

# МИКРО- И НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА MICRO AND NANOSYSTEM TECHNOLOGY

УДК 681.586.7

## Емкостные датчики на основе нанотрубных суперконденсаторов

*Р.А. Браже, А.Ф. Савин*

*Ульяновский государственный технический университет*

## Capacitance-Type Sensors Based on Natotubular Supercapacitors

*R.A. Brazhe, A.F. Savin*

*Ulyanovsk State Technical University*

Предложена конструкция емкостного датчика, которая при сохранении высокой чувствительности позволяет сделать существенно миниатюрнее его чувствительный элемент – конденсатор. С этой целью использованы суперконденсаторы на электропроводящих и диэлектрических нанотрубках. Представленные расчеты показывают принципиальную возможность создания основанных на этом принципе емкостных датчиков давления и перемещения с чувствительностью на 5–6 порядков выше, чем у датчиков на классических углеродных нанотрубках. Датчики пригодны для применения в медицине, робототехнике и наноэлектронике.

*Ключевые слова:* емкостные датчики; датчики давления и перемещения; нанотрубки; суперконденсаторы.

The capacitance sensor design, which while preserving high sensitivity, would permit to make significantly more miniature its sensitive element – capacitor, has been proposed. For this purpose the super-capacitors on the electroconductive and dielectric nanotubes are used. The presented results show the principle opportunity of creating based on its principle capacitance sensors of pressure and displacement with 5 – 6 orders higher sensitivity than those ones based on the classical carbon nanotubes. The sensors are suitable for use in medicine, robot engineering and nanoelectronics.

*Keywords:* capacitance sensors; pressure and displacement sensors; nanotubes; supracrystalline nanotubes; super-capacitors.

**Введение.** Емкостные датчики, в частности датчики давления и перемещения, получили широкое распространение в различных системах управления и контроля. Актуальной задачей является уменьшение их геометрических размеров для встраивания в

объект измерения и использования в медицине, экологии, робототехнике, нанoeлектронике. В качестве материала для чувствительных элементов таких датчиков предлагается использовать углеродные нанотрубки (УНТ), имеющие уникальные механические, электрические, тепловые и химические свойства [1–3]. Наиболее простое устройство подобного типа – датчик микронапряжений, представляющий собой тензорезистор из хаотически ориентированных одностенных УНТ в полимерной пленке [1].

Чувствительность датчика давления (перемещения) можно значительно повысить, если гибкую электропроводящую пленку использовать в качестве подвижной пластины конденсатора (емкостной датчик). В работе [3] описан емкостной датчик, в котором подвижная пластина выполнена из УНТ диаметром 10–30 нм, осажденных на бумажную подложку размером 30×23 мм и подвергнутых последующему прессованию под давлением 5 кПа при температуре 90–100 °С в течение 20–30 с. Чувствительность  $S_P$  такого датчика при измерении давления составляет 17,3 пФ/кПа, а чувствительность  $S_D$  при измерении перемещения –  $0,93 \cdot 10^{-3}$  пФ/мкм. Чувствительность рассчитывается по формулам [3]  $S_P = \Delta C / P$ ,  $S_D = \Delta C / D$ , здесь  $\Delta C$ ,  $P$  и  $D$  – изменение емкости, давление и перемещение соответственно, причем  $\Delta C = \varepsilon_C C_0$ , где  $\varepsilon_C = \Delta C / C_0$  – относительное изменение исходной емкости  $C_0$ . Отметим, что чувствительность рассматриваемых датчиков пропорциональна их емкости.

Очевидно, что для повышения чувствительности емкостных датчиков целесообразно использовать суперконденсаторы со сверхбольшой емкостью. При этом такие суперконденсаторы должны иметь миниатюрные размеры, а также способность изменять свою емкость при внешнем воздействии на его пластины. Цель настоящей работы – разработка конструкции такого суперконденсатора, расчет его характеристик и обоснование возможностей его практической реализации.

**Конструкция и материалы.** В работах [4–6] показана возможность создания высокоэффективных суперконденсаторов на основе металлических и диэлектрических супракристаллических нанотрубок (СНТ). В элементарной ячейке супракристалла в узлах или центре может находиться не один атом, а симметрично организованный атомный комплекс [7–9]. Двумерные углеродные наноаллотропы супракристаллов вызывают интерес исследователей [10–12]. В отличие от графена и УНТ планарные супракристаллы и супракристаллические нанотрубки (рис.1) в зависимости от химического состава и характера гибридизации атомных орбиталей могут быть как электропроводящими, так и диэлектрическими. Это позволяет конструировать из таких нанотрубок цилиндрические конденсаторы и соединять их параллельно в большом количестве в суперконденсаторы.

Удельная емкость такого суперконденсатора равна [4, 5]

$$C_{уд} = n_2 \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln(D_2 / D_1)}, \quad (1)$$

где  $n_2$  – концентрация (на единицу площади) цилиндрических нанотрубных конденсаторов;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрической нанотрубки (для серы  $\varepsilon \approx 3,6 - 4,0$ );  $l$  – длина нанотрубок;  $D_1$  и  $D_2$  – диаметры внутренней и внешней металлических нанотрубок соответственно.

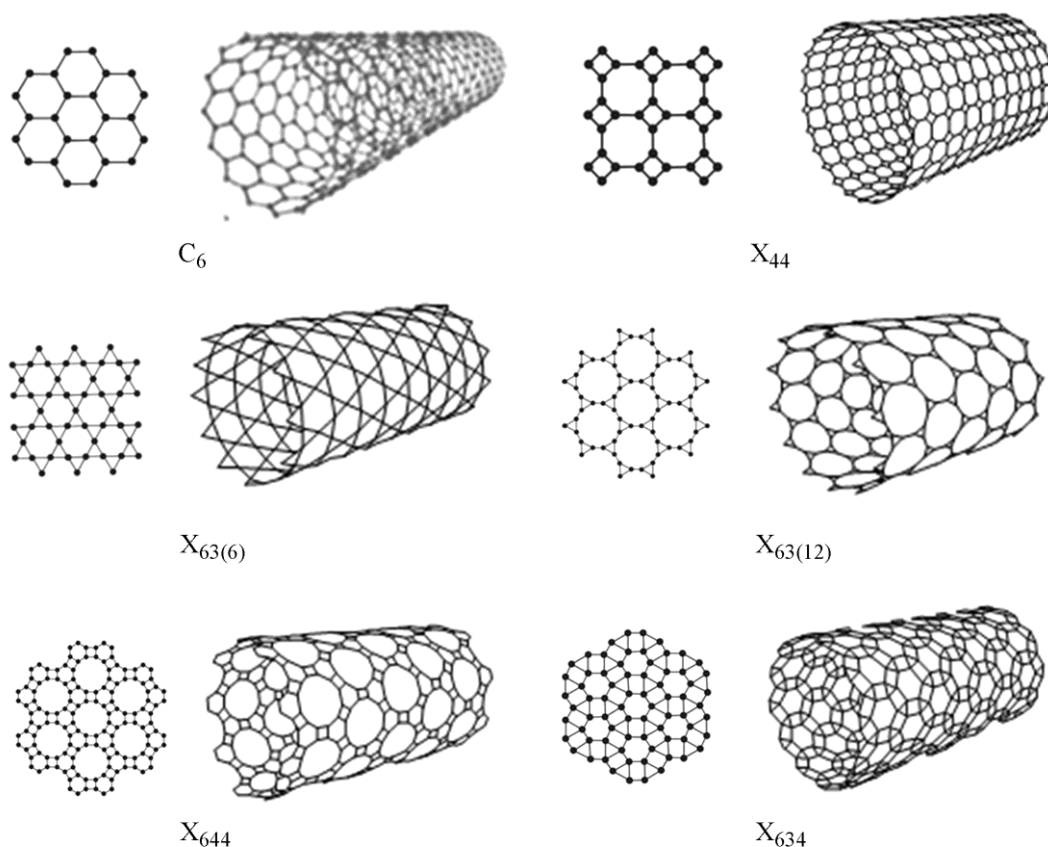


Рис. 1. Атомные модели фрагментов супракристаллических планарных (слева) и образованных из них нанотубулярных (справа) структур: X – символ химического элемента; С – графен и УНТ; индексы – типы правильных многоугольников, образующих структуру. Показаны только зигзагообразные трубки хиральности  $(n, 0)$

Предлагаемый емкостной датчик представляет собой конструкцию из параллельно соединенных цилиндрических нанотрубных конденсаторов, состоящих из поочередно вложенных друг в друга двух металлических (углеродных) и двух диэлектрических (серных) супракристаллических нанотрубок подходящего диаметра (рис.2). Внутренние электроды этих конденсаторов находятся в электрическом контакте с подвижной (гибкой) пластиной, а внешние – с неподвижной пластиной суперконденсатора.

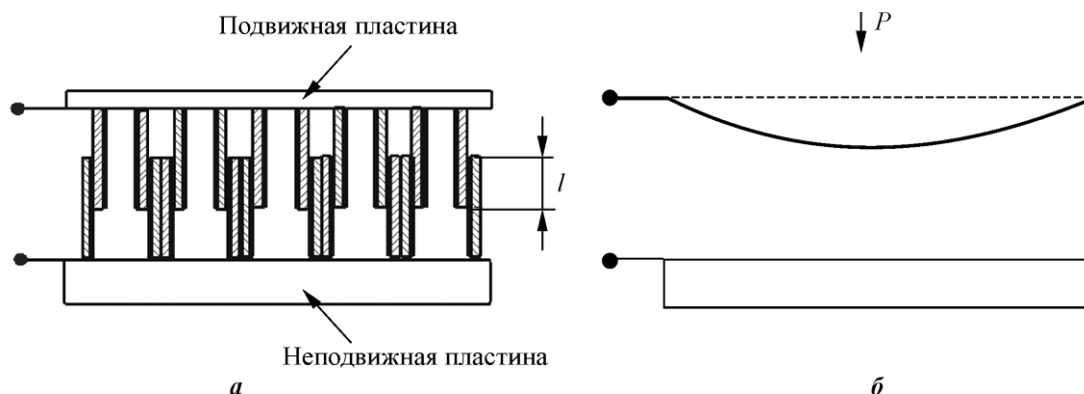


Рис. 2. Схема размещения конструктивных элементов (а) и схема прогиба под внешним давлением подвижной пластины (б) суперконденсатора для датчика давления (перемещения) на основе СНТ

Емкость суперконденсатора согласно выражению (1) равна

$$C_0 = n_2 \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l A}{\ln(D_2/D_1)}, \quad (2)$$

где  $A$  – площадь каждой из его пластин.

Поскольку  $\pi$ ,  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon$ ,  $n_2$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  – константы, то из (2) следует, что

$$\epsilon_C = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta A}{A}, \quad (3)$$

где  $\Delta l$  и  $\Delta A$  – соответственно среднее изменение рабочей длины цилиндрических конденсаторов и изменение площади подвижной пластины суперконденсатора при воздействии на нее давления.

Величина  $\epsilon_C$  в (3) определяется, главным образом, упругими свойствами подвижной пластины, которые могут быть значительно хуже, чем у датчиков с нанокompозитной подвижной пластиной. Тем не менее выигрыш в чувствительности датчиков давления (перемещения) на основе суперконденсаторов за счет их большой емкости может быть настолько огромным, что позволит решить проблему их миниатюризации.

**Результаты и возможности их практической реализации.** Отношение чувствительностей предлагаемого и описанного в [3] датчиков имеет вид

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\epsilon_{C1} C_{01}}{\epsilon_{C2} C_{02}}.$$

При одинаковой площади  $A$  пластин обоих конденсаторов

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\epsilon_{C1} C_{уд}}{\epsilon_{C2} \epsilon_0} d,$$

где  $d = 1,5 - 2,0$  мм – расстояние между пластинами датчика в [3].

В таблице приведены результаты расчетов параметров емкостных датчиков. В качестве примера взяты цилиндрические конденсаторы со структурой  $C_{44}(7,0)-S_{63(12)}(6,0)-C_{44}(5,0)-S_{63(12)}(10,0)$ , позволяющие создать суперконденсатор с удельной емкостью  $C_{уд} = 1650$  мФ/мм<sup>2</sup> [5]. Площади пластин сравниваемых датчиков одинаковы и равны  $30 \times 23$  мм. Параметры для датчика на основе СНТ являются расчетными.

#### Сравнение чувствительности емкостных датчиков

Датчик	$S_P$	$S_D$	$\left(\frac{S_1}{S_2}\right)\left(\frac{\epsilon_{C1}}{\epsilon_{C2}}\right)^{-1}$
на УНТ [3]	17,3 пФ/кПа	$0,93 \cdot 10^{-3}$ пФ/мкМ	$2,8 \cdot 10^9$
на СНТ	48,4 мФ/кПа	2,6 мкФ/мкМ	

Упругие характеристики гибкой пластины суперконденсатора, даже если она выполнена из электропроводящего нанополимера, но нагружена «лесом» из нанотрубок, могут быть значительно хуже, чем у свободной нанокompозитной полимерной пленки. Действительно, модуль изгиба пластины пропорционален производной по кривизне изгиба момента изгибающей силы, действующей на единицу поперечной длины изгибаемого

слоя. Если толщина слоя увеличится в несколько раз, то модуль изгиба уменьшится почти на порядок. Допустим, что он уменьшится на 3–4 порядка, тогда, как следует из таблицы, чувствительность емкостных датчиков на основе суперконденсаторов из СНТ должна быть на 5–6 порядков выше по сравнению с их классическими аналогами. Это позволяет резко уменьшить габариты датчика за счет уменьшения площади его пластин.

Более сложные, чем графен, супракристаллические планарные структуры и более сложные, чем УНТ, супракристаллические нанотубулярные структуры еще не синтезированы. Однако их термодинамическая устойчивость при комнатной температуре обоснована результатами математического моделирования и численными расчетами [7–12]. При наличии к ним практического интереса успешный синтез этих структур – вопрос недалекого будущего. Тем не менее предложенная конструкция суперконденсатора (см. рис.2) для емкостного датчика, хоть и не в оптимальном варианте, уже сейчас может быть реализована на классических УНТ разного диаметра с воздушным зазором между ними. Разработки в области создания двумерных диэлектриков [13] позволяют надеяться и на создание нанотубулярных диэлектрических структур.

Требуемая компоновка нанотрубок определенного типа, создание их контактов с пластинами суперконденсатора и другие проблемы также находятся в пределах возможностей современных нанозлектромеханических технологий [14].

**Заключение.** Проблема создания миниатюрных чувствительных элементов для емкостных датчиков, в частности датчиков давления и перемещения, пригодных для использования в биомедицинских технологиях, робототехнике и нанозлектронике, может быть решена путем применения нанотрубных суперконденсаторов. При этом их чувствительность не только не уменьшается, но и может быть увеличена на несколько порядков. Ее можно варьировать в широких пределах путем подбора диаметров нанотрубок, их длины и химического состава диэлектрических нанотрубок, от которого зависит диэлектрическая проницаемость среды между обкладками нанотрубных конденсаторов.

В частности, для обеспечения максимальной емкости суперконденсатора согласно выражению (2) требуется, чтобы отношение  $D_2/D_1$  было как можно меньше. В работе [4] представлены результаты расчета геометрических параметров металлических (углеродных) и диэлектрических (серных) супракристаллических нанотрубок. В зависимости от симметрии межатомных связей и хиральности диаметры металлических нанотрубок варьировались от 0,66 до 2,00 нм, а диаметры диэлектрических – от 1,03 до 3,27 нм с диапазоном изменения отношения  $D_2/D_1$  от 1,40 до 3,03. Длина нанотрубок составляла 50 мкм. Однако гораздо более важным является тот факт, что при потенциальной возможности сохранить чувствительность емкостного датчика на уровне известных аналогов в предлагаемом датчике площадь пластин конденсатора можно уменьшить на 6 порядков, сократив его линейные размеры с  $30 \times 23$  мм до  $30 \times 23$  мкм.

Для практической реализации данной задачи и достижения оптимальных результатов целесообразно сосредоточить усилия на синтезе супракристаллических нанотрубок, которые в зависимости от химического состава, типа гибридизации атомных орбиталей и хиральности могут быть как электропроводящими, так и диэлектрическими. Технические проблемы, связанные с созданием предложенных емкостных датчиков, решаются в рамках современных нанозлектромеханических технологий.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России №2014/232 (проект №1742).*

*Литература*

1. *Dharap P., Li Z., Nagarajaiah S., Barrera E.* Nanotube film based on SWNT for microstrain sensing // *Nanotechnology*. – 2004. – Vol. 15. – No. 3. – P. 379–382.
2. CNT-based displacement sensor / *Kh.S. Karimov, M. Saleem, Z.M.Karieva et al.* // *International J. of Materials Research*. – 2012. – Vol. 107. – No. 7. – P. 897–900.
3. Novel pressure and displacement sensor, based on carbon nanotubes / *Kh.S. Karimov, Kh. Sulaiman, A. Zubair et al.* // *Chin. Phys. B*. – 2015. – Vol. 24. – No. 1. – P. 018801–018804.
4. *Браже Р.А., Савин А.Ф.* Супракристаллические суперконденсаторы // *Радиоэлектронная техника: межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В.А. Сергеева*. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – С. 161–168.
5. *Браже Р.А., Савин А.Ф.* Математическое моделирование и численные расчеты супракристаллических суперконденсаторов и суперсоленоидов для сверхнизкочастотной радиоэлектроники // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2013. – Т. 16. – № 4. – С. 58–62.
6. *Савин А.Ф.* Программа для численного расчета супракристаллических суперконденсаторов // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20114618165, РФ, 12.08.2014.*
7. *Браже Р.А., Каренин А.А.* Математические модели двумерных супракристаллов // *Тр. Седьмой Междунар. конф. «Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов» (Ульяновск, 2-5 фев. 2009 г.)*. – 2009. – С. 51–52.
8. *Браже Р.А., Каренин А.А.* Компьютерное моделирование физических свойств супракристаллов // *Изв. вузов. Поволжский регион. Физ.-мат. науки*. – 2011. – № 2(18). – С. 105–112.
9. *Браже Р.А., Каренин А.А.* Компьютерное моделирование электрических свойств супракристаллических нанотрубок // *Изв. вузов. Поволжский регион. Физ.-мат. науки*. – 2011. – № 3(19). – С. 131–139.
10. *Enyashin A.N., Ivanovskii A.L.* Graphene allotropes // *Phys. Status Solidi (b)*. – 2011. – Iss.8. – P. 1879–1883.
11. *Беленков Е.А., Грешняков В.А.* Классификация структурных разновидностей углерода // *ФТТ*. – 2013. – Т. 55. – Вып. 8. – С. 1640–1650.
12. *Подливаев А.И., Опенов Л.А.* Кинетическая устойчивость октаграфена ФТТ. – 2013. – Т. 55. – Вып. 12. – С. 2464–2467.
13. *Osada M., Sasaki T.* Two-dimensional dielectric nanosheets: novel nanoelectronics from nanocrystal building blocks // *Advanced Materials*. – 2012. – Vol. 24. – Iss.2. – P. 210–218.
14. *Лозовик Ю.Е., Попов А.М.* Свойства и нанотехнологические применения нанотрубок // *УФН*. – 2007. – Т. 177. – № 7. – С. 786–799.

Статья поступила  
после доработки 11 августа 2015 г.

**Браже Рудольф Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Ульяновского государственного технического университета. *Область научных интересов:* нелинейные волновые процессы, мета- и наноматериалы, математическое моделирование физических, биологических и социально-экономических явлений. **E-mail: brazhe@ulstu.ru**

**Савин Андрей Федорович** – аспирант кафедры физики Ульяновского государственного технического университета. *Область научных интересов:* наноматериалы, радиоэлектроника, математическое моделирование и численные расчеты элементов систем управления.