигурации зонд STM функционировал только как ближайший неподвижный металлический электрод. Это указывает на то, что интегральная схема может заменить схему STM с зондом и диодом, открывая возможности для масштабирования. И наконец, установка доказывает, что динамические свойства свободностоящего графена сохраняются даже под действием внешнего электрического поля. И, что еще более важно, организованное тепловое движение и электростатическое взаимодействие графена достаточно велики, чтобы сделать возможным аккумулярование энергии [E25]. В частности, когда волна графена опрокидывается от зонда STM, работа, выполняемая для преодоления электростатического притяжения между зондом и образцом, происходит от теплового усилия, стоящего за этим движением. Схема диода аккумулирует лишь эту энергию.

В данной установке заряженная графеновая мембрана аналогична заряженной мембране микрофона. Используя схему, описанную выше, исследователи преобразовывают коллективную кинетическую энергию движущихся зарядов в источник постоянного тока. При наличии графена кинетическая энергия представляет собой его тепловую энергию, а не звуковое давление. По оценкам, полная механическая мощность тепловой волны составляет  $1 \text{ пВт/нм}^2$  [E18] или около  $400 \text{ пВт/волну}$  [E26]. Это значение согласуется с данными о  $30 \text{ пА}$  индуцированного тока при  $10 \text{ В}$ , если исследователи предполагают, что эффективная площадь составляет  $50 \text{ нм}$  на  $50 \text{ нм}$ . В конечном счете, передача энергии осуществляется за счет взаимодействия между зарядами в свободностоящем графене и зарядами внутри зонда STM (т.е. коэффициент электрического демпфирования) [E27, E28]. Это явление похоже на динамическое торможение. Демпфирование снимает кинетическую энергию со свободностоящего графена, что эквивалентно понижению локальной температуры. Однако даже при пониженной температуре волна будет продолжать двигаться, поскольку ее низкоэнергетические режимы доступны в очень широком диапазоне температур. Например, измерения подвижности электронов показывают, что гибкие фононы являются преобладающим механизмом рассеяния частиц даже при таких низких температурах, как  $10 \text{ Кельвин}$  [E29]. Конечно, температура отдельной волны не опустится настолько низко. Графен обладает необычайной теплопроводностью, которая по меньшей мере в десять раз больше, чем у меди [E30]. Образец термически связан с внешней окружающей средой через механическую опору, поэтому будет течь тепло. Эта конфигурация не находится в тепловом равновесии; вместо того это открытая система с установившимся режимом.

Хотя мощность, аккумулируемая установкой, невелика, ее удельная мощность является значитель-

ной, превышая удельную мощность ветра ( $\sim 1 \text{ Вт/м}^2$ ) и солнечной энергии ( $\sim 10 \text{ Вт/м}^2$ ). Кроме того, этот новый источник тепла можно аккумулировать постоянно. Дополнительным преимуществом электростатических генераторов является их размер (см. дополнительные материалы в отношении конструкции пластин). По сравнению с электромагнитными генераторами, гораздо реже используемые электростатические генераторы по меньшей мере в 100 раз меньше. Это дает значительное преимущество при питании небольших устройств, например, необходимых для Интернета вещей [31]. Например, беспроводные сенсорные узлы с современными схемными решениями работают с очень низким рабочим циклом, потребляя всего лишь 35 пВт мощности в режиме ожидания и 226 нВт мощности в активном режиме [32].

В заключение, изучали коррелированную динамику колебаний по атомной шкале свободностоящей графеновой мембраны с использованием сканирующей туннельной микроскопии в точечном режиме. Используя MD моделирование и модель антиферромагнитной спин-упругой мембраны, исследователи показали, что волны естественным образом меняют свою кривизну, и в это время тысячи атомов движутся когерентно. Измерения показывают, что движение мембраны вне плоскости является чрезвычайно большим. Ее движение, или упорядоченное броуновское движение, происходит от тепловой энергии и взаимодействий между волнами, естественным образом образуя стохастическую сеть обратной связи. Исследователи успешно преобразовали эту значительную кинетическую энергию в электрический ток с последующим накоплением. Аккумуляция вибрационной энергии представляет собой новый и многообещающий источник возобновляемой энергии, получаемой за счет температур окружающей среды.

#### Материалы и способы

Для этого исследования монослойный графен (образец, в котором менее 10% составляет многослойный графен) был выращен в промышленном масштабе на Ni. Затем его переносили непосредственно на сверхтонкую медную сетку с размером ячеек 2000 меш, имеющую решетку из квадратных отверстий (каждое шириной 7,5 мкм) и опор для стержней (каждая шириной 5 мкм). Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, подтвердили 90%-ное покрытие сетки. Для измерений высоты-времени использовали сверхвысоковакуумный (СВВ) низкотемпературный STM (базовое давление 10-10 мбар), работающий при комнатной температуре. Графеновая пленка была прикреплена к пластине образца на стойках, позволяя зонду STM проходить через отверстия сетки. Это обеспечило стабильную опору для графена, пока он находился под электростатическим притягивающим влиянием напряжения смещения. Чтобы найти центр мембраны, исследователи перемещают зонд STM в боковом направлении, пока они не найдут край медной сетки, а затем перемещают зонд к центру. Вся камера STM опирается на активную систему шумоподавления и виброизоляции. Устройство питается от массивного блока аккумуляторной батареи с изолированным заземлением здания для достижения исключительно низкого механического и электрического шума.

Данные для этого исследования были получены с использованием зондов STM, изготовленных на месте, в условиях туннелирования с постоянным током (с включенной обратной связью), причем топографическое отсканированное изображение устанавливали в точечный режим (без сканирования  $x$  или  $y$ ). Исследователи использовали STM в режиме сканирования, однако движение свободностоящего графена является настолько быстрым, что полученные изображения слишком размыты, чтобы их можно было использовать. По этой причине группа первой получила данные в точечном режиме. Эти наборы данных показывают колебания по высоте во времени для одного местоположения. Затем исследователи проанализировали наборы данных в качестве событий одномерного случайного блуждания, обнаружив, что движение мембраны происходит с чрезвычайным уровнем шума. Даже при подаче 50 вольт между графеном и зондом STM графен продолжает двигаться. Исследователи адаптировали систему для обеспечения непрерывной записи 16-битных данных как для фактического туннельного тока, так и для высоты зонда при частоте 800 Гц для промежутка времени 104 с, что дает  $8 \times 10^6$  точек данных на канал. Исследователи независимо наблюдали за дрейфом зонда-образца STM и обнаружили, что он не является стохастическим и его скорость составляет менее 1 нм/ч. Исследователи собирали данные 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), причем все данные получены при комнатной температуре. При визуализации поверхности графена с атомным разрешением исследователи наблюдали только однослойный графен, который не имел дефектов в микронном масштабе.

При расчете ACF высоты исследователи начинают с  $z(t)$ , показанного на фиг. 1(d) в виде массива значений высоты, индексированных от 1 до  $N$ , и вычисляют следующее: где  $t$  индексировано от 0. Это выражение часто называют автоковариационной функцией, поскольку  $CF(0)$  представляет собой дисперсию первой половины набора данных. Для расчета спектральной плотности мощности исследователи используют теорему Винера-Хинчина и вычисляют преобразование Фурье для ACF(t).

#### Теория упругости для изогнутого свободностоящего графена

Для моделирования низкочастотных колебаний исследователи сначала используют теорию упругости, которая дает самую низкую частоту изгиба, где  $D$ ,  $\rho h$ ,  $k$  представляет собой жесткость на изгиб, площадную плотность массы и допустимый волновой вектор, соответственно. Для волны графена размером 10 нм на  $10 f_0 = 10 \text{ Гц}$ , что на двенадцать порядков выше наблюдаемой частоты. Физика, отсутствующая в этой модели, - это известная волнистая морфология мембраны. Чтобы учесть это, исследователи



сначала представляют себе сжатие графена, что позволяет формировать волны из-за по существу несжимаемых прочных углеродных связей. В целях иллюстрации на фиг. 5А показан узкий поперечный разрез волны графена после сжатия в плоскости. Сжатый графен изгибается либо вверх, либо вниз, поскольку его углеродные связи являются очень гибкими. Исходя из геометрической формы типичной волны шириной 20 нм, соотношение между напряжением сжатия и высотой показано на фиг. 5В. Волна имеет две эквивалентные низкоэнергетические конфигурации, вогнутую и выпуклую, естественным образом формируя двухлучный профиль потенциальной энергии, как показано на фиг. 5С. Энергетический барьер равен  $\alpha\epsilon^2$ , где  $\alpha$  представляет собой постоянную энергии, рассчитанную как  $\alpha\epsilon^2=1,2$  эВ для напряжения 0,1%,  $a=(L_0-L)/L_0$  представляет собой напряжение сжатия [E18]. Волна меняет свою кривизну, пересекая барьер со скоростью Крамера. Исходя из геометрии типичной волны, исследователи пришли к выводу, что  $\alpha\epsilon^2=0,7$  эВ, что снижает частоту изгиба в 1012 раз. В общем, образование волны экспоненциально снижает частоту изгиба, ожидаемую по теории упругости. Скорость перехода инверсии кривизны в зависимости от высоты волны показана на фиг. 5D. Следует обратить внимание, что эта скорость распространяется на более чем пятнадцать разрядов, поскольку высота волны изменяется всего лишь на один ангстрем.

#### Моделирование молекулярной динамики

Чтобы подтвердить упорядоченное движение волн, исследователи выполняли моделирование молекулярной динамики (MD) на предварительно изогнутой квадратной графеновой мембране ( $15 \times 15$  нм<sup>2</sup>), содержащей 104 атома углерода с фиксированными граничными атомами, без использования зонда STM. Моделирование выполняли в вакууме и 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. Система была сначала уравновешена в течение 3,0 нс, начиная с начальной конфигурации. При анализе использовали последующую траекторию из производственного цикла 15,0 нс. Высокие температуры ускорили моделирование с использованием ускоренной под воздействием температуры динамики [19].

#### Антиферромагнитная двухмерная спин-мембранная модель

Эта модель дала дополнительное подтверждение упорядоченного движения волн. Исследователи анализируют точечные массы, размещенные в узлах гексагональной решетки, которые взаимодействуют посредством гармонических пружин. В каждом узле масса линейно связана с изинговским спином с двумя состояниями. Спины связаны антиферромагнитным образом. Представлена следующая функция Гамильтона: Где представляют значения спинов, высоты и импульса, соответственно, для массы  $m$ , размещенной в месте гексагональной решетки, показанной на фиг. 6. Динамика системы состоит из уравнений движения Гамильтона для  $(u_{ij}, p_{ij})$  и стохастической динамики при температуре  $T$  для  $\sigma_{ij}$ , подробнее см. [E15, E16].

Как упоминалось в основном тексте, спиновая динамика имитирует эффект электрон-фононного взаимодействия и кратность химических связей углерода [E12, E13, E20]. Уравнения движения для положений масс интегрируются с использованием алгоритма Верле, который включает внешнее усилие  $f_{\sigma\sigma iii}$ , действующее на массу в узле  $iii$  (см. функцию Гамильтона). На каждом временном шаге случайным образом выбирают один узел решетки; его спин опрокидывается в соответствии с версией Глаубера моделирования типа Монте-Карло с вероятностным показателем [E16]: где  $S$  представляет собой параметр, задающий характеристическую шкалу времени для опрокидывания спина, а  $T$  представляет собой температуру ванны, измеренную в энергетических единицах [E16]. В численном моделировании временной шаг равен  $1/(\delta N)$ , где  $N$  представляет собой количество узлов решетки. Результаты, показанные на фиг. 3 в основном тексте, были получены с использованием высоты точечной массы в центральном положении системы, аналогично экспериментам STM.

Аккумуляция энергии вибрирующей энергии во время туннелирования В отличие от результатов, представленных в основном тексте, в данном случае исследователи рассматривают туннелирование электронов между зондом STM и образцом в электронной схеме, показанной на фиг. S3(a). Переход между зондом и образцом образует негерметичный конденсатор, так как заряд может проходить через вакуумный барьер. Следовательно, ток, протекающий через диод 2, имеет два возможных источника. Один из них связан с переменной емкостью перехода между зондом и образцом (как обсуждается в основном тексте), а другой - с колебаниями туннельного тока. Эти два параметра складываются с получением следующего выражения: где  $\epsilon_0$  представляет собой диэлектрическую проницаемость свободного пространства,  $A$  представляет собой эффективную площадь емкостного перехода между зондом и образцом,  $f$  представляет собой частоту колебаний волны,  $\Delta d(t)$  представляет собой изменение расстояния  $d_0$  между зондом и образцом,  $d_0$  представляет собой расстояние установки туннельного тока,  $V_{stm}$  представляет собой напряжение смещения, подаваемое на зонд STM,  $I_{stm}$  представляет собой заданный туннельный ток (SPC) и  $k$  представляет собой волновое число туннелирования. Когда расстояние между зондом и образцом составляет 2 нм или меньше, преобладает параметр туннелирования; для больших расстояний преобладает параметр переменной емкости.

Когда STM туннелирует, эту установку можно использовать для количественной оценки энергетики

динамической активности атомного масштаба. При этом важно отметить, что ток, протекающий через диод 2, зависит от SPC. Это показано в приведенном выше уравнении, а также в данных на фиг. S3(b). Часть D2C является результатом работы схемы обратной связи по поддержанию постоянного туннельного тока. Колебания туннельного тока заставляют схему обратной связи перемещать зонд, пытаясь удерживать его на  $d_0$ . Эти колебания происходят на высокой частоте, где время отклика схемы является ограничивающим фактором из-за паразитной емкости. В результате, когда ток перестает протекать через диод 2, он разряжается с большой постоянной времени. Прежде чем D2C успеет заметно уменьшиться, переменный туннельный ток уже снова достигает диода 2. Результат, показанный на фиг. S3(b), не зависит от приложенного напряжения смещения и настройки усиления обратной связи. Исследователи также испытали схему с Ge диодами и диодами Шоттки, которые эффективнее работают на более высоких частотах. Однако их недостатком является наличие обратного тока утечки, что снижает общий аккумулированный заряд.

При сравнении свободностоящего графена с неподвижным графеном среднее значение D2C остается таким же, а стандартное отклонение значительно отличается, как показано на фиг. S3(c). Когда SPC составляет 100 пА, D2C колеблется примерно на 10 пА в случае свободностоящего графена и всего лишь примерно на 0,1 пА в случае неподвижного графена. По мере увеличения SPC стандартное отклонение увеличивается и для того, и для другого из-за нагрева образца. Тем не менее, размер колебаний по-прежнему примерно в 100 раз больше для свободностоящего образца. В среднем обратная связь позволяет отслеживать движение свободностоящего графена, но не дает мгновенного результата. Можно экстраполировать колебания тока в свободностоящем графене на нулевой туннельный ток и прогнозировать, что данные колебания все равно будут давать около 20 пА.

#### Конструкция пластины

Использование STM для вариантов применения не является целесообразным. Поэтому в настоящем документе представлена конструкция на основе пластины. На виде сверху, показанном на фиг. 17A, последовательность небольших квадратов 235 представляет металлические контакты вместо зонда STM. С обеих сторон сформированы диоды 250 для регулирования потока заряда. Графен 265 наложен поверх этой структуры с использованием стоек, которые более отчетливо видны на виде сбоку. В этой конструкции используют два конденсатора (200, 275). Первый конденсатор (265, 335) заряжает графен и позволяет передвигать заряд и останавливать движение заряда, а второй конденсатор (275) сохраняет накопленный заряд. Конструкции пластины, представленные на фигурах, иллюстрируют примеры, которые не ограничивают настоящее изобретение. Например, подложки могут включать не только кремний, но и диоксид кремния, карбид кремния, арсенид галлия, гибкие подложки, гибкие печатные схемы, органические подложки, органическую электронику или любую подложку, способную содержать диоды, сформированные внутри подложки.

На фиг. 21A-21H проиллюстрированы приводимые в качестве примера процедуры, которые не ограничивают настоящее изобретение, для формирования устройства в соответствии с настоящим изобретением со следующими этапами получения с использованием электронного луча.

Фиг. 21A. Начинают процесс изготовления с кремниевой пластины <100> размером 4 дюйма и толщиной 500 микрон.

Фиг. 21B. Пластину окисляют, чтобы установить заданную толщину слоя  $\text{SiO}_2$  (например, 300 нм).

Фиг. 21C. Осуществляют спин-покрытие обратной стороны резиста пластины и выполняют первую ступень запекания; MMA EL-6 вращается со скоростью 5000 об/мин, сушка длится 4 мин; пластину/деталь поддерживают по бокам во время сушки обратной стороны для предотвращения загрязнения лицевой стороны.

Фиг. 21D. Осуществляют спин-покрытие лицевой стороны резиста пластины и выполняют вторую ступень запекания/отверждения; CSAR 62, разбавляют 1:1 в анизоле, вращают со скоростью 5000 об/мин, запекают в течение 4 мин.

Фиг. 21E. Совмещают позитивную маску 1 с лицевой стороной пластины и покрытие резиста подвергают воздействию электронного луча; 300 мкКл/см<sup>2</sup> при 50 кэВ.

Фиг. 21F. Проявляют позитивный резист с обеих сторон пластины, проводят осмотр резиста и запекают резист; 20 с с использованием н-амилацетата, 15 с -MIBK:IPA 1:3, прополаскивают IPA; с последующим удалением накипи плазмы  $\text{O}_2$  (30 с при 75 Вт, необходимо проверить другие настройки в установке для плазменного травления Nano  $\text{O}_2$ ); толщина резиста: 100 нм (CSAR 62); ширина линии структуры: 4 мкм.

Фиг. 21G. Осуществляют структурированное изотропное влажное травление слоя  $\text{SiO}_2$  с использованием BOE; BOE 5:1, 3 мин 30 с; с осмотром после травления; толщина резиста/оксида: >4 000 Å; пластину держат влажной при размещении в BOE.

Фиг. 21H. Удаляют пепел с оставшегося резиста (примечание НС: Считают, что это приведет к вторичному образованию нескольких нанометров оксида и может препятствовать травлению на следующем этапе. Дается рекомендация удалить резист с использованием растворителя Remover PG и ацетона, а затем промыть с помощью IPA); технические условия: очищают плазмой  $\text{O}_2$ /удаляют фоторезист; 256 Вт; 0,3 торр; поток  $\text{O}_2$ : 220 куб. см/мин; 15 мин; осмотр после очистки; толщина оксида: >3 000 Å; профило-

метр Dektak 3030.

Фиг. 21I. Поэтапное анизотропное влажное травление кремния на заданную глубину. Глубина травления подобна критическому параметру конструкции/заготовки для установления требуемого зазора между графеном и зондом; технические условия: (все это необходимо перемасштабировать для работы с 50 мл воды для электронного луча); смешивают смесь поверхностно-активного вещества/воды, 550 мг Triton X-100 с 5,5 литрами воды; смешивают смесь КОН/мыльной воды, 2 000 г гранул КОН с 5,5 литрами воды; нагревают наружную сторону раствора до 50°C; пластину протравливают в течение ~15 (подлежит уточнению) мин (~2000 А/мин), выполняют промывку при выгрузке и SRD; проверяют после травления на глубину >14000 А; при необходимости повторяют, чтобы добиться глубины.

Фиг. 21J. Пластину профилируют для проверки характеристик; измеряют толщину травления кремния: профилометр Dektak 303; стандартно для ложбинки: >6000 А (глубина травления оксида и кремния); стандартно для зонда: >0.

Фиг. 21K. Термически окисляют пластину с образованием изолирующего слоя SiO<sub>2</sub>, толщина слоя SiO<sub>2</sub>, вероятно, будет критическим параметром для установления требуемого зазора между графеном и зондом. Технические условия: Пластину помещают в печь при 800°C в атмосфере N<sub>2</sub> на 30 мин; атмосфере O<sub>2</sub> при 1100°C на 332 (подлежит уточнению) мин; атмосфере N<sub>2</sub> при 1100°C на 5 мин; атмосфере N<sub>2</sub> при 900°C на 45 минут; измеряют толщину оксида, эллипсометр Гертнера, 1000-1600 (подлежит уточнению) А; 3000 А занимает 5 ч 31 мин 23 с; потребляет 1320 А кремния, поэтому рост представляет собой увеличение 1680 А; 4482 А на начальном оксиде; потребляет 1972,4 А кремния, так что рост 2510,2 А происходит сверху; разница составляет 830 А.

Фиг. 21L. Пластину профилируют перед нанесением металла; технические условия: профилометр Dektak 303; стандартно для ложбинки: >4400 А (глубина травления оксида и кремния); стандартно для зонда: >1400 А (от оксида до зонда из непротравленного окисленного кремния).

Фиг. 21M. Позитивный электронно-лучевой резист спинового покрытия на лицевой стороне пластины; технические условия: CSAR 62, разбавленный 1:1 в анизоле, потенциально может несколько раз скручен и задублен для достижения необходимой толщины.

Фиг. 21N. Шаблон позитивной маски 2 совмещают с лицевой стороной пластины и проверяют реперные метки совмещения, установленные позитивной маской 1, резист экспонируют; технические условия: 300 мкКл/см<sup>2</sup>, 50 кэВ.

Фиг. 21O. Проявляют позитивный резист и удаляют непроявленный материал; технические условия: 20 с н-амилацетон, 15 с MIBK:IPA 1:1, ополаскивание с использованием IPA.

Фиг. 21P. С отложений выпаривают хром/золото. Толщина металла может быть критическим параметром в установлении требуемого зазора между графеном и зондом; в откачиваемой камере два часа (лаборатория в г. Черчилл): 1×10<sup>-6</sup> торр 50 А Сг, 500 А Au.

Фиг. 21Q. Удаляют электронно-лучевой резист; замачивают в растворителе Remover PG 50:50: ацетон, два часа, ультразвуковая ванна с ацетоном, ополаскивание с использованием IPA.

Фиг. 21R. Окончательный осмотр изготовленной пластины; технические условия: Измеряют профиль с использованием пирамидального зонда из окисленного кремния: профилометр Dektak 3030; стандартно для металла на ложбинке: >3900 А (глубина травления оксида и кремния); стандартно для металла на зонде: >900 А (от оксида до зонда из непротравленного окисленного кремния).

На фиг. 22A-22R проиллюстрированы приводимые в качестве примера процедуры, которые не ограничивают настоящее изобретение, для формирования устройства в соответствии с настоящим изобретением со следующими этапами изготовления методом фотолитографии.

Фиг. 22A. Начинают процесс получения с кремниевой пластины <100> размером 4 дюйма и толщиной 500 микрон.

Фиг. 22B. Пластину окисляют, чтобы установить заданную толщину слоя SiO<sub>2</sub> (например, 300 нм).

Фиг. 22C. Осуществляют спин-покрытие обратной стороны пластины и выполняют первую ступень запекания; AZ-MiR 703, толщина 1,08 мкм, 5000 об/мин; начальное запекание, нагрев пластины EMS, 90°C, 60 с.

Фиг. 22D. Осуществляют спин-покрытие лицевой стороны резиста пластины и выполняют вторую ступень запекания/отверждения; AZ-MiR 703, 1,08 мкм, 5000 об/мин; подробности процесса см. в руководстве 2; запекание; в печи Blue M, 90°C, 10 мин.

Фиг. 22E. Позитивную маску 1 совмещают с лицевой стороной пластины и экспонируют покрытие фоторезиста; технические условия: время экспонирования: 65,0 с (130 мДж/см<sup>2</sup> при 2 мВт/см<sup>2</sup>), экспонирование на длине волны 365 нм; запекание после экспонирования при 110°C в течение 10 мин.

Фиг. 22F. Проявляют позитивный резист с обеих сторон пластины, проводят осмотр и запекание резиста; AZ300MIF 3:1, 60 с; проводят осмотр перед протравливанием; толщина резиста >2000 ангстрем; ширина рисунка ложбинки 2 мкм; запекание после проявки, 120°C в течение 20 мин.

Фиг. 22G. Осуществляют структурированное изотропное влажное травление слоя SiO<sub>2</sub> с использованием BOE; BOE 5:1, 3 мин 30 с; с осмотром после травления; толщина резиста/оксида: >5000 А; пластину держат влажной при размещении в BOE.

Фиг. 22H. Удаляют пепел с оставшегося резиста; технические условия: очищают плазмой

O<sub>2</sub>/удаляют фоторезист; 256 Вт; 0,3 торр; поток O<sub>2</sub>: 220 куб. см/мин; 15 мин; осмотр после очистки; толщина оксида: >3000 Å; профилометр Dektak 3030.

Фиг. 22I. Поэтапное анизотропное влажное травление кремния на заданную глубину. Глубина травления подобна критическому параметру конструкции/заготовки для установления требуемого зазора между графеном и зондом; технические условия: (все это необходимо перемасштабировать для работы с 50 мл воды для электронного луча); смешивают смесь поверхностно-активного вещества/воды, 550 мг Triton X-100 с 5,5 литрами воды; смешивают смесь KOH/мыльной воды, 2000 г гранул KOH с 5,5 литрами воды; нагревают наружную сторону раствора до 50°C; пластину протравливают в течение ~15 (подлежит уточнению) мин (~2000 Å/мин), выполняют промывку при выгрузке и SRD; проверяют после травления на глубину >14000 (подлежит уточнению) Å; при необходимости повторяют, чтобы добиться глубины.

Фиг. 22J. Пластину профилируют для проверки характеристик; измеряют толщину травления кремния: профилометр Dektak 303; стандартно для ложбинки: >6000 Å (глубина травления оксида и кремния); стандартно для зонда: >0.

Фиг. 22K. Термически окисляют пластину с образованием изолирующего слоя SiO<sub>2</sub>, толщина слоя SiO<sub>2</sub>, вероятно, будет критическим параметром для установления требуемого зазора между графеном и зондом. Технические условия: Пластину помещают в печь при 800°C в атмосфере N<sub>2</sub> на 30 мин; атмосфере O<sub>2</sub> при 1100°C на 332 (подлежит уточнению) мин; атмосфере N<sub>2</sub> при 1100°C на 5 мин; атмосфере N<sub>2</sub> при 900°C на 45 минут; измеряют толщину оксида, эллипсометр Гертнера, 1000-1600 (подлежит уточнению) Å; 3000 Å занимает 5 ч 31 мин 23 с; потребляет 1320 Å кремния, поэтому рост представляет собой увеличение 1680 Å; 4482 Å на начальном оксиде; потребляет 1972,4 Å кремния, так что рост 2510,2 Å происходит сверху; разница составляет 830 Å.

Фиг. 22L. Пластину профилируют перед нанесением металла; технические условия: профилометр Dektak 303; стандартно для ложбинки: >4400 (подлежит уточнению) Å (глубина травления оксида и кремния); стандартно для зонда: >1400 (подлежит уточнению) Å (от оксида до зонда из непротравленного окисленного кремния).

Фиг. 22M. Позитивный негативный фоторезист спинового покрытия на лицевой стороне пластины; технические условия: Обезвоживание и запекание пластины, 30 мин при 160°C; основное запекание HMDS, 15 мин; спин-покрытие Futurexx NR9-3000PY при 3000 об/мин; подробная информация о процессе в руководстве 3; начальное запекание 1 мин при 150°C, устройство для нанесения покрытий 143.4 Eaton.

Фиг. 22N. Негативную маску 2 совмещают с лицевой стороной пластины и проверяют реперные метки совмещения, установленные позитивной маской 1, фоторезист экспонируют; технические условия: Негативную маску 2 совмещают с пластиной; экспонирование: SUSS MA150; C-4: 300 мДж/см<sup>2</sup>; 38,0 с (7,9 Вт/см<sup>2</sup>); запекают после экспонирования на горячей пластине EMS; 100°C в течение 1 мин; 98,3°C.

Фиг. 22O. Проявляют негативный резист и удаляют непроявленный материал; технические условия: Позитивная проявка 16 с; последующее запекание при 120°C в течение 20 мин; готовят к погружению в поверхностно-активное вещество: 1 капля Triton X-100 в 4,5 л деионизированной воды; выполняют погружение 100:1 BOE, 30 с для удаления оксида в контактных окнах.

Фиг. 22P. Из отложений выпаривают золото. Толщина металла может быть критическим параметром в установлении требуемого зазора между графеном и зондом; в откачиваемой камере в течение ночи: 1×10<sup>-6</sup> торр; слой 500 Å.

Фиг. 22Q. Снимают фоторезист; используют ультразвук наряду с ацетоном.

Фиг. 22R. Осуществляют окончательный осмотр изготовленной пластины; технические условия: измеряют профиль с использованием пирамидального зонда из оксидированного кремния: профилометр Dektak 3030; стандартно для металла на ложбинке: >3900 Å (глубина травления оксида и кремния); стандартно для металла на зонде: >900 Å (от оксида до непротравленного зонда из оксидированного кремния).

Начиная с фиг. 23, показаны некоторые сборки преобразователя, в частности сборки, в которых важные компоненты изготовлены внутри подложки таким образом, чтобы исключить описанное выше использование сканирующего туннельного микроскопа (STM). В одном неограничивающем варианте реализации концепции настоящего изобретения могут быть включены в преобразователь, поскольку он преобразует физическое движение (т.е. вибрацию мембраны) в электрический сигнал. Кроме того, по сути, именно чрезвычайная гибкость сверхтонких двумерных материалов для мембран позволяет им перемещаться на большие расстояния при воздействии внешнего усилия. Чем больше движение, тем сильнее будет индуцированный электрический сигнал. Идентифицированные двумерные материалы в 10000 раз более гибкие, чем современная технология с применением нитрида кремния.

Рассматривая настоящее изобретение с точки зрения преобразователя, один вариант реализации включает систему для аккумуляции энергии и содержит подложку, имеющую начальную толщину между первой поверхностью подложки и противоположной поверхностью подложки. Вторая поверхность подложки ограничивает открытую область лунки, проходящую от первой поверхности подложки ко второй поверхности подложки. Свободностоящая мембрана может быть расположена над областью лунки и может быть нанесена на первую поверхность подложки, при этом свободностоящая мембрана может свободно вибрировать в ответ на воздействие энергии окружающей среды. Вибрация мембраны

определяет циклические образования волн вдоль первой поверхности мембраны, при этом каждое образование волны чередуется между подъемом и спадом в области лунки. Вместо указанного выше использования сканирующего туннельного микроскопа (STM) в преобразователе энергии согласно этому варианту реализации используют конструкцию зонда, сформированную как часть подложки или прикрепленную к ней и проходящую от второй поверхности подложки. Учитывая, что один из видов преобразователя, описанного в настоящем документе, преобразует механическую энергию вибрации в электрическую энергию через поток тока, причем преобразователь содержит первый контакт, подключенный к первой поверхности подложки, и второй контакт, подключенный к конструкции зонда, для извлечения и/или впрыска носителя в зависимости от полярности. В одном неограничивающем варианте реализации источник напряжения может быть подключен ко второму контакту для создания емкостной области зарядов между зондом и мембраной. Как описано выше, расстояние между зондом и мембраной изменяется в зависимости от соответствующих подъемов и спадов из-за циклической вибрации материала мембраны, на которую действуют силы окружающей среды или энергия окружающей среды (тепло, поток воздуха, силы сжатия, силы расширения и т.д.). Емкостная область между зондом и мембраной накапливает и излучает заряды циклически в зависимости от расстояния между зондом и мембраной. В одном варианте реализации источник напряжения также может быть приемником заряда и устройством накопления, например аккумуляторной батареей. Следовательно, накопительный конденсатор может быть подключен к мембране и принимать излучаемые заряды из емкостной области, когда расстояние между зондом и мембраной увеличивается во время периодов подъема волны. В альтернативном цикле потока энергии источник напряжения подает заряды в емкостную область, когда расстояние между зондом и мембраной уменьшается во время периодов спада волны. Компьютерная система может электронно сообщаться по меньшей мере с одним из первого контакта и второго контакта, и, как в большинстве компьютеризированных систем, компьютер, используемый с этим преобразователем энергии, может содержать по меньшей мере один процессор и запоминающее устройство, при этом запоминающее устройство хранит инструкции, которые при исполнении по меньшей мере одним процессором управляют накоплением заряда и передачей заряда от мембраны.

Подложка, на которой сформирован преобразователь для настоящего изобретения, может включать в себя совокупность отдельных сборок преобразователя на одной подложке. Для размещения совокупностиборок преобразователей подложка может включать в себя схему ложбинок на первой поверхности подложки, при этом каждая ложбинка изолирует либо зонд, либо первый контакт, либо и то, и другое от соседних частей подложки. Таким образом, одна сборка в подложке соединяет электрическую схему, частично содержащую источник напряжения, накопительный конденсатор, зонд и мембрану, направляющую энергию к общему заземлению. Перед заземлением схема содержит первый диод, подключенный к мембране или зонду или и к тому, и к другому, причем общее заземление параллельно постоянному приемнику энергии, например накопительному конденсатору, и второй диод, подключенный к мембране или зонду последовательно с накопительным конденсатором. Таким образом, накопительный конденсатор является одним необязательным каналом к общему заземлению и может быть подключен к нему. Преобразователь в соответствии с настоящим изобретением может получить выгоду от экономии масштаба за счет использования матрицы соответствующих первых диодов и вторых диодов, соединяющих соответствующие области мембраны или зонда с источником напряжения, постоянным накопительным конденсатором и общим заземлением. Как можно больше компонентов, в частности диодов, можно сформировать внутри подложки с помощью методов легирования для многочисленных материалов подложки. В ином случае система в соответствии с настоящим изобретением может содержать схему, которая содержит соединенные компоненты, выбранные из источника напряжения, постоянного накопительного конденсатора, зонда и мембраны, причем некоторые или все компоненты соединены друг с другом через схемную плату, которая отделена от подложки.

Во многих обсуждаемых в настоящем документе примерах говорится, что свободностоящая мембрана представляет собой свободностоящую графеновую мембрану, но этот пример не ограничивает типы материалов, которые могут быть использованы для реализации преобразователя энергии для данного применения. Для неограничивающих примеров, описывающих использование графеновой мембраны, свободностоящая мембрана представляет собой одно из двухслойной структуры графена, трехслойной структуры графена и многослойной структуры графена. Другие материалы, которые могут быть использованы в соответствии с описанием вибрационной мембраны, помимо графена, включают дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), селенид молибдена ( $\text{MoSe}_2$ ), дисульфид вольфрама ( $\text{WS}_2$ ), диселенид вольфрама ( $\text{WSe}_2$ ), дисульфид рения ( $\text{ReS}_2$ ), диселенид рения ( $\text{ReSe}_2$ ), нитрид бора (BN) и другие комбинации переходного металла и другого элемента (MX<sub>2</sub>) или их комбинацию.

Накопительный конденсатор представляет собой резервуар для электрического потенциала, генерируемого механическим перемещением свободностоящей мембраны, которая находится в емкостной связи с зондом из-за электрических зарядов на зонде и/или мембране. В одном варианте реализации, который не ограничивает настоящее изобретение, емкостная область показывает цикл емкости от минимальной емкости около 0,001 фемтофарад до максимальной емкости около 1000 фемтофарад. Минимальная емкость соответствует периодам времени, в течение которых расстояние между зондом и мембраной

максимально увеличивается во время периодов подъема волны. Максимальная емкость соответствует периодам времени, в течение которых расстояние между зондом и мембраной сводится к минимуму во время периодов спада волны. Емкостная область подвержена туннелированию тока, когда расстояние между зондом и мембраной сводится к минимуму во время периодов спада волны, тем самым предоставляя ток накопительному конденсатору. В одном варианте реализации испытания амперметр, подключенный через переключатель, работает параллельно накопительному конденсатору, при этом амперметр измеряет заряд накопительного конденсатора для отслеживания пользователем.

Мембрана описана как свободностоящая мембрана в том смысле, что секция мембраны, расположенная рядом с зондом схемы (как правило, внутри подложки), свободна и имеет возможность колебаться или волнообразно колебаться по меньшей мере на части мембраны. В этом отношении можно считать, что мембрана имеет первую поверхность, расположенную вблизи или даже непосредственно обращенную к формированию зонда подложки, и вторую поверхность, противоположную первой поверхности, причем эти поверхности соединены в точках, удаленных от области окна, которая вибрирует вблизи зонда. Механическая энергия системы вызывает вибрацию мембраны и может быть окружающей энергией в виде тепловой энергии или кинетической энергии атомов в свободностоящей мембране. В некоторых неограничивающих вариантах реализации мембрана имеет среднюю толщину от 0,3 нм до 3,0 нм, от 0,3 нм до 2,0 нм, от 0,3 нм до 1,0 нм или от 0,3 нм до 0,6 нм.

Система для преобразования вибрационной энергии в выходной ток, как описано в настоящем документе, может использовать сборку 300 преобразователя, сформированную внутри подложки 325 или соединенную с подложкой, имеющей начальную толщину между первой поверхностью 330 подложки и противоположной поверхностью 340 подложки. Вторая поверхность 350 подложки ограничивает открытую область 355 лунки проходящую от первой поверхности 330 подложки ко второй поверхности 350 подложки 325. Свободностоящая мембрана 425, соединенная с первой поверхностью 330 подложки 325, содержит первую поверхность 430, которая не имеет препятствий и свободно вибрирует в ответ на воздействие энергии окружающей среды, при этом вибрация мембраны определяет циклические образования 271 волн вдоль первой поверхности 430 и при этом каждое образование волны чередуется между подъемом 286 и спадом 289 в соответствующей области 464 окна из совокупности областей окна мембраны 425. Зонд 360 либо сформирован внутри подложки 325, либо по меньшей мере расположен на второй поверхности 350 подложки рядом с мембраной 425. Источник 200 напряжения находится в электрическом сообщении с зондом или мембраной, однако варианты реализации в настоящем документе признают увеличение потенциала напряжения, первоначально приложенного источником напряжения, поскольку избыточный заряд, который может проходить через сборку 300 преобразователя, может накапливаться в накопительном конденсаторе 275 в результате преобразования механической энергии в электрическую. Таким образом, источник напряжения может быть описан в одном неограничивающем варианте реализации как настройка заданного тока между зондом 360 и мембраной 425 для определения соответствующей емкостной области заряда между зондом и мембраной. Дополнительная проводимость к зонду 360 и мембране 425 и от них умножает проводимость тока в системе, как описано выше. Расстояние между зондом и мембраной изменяется в зависимости от соответствующих подъемов и спадов, а емкостная область накапливает и излучает заряды циклически в зависимости от расстояния между зондом и мембраной. Постоянный накопительный конденсатор 275 соединен с мембраной или зондом и принимает излучаемые заряды и дополнительные туннельные заряды из емкостной области, когда расстояние между зондом и мембраной максимально увеличивается во время периодов подъема волны в соответствующей области окна. Подобно другим вариантам реализации, описанным выше, количество дополнительных туннельных зарядов пропорционально заданному току зонда. Заданный ток зонда представляет собой фиксированный ток, а диапазон расстояния между зондом и мембраной регулируют между минимальным расстоянием и максимальным расстоянием, при этом максимальное расстояние выполнено с возможностью учета дополнительных туннельных зарядов, проходящих через емкостную область.

Зонд 360, сформированный в подложке, служит одной сопоставимой емкостной пластиной, в то время как мембрана 425 служит другой емкостной пластиной емкостного взаимодействия между зондом и мембраной. Система, использующая это взаимодействие для преобразования вибрационной энергии в выходной ток, может содержать схему 500 аккумуляции тока в подложке, при этом схема аккумуляции тока содержит массив контактов зонда, соединенных соответствующими согласующими диодами 235 с источником 200 напряжения и накопительным конденсатором 275. Свободностоящая мембрана проходит поверх по меньшей мере контактов зонда в цепи аккумуляции тока таким образом, что контакты зонда отделены от мембраны и обращены к первой поверхности мембраны для определения емкостной области между общим контактом, соединяющим соответствующие контакты зонда, и первой поверхностью мембраны. Как отмечено в других вариантах реализации, первая поверхность мембраны не имеет препятствий и свободно вибрирует в ответ на воздействие энергии окружающей среды, при этом вибрация мембраны определяет циклические образования волн вдоль первой поверхности, и при этом каждое образование волны чередуется между подъемом и спадом относительно общего контакта. Соответствующие емкостные области между контактами зонда и мембраной накапливают заряды между контактом зонда и мембраной, при этом контакт зонда переключает выходной ток накопленных зарядов

через один из соответствующих диодов, чтобы направить выходной ток либо на источник напряжения, либо на постоянный накопительный конденсатор в ответ на циклическое образование волн в мембране. В некоторых версиях этой технологии схема 500 аккумулярования формируется внутри подложки путем определения соответствующих областей ложбинки и лунки, как показано на фиг. 21-27. В одном неограничивающем варианте реализации зонд 360 сформирован как компонент подложки 325 в соответствующей ложбинке 510 рядом с секцией 520 лунки, также сформированной в подложке. Схема 500 аккумулярования содержит верхний контакт 530 и нижний контакт 540 для извлечения заряда. В другом варианте реализации схема 500 аккумулярования содержит зонд 360 в подложке и другие компоненты на соседней схемной плате (не показана).

Конечно, настоящее изобретение не ограничивается каким-либо одним устройством или преобразователем, чтобы воспользоваться преимуществом способа сборки схемы аккумулярования энергии. Например, в настоящем изобретении показано формирование емкостной области в схеме аккумулярования энергии путем определения первой пластины конденсатора, имеющей начальное разделительное расстояние по отношению к первой поверхности свободностоящей мембраны, при этом первая поверхность свободностоящей мембраны определяет вторую пластину конденсатора. Путем соединения первой пластины конденсатора (или, возможно, второй пластины конденсатора в установке с противоположной полярностью) с источником напряжения способ выполнен с возможностью индуцирования накопления заряда в емкостной области между зондом в подложке и первой поверхностью мембраны. Выполнение способа продолжается путем размещения мембраны относительно первой пластины конденсатора таким образом, чтобы мембрана не имела препятствий и свободно вибрировала в ответ на воздействие энергии окружающей среды, при этом вибрация мембраны определяет циклические образования волн вдоль первой поверхности, и при этом каждое образование волны чередуется между подъемом и спадом относительно первой пластины конденсатора для изменения начального разделительного расстояния. Разрядка емкостной области через соответствующий диод направляет накопленные заряды либо к источнику напряжения, либо к нагрузке, при этом разрядка емкостной области включает направление зарядов к источнику напряжения во время спада и направление зарядов к нагрузке во время подъема. В одном варианте реализации нагрузка представляет собой конденсатор накопления заряда, упомянутый выше как постоянный накопительный конденсатор. Постоянный накопительный конденсатор отличается от емкостного взаимодействия между вибрирующей мембраной и зондом подложки (что больше похоже на переменный конденсатор).

#### Способы применения

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

Устройства для аккумулярования энергии, описанные в настоящем документе, могут быть включены, например, в 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 аккумулярования энергии, как описано в настоящем документе, 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 (STM).

Один неограничивающий фактор, который следует отметить в отношении этой технологии, состоит в том, что описания в настоящем документе, в которых используется электростатический/емкостной подход к аккумулярованию вибрационной энергии, являются лишь примерами многих вариантов реализации. Если бы мембрана была намагничена, она использовала бы электромагнитный метод для аккумулярования вибрационной энергии. Для осуществления этого метода не требуется источник напряжения, но "зонд" должен быть проволочной петлей. Подобно, если бы мембрана была пьезоэлектрической или магнитострикционной, она использовала бы пьезоэлектрический или магнитострикционный эффект для аккумулярования энергии при вибрации. Опять же, источник напряжения не потребует. Изгибающий пьезоэлемент будет индуцировать напряжение и генерировать направление тока. Для изгибающего магнитострикционного устройства потребуются проволочная петля. В других подобных случаях для аккумулярования тока будут использовать выпрямитель диодного моста.

При использовании электрически изолирующей мембраны, например из нитрида бора (BN) (по сравнению с электропроводящей мембраной, например графеном), BN сначала распыляют электрическими зарядами, которые затем остаются на месте, поскольку она является изолирующей. При закреплении зарядов на мембране источник напряжения в описанной выше схеме больше не требуется. Это называется внутренней поляризацией по сравнению с внешней поляризацией, и эти термины обычно используют для описания двух типов микрофонов. Отсутствие необходимости в источнике напряжения пред-

ставляет собой существенный вариант реализации. Рекомендуется рассмотреть возможность добавления в этом случае общей формулы MX<sub>2</sub> (термин, используемый в данной области техники) для переходного металла и другого элемента.

Следует понимать, что любой из компонентов или модулей, на которые делается ссылка в отношении устройств для аккумулялирования 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 документе признаков и их компонентов, обсужденных в настоящем документе, 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.

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.

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 документе или показанные на сопроводительных графических материалах 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 документе, 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 документе предназначены для входа в рамки объема прилагаемой формулы изобретения. Кроме того, хотя конкретно описаны только некоторые репрезентативные этапы способа, раскрытые в настоящем документе, 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 документе или меньше, однако включены другие комбинации этапов, элементов, компонентов или составляющих, даже если они явным образом не указаны.

Основные приведенные ссылочные материалы.

- [1] N. Mounet, M. Gibertini, P. Schwaller, D. Campi, A. Merkys, A. Marrazzo, T. Sohier, I.E. Castelli, A. Cepellotti, G. Pizzi, N. Marzari, Two-dimensional materials from high-throughput computational exfoliation of experimentally known compounds, *Nature Nanotechnology*, 13 (2018) 246-+.
- [2] N.R. Greene, Energy Flow for a Variable-Gap Capacitor, *The Physics Teacher*, 43 (2005) 340.
- [3] S.F. Philp, VACUUM-INSULATED, VARYING-CAPACITANCE MACHINE, *Ieee*



Transactions on Electrical Insulation, 12 (1977) 130-136.

[4] R. O'Donnell, N. Schofield, A.C. Smith, J. Cullen, Design Concepts for High-Voltage Variable-Capacitance DC Generators, Ieee Transactions on Industry Applications, 45 (2009) 1778-1784.

[5] P. Xu, M. Neek-Amal, S.D. Barber, J.K. Schoelz, M.L. Ackerman, P.M. Thibado, A. Sadeghi, F.M. Peeters, Unusual ultra-low-frequency fluctuations in freestanding graphene, Nat. Comm., 5 (2014) 3720.

[6] M. Neek-Amal, P. Xu, J.K. Schoelz, M.L. Ackerman, S.D. Barber, P.M. Thibado, A. Sadeghi, F.M. Peeters, Thermal mirror buckling in freestanding graphene locally controlled by scanning tunneling microscopy, Nat. Comm., 5 (2014) 4962.

[7] M.L. Ackerman, P. Kumar, M. Neek-Amal, P.M. Thibado, F.M. Peeters, S. Singh, Anomalous Dynamical Behavior of Freestanding Graphene Membranes, Physical Review Letters, 117 (2016).

[8] M. Lopez-Suarez, R. Rurali, L. Gammaitoni, G. Abadal, Nanostructured graphene for energy harvesting, Physical Review B, 84 (2011) 161401(R).

[9] J.F. Xu, P.M. Thibado, Z. Ding, 4 K, ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope having two orthogonal tips with tunnel junctions as close as a few nanometers, Rev. Sci. Instrum., 77 (2006) 093703.

[10] J. Tersoff, D.R. Hamann, THEORY OF THE SCANNING TUNNELING MICROSCOPE, Physical Review B, 31 (1985) 805-813.

*Приведенные в качестве примера ссылочные материалы*

[E1] A. Einstein, Investigations on the theory of the Brownian movement, Annalen der Physik, 17 (1905) 549-560.

[E2] C. Lotze, M. Corso, K.J. Franke, F. von Oppen, J.I. Pascual, Driving a Macroscopic Oscillator with the Stochastic Motion of a Hydrogen Molecule, Science, 338 (2012) 779-782.

[E3] L. Gammaitoni, P. Hanggi, P. Jung, F. Marchesoni, Stochastic resonance, Rev. Mod. Phys., 70 (1998) 223-287.

[E4] I.A. Martinez, E. Roldan, L. Dinis, D. Petrov, J.M.R. Parrondo, R.A. Rica, Brownian Carnot engine, Nature Physics, 12 (2016) 67-70. [E5] U. Seifert, Stochastic thermodynamics, fluctuation theorems and molecular machines, Reports on Progress in Physics, 75 (2012) 126001.

[E6] R.D. Astumian, Thermodynamics and kinetics of a Brownian motor, Science, 276 (1997)

917-922.

[E7] M.O. Magnasco, FORCED THERMAL RATCHETS, *Physical Review Letters*, 71 (1993) 1477-1481.

[E8] A.L. Cottrill, A.T. Liu, Y. Kunai, V.B. Koman, A. Kaplan, S.G. Mahajan, P.W. Liu, A.R. Toland, M.S. Strano, Ultra-high thermal effusivity materials for resonant ambient thermal energy harvesting, *Nature Communications*, 9 (2018) 664.

[E9] H.H. Hasegawa, C.B. Li, Y. Ohtaki, Thermodynamics of a system with long-time correlations, *International Journal of Quantum Chemistry*, 98 (2004) 138-144.

[E10] M.L. Ackerman, P. Kumar, M. Neek-Amal, P.M. Thibado, F.M. Peeters, S. Singh, Anomalous Dynamical Behavior of Freestanding Graphene Membranes, *Physical Review Letters*, 117 (2016) 126801.

[E11] J.C. Meyer, A.K. Geim, M.I. Katsnelson, K.S. Novoselov, T.J. Booth, S. Roth, The structure of suspended graphene sheets, *Nature*, 446 (2007) 60-63.

[E12] A. Fasolino, J.H. Los, M.I. Katsnelson, Intrinsic ripples in graphene, *Nature Materials*, 6 (2007) 858-861.

[E13] P. San-Jose, J. Gonzalez, F. Guinea, Electron-Induced Rippling in Graphene, *Physical Review Letters*, 106 (2011) 045502.

[E14] P. Xu, M. Neek-Amal, S.D. Barber, J.K. Schoelz, M.L. Ackerman, P.M. Thibado, A. Sadeghi, F.M. Peeters, Unusual ultra-low-frequency fluctuations in freestanding graphene, *Nat. Comm.*, 5 (2014) 3720.

[E15] M. Ruiz-Garcia, L.L. Bonilla, A. Prados, Ripples in hexagonal lattices of atoms coupled to Glauber spins, *Journal of Statistical Mechanics-Theory and Experiment*, (2015) P05015.

[E16] M. Ruiz-Garcia, L.L. Bonilla, A. Prados, STM-driven transition from rippled to buckled graphene in a spin-membrane model, *Physical Review B*, 94 (2016) 205404.

[E17] See Supplemental Material at [URL will be inserted by publisher] for further details on experiments and calculations.

[E18] M. Lopez-Suarez, R. Rurali, L. Gammaitoni, G. Abadal, Nanostructured graphene for energy harvesting, *Physical Review B*, 84 (2011) 161401(R).

[E19] M.R. Sorensen, A.F. Voter, Temperature-accelerated dynamics for simulation of infrequent events, *Journal of Chemical Physics*, 112 (2000) 9599-9606.

[E20] L.L. Bonilla, M. Ruiz-Garcia, Critical radius and temperature for buckling in graphene, *Physical Review B*, 93 (2016) 115407.

[E21] J.F. Xu, P.M. Thibado, Z. Ding, 4 K, ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope having two orthogonal tips with tunnel junctions as close as a few nanometers, *Rev. Sci. Instrum.*, 77 (2006) 093703.

- [E22] S.F. Philp, Vacuum-Insulated, Varying-Capacitance Machine, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 12 (1977) 130-136.
- [E23] R. O'Donnell, N. Schofield, A.C. Smith, J. Cullen, Design Concepts for High-Voltage Variable-Capacitance DC Generators, IEEE Transactions on Industry Applications, 45 (2009) 1778-1784.
- [E24] N.R. Greene, Energy Flow for a Variable-Gap Capacitor, The Physics Teacher, 43 (2005) 340.
- [E25] J.-S. Rattinacannou, A promising new energy source: The Brownian motion of nanoresonator arrays European Physical Journal, 79 (2014) 01006.
- [E26] M.B. Lundberg, J.A. Folk, Rippled Graphene in an In-Plane Magnetic Field: Effects of a Random Vector Potential, Physical Review Letters, 105 (2010) 146804.
- [E27] C.B. Williams, R.B. Yates, Analysis of a micro-electric generator for microsystems, Transducers, (1995) 369.
- [E28] S. Roundy, P.K. Wright, J. Rabaey, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, Computer Communications, 26 (2003) 1131-1144.
- [E29] E.V. Castro, H. Ochoa, M.I. Katsnelson, R.V. Gorbachev, D.C. Elias, K.S. Novoselov, A.K. Geim, F. Guinea, Limits on Charge Carrier Mobility in Suspended Graphene due to Flexural Phonons, Physical Review Letters, 105 (2010) 266601.
- [E30] A.A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, C.N. Lau, Superior thermal conductivity of single-layer graphene, Nano Lett., 8 (2008) 902-907.
- [E31] J. Macaulay, M. Kuckelhaus, Internet of things in logistics, Mathtais Heutger (2015).
- [E32] S. Hanson, M. Seok, Y.S. Lin, Z. Foo, D. Kim, Y. Lee, N. Liu, D. Sylvester, D. Blaauw, A Low-Voltage Processor for Sensing Applications With Picowatt Standby Mode, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 44 (2009) 1145-1155.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система для сбора энергии, содержащая подложку, имеющую начальную толщину между первой стороной подложки и противоположной стороной подложки;

вторую сторону подложки, ограничивающую открытую область углубления, проходящего от первой стороны подложки к противоположной стороне подложки;

свободностоящую мембрану, расположенную над открытой областью углубления и нанесенную на первую сторону подложки, при этом свободностоящая мембрана выполнена с возможностью свободной вибрации в ответ на воздействие энергии окружающей среды, при этом вибрация мембраны определяет циклические образования, в виде волн, вдоль первой поверхности мембраны, при этом каждое образование, в виде волны, чередуется между подъемом и спадом над открытой областью углубления;

заостренный выступ, выступающий от второй стороны подложки и определяющий первую конденсаторную пластину;

при этом первая поверхность мембраны определяет вторую конденсаторную пластину, причем первая конденсаторная пластина имеет начальный зазор по отношению ко второй конденсаторной пластине;

общий металлический контакт, соединенный с первой стороной подложки;

контакт заостренного выступа, соединенный с заостренным выступом;

источник напряжения, соединенный с контактом заостренного выступа, индуцирующим емкостную область зарядов между первой конденсаторной пластиной, определяемой заостренным выступом, и второй конденсаторной пластиной, определяемой свободностоящей мембраной,

при этом расстояние между заостренным выступом и мембраной изменяется от величины начального зазора в соответствии с соответствующими подъемами и спадами, и

при этом емкостная область между первой конденсаторной пластиной, определяемой заостренным выступом, и второй конденсаторной пластиной, определяемой свободностоящей мембраной, накапливает и излучает заряды циклически, в зависимости от расстояния между заостренным выступом и мембраной; и

накопительный конденсатор, соединенный с мембраной и принимающий излучаемые заряды из ем-

костной области, когда расстояние между заостренным выступом и мембраной увеличивается во время периодов подъема волны.

2. Система по п.1, отличающаяся тем, что источник напряжения подает заряды в емкостную область, когда расстояние между заостренным выступом и мембраной уменьшается во время периодов спада волны.

3. Система по п.1, дополнительно содержащая компьютерную систему, электронно связанную с общим металлическим контактом и/или контактом заостренного выступа и содержащую по меньшей мере один процессор и запоминающее устройство, и при этом запоминающее устройство хранит инструкции, которые при выполнении по меньшей мере одним процессором управляют накоплением заряда и передачей заряда от мембраны.

4. Система по п.1, дополнительно содержащая схему канавок на первой стороне подложки, при этом каждая канавка изолирует либо заостренный выступ, либо общий металлический контакт от соседних частей подложки.

5. Система по п.1, дополнительно содержащая электрическую схему, соединяющую источник напряжения, накопительный конденсатор, заостренный выступ и мембрану с общим заземлением, при этом схема содержит первый диод, соединенный с мембраной или заостренным выступом, общее заземление, параллельное постоянному конденсатору, и второй диод, соединенный с мембраной или заостренным выступом последовательно, причем постоянный конденсатор соединен с общим заземлением.

6. Система по п.5, дополнительно содержащая группу соответствующих первых диодов и вторых диодов, соединяющих соответствующие области мембраны или заостренного выступа с источником напряжения, постоянным накопительным конденсатором и общим заземлением.

7. Система по п.5, отличающаяся тем, что компоненты соединения схемы, выбранные из источника напряжения, постоянного накопительного конденсатора, заостренного выступа и мембраны, соединены друг с другом через схемную плату, которая отделена от подложки.

8. Система по п.1, отличающаяся тем, что свободностоящая мембрана представляет собой свободностоящую графеновую мембрану.

9. Система по п.1, отличающаяся тем, что свободностоящая мембрана представляет собой одно из двухслойной структуры графена, трехслойной структуры графена и многослойной структуры графена.

10. Система по п.1, дополнительно содержащая амперметр, подсоединенный через переключатель для работы параллельно накопительному конденсатору, при этом амперметр измеряет заряд в накопительном конденсаторе.

11. Система по п.1, отличающаяся тем, что емкостная область имеет цикл емкости от минимальной емкости около 0,001 фемтофард до максимальной емкости около 1000 фемтофард.

12. Система по п.11, отличающаяся тем, что минимальная емкость соответствует периодам времени, в течение которых расстояние между заостренным выступом и мембраной максимально увеличивается во время периодов подъема волны.

13. Система по п.12, отличающаяся тем, что максимальная емкость соответствует периодам времени, в течение которых расстояние между заостренным выступом и мембраной сведено к минимуму во время периодов спада волны.

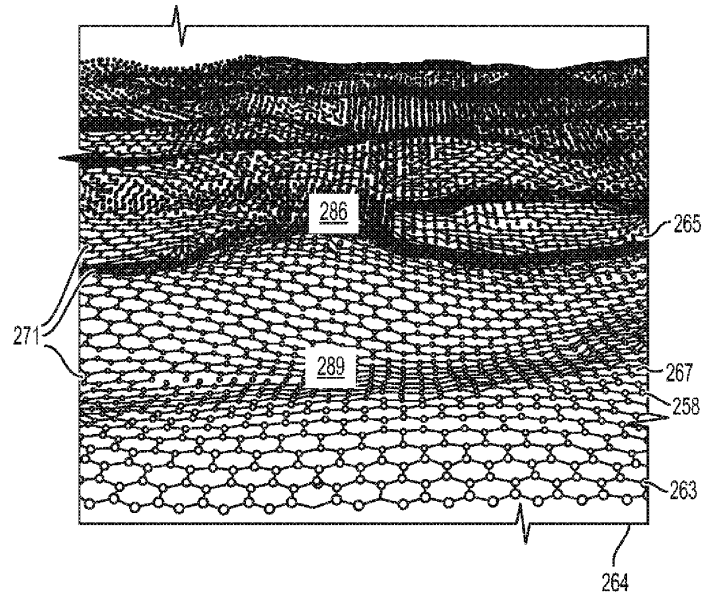
14. Система по п.1, отличающаяся тем, что емкостная область подвержена туннелированию тока, когда расстояние между заостренным выступом и мембраной сведено к минимуму во время периодов спада волны.

15. Система по п.1, отличающаяся тем, что энергия окружающей среды представляет собой тепловую энергию.

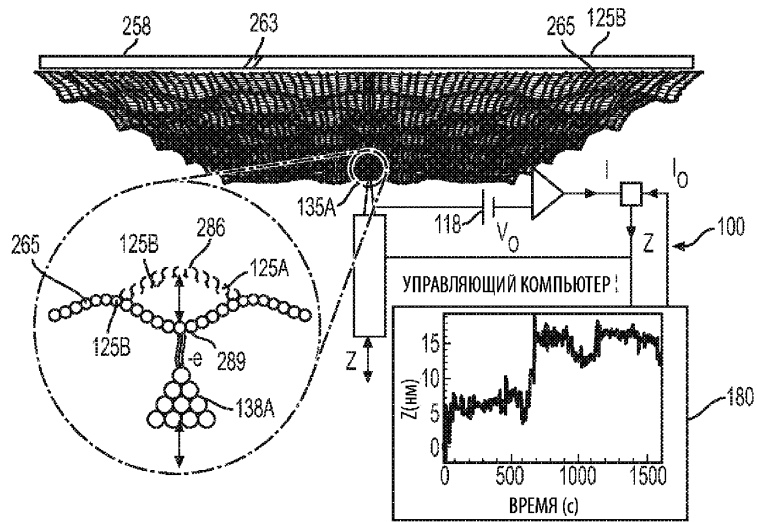
16. Система по п.1, отличающаяся тем, что энергия окружающей среды представляет собой кинетическую энергию атомов в свободностоящей мембране.

17. Система по п.1, отличающаяся тем, что свободностоящая мембрана содержит графен,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ,  $\text{ReS}_2$ ,  $\text{ReSe}_2$ ,  $\text{BN}$ , комбинации переходного металла и другого элемента ( $\text{MX}_2$ ) или их комбинацию.

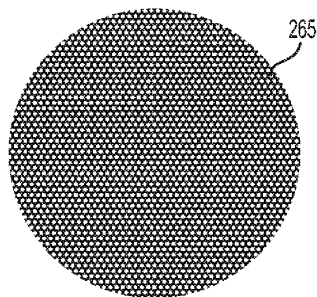
18. Система по п.1, отличающаяся тем, что мембрана имеет среднюю толщину от 0,3 нм до 3,0 нм, от 0,3 нм до 2,0 нм, от 0,3 нм до 1,0 нм или от 0,3 нм до 0,6 нм.



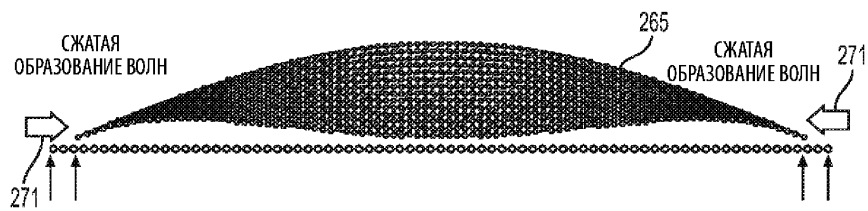
Фиг. 1А



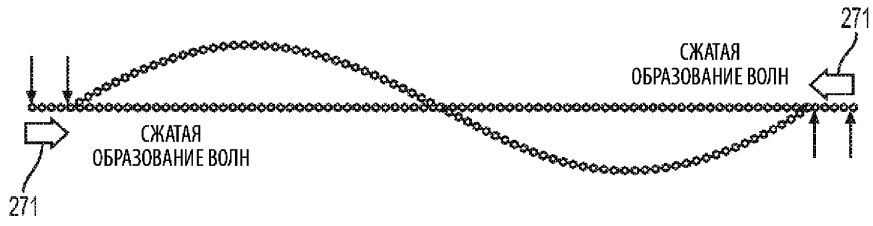
Фиг. 1В



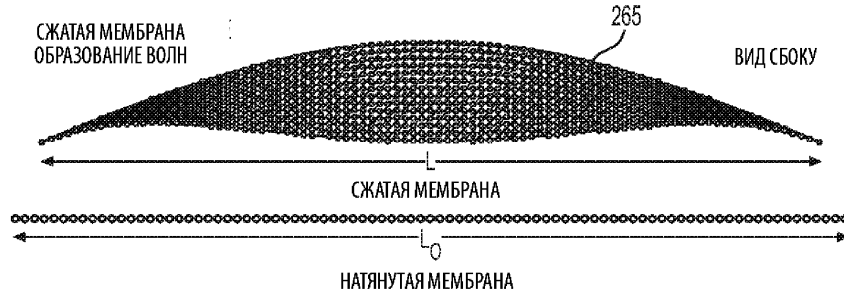
Фиг. 2А



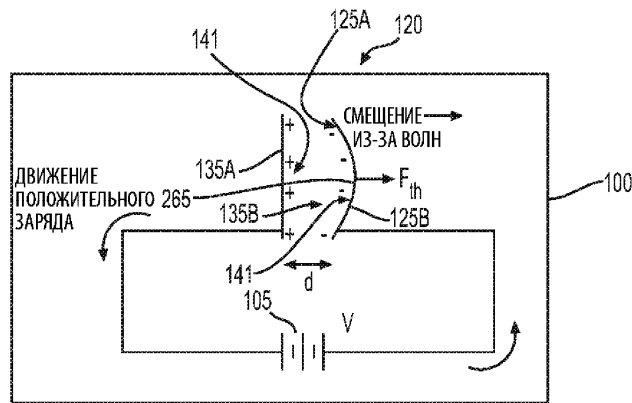
Фиг. 2В



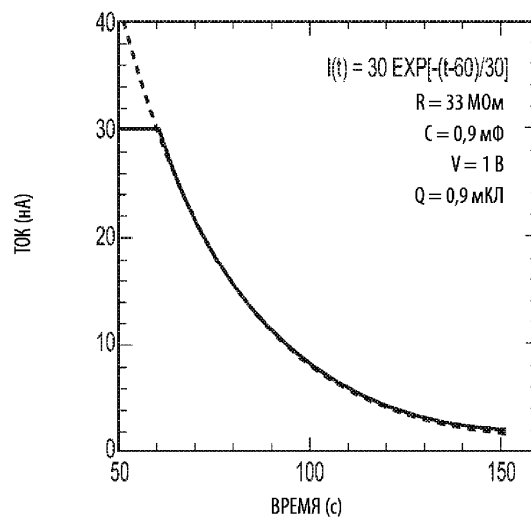
Фиг. 2С



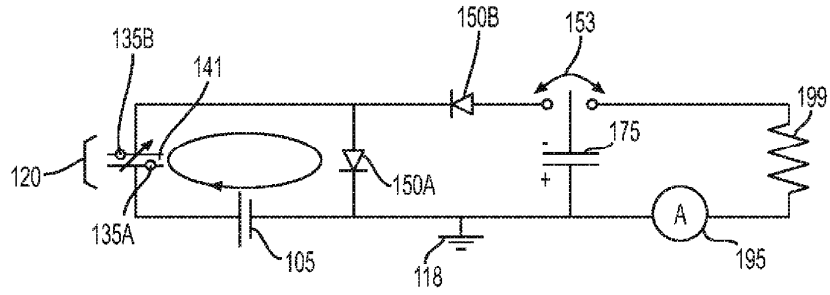
Фиг. 2D



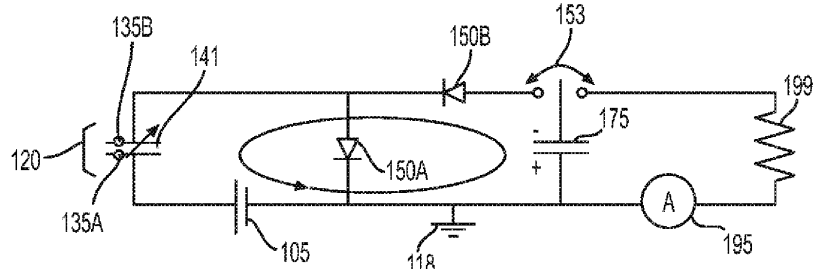
Фиг. 3А



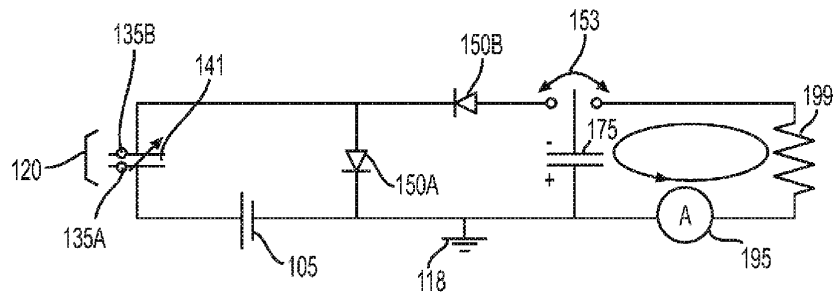
Фиг. 3В



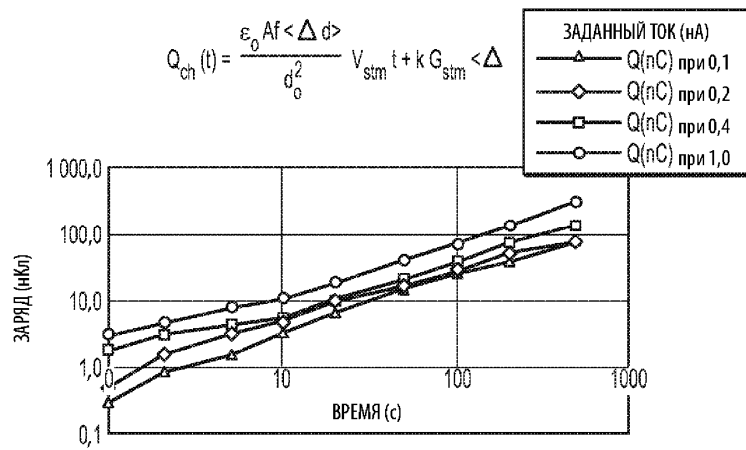
Фиг. 4А



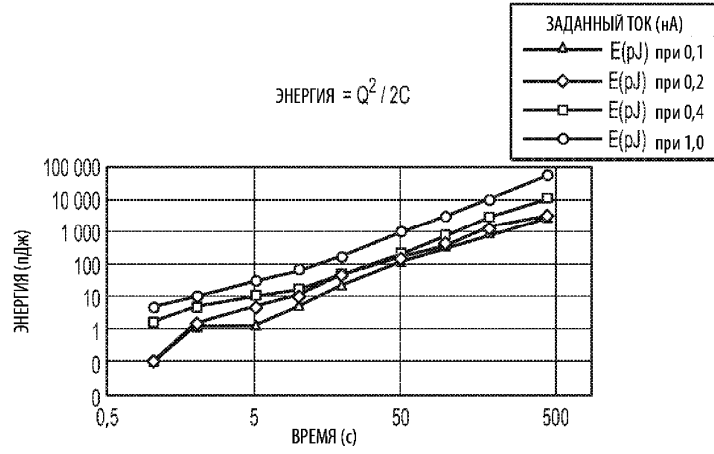
Фиг. 4В



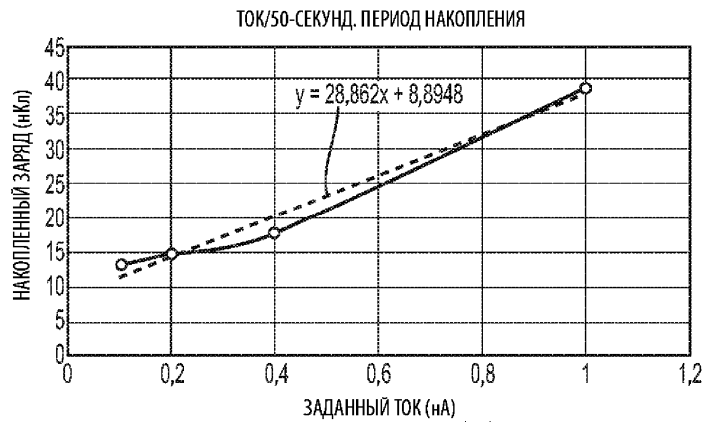
Фиг. 4С



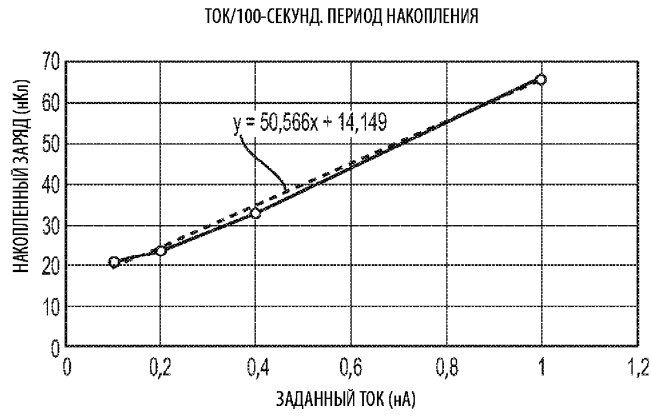
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

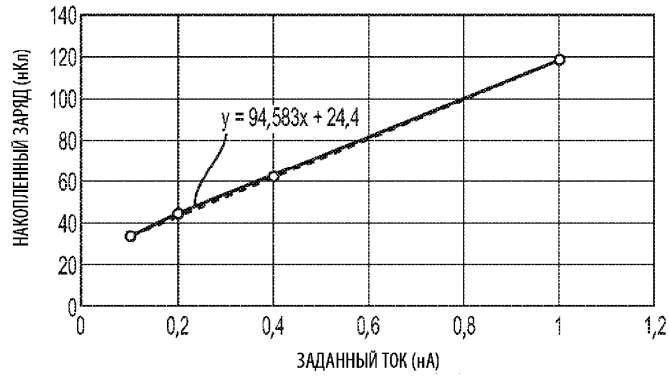


$$Q_{ch}^{max}(t_{stm}) = \frac{\epsilon_0 A f \langle d(t) \rangle}{d_0^2} V_{stm} T + k G_{stm} \langle d(t) \rangle T |_{stm}$$

Фиг. 8

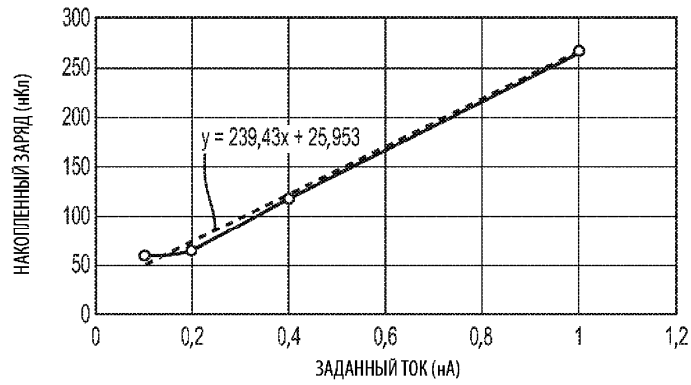


ТОК/200-СЕКУНД. ПЕРИОД НАКОПЛЕНИЯ



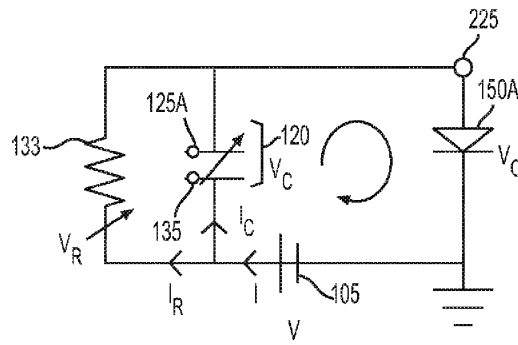
Фиг. 9

ТОК/500-СЕКУНД. ПЕРИОД НАКОПЛЕНИЯ

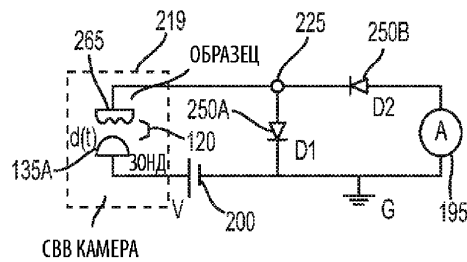


$$Q_{ch}^{max}(I_{stim}) = \frac{\epsilon_0 Af \langle d(t) \rangle}{d_0^2} V_{stim} T + k G_{stim} \langle d(t) \rangle T I_{stim}$$

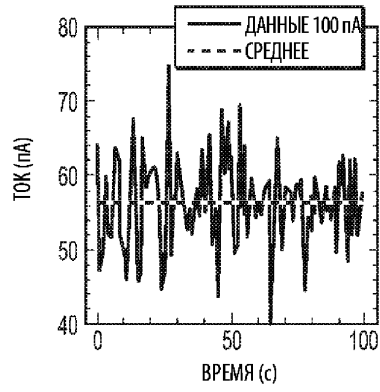
Фиг. 10



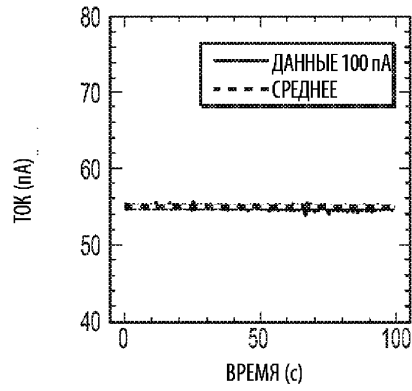
Фиг. 11



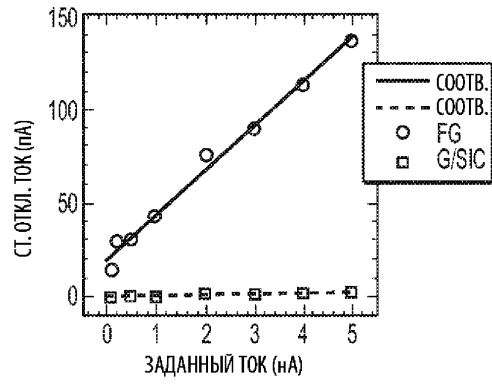
Фиг. 12А



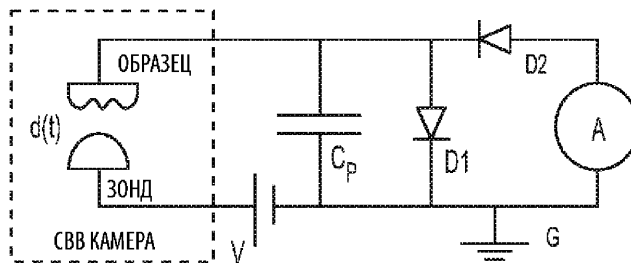
Фиг. 12В



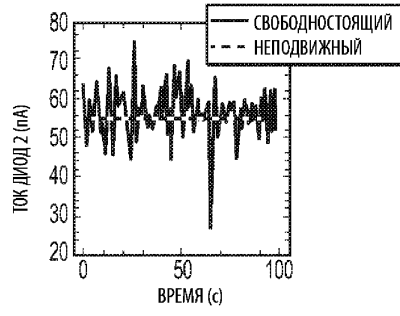
Фиг. 12С



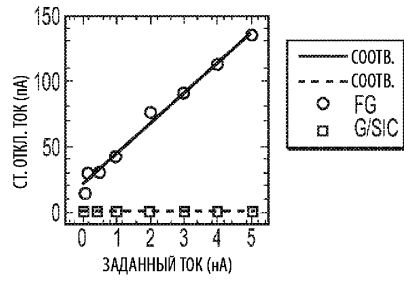
Фиг. 12D



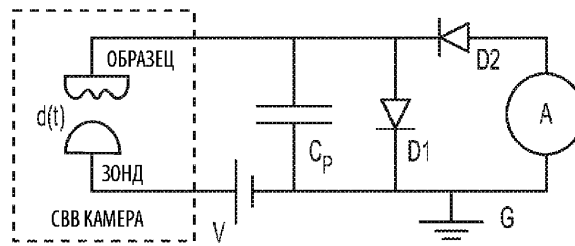
Фиг. 12E



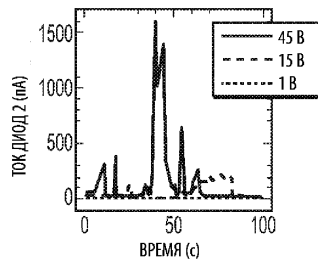
Фиг. 12F



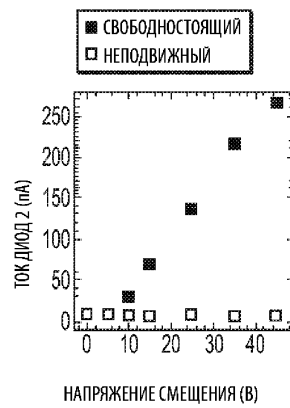
Фиг. 12G



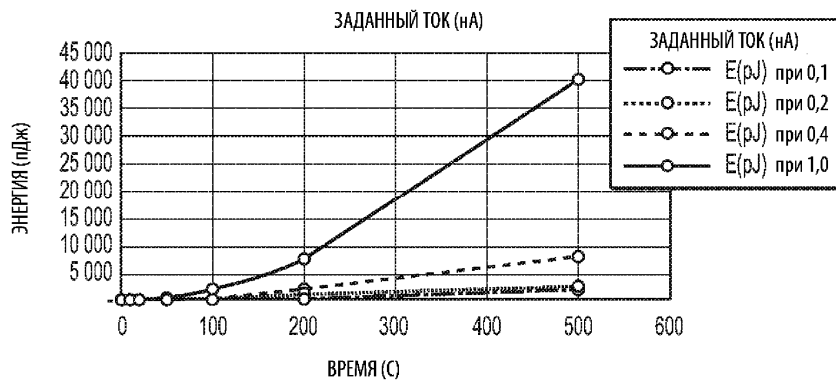
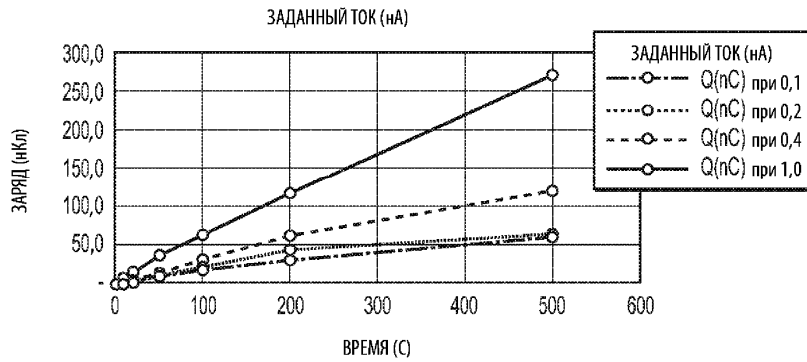
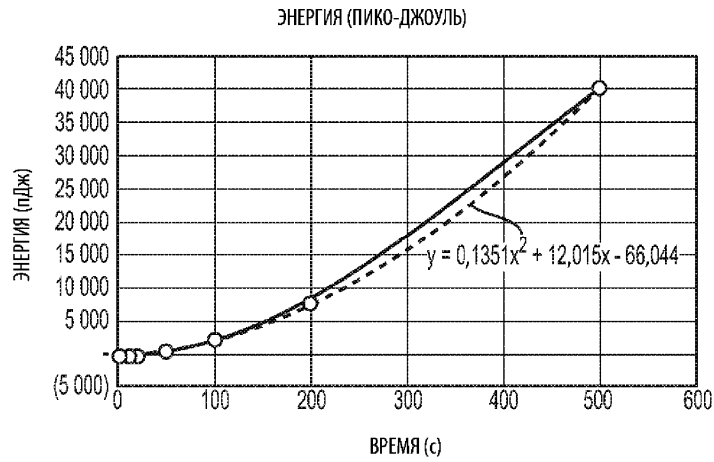
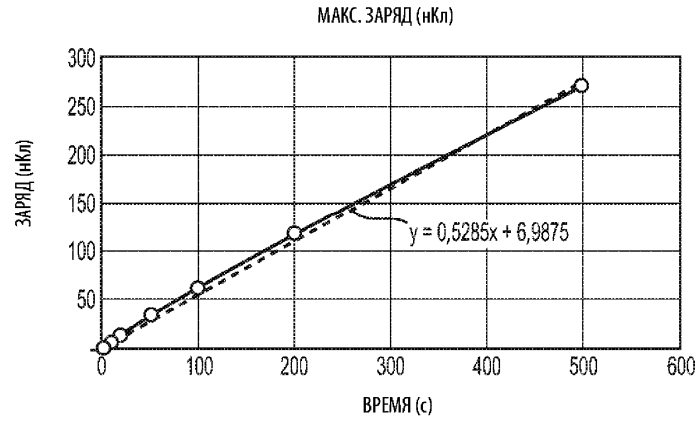
Фиг. 12H

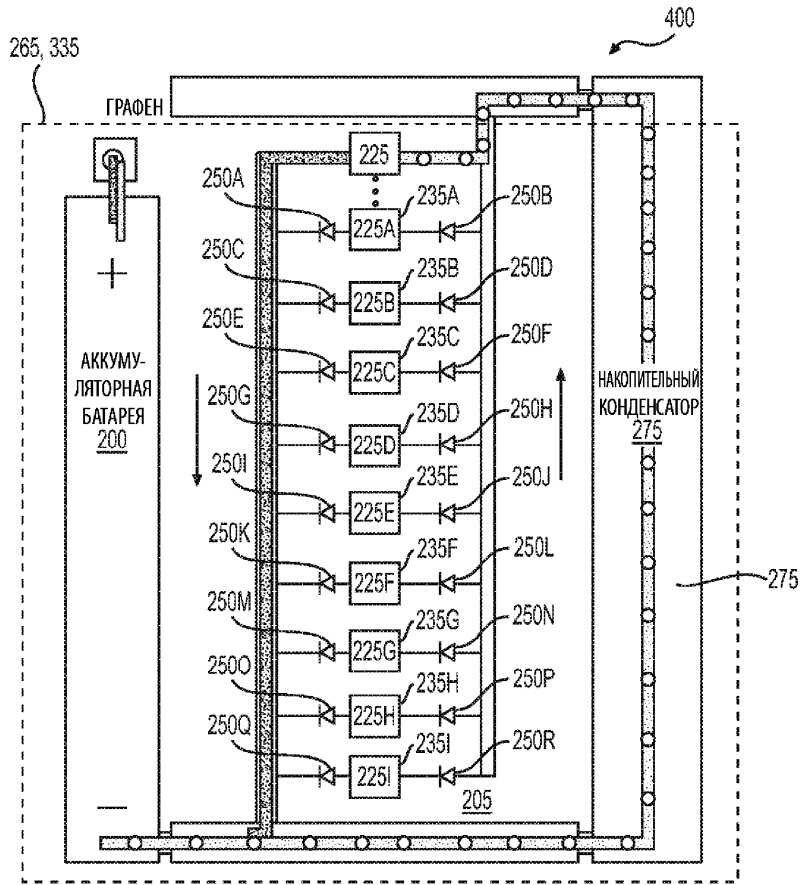


Фиг. 12I

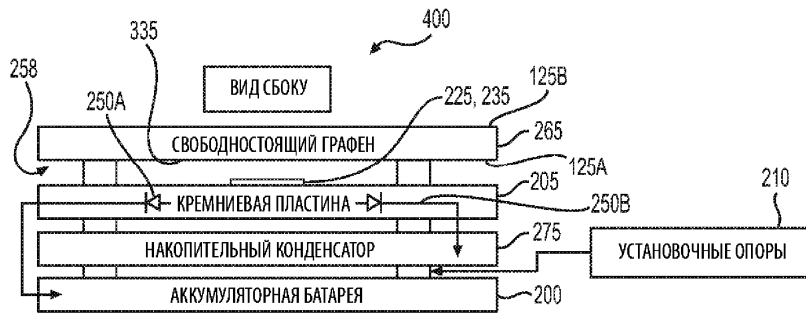


Фиг. 12J

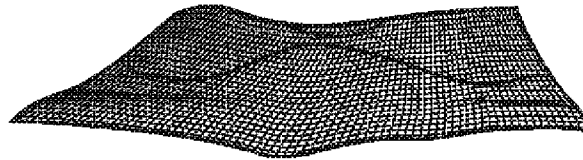




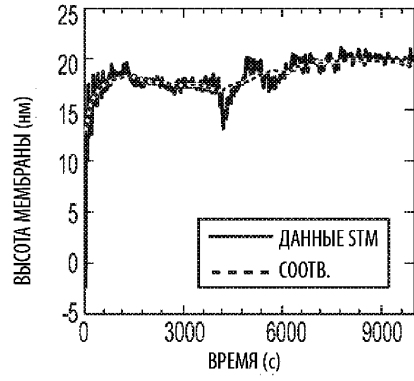
Фиг. 17А



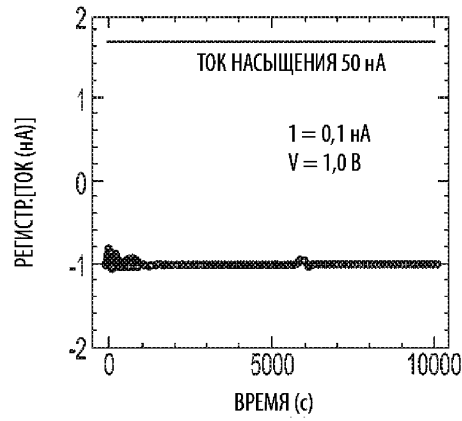
Фиг. 17В



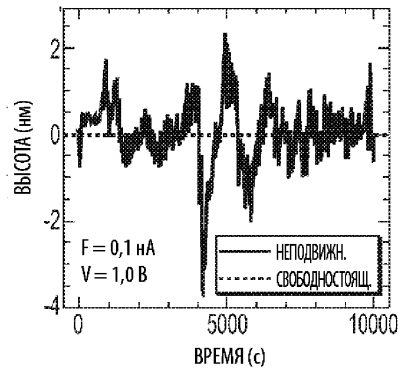
Фиг. 18А



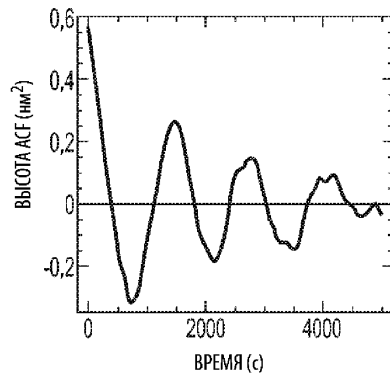
Фиг. 18В



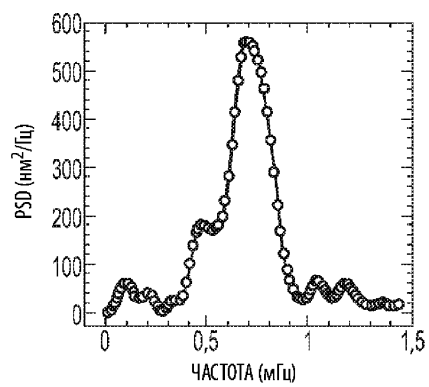
Фиг. 18С



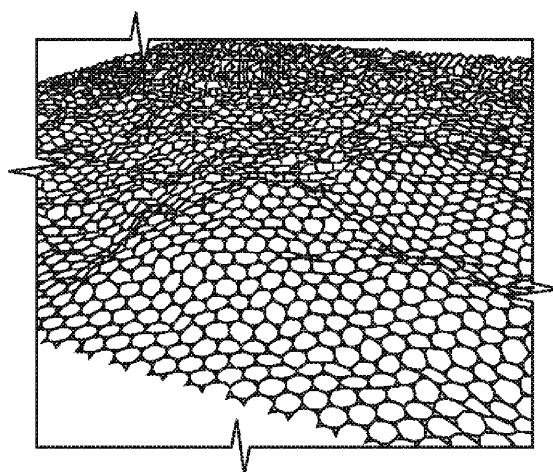
Фиг. 18D



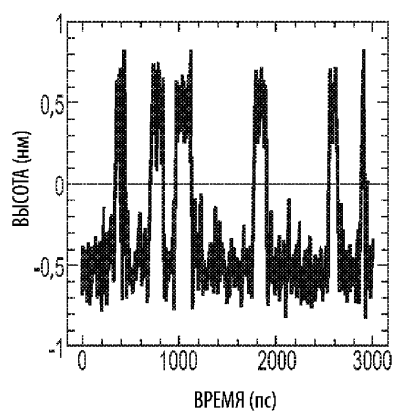
Фиг. 18E



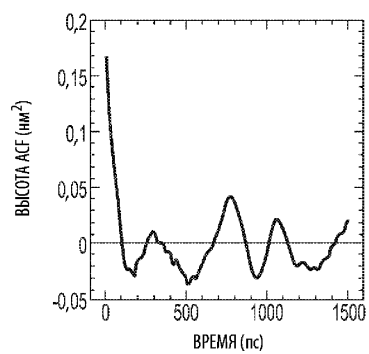
Фиг. 18F



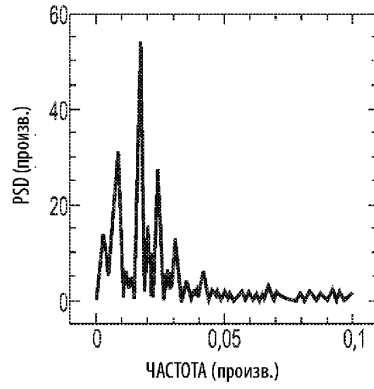
Фиг. 19А



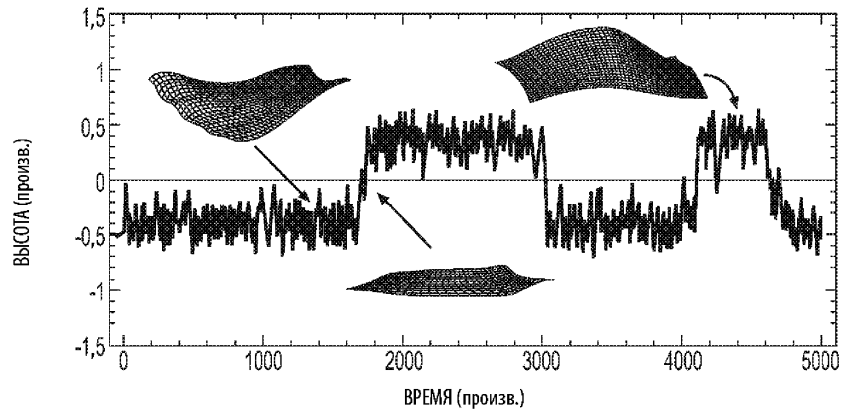
Фиг. 19В



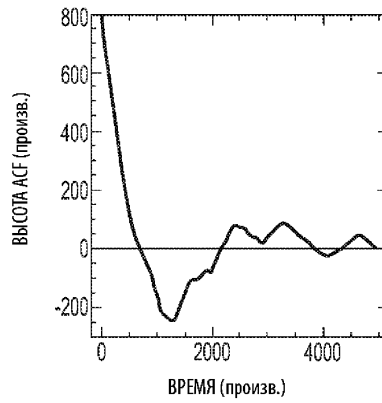
Фиг. 19С



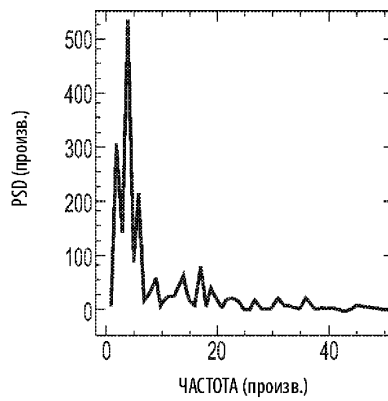
Фиг. 19D



Фиг. 20А

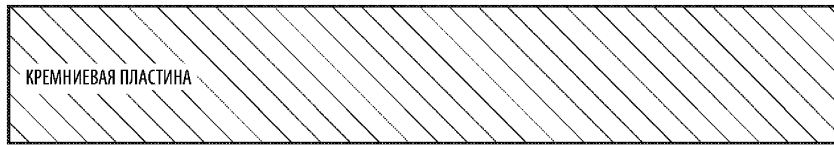


Фиг. 20В

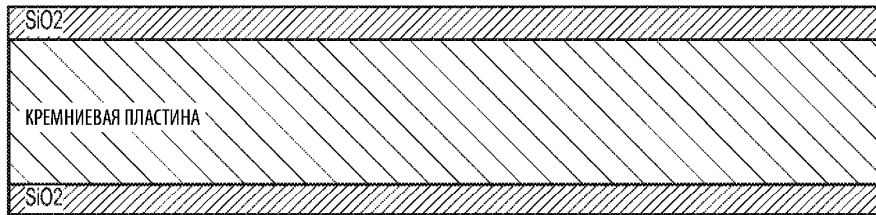


Фиг. 20С

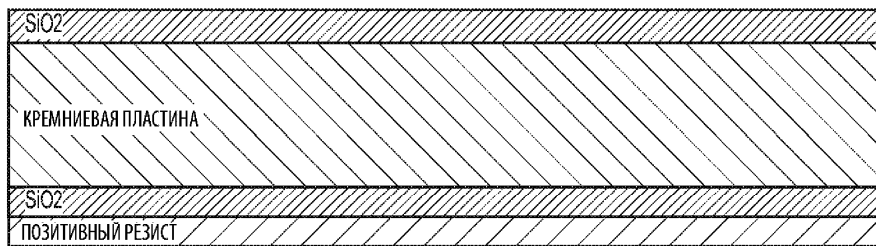




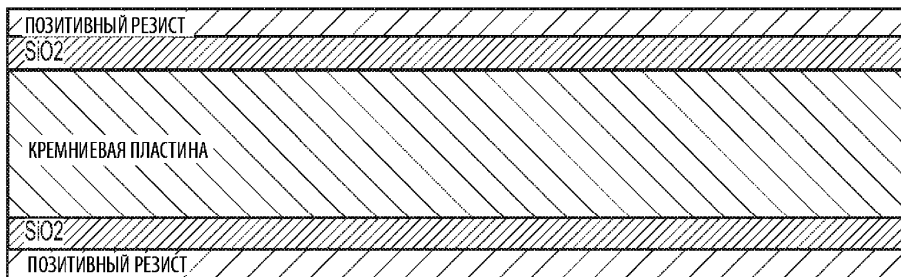
Фиг. 21А



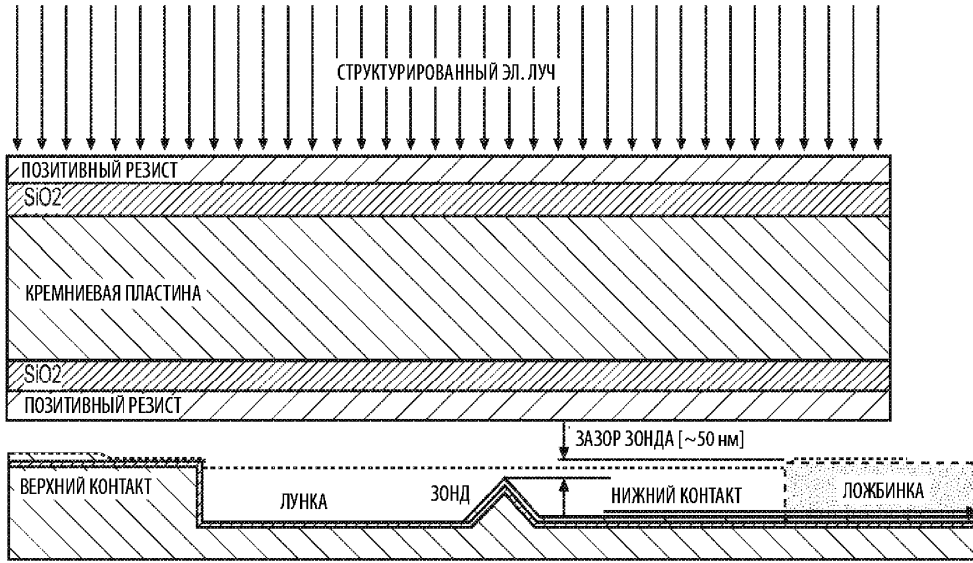
Фиг. 21В



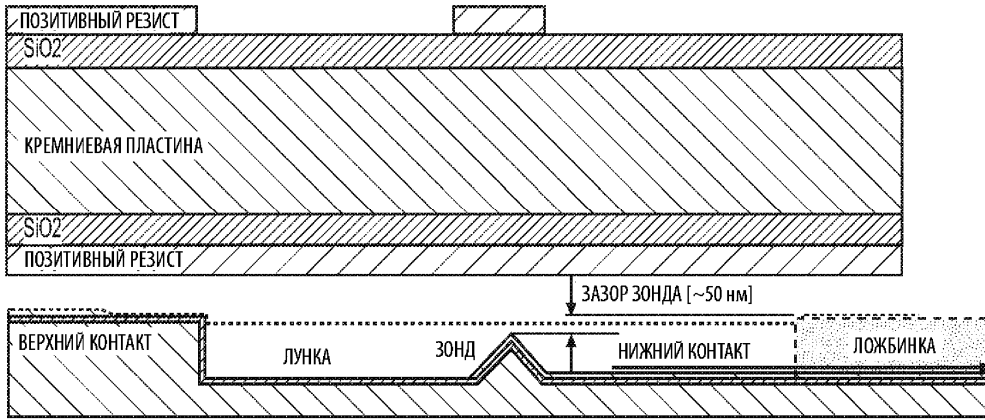
Фиг. 21С



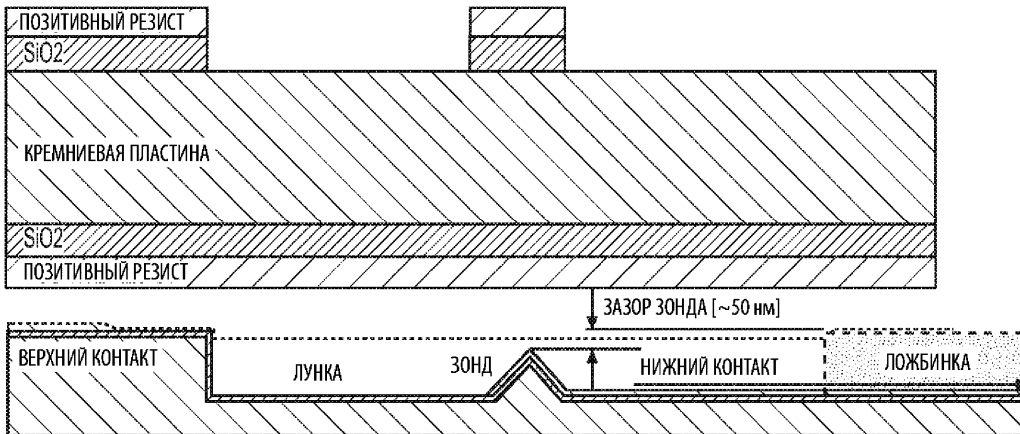
Фиг. 21D



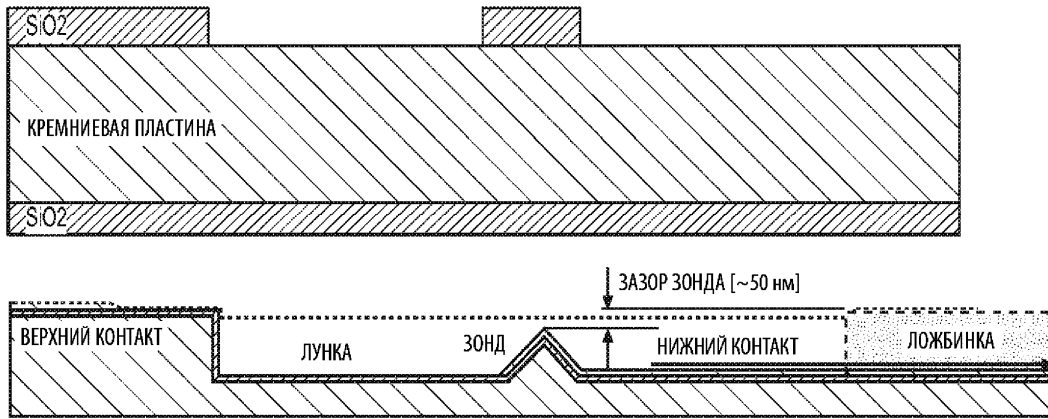
Фиг. 21Е



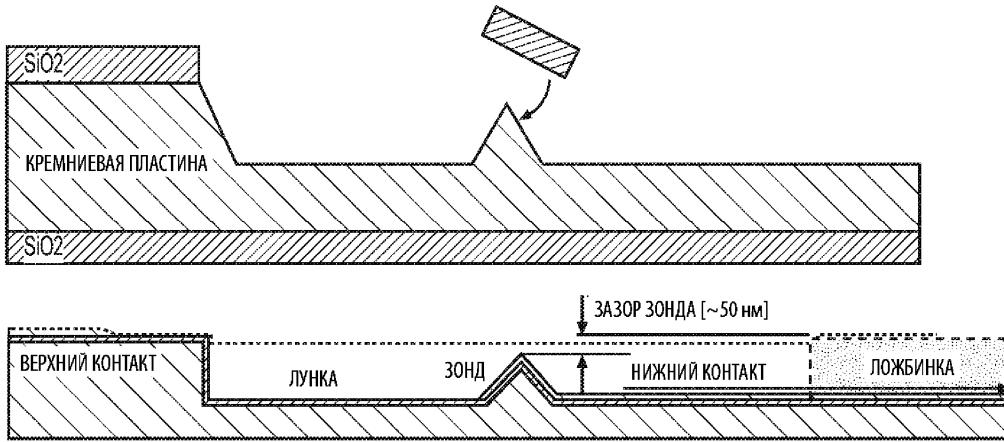
Фиг. 21F



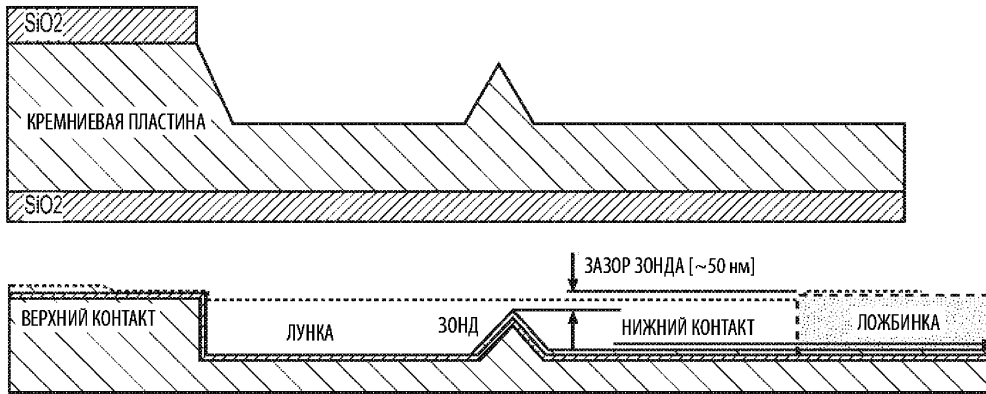
Фиг. 21G



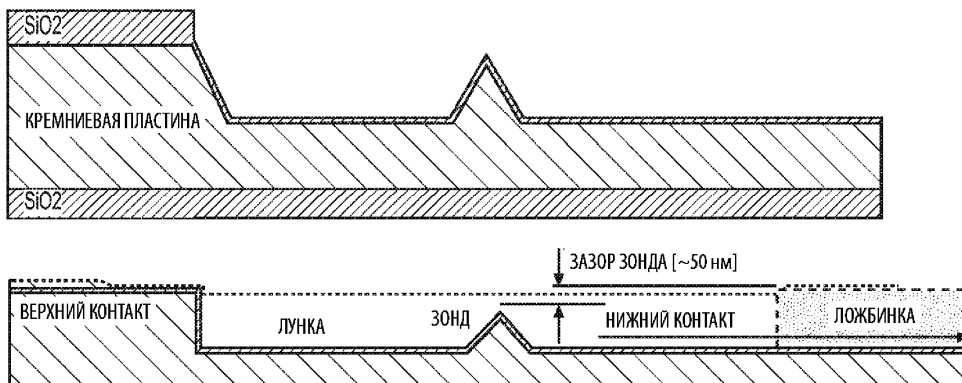
Фиг. 21H



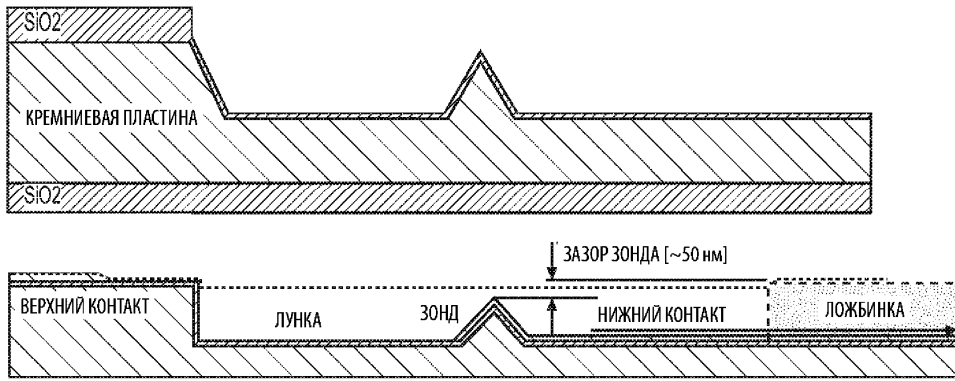
Фиг. 21I



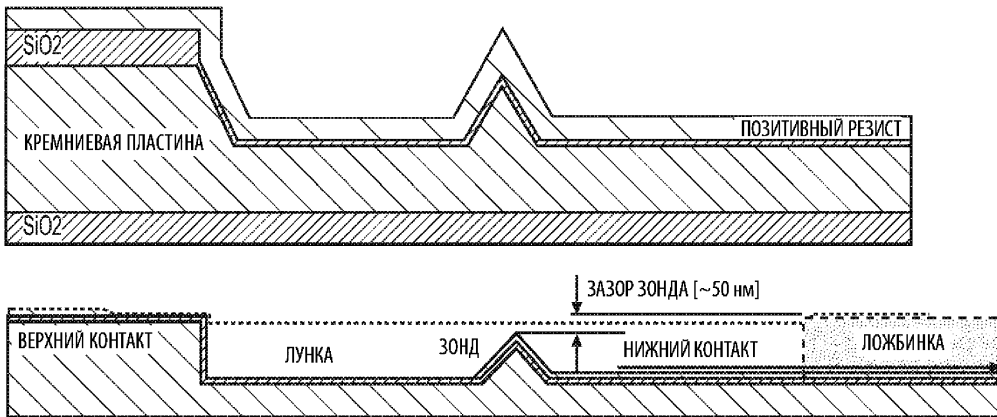
Фиг. 21J



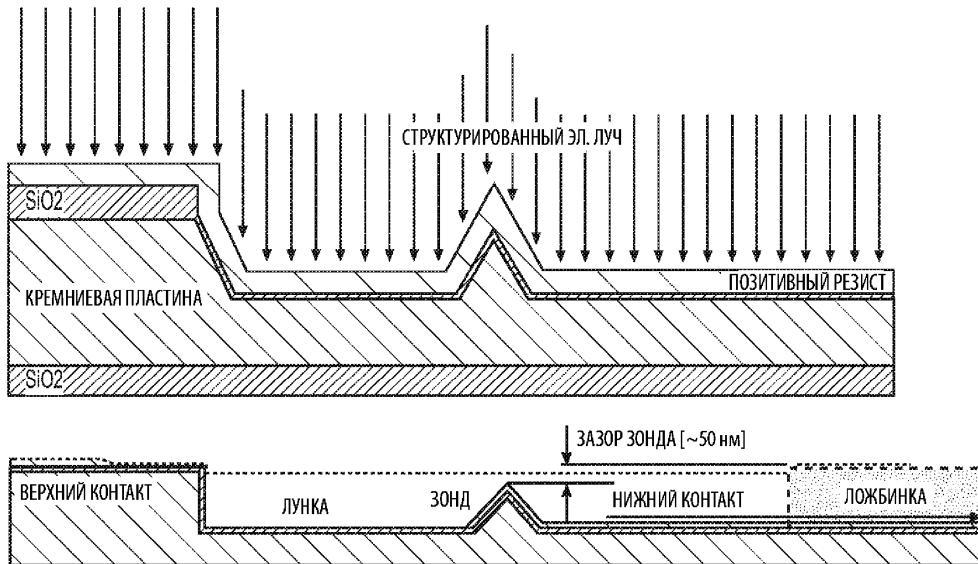
Фиг. 21K



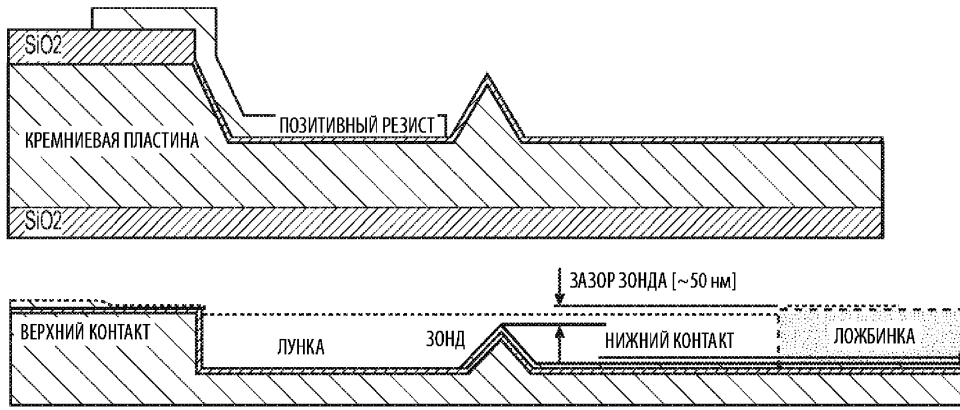
Фиг. 21L



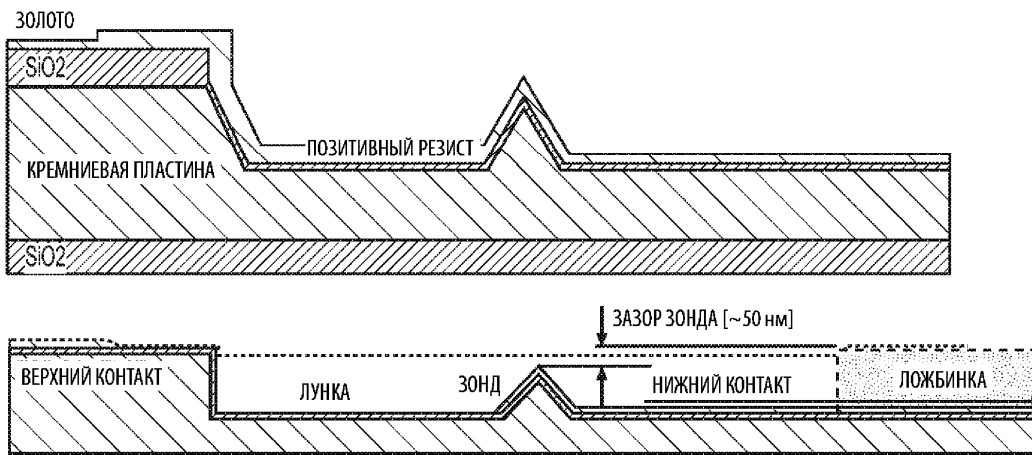
Фиг. 21M



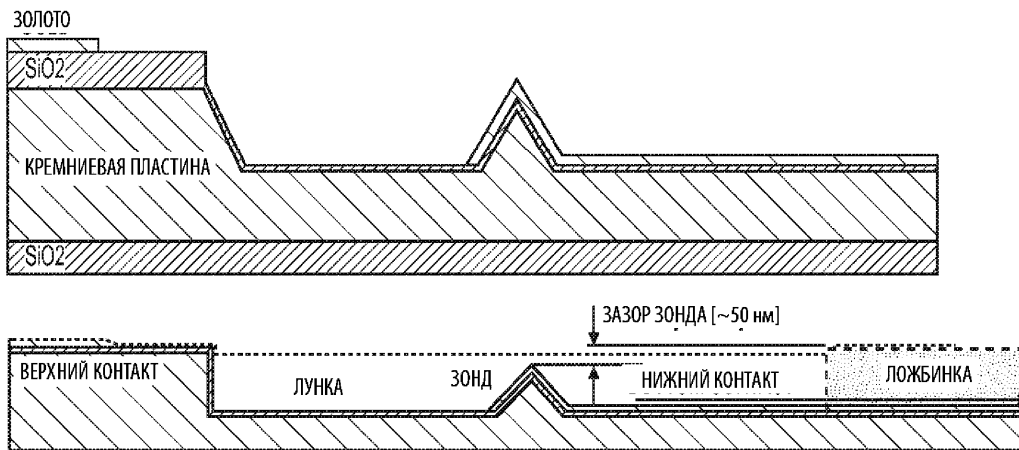
Фиг. 21N



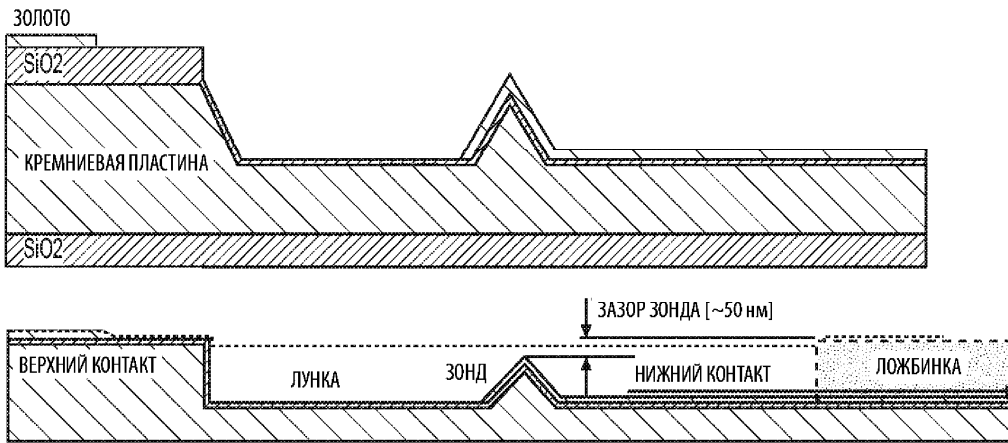
Фиг. 21O



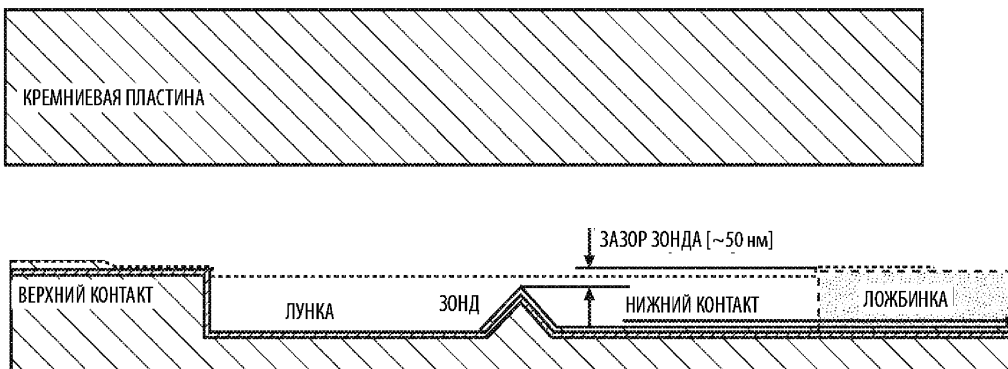
Фиг. 21P



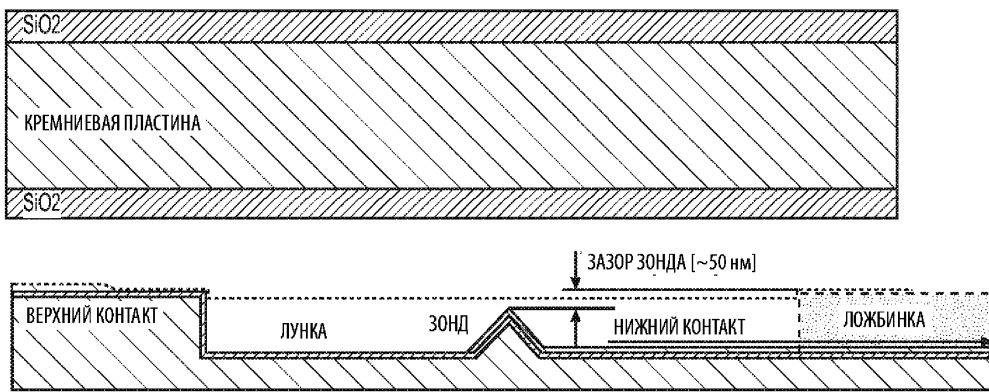
Фиг. 21Q



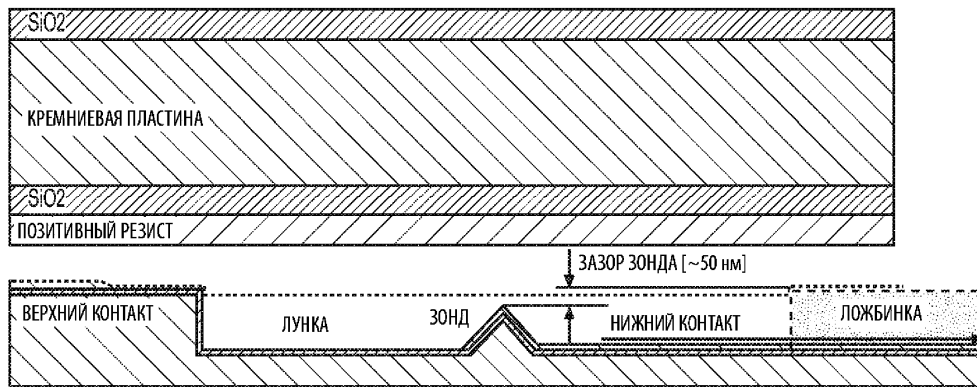
Фиг. 21R



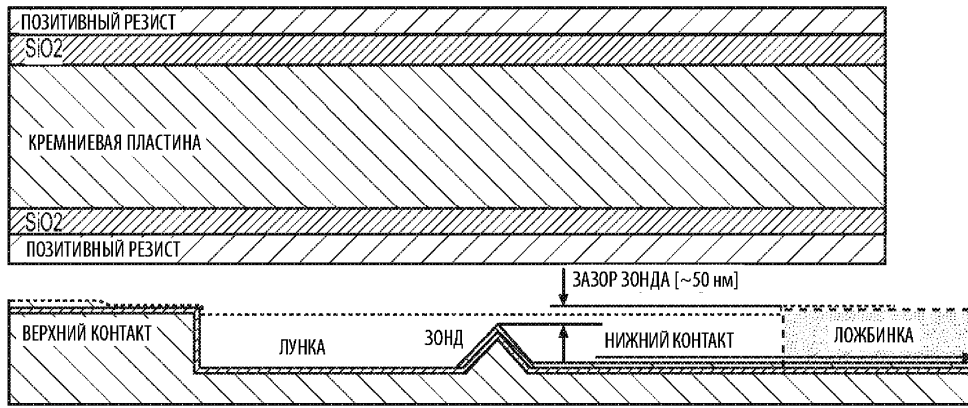
Фиг. 22A



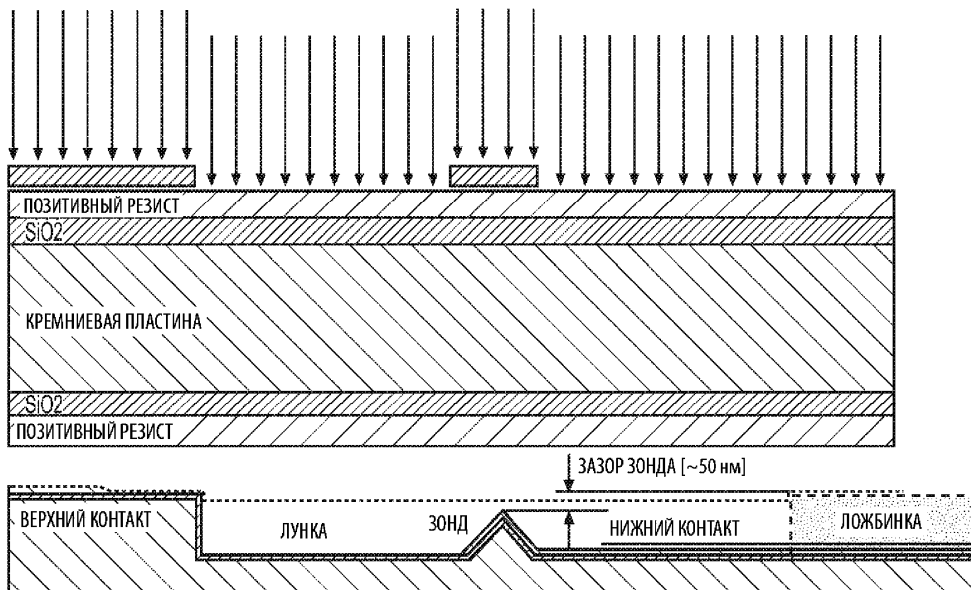
Фиг. 22B



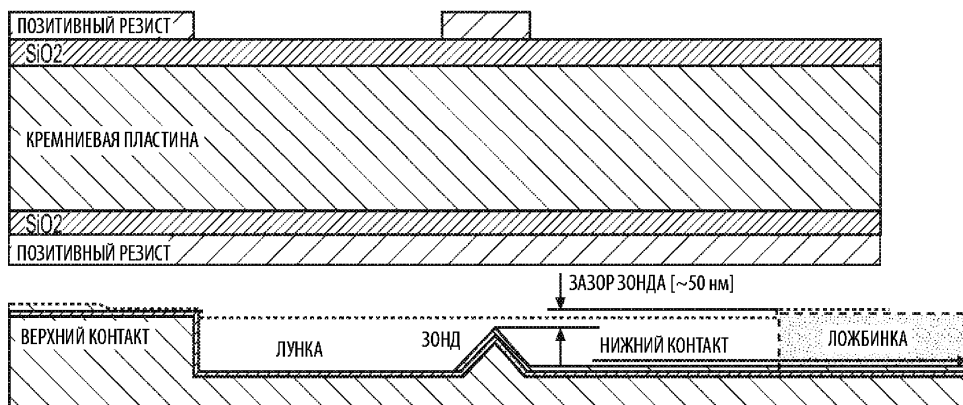
Фиг. 22C



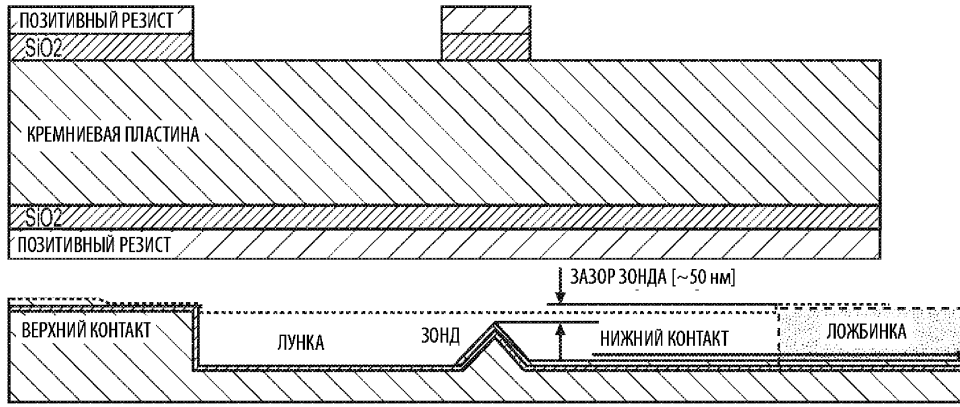
Фиг. 22D



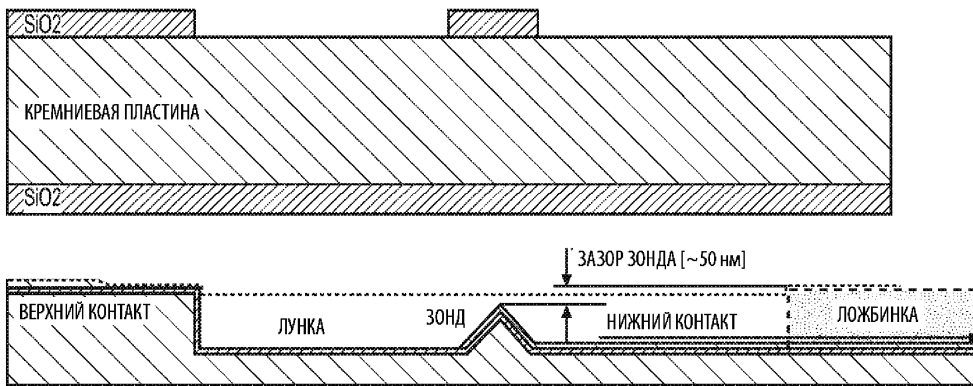
Фиг. 22E



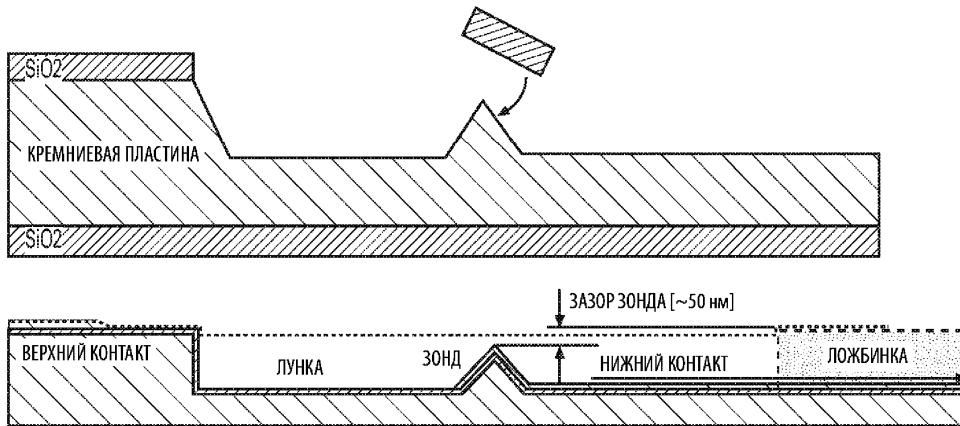
Фиг. 22F



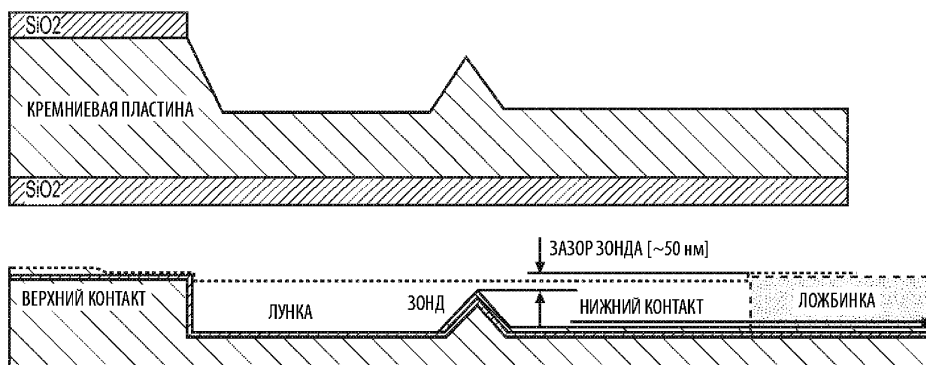
Фиг. 22G



Фиг. 22H

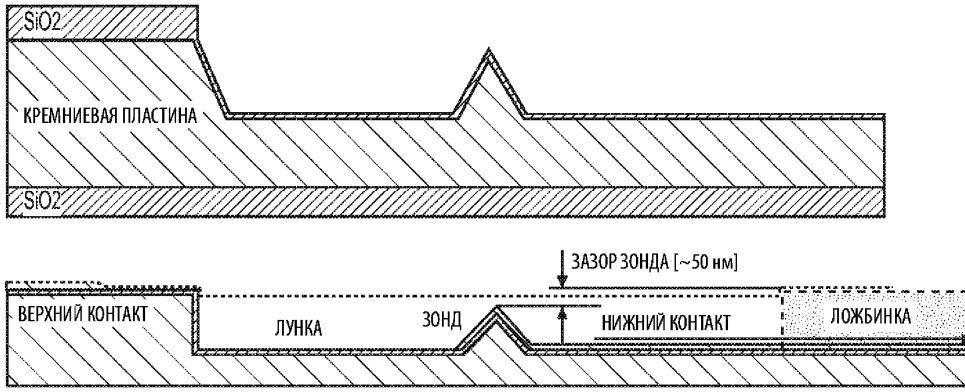


Фиг. 22I

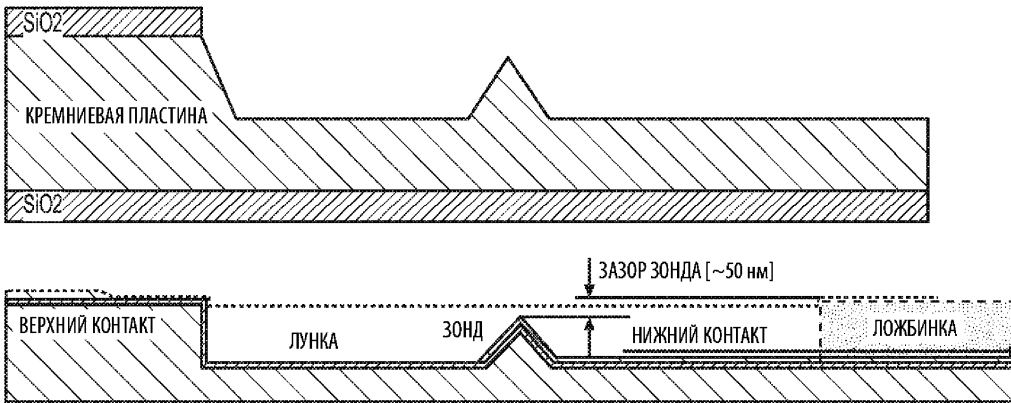


Фиг. 22J

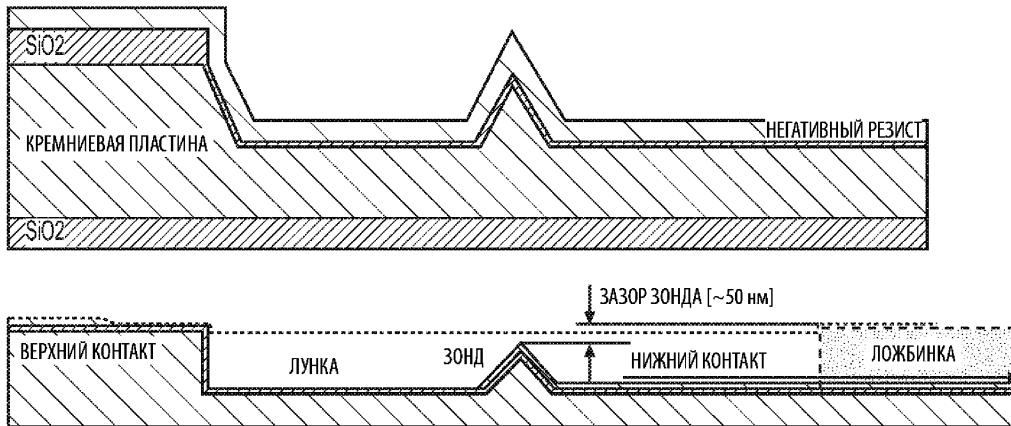




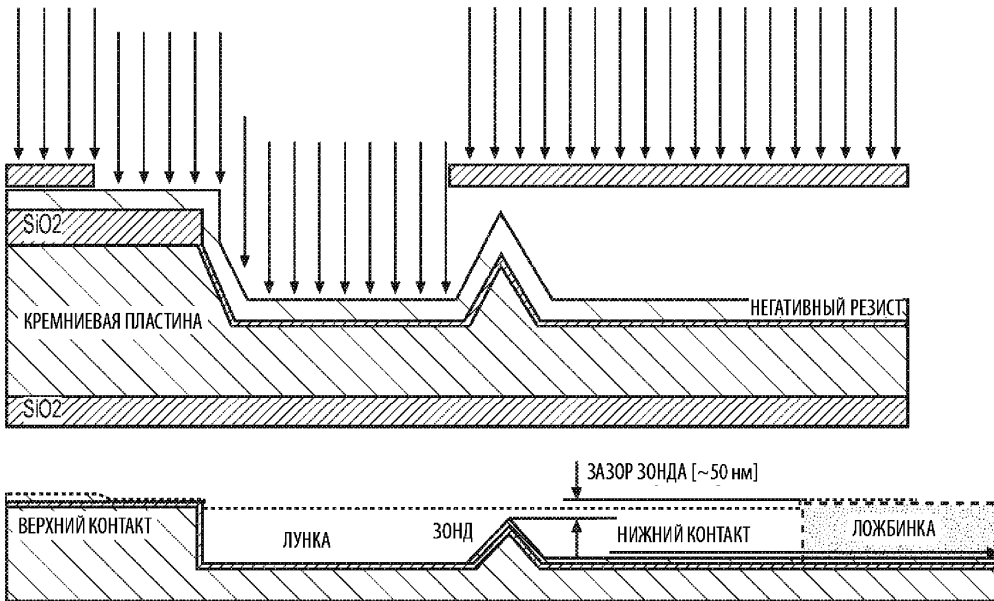
Фиг. 22К



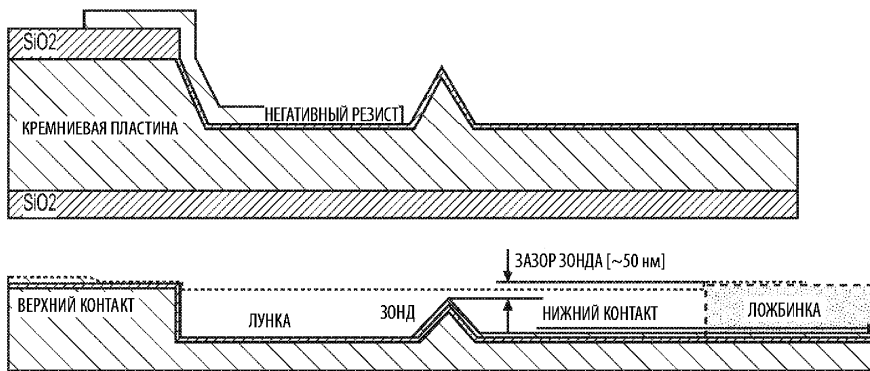
Фиг. 22L



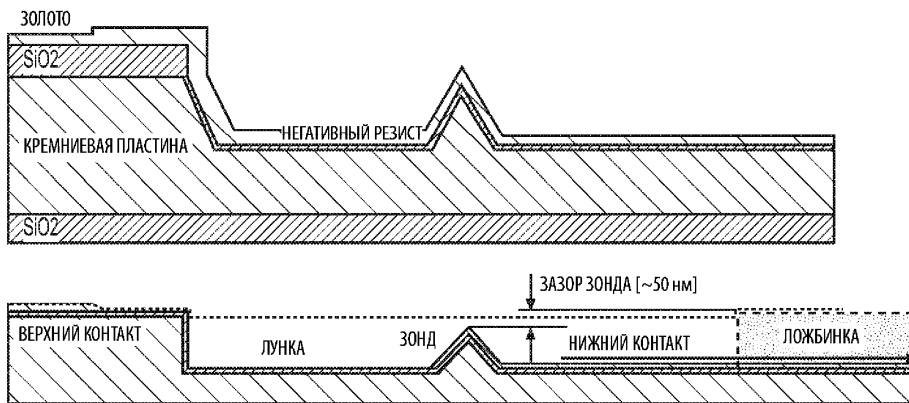
Фиг. 22М



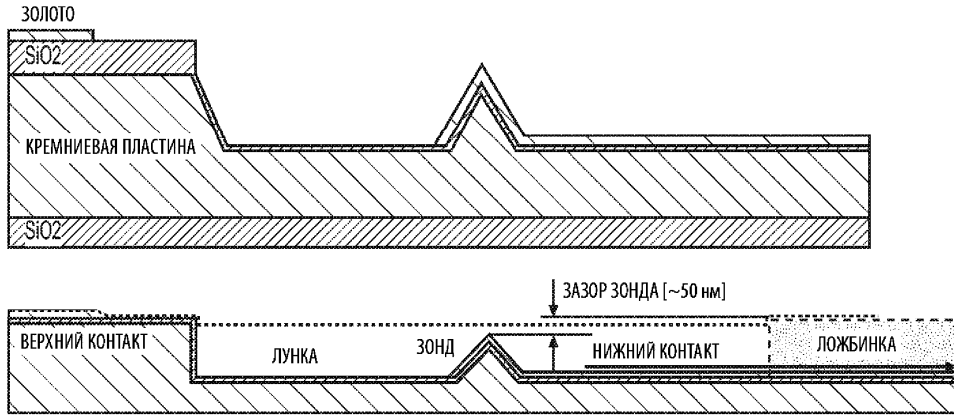
Фиг. 22N



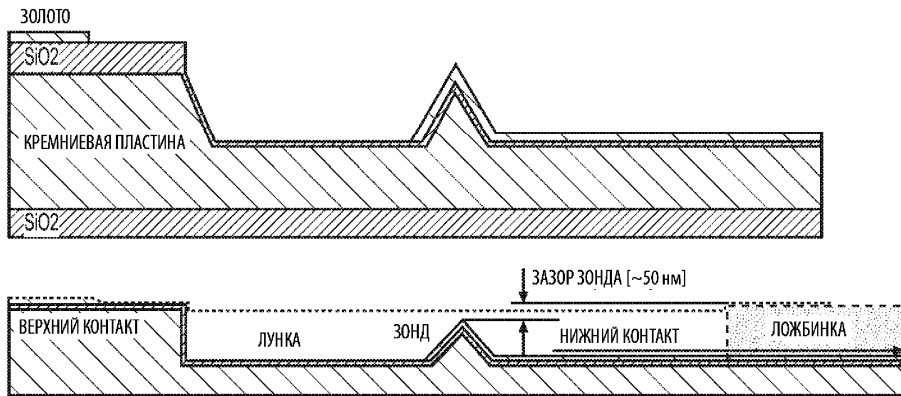
Фиг. 22O



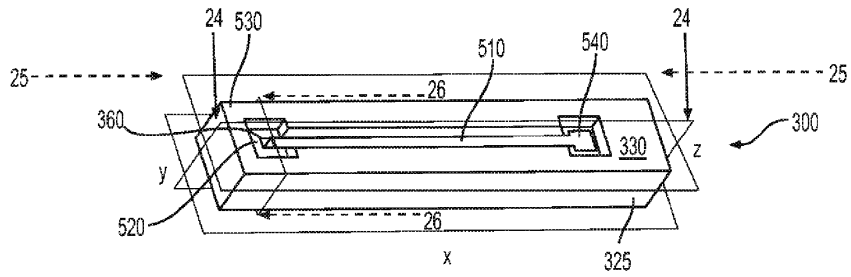
Фиг. 22P



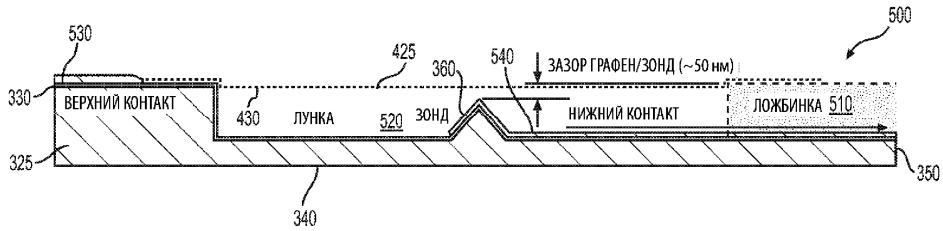
Фиг. 22Q



Фиг. 22R



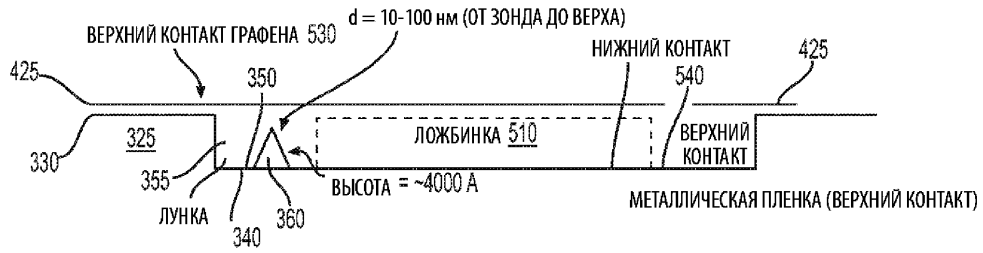
Фиг. 23



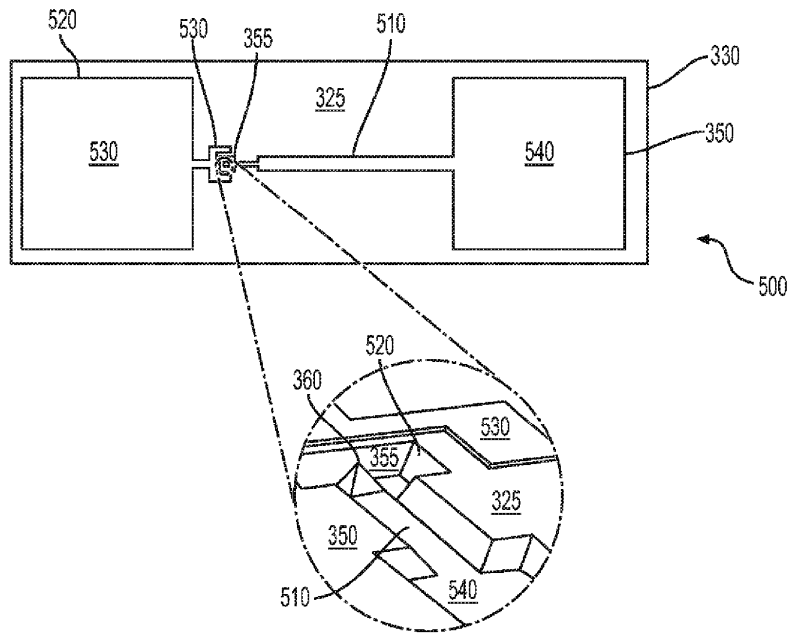
Фиг. 24



Фиг. 25



Фиг. 26



Фиг. 27

