

ТРАНЗИСТОР С ЕДИН ЕЛЕКТРОН: ПРИЛОЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМИ

Мила Илиева-Обретенцова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, milailieva@abv.bg

РЕЗЮМЕ. Целта на този доклад е да представи накратко физичните процеси в наноелектронния елемент транзистор с един електрон (SET) и проблемите при неговото прилагане. Функционирането на SET се основава на контролирания трансфер на отделни електрони между малки проводящи „острови“. Свойствата на елемента са доминирани от квантовата механика и предоставят нови характеристики като кулонова осцилация, кулонова блокада, които са полезни за някои приложения. SET е способен да отстрани силициевите транзистори в близко бъдеще и да увеличи плътността на елементите. Настоящите изследвания предоставят нови идеи, които ще революционизират RAM-паметите и цифровите технологии за съхранение на данни.

SINGLE ELECTRON TRANSISTOR: APPLICATIONS AND PROBLEMS

Mila Ilieva-Obretenova

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, milailieva@abv.bg

ABSTRACT. The goal of this paper is to review in brief the basic physics of nanoelectronic device single-electron transistor (SET) as well as to prospect the problems in its applications. SET functioning is based on the controllable transfer of single electrons between small conducting "islands". The device properties are dominated by the quantum mechanics and provide new characteristics: coulomb oscillation and coulomb blockade that are helpful in a number of applications. SET is able to shear a domain with silicon transistor in near future and enhance the device density. Recent research in SET gives new ideas which are going to revolutionize RAM and digital data storage technologies.

Въведение

Транзисторът с един електрон (SET) представлява елемент с критични размери от няколко нанометра. Използвани са метал, полупроводник, въглеродни нанотръби или индивидуални молекули. Конструкцията се състои от малък проводящ остров (квантова точка), свързан към сорса и дрейна чрез тунелни преходи и кондензатори свързани към един или повече гейтове. За разлика от полевия транзистор, SET се базира на един квантов феномен – тунелен ефект. Електрическото поведение на тунелния преход зависи от два фактора.

1. Колко ефективно бариерата предава електронната вълна, което намалява експоненциално с дебелината.

2. Броят на модите на електронните вълни, които се удрят в бариерата, който се дава чрез площта на тунелния преход, разделена на квадрата на дължината на вълната.

Квантовата точка е мезоскопична система, в която добавянето или отстраняването на един електрон може да предизвика промяна в електростатичната енергия или Кулоновата енергия, която е по-голяма от топлинната енергия и може да контролира електронния транспорт към и извън квантовата точка. Чувствителността към индивидуалните електрони води до електроника, базирана на един електрон. За квантова точка нивото на дискретната енергия на електроните в нея е ясно изразено като това в атомите и молекулите, така че може да се говори за „изкуствени атоми и молекули“ (Kastner, 2000). Когато вълновите функции между две квантови точки се

припокриват, свързаните квантови точки демонстрират свойствата на молекула. За да се изяснят свойствата на електронния транспорт в квантова точка, нека разгледаме метална наночастица, разположена между два метални електрода, както е показано на Фиг. 1. Наночастицата е отделена от електродите чрез вакуум или изолационен слой като окис или органични молекули, така че между тях е разрешен само тунелинг (Fulton, 1987). Така можем да моделираме всеки от преходите наночастица-електрод с резистор в паралел с кондензатор. Съпротивлението се определя от тунелинга на електрони, а капацитетът (C) зависи от размера на частицата. Означаваме резисторите с R_1 и R_2 , кондензаторите с C_1 и C_2 , а приложеното напрежение между електродите с V . Ще разгледаме как токът I зависи от V . Когато започнем да увеличаваме V от нула, никакъв ток не може да протече между електродите, защото движението на един електрон към или от една първоначално неутрална наночастица коства енергия, дадена с уравнение (1).

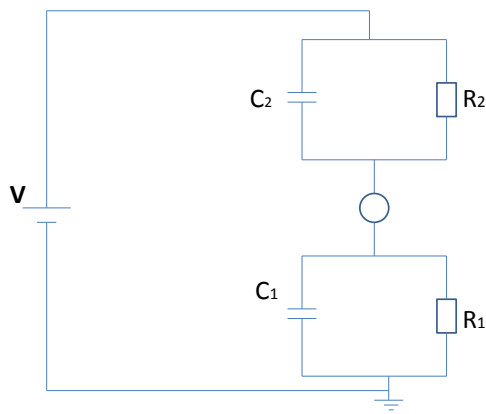
$$E_c = e^2/(2C), \quad (1)$$

където „e“ е зарядът на електрона.

Това потискане на електронния поток се нарича Кулонова блокада. Ток започва да протича през наночастицата, само когато приложеното напрежение V е достатъчно голямо, така че

$$V_{th} \geq E_c = e^2/(2C) \quad (2)$$

V_{th} се нарича прагово напрежение. Така във волтамперната характеристика (V_{Ax}) очакваме права с нулев ток с ширина $2V_{th}$. Когато приложеното напрежение достигне V_{th} , един електрон се добавя или отстранява от наночастицата. При по-нататъшно увеличаване на напрежението токът не се увеличава пропорционално, защото се изисква да добавим (или отстраним) два електрона към наночастицата, което струва повече енергия. След като приложеното напрежение стане достатъчно голямо, за да преодолее Кулоновата енергия на два електрона, токът започва да нараства отново. Това води до стъпаловидно нарастване на V_{Ax} , наречено Кулонова стълба.



Фиг. 1. Структура на квантова точка

Теоретични основи

В историята на електрониката с един електрон „класическата“ теория, въведена от Кулик и Шектер (Веднарек, 2000), играе много важна роля в разбирането на поведението на елементи с един електрон. Това е обща теория, базирана на следните допускания:

А. Оразмеряването на енергията на електрона в проводниците се игнорира, т.е. спектърът на енергията на електрона се третира като непрекъснат. Това допускане е валидно, само ако Кулоновата енергия $E_C \ll k_B T$. Това често дава адекватно описание на наблюденията, доколкото $E_C \ll E_C$.

Б. Времето τ_t на тунелинг през бариерата се приема за нищожно малко в сравнение с други времена (включително интервала между съседни събития на тунелинг). Това допускане е валидно за тунелни бариери, използвани в елементи с един електрон. На практика $\tau_t \sim 10^{-15}$ s.

В. Кохерентни квантови процеси, състоящи се от няколко едновременни квантови събития (ко-тунелинг) са игнорирани. Това допускане е валидно, ако съпротивлението R на всички тунелни бариери на системата е много по-голямо отколкото квантовото съпротивление R_Q ($R \gg R_Q$).

$$R_Q = h/4e^2 \sim 6,5 \text{ k } \Omega, \quad (3)$$

където h е константата на Планк.

Класическата теория е количествено споразумение с всички експериментални данни за системи с метални проводници (с техните малки стойности на дължината на вълната на електрона на нивото на Ферми λ_F и дава поне качествено описание на повечето резултати за повечето полупроводникови структури, където количествените ефекти са по-забележими поради по-голяма λ_F). Следвани са тези изисквания при изследването на системи с един електрон.

Резултати

Приложения на SET

„Суперчувствителен „електромер“

Високата чувствителност на транзисторите с един електрон ги превръща в „електромери“ в уникални физични експерименти. Например чрез тях са възможни ясни наблюдения на ефекти на еднаквост в суперпроводници. Демонстрирани са абсолютни измервания на екстремно ниски постоянни токове $\sim 10^{-20}$ A. Транзисторите са използвани и в първото измерване на ефекти с един електрон в кутии и филтри с един електрон. Модифицирана версия на транзистора е използвана за първо доказателство на съществуването на възбуждане на частичен заряд в квантовия ефект на Хол.

Спектроскопия на един електрон

Едно от най-важните приложения на елементите с един електрон е възможността за измерване на енергиите за събиране на електрони (и следователно разпределението на нивата на енергиите) в квантови точки и други нанообекти.

Стандарти за постоянен ток

Едно от възможните приложения на тунелинг на един електрон е фундаменталната стандартизация на постоянен ток (Knobel, 2002). За тази цел се използва заключване на фазата на SET осцилации или Блох осцилации в прост осцилатор с външен радиочестотен източник на добре дефинирана честота F . Заключването на фазата ще предостави трансфера на определен брой m електрони за период на външния радиочестотен сигнал и следователно ще генерира постоянен ток, който е фундаментално свързан с честотата: $I = f(F)$. Този подход има ограничение на кохерентната осцилация, което се преодолява чрез използването на стабилен радиочестотен източник, който управлява елементи, които не демонстрират кохерентни осцилации в автономен режим.

Температурни стандарти

Може да се разработи нов подход към нов стандарт за абсолютна температура чрез използването на едно-измерни редици с един електрон (Matsumoto, 1996). При ниски температури, редици с $N \gg 1$ острови демонстрират V_{Ax} , подобни на тези на SET с ясна Кулонова блокада на тунелинга при ниски напрежения ($V < V_{th}$) и доближаваща линейната асимптота $V = N \cdot R \cdot I + \text{const}$ при $|V| \gg V_{th}$. Ако температурата се повиши над E_C/k_B , температурните флуктуации разрушават Кулоновата блокада и V_{Ax} е почти линейна при всички напрежения: $G = dI/dV \sim G_n = 1/NR$.

Единственият оставащ артефакт от Кулоновата блокада е малък наклон в диференциалната проводимост около $V=0$.

Откриване на инфрачервено излъчване

Изчисленията на фотоотговора на системи с един електрон на електромагнитно излъчване с честота E_c/h показват, че най-общо отговорът се различава от този при добре познатата теория на Тиен-Гордън за тунелинг, асистиран с фотони (Cleand, 1993). Фактически това се основава на допускането за независими събития на тунелинг, докато в системите с един електрон електронният трансфер е обикновено зависим. Този факт означава, че елементите с един електрон, по-специално едноизмерната много-преходна редица, с тяхната ниска степен на ко-тунелинг може да се използва за ултрачувствителен видео- и хетеродин детектор на високочестотно електромагнитно излъчване подобно на преходите в редиците суперпроводник-изолатор-суперпроводник (SIS). Поредицата с един електрон има предимства пред нейния аналог SIS:

- по-нисък shot шум (вид електронен шум, който произтича от дискретната природа на електричния заряд);
- удобна настройка на праговото напрежение.

Тези особености я правят перспективна за детекция в терагерцовия честотен диапазон, където още няма детектори, защитени от предишни излъчвания.

Логика „Състояние на напрежението”

Транзисторите с един електрон могат да се използват и в режим „състояние напрежение”. В този режим входното гейтово напрежение V контролира тока сорс-дрейн на транзистора, който се използва в цифрови логически схеми подобно на конвенционалните полевни транзистори. Това означава, че зарядните ефекти с един електрон са ограничени до вътрешността на транзистора, докато външно той изглежда като обичаен електронен елемент, превключващ мулти-електронни токове с двоично представено ($1/0$, високо-ниско) постоянно напрежение (Masumi, 2004). Тази концепция опростява проектирането на схеми, което може да игнорира всички подробности на „физиката с един електрон”. Един основен недостатък на схемите със състояние напрежение е, че никой от транзисторите във всяка комплементарна двойка не е затворен прекалено добре, така че статичната утечка на ток в тези схеми е напълно реална, от порядъка на 10^{-4} e/RC. Съответната статична консумация на мощност е нищожна за относително големи елементи, работещи при хелиеви температури. Обаче при експлоатация при стайна температура тази мощност става от порядъка на 10^{-7} W на транзистор. Въпреки че е очевидно ниска, тази цифра дава една неприемлива плътност на разсейване на статична мощност (>10 kW/cm²) за хипотетични схеми, които могат да бъдат достатъчно плътни ($>10^{11}$ транзистора на см²), за да представляват реално предизвикателство за еталонната CMOS технология (Songphol, 2002).

Логика „Състояние на заряда”

Проблемът с утечка на ток се решава с използването на друг логически елемент, наречен логика със състояние на заряда, в който отделните битове информация са представени чрез наличието/липсата на отделни електрони в определени проводящи острови през цялата

схема. В тези схеми статичните токове и мощност изчезват, докато няма постоянен ток в някое статично състояние.

Програмируема логика Транзистор с един електрон

SET без функция на твърда памет е ключ към програмируема SET логика (Lingjie.1997, Ken Uchida. 2003). Промяна на фазата на полупериод прави функцията на SET допълваща към конвенционалните SET. Като резултат SET с функция на твърда памет имат функционалността на конвенционалните SET (като n-MOS) и допълващите SET (като p-MOS). Като се използва този факт, функцията на SET схема може да се програмира на базата на функцията, съхранена чрез функцията на паметта. Зарядът около квантовата точка на SET, а именно един SET остров променя фазата на Кулонова осцилация, експлоатира писане/триене на паметта, което инжектира/изхвърля заряд към/от паметта близо до SET острова. Това прави възможно да се настройва фазата на Кулонова осцилация. Ако инжектираният заряд е адекватен, промяната на фазата е половин период от Кулоновата осцилация.

Проблеми в реализацията на SET

Литографски технологии

Първият най-голям проблем с всички логически елементи с един електрон е изискването $E_c \sim 1000k_B T$, което на практика означава размер на острова под нанометър за експлоатация при стайна температура. В схеми с много голяма степен на интеграция това ниво на производствена технология е много трудно. Освен това, даже ако тези острови са произведени по някакъв начин чрез нанолитография, трудно ще бъдат абсолютно правилни. Докато в такива малки проводници квантовата кинетична енергия дава доминантен принос към енергията за добавяне на електрон ($E_c \gg E_c$), даже малки вариации във формата на острова ще доведат до непредсказуеми и по-скоро съществени вариации в спектъра на енергийните нива и следователно в праговете на превключване на елемента.

Предишен заряд

Вторият основен проблем с логическите схеми с един електрон е лошата случайност на предишния заряд. Един зареден примес в изолиращата среда поляризира острова, създавайки на неговата повърхност заряд Q_0 от порядъка на e . Този заряд е ефективно извлечен от външния заряд Q_e .

Ко-тунелинг

Есенцията на ефекта е, че тунелинг на няколко електрона ($N > 1$) през различни бариери по едно и също време е възможно като отделен кохерентен квантовомеханичен процес. Енергията на този процес е приблизително $(R_Q/R)N-1$ пъти по-малка от тази за тунелинг на един електрон.

Ако уравнението, изразено с (3) е удовлетворено, тази енергия е доста малка. Въпреки това може ясно да се наблюдава ко-тунелинг в обхвата на Кулонова блокада, където класическият тунелинг е подтиснат.

Експлоатация при стайна температура

Първият голям проблем с всички известни типове логически елементи с един електрон е изискването $E_s \sim 1000 k_B T$, което на практика означава размер на острова под нанометър за експлоатация при стайна температура.

Свързване на SET с външната среда

Индивидуалните структури определят коя функция като логическа схема трябва да бъде аранжирана в по-големи 2-измерни образци. Има две идеи. Първата е да се интегрира SET както и съответното оборудване със съществуващите MOSFET. Това е атрактивно, защото може да увеличи плътността на интеграция. Втората опция е да се преустанови свързване с проводник, а вместо него да се използва статичната електронна сила между основните клъстери за формиране на схема, свързана чрез клъстери, която се нарича квантов клетъчен автомат (QCA). Предимството на QCA е неговата висока скорост за обмен на информация между клетките (близка почти до светлинната скорост) само чрез електростатични взаимодействия, не са необходими проводници между редиците и размерът на всяка клетка може да бъде по-малък от 2,5 nm. Това ги прави много подходящи за памет с висока плътност и следваща генерация квантов компютър.

Заклучение

Транзисторът с един електрон (SET) доказва своята стойност като инструмент в научните изследвания. Съпротивлението на SET се определя от тунелинг на електрон, а капацитетът зависи от размера на наночастицата. Токът започва да протича през прехода, когато приложеното напрежение е достатъчно, за да увеличи енергията на електрона над Кулоновата блокада. Това се нарича прагово напрежение V_{th} . Постоянен нулев ток съществува за $2 V_{th}$. Приложенията на наноелементи в метрологията, включващи фундаменталните стандарти за ток, съпротивление и температура, изглеждат много-обещаващи. Друго потенциално приложение е откриване на излъчвания в терахерцовия диапазон. Ситуацията е много по-сложна с цифровата „електроника с един електрон“. Концепцията на логика с един електрон, предложена досега, разглежда силни предизвикателства: или да се отстрани предишния заряд, или да се осигури

непрекъснат трансфер на заряд в наномасаб. Основният проблем в наноерата е производството на наноелементи. SET предоставя потенциал за ниска консумация и интелигентни чипове, подходящи за всякакви приложения.

Литература

- A.N.Cleand, D.Estene, C.Urbina and M.H.Devoret. 1993. An extremely Low noise Photodetector based on the single electron Transistor, *Journal of Low Temperature Physics*, Vol. 93, Nos.3/4, pp.767-772.
- Ken Uchida, Jugli Kaga, Ryuji Ohba and Akira Toriumi. 2003. Programmable Single-Electron Transistor Logic for Future Low-Power Intelligent LSI: Proposal and Room-temperature Operation, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 50, №7.
- K. Matsumoto, M. Ishii, K.Segawa, Y.Oka, B.J. Vartanian and J.S. Harris. 1996. Room temperature operation of a single electron transistor made by the scanning tunneling microscope nano oxidation process for the TiOx/Ti system, *Appl. Phys. Lett.* 68 (1), pp. 34-36.
- Lingjie Guo, Effendi Leobandung and Stephen Y. Chou. 1997. A silicon Single-Electron transistor Memory operating at room temperature, *Science* Vol. 275, pp. 649-651.
- M.A.Kastner. 2000. The single electron transistor and artificial atoms, Leipzig, *Ann.Phys.*, vol.9, pp. 885-895.
- Masumi Sailto, Hidenhiro Haratation and Toshiro Hiramoto. 2004. Room-Temperature Demonstration of Integrated Silicon Single-Electron Transistor Circuits for Current Switching and Analog Pattern Matching, San Francisco, USA, *IEEE International Electron Device Meeting*.
- R. Knobel, C.s. Yung and A.N.Clelanda. 2002. Single-electron transistor as a radio frequency mixer, *Applied Physics Letters*, Vol.81, № 3, pp. 532-534.
- S.Bednarek, B.Szafran and J.Adamovski. 2000. Solution of the Poisson Schrodinger problem for a single-electron transistor, *Phys.Rev.B*, Vol.61, pp.4461-4464.
- Songphol Kanjanachuchai and Somsak Panyakeow. 2002, Beyond CMOS: Single-Electron Transistors. Bangkok, Thailand, *IEEE International Conference on Industrial Technology*.
- T.A. Fulton and G.D.Dolan. 1987. Observation of single electron charging effect in small tunneling junction, *Phys.Rev.Lett.*, Vol.59, pp.109-112.