




НАНОКОМУНИКАЦИОННИ УСТРОЙСТВА И МРЕЖИ

Лекция 8.
Радио с нанотръба
Доц. д-р инж. Галя Маринова
2022 г.

Интегриран радиоприемник в една нанотръба



Представена е конструкцията на напълно функционален, напълно интегриран радиоприемник в една единствена въглеродна нанотръба.

Нанотръбата служи едновременно за:

- Всички основни компоненти на радиото: **антена, настройваем лентов филтър, усилвател и демодулатор.** Постояннотоков източник, като този от батерия, захранва радиото.

Използват се носещите честоти в комерсиалната скала **40-400 MHz** и едновременно техниките на **честотна и амплитудна модулация**

- Демонстрирано е успешно приемане на музика и глас.



Блокова схема на традиционнно радио


Четири основни компонента на радиото, антена, тунер, усилвател, и демодулатор могат да се имплементират в една въглеродна нанотръба.




Цялостна система на радио в една нанотръба

K. Jensen, J. Welton, H. Garcia, and A. Zettl*, Nanothe Radio, Department of Physics, Center of Integrated Nanoscale Systems, University of California at Berkeley, Berkeley, California 94720, and Materials Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, October 2, 2007






Нови приложения на радиото от нанотръба




Днес, технологията основана на силиция и силициевите транзистори бързо достига своите **твърди физически граници**, и бъдещият прогрес изисква наноматериали, например въглеродните нанотръби.

Комбинирайки много от уникалните електрически и механични свойства на въглеродните нанотръби, авторите от **Калифорнийския университет в Бъркли** създават напълно функционален радиоприемник, от една единствена въглеродна нанотръба, на порядъци по-малък от съществуващите радиа.

Радиото от нанотръба може да доведе до радикално нови приложения, като например радиоуправляеми устройства достатъчно малки, за да съществуват в **човешката кръвоносна система**, или просто по-малки, по-евтини, и по-ефекасни безжични устройства.




Принципи на работа на радиото




За да се разбере как работи радиоприемника от нанотръба, добре е да се разгледа, как работи радиото по принцип, по-специално радиоприемниците с детектор на обвивката. Това радио включва 4 основни компонента: антена, тунер, усилвател, и демодулатор (пунктир).

- Аntenата приема идващите радиопредавания.
- Тунерът филтрира приетия сигнал, избирайки честотната лента или съответен канал.
- Усилвателят усилва слабия по мощност радиосигнал към по-стабилен нива.
- Накрая демодулаторът, обикновено нелинейно устройство като **диод**, извлича от идващия модулиран, високочестотен радиосигнал понискочестотния **информационен сигнал**, който в зависимост от приложението може или директно да се усили и да се изпрати към високоговорителя или да продължи неговата обработка чрез компютър или друг инструмент.



Имплементиране на радиото в нанотръба



Опростеният модел показва, че цялото радио се състои от една въглеродна нанотръба, монтирана към електрода, много близо до другия електрод.

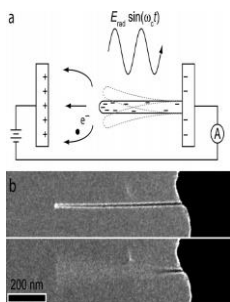
Постояннотоковият източник на напрежение, от една батерия, е свързан към електродите и захранва радиото.

Важно за действието на радиото е, че приложеното напрежение **зарядва негативно върха на нанотръбата**, и го прави чувствителен към вибрациите на електрическите полета. Също така двата електрода и нанотръбата се намират **във вакуум**, типично под 10^{-7} Torr.

Геометричната конфигурация напомня конвенционална **вакумна тръба**. Има някои ключови функционални прилики между двете. **Torr** - мерна единица за налягане $\frac{1}{760}$ от стандартната атмосфера



Схема на радиото с нанотръба и Микрографове на предаването на електрони



- (a) Схема на радиото с нанотръба. Радиопредаванията настроени към резонансната честота на нанотръбата карат заредената нанотръба да вибрира. Полевата емисия на електрони от върха на нанотръбата се използва, за да **детектира вибрациите** и също да **усили и демодулира** сигнала. Уред за измерване на тока, като чувствителна колонка, управлява изхода на радиото.
- (b) Микрографове на предаването на електрони на нанотръбното радио при включване и изключване на резонанса по време на радиопредаването.



Принцип на действие на нанотръбното радио



Нанотръбното радио действа по съвсем различен начин от традиционното радио.

Природата на традиционното радио е **напълно електрическа**, а нанотръбното радио функционира отчасти като **механично**.

Накратко, електромагнитните вълни от идващото радиопредаване се отразяват в нанотръбата, карайки я да вибрира физически чрез тяхното въздействие върху заредения връх.

Тези вибрации са значими само, когато **честотата на идващата вълна съвпада с резонансната честота** на огъване на нанотръбата.

Резонансната честота на нанотръбата може да се настрои по време на действие, и следователно нанотръбното радио, като всяко добро радио, може да бъде настроено да приеме само предварително настроена лента от електромагнитния честотен спектър.

Това обяснява поне повърхностно, как нанотръбата служи **едновременно за антена и за тунер** в радиото.



Стъпала за усилване и демодулация



Стъпалата за **усилване и демодулация** разчитат изцяло на забележителните свойства за **полево излъчване** на въглеродните нанотръби, които в голяма степен се дължат на тяхната **игловида геометрия**, която концентрира електрическото поле.

Приложеното постоянно токово напрежение между електродите произвежда номинално **постоянен ток от излъченото поле**. **Механичните вибрации** на нанотръбата моделират излъчвания от полето ток, който представлява лесно **детектиран** електрически сигнал.

Тъй като напрежителният източник на батерията, по-скоро, отколкото идващата електромагнитна вълна, **захранва** полевият ток, **усилването** на радиосигнала става възможно. Също така, поради нелинейности присъщи на полето, се случва и **демодулацията** на радиосигнала. Така, и четирите основни компонента на радиоприемника са имплементирани компактно и ефикасно вибриращата и излъчващата поле нанотръба.



Нанотръбно радио в TEM



Поради критичната роля, която играе механичното движение на нанотръбата по време на работа е важно визуално наблюдение на нанотръбното радио. Реализирано е чрез монтирането на нанотръбното радио в предавателен електронен микроскоп (ТЕМ) с висока разделителна способност. Синусоидален носещ радиосигнал (генериран от скрийнинг в ТЕМ) стартира в близост до предавателната антена.

Фиг. b показва ТЕМ микрографове от нанотръбата, свързана към катода (анодът не е показан тъй като е на **повече от 1 микрон** извън картината наляво). Горното изображение, резонансната честота на нанотръбата не съответства на предаваната носеща честота;

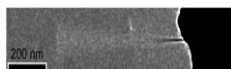


Нанотръбно радио в ТЕМ



Нанотръбата е относително неподвижна и не може да се получи радиоприемане. В това изображение се вижда отрицателното зареждане на върха на нанотръбата, който се изразява като значително блясък към нанотръбния връх. В долното изображение, резонансната честота на нанотръбата е настроена към носещата предавателна честота (251 MHz).

Тук осцилиращото електрическо поле на радиосигнала управлява резонансно заряда на нанотръбата, водещ я до силно вибриране по този начин се размива изображението си. По време на тези резонансни условия, радиоприемането е възможно.



Тестове с аудиосигнали



За да се свърже механичното движение на нанотръбата с действието на реален радиопредавател, авторите пускат честотно-модулираното (FM) радиопредаване (амплитудно-модулираните сигнали (AM) също работят) на песента "Good Vibrations" на Бич Бойс.

След като е приета, филтрирана, усилена и демодулирана песента от нанотръбното радио, възникналият сигнал е **усилен от предусилвател на ток** е и **изпратен на аудио колонка и записан**. Горната част на Фиг. 3 показва честотния спектър и аудио графиката на 2s сегмент от песента, както е предадена, а долната част показва същия сегмент, така както е получен от радиото.

Нанотръбното радио **възпроизвежда коректно аудио сигнала**, и песента се разпознава лесно от ухото (виж Supporting Information за аудио и видео на тази песен и други класики по нанотръбното радио).



Тестове с аудиосигнали (1)



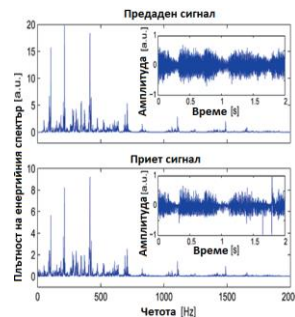
Като тест по време на действието, нанотръбата нарочно **е разстроена** спрямо носещата честота, и както се очаква, като се загуби механичния резонанс, изчезва и радиоприемането. Авторите успяват директно, дори без активна обратна връзка, да го поддържат "заклучено" за даден радиопредавателен канал за дълги минути време.

Разбира се не е необходимо нанотръбното радио да работи в ТЕМ.

Използвайки малко по-различна конфигурация, авторите успяват да предадат и получат сигнали по дължината на тяхната лаборатория, на разстояние от няколко метра.



Илюстрация на работата на нанотръбното радио

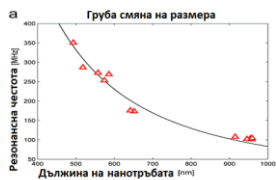


Предадени и приети аудио сигнали и честотен спектър за 2 s. при песента "Good Vibrations" на Бич Бойс.

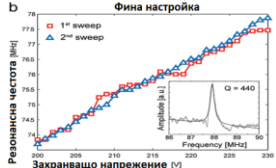
Нанотръбното радио възпроизвежда коректно аудиосигнала, и песента е лесно разпознаваема от ухото (може да се прослуша в Supporting Information).



Демонстрация на груби и фини методи за настройка на централната честота на тунера на нанотръбното радио



(а) При груба настройка или "триминг", нанотръбата се намалява контролирано, като по този начин се увеличава резонансната честота. Нейната резонансна честота следва зависимостта $1/L^2$ предсказана от лъчевата теория на Ойлер-Бернули.



(б) При фина настройка, се използва запазващо напрежение за настройка на напрежението на нанотръбата. Развивката на запазващото напрежение показва реверсивността на процеса. Въмъкнат е типичен резонансен пик с Лоренцово съответствие.

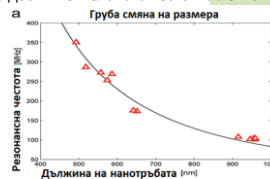


Действие на нанотръбното радио и граници на чувствителността



Резонансната честота на нанотръбното радио се настройва в **двустъпков процес**. Начална "груба" настройка установява работната честотна лента чрез триминг, или съксяване на дължината на нанотръбата. За да реализира това, през нанотръбата се задава висок полемиссионен ток, много по-висок от този за работа на радиото, в резултат въглеродните атоми са изхвърлени от края на нанотръбата, променяйки нейната дължина. Процесът на триминг завършва, когато резонансната честота на нанотръбата достигне желаната честотна лента.

Фиг. а показва грубата настройка на нанотръбното радио от по-ниска честотна FM радио лента (около **100 MHz**) към много по-височестотни ленти (до **350 MHz**), резервирани за приложения като телевизия или аварийните служби.



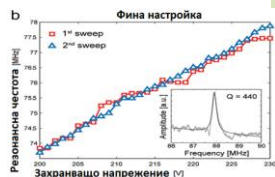
Фина настройка



Фина настройка на радиото в желаната лента се реализира чрез прилагане на електростатично поле към нанотръбата.

Така, както се настройва китара чрез опъване на струните, се настройва и нанотръбната резонансна честота (над няколко MHz) чрез малка настройки на вече установеното постоянно токово запазващо напрежение.

Фиг. 4b показва напълно обратима фина настройка на нанотръбната резонансна честота по време на работата на радиото.



Антената е имплементирана чрез заредения връх на нанотръбата



Това съществено се различава от другите предложения, които използват нанотръбите като умалени версии на макроскопичните антени. Количеството заряд на върха влияе върху характеристиките на антената. Нанотръби с подобен размер и при подобни условия като тези използвани в експеримента

($L = 500 \text{ nm}$, $r = 5 \text{ nm}$, $E_{ext} 10^8 \text{ V/m}$) акумулират приблизително $3 \times 10^{17} \text{ C}$ заряд (почти **200 небалансирани електрона**) на техните върхове.

Тунерът филтрира радиосигнали чрез резонансната честота на огъване на нанотръбата. Според класическата лъчева теория на Ойлер-Бернули, резонансната честота на конзолна нанотръба е:

$$f_0 = 0.56/L^2 \sqrt{YI/\rho A}$$

където L е дължината на нанотръбата, Y е модула на Юнг, I е реалния момент на инерцията ($(\pi/4)(r_o^4 - r_i^4)$) за цилиндър с външен и вътрешен радиуси r_o , r_i), ρ е плътността, A е площта на кросекцията.



Типични честотни параметри на нанотръбата



Типичните нанотръби използвани в експериментите имат резонансни честоти от **10 до 400 MHz**, в търговски значимата част от спектъра включително **FM радио**.

Лентата на филтъра се определя от качествения фактор на нанотръбните резонатори, типично около **500** (Фиг. 4b).



Амплитуда на вибрациите на върха на нанотръбата



Чрез комбиниране на теоретичните резултати за антената и тунера, е възможно да се определи **чувствителността** на нанотръбното радио към идващите електромагнитни вълни.

Амплитудата на вибрациите на върха на нанотръбата е дадена от уравнението:

$$|y| = \frac{qE_{\text{rad}}/m_{\text{eff}}}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\omega\omega_0/Q)^2}}$$



Амплитуда на вибрациите на върха на нанотръбата (1)



където q е заряда на върха, E_{rad} е амплитудата на електрическото поле на идващото излъчване, $m_{\text{eff}} \approx 0.24 m$ е ефективната маса на нанотръбата, определена от теорията на Ойлер-Бернули, Q е качествения фактор.

Тази амплитуда може да се сравни с **термалните вибрации на нанотръбата**, което ограничава чувствителността на радио от единична нанотръба. Минималната детектируема амплитуда на електрическото поле при поддържане на лента B е

$$E_{\text{rad}} = (1/q)\sqrt{4k_B T m_{\text{eff}} \omega_0 B / Q}$$

С типична стойност за експериментите $1 \text{ V/m}/\sqrt{\text{VHz}}$ или еквивалентно $60 \text{ dBmV/m}/\sqrt{\text{VHz}}$.



Амплитуда на вибрациите на върха на нанотръбата (1)



Чувствителността на нанотръбното радио може да се увеличи чрез работа при **намалена температура**, използвайки **по-ниска резонансна честота**, или **подобрявайки Q** на осцилиращата нанотръба.

Други промени включват свързването на **външна антена** (Този метод е ефективен за **приемане на далечни разстояния**, описано по-горе)

или с цел съхранение на общия малък размер на приемната система използвайки **множество нанотръби**, всички настроени на една и съща честота.



Усилвател и демодулятор на нанотръбното радио



Крайните 2 компонента на нанотръбното радио, усилвателят и демодуляторът се базират на полевото излъчване от върха на тръбата. Токът на полевото излъчване I , от въглеродната нанотръба се описва добре чрез закона на Фуулер- Нордхайм:

$$I = c_1 A (\gamma E_{\text{ext}})^2 \exp\left(-\frac{c_2}{\gamma E_{\text{ext}}}\right)$$

където A е областта, от която нанотръбата излъчва, E_{ext} е външното приложено електрическо поле, γ е фактор за усилване на локалното поле. Константите c_1 и c_2 , които включват само фундаментални константи и нанотръбната работна функция, имат стойности $3.4 \times 10^{-5} \text{ A/V}^2$ и $7.0 \times 10^{10} \text{ V/m}$, респективно.



Фактор за усилване на полето за нанотръба



Факторът за усилване на полето, мярка за концентрацията на локалното електрическо поле чрез геометрията на нанотръбата, разграничава въглеродните нанотръби като отлични полени излъчватели и играе също така важна роля при действието на нанотръбното радио. За добра апроксимация, факторът за усилване на полето за нанотръба е

$$\Upsilon = 3.5 + h/r,$$

където h е височината на върха на нанотръбата над катода и r е радиуса на нанотръбата.

Когато нанотръбите вибрират, височината на техния връх осцилира като резултат от променлив във времето фактор за усилване на полето:

$$\Upsilon(t) = \Upsilon_0 + \Delta \Upsilon(t).$$



Реакцията на ток на полевото излъчване на вибрациите се определя чрез заместване на $\gamma_0 + \Delta \gamma(t)$. За γ в уравнение 2. Вдигайки на втора степен $\Delta \gamma(t)/\gamma_0$ и филтрирайки нулевата и първата степени на $\Delta \gamma(t)/\gamma_0$, което отговаря на постоянен ток и радиочестотните членове, се получава:

$$\Delta I(t) = I_0(1 + \alpha + \alpha^2/2)(\Delta\gamma(t)/\gamma_0)^2; \quad \alpha = \frac{c_2}{\gamma_0 E_{ext}}$$

Което реализира едновременно за усилване и демодулация. Усилването се получава защото изходът на радиото, $\Delta I(t)$, е пропорционален на тока на излъчаното поле, I_0 , което е захранено от батерияния източник на напрежение. Усилването на мощността, дадено от отношението на разсеяната мощност от тока на сигнала през товарния резистор, $P_{out} = \Delta I_{rms}^2 R_L$, към приетата мощност от нанотръбата от радиосигнала при резонанс, $P_{in} = m_{eff} \omega_0^3 |y|^2/2Q$, е типично от порядъка на **50 dB** в тези експерименти, въпреки, че е лесно за настройка в широк обхват. Демодулацията се случва защото $\Delta I(t)$, е пропорционално на квадрата на входния сигнал $\Delta \gamma(t)$, ефективно смесване на входния сигнал със себе си. По този начин, излъчващата поле нанотръба работи подобно на стандартните диодни детектори.



Финансиране на и допълнителна информация



Национална научна фондация на САЩ и Центъра за интегрирани наномеханични системи и Енергийния департамент на САЩ финансират изследванията.

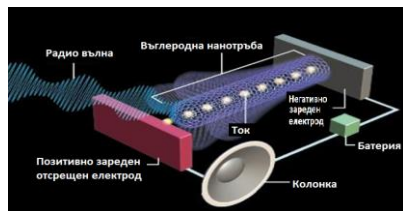
Допълнителна информация може да се намери на:
Transmission electron microscopy (TEM) видео с висока разделителна способност и придружаваща аудио на нанотръбното радио в действие и детайли от конструкцията на нанотръбното радио.

Този материал може да се зареди свободно онлайн на адрес:

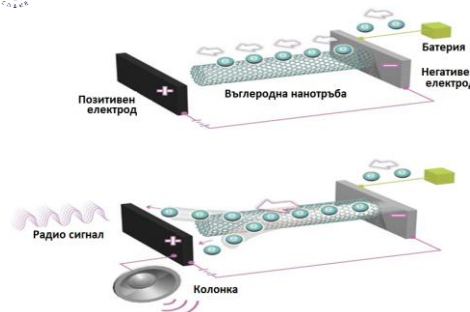
<http://pubs.acs.org>



Нанотръбно радио Дали Маркони не е измислил радиото по грешен начин? Сана Хак



Подигравайки се със сложната архитектура на безжичното предаване, една единствена молекула – въглеродна нанотръба изпълнява всички функции на безжичното радио! С малък размер, нанотръбното радио е толкова малко, че може да влезе в жива клетка или да плува в кръвоносната система.



<http://wills-nanotech.blogspot.com/2008/03/nanotube-radio-antenna-work-at-uc.html>



Нанотръбна радиоантена работи в U.C. Berkeley

<http://wills-nanotech.blogspot.com/2008/03/nanotube-radio-antenna-work-at-uc.html>

Alex Zettl от **University of California at Berkeley** е измислил интересна радиоантена, направена от една проводима въглеродна нанотръба. (по-малко от микрон дълга и 10nm широка) поставена между две проводими плоскости. Той използва антената да приема песни излъчвани по радиото, и е показал записите, които могат да се чуят. Има празнина между едната плоскост и свободния край на нанотръбата, през която електроните минават тунелно. Когато напрежението се пусне между двете плоскости, свободният край на нанотръбата става електрически зареден обратно на близката плоскост, и електростатичното привличане запазва нанотръбата под механично напрежение.



Нанотръбна радиоантена работи в U.C. Berkeley

<http://wills-nanotech.blogspot.com/2008/03/nanotube-radio-antenna-work-at-uc.html>

Електрически зареденият свободен край на нанотръбата се движи в отговор на околното радиочестотно електрическо поле. Това променя размера на процепа, и следователно измереният тунелен ток през процепа, точно както със сканиращия тунелен микроскоп. Резонансната честота на антената е просто механичната резонансна честота на нанотръбата под напрежение. Напрежението може да се променя чрез смяна на напрежението между двете проводими пластини, и така радиото може да се настройва. Лентата на антената се определя от твърдостта на нанотръбата, и зависи изначално от дължината на нанотръбата. Разстоянието между двете пластини трябва да е във вакуум така че нанотръбата да се движи свободно, така че Брауновото движение да не разстройва радиото.

Радиоантена с този размер може да комуникира и следователно да се управляват нанороботи, например в човешкото тяло. Тези нанороботи може да се ползват за диагностика, четене или кръвна химия или информация за различни видове повреди на клетките, и може да им се пращат инструкции за намеса.





Нанотръбна радиоантена работи в U.C. Berkeley (1)

<http://wills-nanotech.blogspot.com/2008/03/nanotube-radio-antenna-work-at-uc.html>

Има много интересни развития в областта на нанопроизводството, както тетрахедръра на Andrew Turberfield. Тези предложения са “контролирани” чрез добавяне на различни ДНК последователности към течността, в която се намира структурата, и новите последователности взаимодействат механично със структурите, които трябва да се променят, чрез селективно свързване с някои части на съществуващите структури. Но всяка стъпка отнема десетки минути, тъй като дифузията на молекулите се реализира чрез водата и ги позиционира да се свържат коректно.

Ако сигналът е получен от радиоантена, резултатите ще се получават по-бързо.

Posted by Will Ware at 3/13/2008 07:36:00 AM



Допълнителна информация за радиото от нанотръба (Supporting information)

K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, and A. Zettl, Nanotube Radio <http://pubs.acs.org>

Видео и аудио

Включени са 4 видеота, които демонстрират приемането на предадените FM радиосигнали от тяхното радио от нанотръба. В началото на всяко видео, нанотръбното радио се настройва на различна честота от тази на предавания радиосигнал. Така, нанотръбата не вибрира, има само статичен шум, от тока на полевото излъчване, и той може да се чуе.

След като радиото се настрои към предавания сигнал, нанотръбата започва да вибрира, което замъглява неговото изображение на TEM видеото, и в същото време, музиката започва да се чува.

4 песни - Good Vibrations (Бич Бойс), Largo от операта Xerxes от Хендел (това е била първата песен предадена от радио), Layla от Ерик Клептън, и Main Title от Star Wars от Джон Уилямс.



Методи за конструиране на нанотръбното радио

K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, and A. Zettl, Nanotube Radio <http://pubs.acs.org>

Използвани са **2 метода** за конструиране на нанотръбно радио, промяна на размера и метод на единичната нанотръба.

По метода **с промяна на размера**, микроскопичното влакно от многостенни въглеродни нанотръби (MWNTs) е свързано с проводим епоксиден материал към платинова жичка. Жичката, която служи за катод, се инсталира във вакуумна камера и се поставя близо до медна пластина, анод, чрез микроманипулатор. Въпреки, че има множество нанотръби в макроскопичното влакно, **само някои от тях, които стърчат най-далече от влакното**, допринасят значително за тока от полевото излъчване по време на работата на радиото.

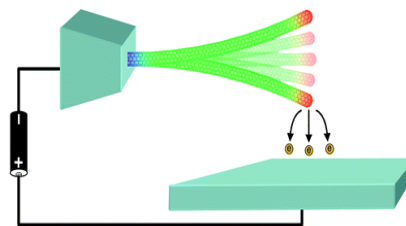
Така, само някои нанотръби работят като нанотръбни радиа.

Поради неговата простота, този метод на конструкция може да се адаптира за ползване **със стандартни литографски техники**.



Устойчиви механични авто-осцилации във въглеродни нанотръби

Jeffrey A. Weldon, Benjamin Alemán, Allen Sussman, William Gannett and Alex K. Zettl
Nano letters, 2010, Sustained Mechanical Self-Oscillations in Carbon Nanotubes <http://pubs.acs.org>



БЛАГОДАРИМ
ЗА
ВНИМАНИЕТО!

