

Что касается обратной передачи данных из системы наноустройств к внешним устройствам, то эта задача сложнее, чем ввод информации в наносистему, поскольку передающие устройства сильно ограничены в энергии. По-видимому, в общем случае наиболее приемлемым решением будет использование микропроводников, но выбор канала передачи сигналов зависит от требуемой пропускной способности.

**Заключение.** В настоящее время технология ещё только делает первые шаги в направлении создания молекулярных функциональных и вычислительных устройств. Тем не менее мы знаем, что такие устройства могут быть созданы. В этом докладе рассмотрены некоторые общие вопросы организации каналов связи в технических наносистемах, что в определённой мере позволяет прогнозировать перспективы их развития.

#### Список использованных источников

1. Попов, В. Ю. ДНК наномеханические роботы и вычислительные устройства / В. Ю. Попов // Информационно-телекоммуникационные системы : Всерос. конкурс. отбор обзорно-аналит. ст. по приоритет. направлению, 2008. — 210 с.

УДК [[621.313::621.315]::537.21]-022.532

А. Л. Полюх, Г. В. Качкар

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи

### НАНОРАЗМЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ СВЯЗАННОГО ИОННОГО ТОКА

**Введение.** В настоящее время уже известно несколько типов действующих молекулярных приводов вращательного действия. Наиболее миниатюрная из известных конструкций электродвигателя состоит из единственной молекулы бутил-метил-сульфида, закреплённой атомом серы на медной подложке (рисунок 1) [1]. Известна также конструкция из 244 атомов, способная вращаться при поглощении световых квантов (рисунок 2) [2—4].

Эти конструкции, безусловно, являются важными достижениями на пути развития техники, но недостатком этих молекулярных двигателей является низкая степень контроля скорости вращения и угла поворота ротора. Скорость вращения таких устройств контролируется косвенно — по температуре, величине протекающего тока или интенсивности светового потока. В силу этого такие приводы могут использоваться в транспортных машинах, но возможности их применения в технологических системах ограничены.

Мы хотим предложить конструкцию электродвигателя несколько большего размера (диаметр ротора 10—20 нм, размер всего устройства — до 100 нм). Отличительной особенностью такого привода будет возможность точного отчёта угла поворота, поскольку этот угол однозначно связан с количеством проходящих через систему элементарных зарядов, которое можно точно подсчитывать и регулировать.

**Основная часть.** Ионный ток представляет собой направленное движение электрических зарядов, ассоциированных с молекулярными носителями (ионами). Обычно при этом предполагается, что движение молекулярного или атомного иона происходит в среде, допускающей его более или менее свободное перемещение, однако возможны и другие варианты. Для существования тока принципиально важен только факт переноса зарядов через некоторую поверхность, при этом детали движения самих частиц вещества не имеют принципиального значения.

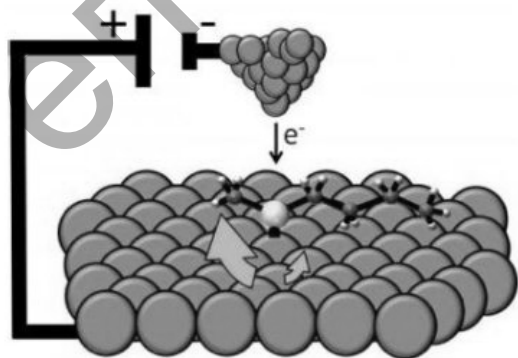


Рисунок 1 — Самый маленький электродвигатель

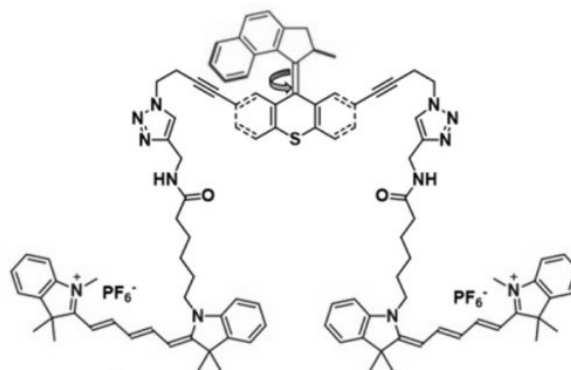


Рисунок 2 — Молекула с пропеллером

В частности, мы рассмотрим случай, когда электрический заряд связан с достаточно крупной частицей вещества, которую можно рассматривать как очень крупный ион, которая неподвижна в пространстве, т. е. не может иметь поступательного перемещения, но может вращаться. При этом всё же возможен перенос локализованного заряда на некоторое расстояние — за счёт поворота частицы (ротора) вокруг фиксированной оси вращения. Благодаря этому заряд на поверхности частицы может перемещаться от одного электрода (истока) ко второму (стоку) — это есть не что иное, как протекающий между электродами ток. Если это перемещение заряда происходит во внешнем электрическом поле, то при этом будет совершаться определённая работа, которая может быть полезно употреблена, в частности для преодоления сил трения при вращении ротора и соединённых с ним органов машины.

В данном случае процесс переноса заряда отличается от свободного движения молекулярных ионов, но имеет и некоторое сходство с ним. Все силовые и энергетические характеристики двигателя будут определяться тем фактом, что ток определённой величины протекает между точками с определённой разностью потенциалов. При этом вся полезная работа будет определяться изменением потенциала между двумя точками окружности ротора, в которых происходит, соответственно, эмиссия и снятие избыточного заряда. Падение потенциала на других участках цепи будет определять величину бесполезных потерь энергии.

*Конструкция микроэлектродвигателя на связанном ионном токе.* Электростатические двигатели различных конструкций известны уже давно. В том числе существуют демонстрационные модели, в которых ротор из диэлектрического материала вращается между электродами с высоким положительным и отрицательным потенциалом за счёт переноса на поверхность заряда посредством коронного разряда либо с ионами воздуха, и последующего движения зарядов вместе с поверхностью ротора в электростатическом поле электродов. Наше предложение отличается в основном тем, что позволит получить очень миниатюрную работоспособную конструкцию с достаточными силовыми параметрами для практического применения.

Ротор двигателя в простейшем случае может представлять собой сферическую наночастицу. Существенным является то, что материал ротора должен обладать электроизолирующими свойствами, т. е. иметь высокое сопротивление перемещению электрических зарядов. В качестве материала для ротора можно использовать, например, сферическую каплю стекловидного диэлектрика.

Ротор должен быть закреплён в пространстве и свободно вращаться вокруг фиксированной оси. Одним из возможных вариантов будет подвеска ротора на упругих молекулярных нитях. Возможны также варианты с выращиванием структуры ротора на молекулярной нити либо тонкой нанотрубке.

Внешний слой материала ротора должен обладать хорошими изолирующими свойствами, но на его поверхности должны быть созданы (путём легирования или осаждения атомов либо молекул) несколько обособленных электродов — небольших областей с достаточно высокой проводимостью, способных легко принимать и отдавать электроны, выполняющих роль потенциальных «карманов» для избыточных зарядов.

Рядом с ротором (вблизи его экваториальной плоскости) должен располагаться электрод — источник электронов. Этот электрод должен иметь достаточно высокий отрицательный потенциал и остриё с настолько малым радиусом, чтобы могло осуществляться прямое туннелирование электронов через вакуумный промежуток между остриём и ближайшим участком поверхности ротора.

Во время нахождения одной из легированных областей на поверхности ротора вблизи острия отрицательного электрода один или несколько электронов с него могут туннелировать в потенциальный «карман» на поверхности. Далее между отрицательным электродом и одноимённо заряженной областью на поверхности ротора будет действовать сила отталкивания, которая (в силу невозможности прямого прохождения зарядов через изолирующее вещество ротора) приведёт к его повороту на некоторый угол (до  $180^\circ$ ). При этом будет совершена работа, равная произведению величины перемещённого заряда на разность внешних потенциалов.

После поворота ротора и отдаления «кармана» с избыточным зарядом от отрицательного электрода лишний электрон надо убрать, чтобы обеспечить возможность повторения цикла при дальнейшем вращении ротора. Мы считаем, что приемлемым вариантом может быть постепенная утечка заряда через вещество ротора и далее через опоры. При этом сопротивление вещества вблизи поверхности ротора должно быть достаточно большим, чтобы заряд удерживался на поверхности достаточно долгое время для поворота ротора на определённый угол; однако после этого заряд должен относительно быстро покидать ротор. Для этого структура ротора должна быть неоднородной: внешний слой должен обладать очень высоким сопротивлением, внутренняя же область ротора и его опоры должны обладать достаточной проводимостью (на 2-3 порядка выше проводимости изолирующего слоя), что позволит электронам покидать объём ротора за приемлемое время.

*Упрощённая конструкция двигателя.* На начальном уровне развития нанотехнологии можно предложить более простые конструкции, которые легче реализовать, хотя их функциональные возможности будут ниже. Можно взять однородную сферическую наночастицу без специальной внутренней структуры из вещества с достаточно высоким сопротивлением (диэлектрика с узкой запрещённой зоной, в котором появление носителей заряда всё же возможно из-за внутренней термической или фотоионизации, но их концентрация настолько мала, что среднее по времени эффективное удельное сопротивление вещества в объёме частицы составляет порядка  $10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ).

Если такую частицу закрепить на оси вращения, а рядом разместить электрод с тонким остриём, то при подаче достаточного отрицательного потенциала на электрод частица начнёт вращаться. Скорость вращения будет сильно зависеть от свойств частицы-ротора, в первую очередь от её проводимости, но эффект, по-видимому, будет проявляться в широком диапазоне значений проводимости (если говорить точнее, то, в силу очень малого объёма вещества, здесь надо вести речь не о постоянной проводимости,

а о частоте спонтанного или вынужденного появления носителей заряда в данном объёме вещества). Для частоты вращения  $10^6$  об./с оптимальным будет время утечки избыточного заряда с поверхности ротора порядка  $10^{-7}$  с, для чего необходимо появление примерно  $10^8$  свободных носителей заряда во всём объёме ротора за секунду, или  $10^4 \dots 10^5$  носителей заряда в  $1 \text{ нм}^3$  вещества за секунду. Такая частота появления свободных зарядов в единице объёма может быть обеспечена только внутренней термоионизацией, поэтому вещество по своим свойствам должно быть более близким к полупроводникам с относительно широкой запрещённой зоной, нежели к чистым диэлектрикам, и иметь удельное сопротивление порядка  $10^3 \dots 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , что примерно соответствует значению удельного сопротивления чистого кремния при  $0^\circ\text{C}$ .

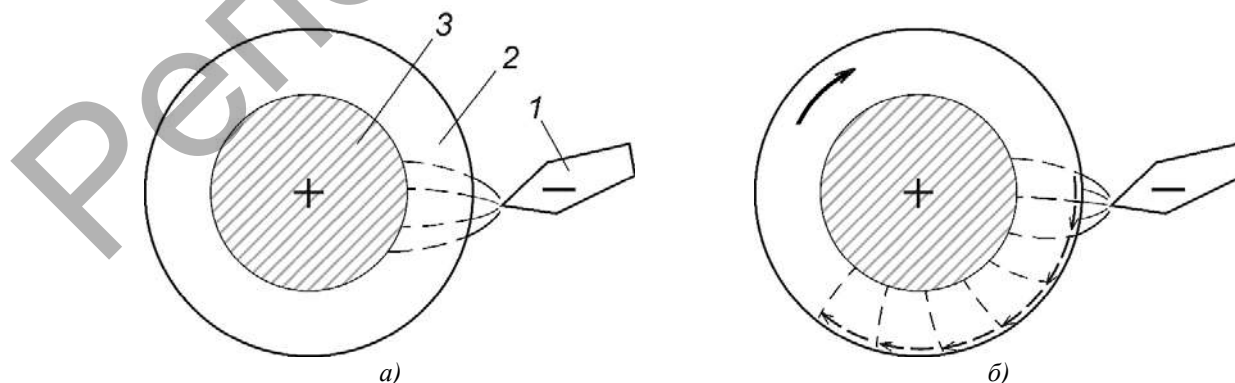
При меньших частотах вращения ротора удельное сопротивление вещества должно быть пропорционально увеличено (говоря более точно, должна быть уменьшена частота появления свободных носителей заряда в единице объёма), что потребует перехода от полупроводников к легированным диэлектрикам с шириной запрещённой зоны  $1,2 \dots 1,5 \text{ эВ}$  [5].

*Демонстрационная модель.* Некоторые свойства рассматриваемой конструкции можно экспериментально изучить на её увеличенной модели, что позволит обойтись без специального лабораторного оборудования для исследований в наномасштабах. Детали механизма переноса заряда при этом могут существенно зависеть от масштаба, но общий принцип действия устройства сохранится, и можно будет провести некоторые количественные оценки, а также экспериментально обнаружить и исследовать явления, наличие которых прямо не связано с масштабом модели.

Например, при любом масштабе системы должно экспериментально обнаруживаться такое специфическое для неё явление, как существенная зависимость электропроводности ротора от скорости его вращения. Это обусловлено тем, что при вращении ротора в переносе зарядов в пределах его объёма участвует не только обычный механизм электропроводности вещества, но и процесс переноса связанных зарядов вдоль поверхности ротора вместе с этой поверхностью, который мы назвали связанным ионным током. Этот ток, по сути, не отличается от других видов тока и вносит заметный вклад в общую проводимость ротора за счёт того, что позволяет избыточным зарядам быстро распространяться на значительную площадь боковой поверхности ротора, таким образом в несколько раз увеличивает площадку, через которую течёт обычный ток проводимости, за счёт чего электрическое сопротивление снижается (рисунок 3). Это снижение общего сопротивления системы при вращении ротора должно легко обнаруживаться независимо от масштаба модели, что позволит проводить косвенное измерение скорости вращения по величине протекающего тока или потенциалу, в том числе и для устройств с размерами порядка десятков нанометров.

Помимо этого, при закреплении ротора на упругой нити в системе могут возникать длиннопериодические крутильные колебания, длительность которых зависит от соотношения упругости нити и других силовых факторов, и которые в свою очередь могут быть обнаружены по периодическим колебаниям сопротивления системы и величины протекающего тока, что позволит с помощью простейшего лабораторного оборудования наблюдать за процессами, протекающими в очень малых масштабах расстояний и времени. При несимметричном расположении электродов возможна также зависимость электрического сопротивления от направления вращения.

Для демонстрационной модели можно взять проводящий шарик диаметром  $5 \dots 10 \text{ мм}$  с покрытием из изолирующего вещества толщиной  $0,5 \dots 1 \text{ мм}$ , закрепить его на оси вращения (тонкой металлической спице либо проводящей нити) и подвести к нему на близкое расстояние остриё металлического электрода, на который подан отрицательный потенциал порядка  $5 \dots 10 \text{ кВ}$ . При соответствующем значении удельного сопротивления оболочки шарика он начнёт вращаться, когда электрод приблизится к нему на расстояние, достаточное для возникновения коронного разряда. Можно оценить, что для вращения с частотой  $10 \text{ об./с}$  удельное сопротивление внешнего слоя вещества шарика должно составлять порядка  $10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .



1 — отрицательный электрод; 2 — слой вещества с высоким сопротивлением; 3 — проводящая сердцевина (положительный электрод)

Рисунок 3 — Путь протекания тока *a* — при неподвижном роторе; *б* — при вращении ротора (в этом случае сопротивление уменьшается)

Примечание. Стрелками показано направление переноса зарядов вместе с поверхностью вращающегося ротора.

**Заключение.** Мы рассмотрели одну из самых простых конструкций миниатюрного электростатического двигателя, пригодного для использования в устройствах субмикронного размера. Работоспособность устройства в основном определяется величиной проводимости вещества ротора, которая определяет эффективное время утечки зарядов с поверхности. Для исследования поведения предложенного устройства можно использовать более крупномасштабную модель при соответствующем изменении удельного сопротивления, которое должно быть обратно пропорционально частоте вращения.

#### Список использованных источников

1. Experimental Demonstration of a Single-Molecule Electric Motor / H. L. Tierney [et al.] // Nature Nanotechnology. — 2011. — № 6. — p. 625—629.
2. Unimolecular Submersible Nanomachines. Synthesis, Actuation, and Monitoring / V. García-López [et al.] // Nano Letters. — 2015, DOI: 10.1021.
3. Light-driven monodirectional molecular rotor / N. Koumura [et al.] // Nature. — 1999. — V. 401. — P. 152—155.
4. Toward a switchable molecular rotor / A. M. Schoevaars [et al.] // J. Org. Chem. — 1997. — V. 62. — P. 4943—4948.
5. Морозов, М. П. Физические основы микроэлектроники : конспект лекций / М. П. Морозов. — Рыбинск : РГАТУ им. Соловьёва, 2001. — 82 с.

УДК 513.82

А. А. Юдов, Е. А. Сирисько

Учреждение образования «Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина», Брест

### РЕДУКТИВНЫЕ ОДНОРОДНЫЕ ПРОСТРАНСТВА С ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ГРУППОЙ— ГРУППОЙ ЛИ ДВИЖЕНИЙ ШЕСТИМЕРНОГО ЕВКЛИДОВА ПРОСТРАНСТВА

**Введение.** В работе рассматриваются редуktивные однородные пространства  $H/G_i$ , где  $H$  — группа вращений шестимерного евклидова пространства  $R_6$ , а  $G_i$  — подгруппы Ли группы Ли  $H$ . Классификация всех связанных подгрупп Ли группы Ли  $H$  вращений пространства  $R_6$  с точностью до сопряженности имеется в [1]. Тем самым классифицированы с точностью до изоморфизма все однородные пространства со структурной группой  $H$ . Ставится задача среди всех таких однородных пространств выделить редуktивные однородные пространства.

**Основная часть.** Однородное пространство  $H/G_i$  называется редуktивным, если алгебра Ли  $\bar{H}$  группы Ли  $H$  распадается в прямую сумму подпространств:

$$\bar{H} = m + \bar{G}_i, \quad (1)$$

причем подпространство  $m$  инвариантно относительно  $ad\bar{G}_i$ , где  $ad\bar{G}_i$  — присоединенное представление алгебры Ли  $\bar{G}_i$ .

Для нахождения редуktивных дополнений используем следующий способ (опишем его на примере нахождения двенадцатимерного векторного подпространства  $m$ ). Пусть  $a_1$  — базис алгебры Ли  $\bar{G}_i$  группы Ли  $\bar{G}_i$ , принадлежащей группе Ли  $H$ . Рассмотрим девятимерное векторное подпространство  $m$  алгебры Ли  $\bar{H}$ , образованное векторами  $b_1, b_2, b_3, \dots, b_{12}$ , т. е.  $m = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_{12}\}$ . Для этого подпространства  $m$  потребуем выполнимость условия инвариантности относительно  $ada$ , т. е. выполнимость условий

$$[a, b_j] = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 + \dots + a_{12} b_{12}, j = 1, 2, 3, \dots, 12. \quad (2)$$

Систему (2) будем называть системой инвариантности пространства  $m$ , или просто системой инвариантности. Раскладывая левую и правую части по базису  $i_7, \dots, i_{21}$  алгебры Ли  $\bar{H}$ , получим систему инвариантности в виде системы алгебраических уравнений. Пусть, например,  $b_j = \beta_{j7} i_7 + \dots + \beta_{j21} i_{21}$ . Элементарными преобразованиями можно от базиса  $\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_{12}\}$  перейти к базису  $\{b'_1, b'_2, b'_3, \dots, b'_{12}\}$  с более простыми коэффициентами  $\beta_{jk}$ . Для этого придется рассмотреть 450 случаев. В данной работе представлен один из рассмотренных случаев. При этом система инвариантности упростится. Пусть система инвариантности решена, в итоге получены двенадцатимерные пространства  $m_1, \dots, m_p$ , инвариантные относительно  $ad\bar{G}_i$ . Среди этих пространств нужно выбрать такие, которые удовлетворяют условию (1). Такие пространства  $m_i$  и будут искомыми редуktивными дополнениями.

Рассмотрим однородное пространство  $H/G_6$ ,  $\bar{G}_6 = \{i_7, i_8, i_{12}\}$ ,  $a = \{i_7\}$ ,  $\bar{H} = \{i_7, \dots, i_{21}\}$ .