


НАНОКОМУНИКАЦИОННИ УСТРОЙСТВА И МРЕЖИ

Лекция 10.

Комуникационни мрежи от въглеродни нанотръби

Доц. д-р инж. Галя Маринова
2021 г.



Увод

нанокомуникационна мрежа и потенциални предимства при пренос на информация от използването на **индивидуалните нанотръби** в **случайни мрежи от въглеродни нанотръби** (CNT). Различен подход от по-ниско ефективния традиционен подход, на използване на **CNT мрежите за конструиране на транзистори**.

Традиционният мрежов протокол стек е **инвертиран**, защото вместо мрежовият слой, който се позиционира **над физическия и свързващия слоеве**, CNT мрежите и маршрутизацията на информацията са **интегрална част от физическия слой**.

Едностенните въглеродни нанотръби (SWNT) са моделирани като **линейни нанотръби** разположени двумерно спрямо централните координати с определен **ъгъл**. Може да се зададе разпределението на **дължините и ъглите**. **Мрежовият граф** е извлечен от слоя с нанотръбите и е разглеждана възможността да се маршрутизира информацията близо до индивидуалните нанотръби.

Влияние на характеристиките на случайната тръба, като разположение и ъгъл, върху съответния мрежов граф.


Stephen F. Bush and Yun Li, Nano-Communications: A New Field? An Exploration into a Carbon Nanotube Communication Network, February 2006, Inderscience Publishers.



CNT мрежа за комуникация

CNT мрежата е изградена от много нанотръби, често със **случайна ориентация**, може да са плтно пакетирани. Текущите технологии са фокусирани върху използването на цялата CNT мрежа като полупроводников материал за конструирането на един транзистор или Field Effect Transistor (FET). Изискват се **много такива транзистори** за да се изгради мрежовото оборудване. Много мрежи на наноиво са внедрени във всяко устройство, което би могло да се използва по друг по-ефективен начин за комуникация.

Преосмисля се комуникационната архитектура, така че самата CNT мрежа да представлява комуникационната среда, а индивидуалните **нанотръби да са връзките**. Индивидуалните тръби и **контактите** между тръбите (**формиращи възли**) нямат еквивалентната способност за обработка на традиционната мрежа - методите за компенсация на това чрез **осредняване на голям брой тръби**. Сравнение на комуникациите и на SWNT мрежите е показано на Фиг. На долното ниво, комуникационните връзки може да са **между хостове и рутери** в комуникационна мрежа или може да са **застъпвания** на въглеродни нанотръби в точки, които ще се идентифицират като възли. Функциите на мрежата чрез смяна на състоянието; данните трябва или да текат или да се включват или да се маршрутизират през възлите.




Мрежови компоненти за наномрежи изискват модификация на концепцията. за да отговарят по-добре на наноивото

Базисни мрежови компоненти	Традиционни мрежи	Мрежи на наноиво
Протокол	Процесори	Гейтов контрол
Състояние	Възел Памет	Полупроводниково съпротивление на тръбата
Мрежа	Връзки	Нанотръби

↑ Нарастане на концептуалното усъвършенстване

Състоянието може да се имплементира като маршрутизираща таблица на рутер или чрез EM поле контролиращо съпротивлението на специфична област на въглеродната HTM. Трябва механизъм за контрол на състоянието - **алгоритъм за маршрутизация или напрежения на гейтовете на FET, приложени към въглеродната HTM**. Разгледани са някои характеристики на CNT мрежи свързани с комуникацията като **честотна лента, капацитет, и влиянието на подредбата на тръбите и адресирането и маршрутизацията**.



Влияние на скалата върху традиционната комуникационна мрежа


Промяната в капацитета и по-специално в честотната лента.

За прости хармонични трептения, ЧЛ се увеличава с намаляване на размера; Потенциалната ЧЛ силно се увеличава. Нарастването е $1/L$ където L е дължина. Капацитетът, C_g , на връзката между предавателя на I и приемника на l е даден от известната формула на Шенон (1). Отчитайки всички възможни техники за кодиране на много нива и много фази, теоремата казва, че теоретичната максимална скорост на чисти данни (или с ниска BER) с дадена средна мощност на сигнала, която може да се предаде през аналогов комуникационен канал с адитивен бял Гаусов шум е:

$$C_g = BW \ln(1 + (S/N)_g) \quad (1)$$

BW е честотната лента на комуникация, $a (S/N)_g$ е отношението сигнал - шум (SNR). SNR се мери като отношение между шума и произволен сигнал в канала, не задължително най-мощния възможен сигнал.

На фиг.2 **капацитетът на канала, при минимален шум (SNR=1/2), нараства с намаляване на скалата**.



Апроксимация на нарастването на капацитета с намаляване на скалата.

С намаляване на скалата, потенциалният капацитет нараства значително.



Скала (m)



Защитен интервал

Освен повишения потенциал на ЧЛ, плътността на нанотръбите води до увеличение на броя битове на квадратен метър. Разглеждат се днешните безжични мрежи. Типичният капацитет в бит-метри/секунда е ограничен в традиционните безжични мрежи.

За да се определи колективният капацитет може да се използва апроксимация за максималния безжичен капацитет в безжичните мрежи.

След като минималното количество информация за разпространение е определено, то трябва да се разпространи през мрежата, колкото е възможно **по-ефективно**. Приема се идеален механизъм на разпределение, при който **всички връзки се използват максимално ефективно за разпространение на маршрутизираната актуализирана информация**. Приема се, че мрежа от l възли е разположена върху площ A и всяка възможна връзка има капацитет W .

Δ е защитен интервал, който гарантира предаванията през канала да не се застъпват.



Максималният безжичен капацитет в бит-метри за секунда

е показан в (2).

$$C_{\max} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{W}{\Delta} \sqrt{n} \quad (2)$$

Обобщавайки за **равномерно случайно разпределение на l сензора върху кръгла площ A** , плътността е l/A , и очакваното разстояние до най-близкия съсед е $\sqrt{A/n}$. Общото разстояние, което данните трябва да

$$E[d] = \sum_{k=1}^n \frac{\sqrt{A}}{n} \quad (3)$$

преминават е показано в (3).

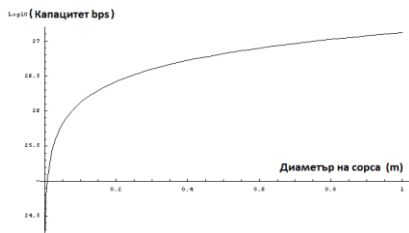
Разглежда се въглеродна HTM. Точка източник може да излъчи информация еднопосочно чрез тръбна структура ограничена от степента на компактност на мрежата от тръби. Ако тръбите **са добре подредени**, няма да има нужда от защитен интервал. Приема се, че макроскопичният източник генерира данни еднопосочно.

CNT има диаметър от порядъка на 1.4 nm. Ако тръбите излъчват компактно от кръгъл източник, капацитетът е показан на Фиг. 3.



Фиг. 3 Капацитетът на мрежа от въглеродни нанотръби във функция от площта налична за свързване на нанотръбата

Постига се **висок капацитет върху много по-малко разстояние** отколкото би могло да се постигне с безжична мрежа. Важно е, че границата е достигната, когато **много голям брой тръби са свързани към източника без прекриване**. За съжаление, наличните технологии не могат да подредят тръбите с такава точност.



Програма в МАТЕМАТИКА

Разработен е пакет с програмата Mathematica за **конструиране на CNT мрежа от топология на тръба и за аналитично изследване на характеристиките й**.

Програмата за оценка на случайни CNT мрежи е използвана за **проверка на характеристиките** на проекти на въглеродни нанотръби.

Позицията на тръбата е свързана с характеристиките включващи **местоположение на центъра на тръбата t_{xy} , ъгъла на тръбата θ , плътността на тръбата d_t** .

Пресичанията на тръбите формират върховете V и тръбите формират краищата E на графа $G(V, E)$. В конкретния случай на FET мобилност, структурата на графа влияе на мобилността μ на FET. Така, целта е да се намери **отношението между тръбите, CNT мрежата, и мобилността**. Нека $f(t_{xy}, \theta, d_t)$ е функция на физическите характеристики на тръбата.

Мобилността е апроксимирана като:

$$\frac{L_{sd}(I_{on} - I_{off})}{W} \frac{t_{ox}}{20\epsilon V_{sd}}$$



Програма в МАТЕМАТИКА

Където I_{on} и I_{off} са токове on и off на FET гейта, които се определят чрез съпротивлението на CNT мрежата;

w и L_{sd} са широчината и дължината на гейта респективно.

$$f(t_{xy}, \theta, d_t) \rightarrow G(V, E) \rightarrow \mu(\Delta R_{sd}) \quad (4)$$

Ключовият компонент на топологията на тръбата е **общата насоченост на тръбите**, това е ъгъла на всяка тръба по отношение на всички други тръби. **Изотропията** е глобална мярка за тази насоченост. Изотропията измерва насочеността на тръбите и е дефинирана като

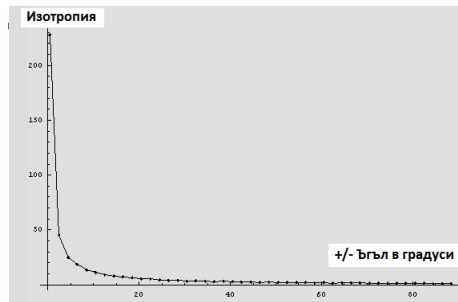
$$\frac{\sum I \cos \alpha}{\sum I \sin \alpha}$$

където l е дължината на тръбата и α е ъгъла на тръбата.

Тръбите, които са почти подредени имат висока изотропия, а тръбите, които са случайно ориентирани имат ниска изотропия. Фиг. 4 показва изотропията на множество CNT мрежи с ограничени ъгли на тръбите. Плътността на тръбите е 1.2 на микро и дължините са константи на 3 микрона. Диапазонът на ъглите е ограничен между -1 и $+1$ градуса до $.90$ и $+90$ градуса.



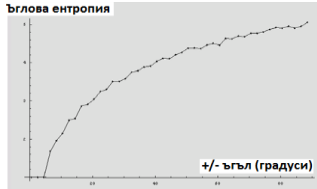
Фиг. 4 Изотропията намалява когато ъглите на тръбите имат по-голям диапазон





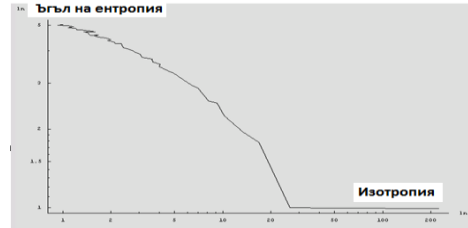
Фиг.5 Ъгловата ентропия нараства, когато диапазонът на ъгъла на тръбата нараства.

Ъгълът на всяка тръба може да се разглежда като **кодирана информация**. **Ентропията от гледна точка на теория на информацията, измерва количеството информация.** Ъгловата ентропия се дефинира като : $\sum \text{Pr}(\alpha) \log_2(\text{Pr}(\alpha))$ където α е ъгъла на тръбата и Pr е вероятността за тръба с даден ъгъл в анализирания мрежа. Ъгловата ентропия на анализирания мрежа от Фиг. 4 е показана на Фиг.5. Колкото по-случаен е ъгълът, съществува толкова по-голяма ентропия на ъгъла и така би трябвало да има **отношение между изотропията, ъгловата ентропия, вида мрежа, която е формирана и тяхната характеристика и гъвкавост към метални тръби.**



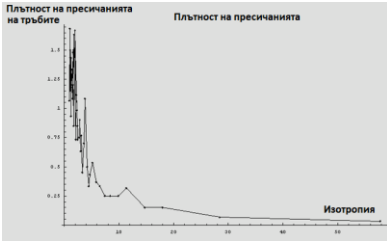
Фиг. 6 **Натуралния логаритъм на ентропията на ъгъла намалява, докато натуралния логаритъм на изотропията нараства.**

Има отношение между изотропията и ъгъла на ентропия за еднакви мрежи, анализирани в предишната фигура. **Високата ентропия на ъгъла води до това, че насочеността и следователно изотропията са ниски.** Информацията може да се съхранява в ъглите на тръбите; Четенето на информацията се осъществява от промяната в съпротивлението на контакта между тръбите.



Фиг. 7 **Плътноста на пресичанията на тръбите (възли) зависи обратно пропорционално на изотропията.**

По-голямата промяната на ъгъла позволява на тръбите да се пресекат по-близо една до друга. Съпротивлението на контакта между тръбите има по-голямо влияние, когато нараства плътността на пресичанията. Има и влияние върху вероятността за проникване (филтриране).



Характеристики на CNT наномрежите

За всяка дадена ориентация на нанотръбите, е извлечена съответната мрежа $G(V, E)$ и са зададени съпротивленията на основата на вероятността тръбата да е или чиста въглеродна нанотръба с $10^6 \Omega$, **когато гейтът е включен (10 V) и $10^{12} \Omega$, когато гейтът е изключен.** При примеси (твърди нанотръби) остават на $10^6 \Omega$ независимо от напрежението на гейта и вероятността за твърда тръба е 0.33.

Извлечена е мрежата формирана чрез препокриване на нанотръбите чрез определяне на местата на контактите. **Областта на гейта покрива тази мрежа и виртуалните върхове са добавени като сорс и дрейн;** Виртуалните върхове са зададени краища без съпротивление към всяка тръба, която е съседна респективно на края на сорса или дрейна на топологията. **Еквивалентното съпротивление** на мрежата от резистори през виртуалния сорс и дрейн се определя от (5), където I_i е i -тата собствена стойност на Лапласовия граф и $\phi_{i\alpha}$ е компонентата α на i -тата собствена стойност на Лапласиана.

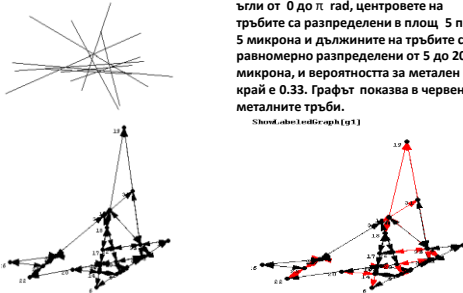
$$R_{sd} = \sum_{I_i} \frac{1}{I_i} |\phi_{i\alpha} - \phi_{i\beta}|^2 \quad (5)$$

Генериран е графът за голям брой тръбни топологии с различни разпределения на местоположението, ъглите, и дължините. Един пример е показан в Таблица 1.



Таблица 1 **Пример на генериране на случайна CNT мрежа:**

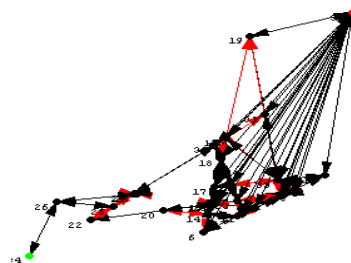
`g1 = CreateNet(10, 0, 100, 5, 10, 5, 10, 5, 20, -33)` **10 тръби, равномерно разпределени ъгли от 0 до π rad, центровете на тръбите са разпределени в площ 5 по 5 микрона и дължините на тръбите са равномерно разпределени от 5 до 20 микрона, и вероятността за метален край е 0.33. Графът показва в червено металните тръби.**



Фиг.8 **Възли на виртуален сорс и дрейн, добавен към графа от Таблица 1.**

Определени са местата на виртуалните сорс и дрейн и са изобразени.

`ShowLabelledGraph [g1]`





Безкрайни или крайни дължини на тръбите

Разглеждайки отношението в (1), особено, $f(t_{ij}, \theta, d_i) \rightarrow G(V, E)$
 За отбелязване е, че разположението на центровете на тръбите t_{ij} и ъглите на тръбите θ , са случайни променливи. Плътноста на тръбите t е броя тръби за единица площ и не се разглежда като случайна променлива в този анализ.
 Интуитивно може да се очаква, че анизотропията (6), ще влияе върху броя на върховете d_i .

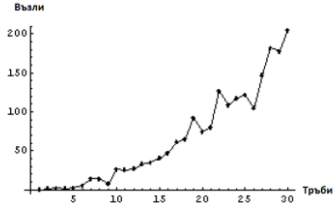
$$\sum_{i=1}^N |\cos \theta_i| \quad (6) \quad |f| = n_1 = \left(\sum_{i=1}^{n-1} t_i^2 \right) + \frac{t_n^2}{2}, n_1 = 0, n_2 = 1 \quad (7)$$

В (6), компонентата x на всяка тръба е $L_i \cos \theta_i$, а компонентата y на всяка тръба е $L_i \sin \theta_i$, където L_i е дължината на i -тата тръба. Ако дължината на тръбата е безкрайна, броят на върховете в графа $G(V, E)$ е дефиниран в (7). Интуицията е, че всяка нова тръба ще се прекрива с $n-1$ съществуващи тръби, предполагайки, че няма идеално паралелни тръби, което води до допълнителни $n-1$ възела. Фиг. 9 показва симулирания брой на възли извлечени от графа към тръбите, а Фиг. 10 показва симулацията спрямо анализа. Симулацията има по-малък брой възли защото то предполага безкрайни дължини на тръбите. Симулираните възли са краен брой; С повишаване на дължините на тръбите, се очаква реалният брой възли да достигне аналитичния резултат.



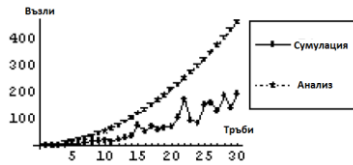
Фиг. 9 Възли (пресичания на тръби) към общия брой тръби

Ъглите на тръбите са равномерно разпределени от $-\pi/4$ до $\pi/4$ rad и дължините на тръбите се изменят равномерно от 3 до 10 микрона в площ 5 на 5 микрона.



Фиг. 10 Симулирани към аналитични резултати за равномерни разпределени ъгли на тръбите от 0 до $\pi/2$ rad

Аналитичните резултати предполагат прекриване на тръби с безкрайна дължина, аналитичните резултати са горна граница на реалния брой възли.



Фиг.11 Вероятностни анализи към резултати от симулацията използвайки реалните дължини на тръбите

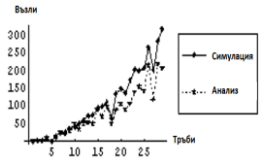
Определянето на броя и на плътността на върховете, когато дължините на тръбите са крайни, става по-сложно. Уравнение (7) трябва да се промени, така че всеки член да включва вероятността за прекриване между двойките тръби, както е показано в (8), (9) и (10), където вероятността за прекриване се определя чрез вероятността за прекриване в компонентите x и y на двойките тръби. Комбинирайки уравненията (8), (9) и (10) със (7) води до (11). Анализът от (11) е изчертан върху реалния на Фиг. 11.

$$P_x(\alpha_1) = P_x(\alpha_1)P_y(\alpha_2) \quad (8)$$

$$P_x(\alpha_1, y, L, \theta) = P_x(|x_1 - x_2| < L_i \sin \theta + L_j \sin \theta) \quad (9)$$

$$P_x(\alpha_1, |x, L, \theta) = P_x(|x_1 - x_2| < L_i \cos \theta + L_j \cos \theta) \quad (10)$$

$$|f| = P_x(\alpha_1) \binom{n}{2} \quad (11)$$



Вероятност за свързана мрежа

Максимален брой върхове е генериран когато разликите между стойностите на x , y са малки, което е висока концентрация на тръби, когато L е голямо, и когато θ е $(+\pi/4)$ rad или $(-\pi/4)$ rad. Концентрацията на тръбите, която се изисква за свързана мрежа през гейта се увеличава при тези ъгли. Отношението между L и θ за създаване на свързана мрежа за дадена концентрация на тръбите в област w_{LD} трябва също да бъде определено. Ако дължината на тръбите се поддържа константа и центърът на всяка тръба е локализиран отдалечено, тогава ъглите на тръбите трябва да се намалят, за да се получи свързан граф, който ще намали броя на върховете. Има оптимален диапазон за θ за дадена площ, който покрива изискванията за свързан граф, но това също така минимизира броя на върховете на CNT мрежата $G(V, E)$. Вероятността за свързана мрежа идва от (8). Изискванията за мрежата за достигане от сорса до дрейна е вероятността тръбите i и j да се свържат и че i и j отговарят на изискванията за разстоянието. Очакваното разстояние, което достига или задминава разстоянието сорс-дрейн, както е показано в (12).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n P_x(\alpha_2) \left(|x_i - x_j| + \left(\frac{L_i}{2} \cos \theta_i + \frac{L_j}{2} \cos \theta_j \right) \right) \geq L_{sd}$$



Предаване на данни в CNT мрежа

Предаването на данни става чрез **модулиран ток** поток през CNT мрежата насочван към посочени нанодестинационни адреси. Адресите идентифицират пространствено отделени области в CNT мрежата. Тъй като е използван контрол на гейтовете за извършване на маршрутизацията през CNT мрежата, нано-адресите са малвани директно към комбинациите от гейтове, които ще се включат за да създадат път от източника към крайната дестинация.

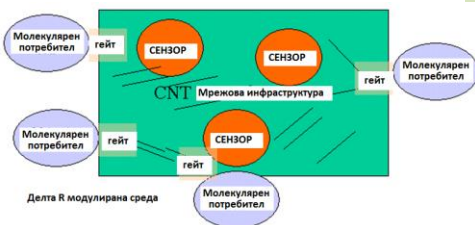
Фиг. 12 показва концептуален изглед на CNT мрежовата инфраструктура.

Освен гейтовия контрол на маршрутизацията, сензорите често са конструирани от нанотръби, така че да си променят съпротивлението на основата на количеството и спецификата на материала, към който са чувствителни. Така, актът на детектиране може да промени маршрутизацията през мрежата.





Фиг. 12. CNT мрежова инфраструктура се състои от резисторно-модулирана среда за маршрутизация на информацията между адреси на молекулярно ниво.



Маршрутизация в CNT мрежа

при дадена CNT мрежа, трябва да се разгледа механизъмът използван за маршрутизация на данните през тази мрежа. Разглежда се случайна CNT мрежа с матрица от гейтове, както е показано на Фиг.13.

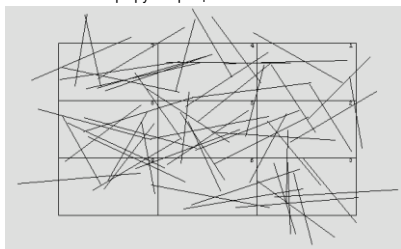
Когато един гейт е включен, нанотръбите към областта на този гейт стават проводими. Правилното избиране на гейтовете, които да се включат, променя и токовия поток към краищата на CNT мрежа, създавайки ефективно контролирана мрежа, която може да действа като комуникационна мрежа или като тегловни коефициенти в невронна мрежа. Гейтовете са идентифицирани чрез номера и когато са включени, сменят съпротивлението на полупроводниковите нанотръби в тяхната област.

Повечето нанотръбни сензорни устройства работят чрез промяна на съпротивлението на тръбата.



Фиг. 13 Матрица от насложени гейтове върху случайна CNT мрежа

Гейтът, който е включен, по някаква причина, може да се използва за маршрутизиране на данни през мрежата. Така, сензорните елементи, които работят чрез промяна в съпротивлението, могат да действат едновременно и като маршрутизиращи елементи.

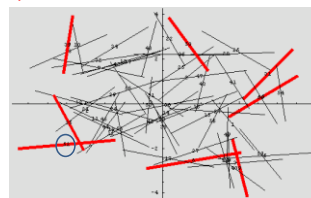


Потенциалът на способността за маршрутизация е симулиран като е използвана специфична CNT мрежа от фиг.14.

Тръбите в червено се разглеждат като изходи на този ключ.

Тръба 52 се разглежда като вход.

Хипотезата е, че тази анизотропна среда, тръбите са случайно разпръснати във всички възможни ъгли осигурявайки приблизително равно разпространение във всички посоки. Подходящото активиране на гейтовете служи за канализиране на потока в желаните посоки.



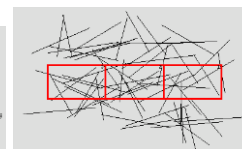
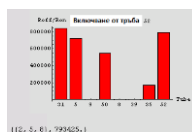
Фиг. 14 Тръбите използвани за I/O, когато CNT мрежата се използва като комуникационна мрежа посочена в червено. Червените тръби отговарят на I/O контакти, един за всяка област за обикновена мрежата (области показани в предишната фигура).

Използвайки относително малка гейтова матрица 3 x 3, се разглеждат всички



Таблица 2. Отношението на съпротивлението с невключени гейтове

Към съпротивление с включени посочени гейтове е показан на графове с черти избрани входни-изходни тръби I/O. Включените гейтове които генерират стойностите на диаграмата с чертичките са показани под всяка диаграма. Тръба 52 е входна тръба за този пример. Последното число от списъка под всеки граф е прага на съпротивлението разграничавайки изходното съотношение на съотношенията от следващото най-високо съотношение.

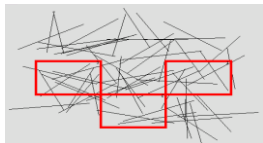
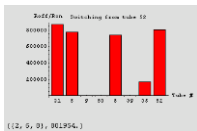


Съотношение на съпротивленията и конфигурация на гейтовете за изходна тръба 31.

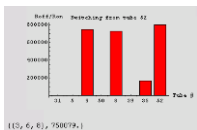


възможни комбинации на включените гейтове и въздействието върху предварително посочени изходни тръби. Отношението на съпротивлението на тръба 52 към всички изходни тръби, когато никоя тръба не е включена R_{off} , към съпротивлението между същата двойка тръби, когато комбинациите на гейтовете са включени R_{on} е изчертано на диаграмата с чертички, показана в Таблица 2. Ефективността на способността за маршрутизация се измерва чрез разликата между съпротивителното съотношение на всеки изход и очакваното съотношение на съпротивлението на всички изходи (13); само най-ефективната комбинация на гейтове е показана за всеки изход.

$$\max_{\text{определени}} \left[\left(R_{off} / R_{on} \right) / \text{arg min Output} - E \left[R_{off} / R_{on} \right] \right]$$



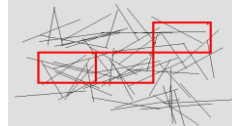
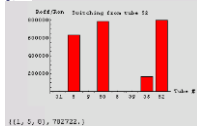
Съотношение на съпротивления и конфигурация на гейтовете за изходна тръба 5.



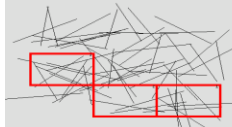
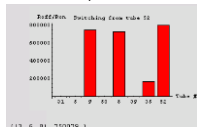
Съотношение на съпротивления и конфигурация на гейтовете за изходна тръба 9.



Съотношение на съпротивления и конфигурация на гейтовете за изходни тръби 50,8



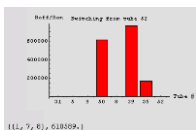
Съотношение на съпротивления и конфигурация на гейтовете за изходна тръба 50.



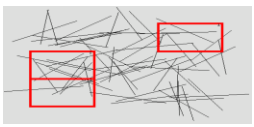
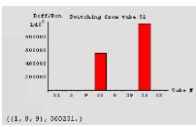
Съотношение на съпротивления и конфигурация на гейтовете за изходна тръба 8.



Съотношение на съпротивления и конфигурация на гейтовете за изходни тръби 39,35



Съотношение на съпротивления и конфигурация на гейтовете за изходна тръба 39.



Съотношение на съпротивления и конфигурация на гейтовете за изходна тръба 35.



Заклучение

Информационният поток през CNT мрежа може да се контролира въпреки случайната природа на подреждането на тръбите.

Същата техника използвана за наблюдение в CNT мрежите, а именно, промяна в съпротивлението на полупроводниковия материал, може да се използва за ефективна маршрутизация на информацията. При този подход, традиционният **мрежов протокол стек е инвертиран**, защото, вместо мрежовият слой да е логично позициониран над физическия и свързващия слоеве, CNT мрежата и маршрутизацията на информацията са интегрална част от физическия слой.

Потенциалните предимства на по-доброто използване на индивидуалните нанотръби в случайно мрежи от въглеродни нанотръби (CNT) за пренос на информация е различен от традиционния, който е потенциално по-ниско ефективен и разточителен, и използва CNT мрежите за конструиране на **транзистори**, които след това се използват за имплементиране на комуникационните мрежи.

Авторите поставят теоретичен въпрос със значителен практически принос, а именно, дали може да се постигне скорост на предаване на информацията чрез CNT мрежи, която доближава **максималния дебит** през еквивалентен мрежов граф, с **други думи**, мрежово кодиране на ниво на индивидуалните нанотръби.



БЛАГОДАРИМ
ЗА
ВНИМАНИЕТО!

