

АНАЛИТИЧНА ДИСКУСИЯ ВЪРХУ ТРАНЗИСТОР С ЕДИН ЕЛЕКТРОН

Мила Илиева-Обретенцова

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

РЕЗЮМЕ. Транзисторът с един електрон е ключов елемент в съвременната изследователска област наноелектроника, който може да предложи ниска консумация и висока скорост. Този транзистор е нов ключов елемент, който запазва своите свойства на атомно ниво и дори отвъд него; той може да контролира движението на един електрон. Консумацията на елемента е приблизително пропорционална на броя електрони, предавани от източника на напрежение към земята при различни логически операции. Следователно този елемент се използва като схема с много голяма интеграция за намаляване на консумацията. Контролираният тунелинг на един електрон осигурява неговата висока скорост. В статията се прави сравнение между транзистор с един електрон и полеви транзистор, посочват се предимствата и недостатъците на първия и се дискутират причините за неговата популярност в областта на наноелектрониката.

ANALYTICAL DISCUSSION OF SINGLE ELECTRON TRANSISTOR

Mila Ilieva-Obretenova

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

ABSTRACT. Single Electron Transistor is a key element in the current research field nanoelectronics, which can offer low power consumption and high operating speed. This transistor is a new switching element, which retains its properties on atomic scale and besides this; it can control the motion of a single electron. Power consumption is roughly proportional to the electron number transferred from voltage source to the ground in various logic operations. Therefore, this element is generally utilized like an ULSI to reduce the power consumption. The controlled tunneling of a single electron makes its high operating speed. This paper focus on the basic comparison of SET and FET, on SET's advantages and disadvantages to make a clear picture about the reason behind its popularity in the field of nanoelectronics.

Въведение

Транзисторът с един електрон (SET) е много популярен в областта на наноелектрониката от десетилетие. SET е фундаментален триелектроден елемент с един електрон, който е способен да предложи ниска консумация и висока скорост. Откакто технологията достигна наноразмер, поведението на наноелектронния SET се контролира от квантово механични ефекти. Схематичната структура на SET е почти същата като тази на MOSFET. SET може да се разглежда като полеви транзистор, чиито канал се състои от малък, с нисък капацитет C , проводящ остров (квантова точка), която е свързана към сорса и дрейна чрез два тунелни прехода и капацитивно свързана към един или повече гейтове, които се използват да контролират трансфера на един електрон от сорса към дрейна. Тук тунелният преход не е нещо друго освен тънка изолационна бариера между два проводящи електрода. SET работи в режим един електрон, при който само един електрон може да се предава от сорса към дрейна през острова при прилагането на постоянно гейтово напрежение върху острова. Елементът с един електрон се базира на един квантов феномен, известен като тунелен ефект. Технологията „Тунелинг на един електрон“ представя възможността да се контролира трансфера на индивидуални електрони. SET може да се използва като чувствителен усилвател на линеен заряд чрез прилагане

на квантов тунелен ефект с един електрон. SET има чувствителност от порядъка на 10^{-6} e/Hz^{1/2}. Това означава, че вариация на заряда от порядъка на 10^{-6} може да се открие за 1 секунда. Двата основни процеса, които се извършват в този наноструктуриран електронен елемент са Кулонова блокада и тунелинг на един електрон. Понастоящем SET се разглежда като елемент с бъдеща ниска консумация и база за интегрални схеми с висока плътност поради възможната работа с няколко електрона. За практически приложения абсолютно необходимо е SET да работи при стайна температура. За тази цел размерът на острова трябва да бъде толкова малък, колкото е възможно, обикновено 10nm. Целта е да се намали общия капацитет на SET и да се преодолеят проблемите от температурни флуктуации.

Теоретични основи

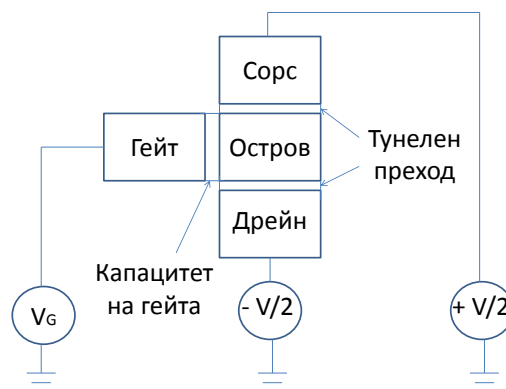
„Един електрон“ е фундаментална концепция в елементи като SET, която може да се представи чрез малка метална сфера. Сферата първоначално е електронеутрална, т.е. общият заряд е нула, поради еднакъв брой електрони и протони в нея. Допускаме, че един електрон е позициониран близо до сферата. В тази ситуация той е привлечен от сферата. Той се присъединява към нея и оставя отрицателен заряд от $-e$ върху нея. Поради

наличието на този заряд се създава електрично поле около сферата, така че, ако друг електрон дойде близо до нея, той ще срещне отблъскващата сила на полето. Концепцията зад „един електрон“ показва, че силата на този тунелинг ефект е зарядната енергия или електростатичната енергия, която се дава с формулата: $E_c = e^2/2C$. От горното уравнение е ясно, че ако капацитетът е много малък, зарядната енергия може да бъде доминираща. Феноменът на трансфер на един електрон може лесно да се разбере, ако концепцията за движението на електронен заряд през проводник е ясна. Токът тече през проводник по един непрекъснат начин, тъй като определен брой свободни електрони е наличен в него. Този ток може да се определи, като се изчисли зарядът, пренасян през полупроводника за интервал от време. Зарядът, пренасян през проводника, може да има някаква стойност, следователно той не е фиксиран количествено. В този случай трансферът на заряд през проводник е едно непрекъснато количество. Електронът се движи спрямо решетката на атомите и не може да бъде определен количествено в проводника. Ако един тунелен преход се постави в редови проводник, потокът от електрони, проникващи в тънката изолационна бариера, ще бъде ограничен от нея. Следователно токът през един проводник може да се определи количествено в тази ситуация. Електричният заряд може да бъде движан от непрекъснат и дискретен процес поради прилагането на тунелен преход като една изолираща бариера в редови проводник. Ако дискретни електрони могат да преминават през прехода, зарядът ще бъде акумулиран в него. Когато се приложи достатъчно високо напрежение напречно на прехода, преминава един електрон. Ликарев (Likharev, 1999) описва този феномен на тунелинг на един електрон като капещ кран. С други думи, ако тунелният преход е захранен с постоянен ток I , осцилацията на тунелинг с един електрон ще се случва с честота $f = I/e$. Зареждането и разреждането на тунелния преход и температурните флуктуации са тясно свързани една с друга. Температурните флуктуации могат да разстройват движението на електроните и да подтиснат количествените ефекти. Следователно, за да се избегне този проблем, Кулоновата енергия трябва да бъде по-голяма от температурните флуктуации. Необходимото условие за наблюдение на феномена „един електрон“ е: $E_c = e^2/2C > k_B T$, където k_B е константата на Болцман, а T е температурата в Келвин. Има две фундаментални условия за наблюдение на зарядния ефект при стайна температура. Първото условие, е че капацитетът C трябва да бъде по-малък от $3 af$. Второто условие е, че квантовите флуктуации в броя на електроните трябва да бъдат незначителни, т.е. електроните трябва да бъдат локализирани само в острова и всички тунелни преходи трябва да бъдат непрозрачни за електроните, за да ги ограничават в островите. Това необходимо условие за непрозрачност може да се изпълни, ако тунелното съпротивление R_T е по-голямо от квантовото съпротивление, т.е. $R_T > h/(2\pi e^2) = 25,813k\Omega$, където h е константата на Планк, а e е зарядът на електрона.

Резултати

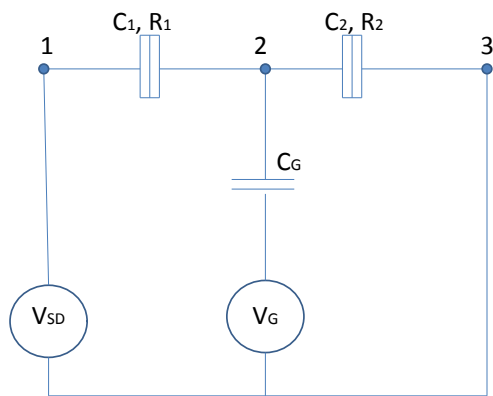
Схема на SET и неговата работа

SET е основен елемент при проектирането на схеми с ултрависока степен на интеграция. Триелектродният превключващ елемент, в който може да се наблюдава Кулонова блокада, е известен като транзистор с един електрон (Amiza, 2005). За разлика от полевите транзистори, транзисторите с един електрон се основават на квантов феномен, известен като тунелен ефект. Този ефект може да се наблюдава, когато два метални електрода са разделени от една изолираща бариера, известна като тунелен преход (Scholze, 2000). Тези елементи могат да пренасят електрони от сорса към дрейна един по един. Схематичната структура на SET е показана на фиг.1. Квантовата точка, която е по-малка от 100 nm в диаметър, е мезоскопична (Averin et al. 1991) система, в която електростатичната (Кулоновата) енергия може да се променя поради отстраняването или добавянето на един електрон. Тази енергия е по-голяма от термичната енергия и може да контролира транспорта на електрони към и от квантовата точка. С други думи, квантовата точка е малък проводящ остров, който съдържа управляем брой електрони, заемащи дискретни орбити.



Фиг.1. Схематична структура на SET

На фиг.2 е показано, че схемите са изградени от малки тунелни преходи, капацитети и източници на напрежение (Deer, 2006; Yu, 2006). Напрежението на гейта V_G се използва да контролира SET или, с други думи, то контролира последователния трансфер на електрони. Следователно, един електрон, преминаващ през тунел, може да се опише като дискретен заряд поради стохастичната природа на събитието тунелинг. На фиг. 2 възел 1 представя сорса, възел 2 е остров, а възел 3 представя дрейна. Тунелните преходи са локализирани между тези възли и са описани като тунелен капацитет C_1 и C_2 и тунелно съпротивление R_1 и R_2 . Теорията за тунелинг на един електрон зависи от класическата теория, която се фокусира върху зареждането на малкия проводящ остров с диаметър ≤ 100 nm. Капацитетът на острова се дава чрез уравнението за проводящ сферичен капацитет.



Фиг.2. Схема на транзистор с един електрон

SET може да бъде електростатично контролиран чрез гейтовия капацитет C_G . Следователно общият капацитет на острова се дава чрез

$$C = C_1 + C_2 + C_G \quad (1)$$

Принципи на тунелинг и Кулонова блокада

Тунелният преход представлява тънка изолираща бариера между два проводящи електрода. В случая на класическа електродинамика никакъв ток не може да протича през изолираща бариера. Но в съответствие с подхода на квантовата механика има някаква вероятност (по-голяма от нула) един електрон, разположен от едната страна на бариерата – тунелен преход – да достигне другата страна. Следователно трансферът на електрони през бариерите на квантовата точка предизвиква зареждане на квантовата точка. А това води до увеличаване на електростатичната енергия, която се дава чрез

$$E_C = e^2 / (2C). \quad (2)$$

Тази енергия е известна още като Кулонова зарядна енергия или енергия на Кулонова блокада. Тя е отблъскващата енергия на предишния електрон, съществуващ в острова спрямо следващия електрон, идващ към острова. В случай на миниатюрна система капацитетът C на острова е много малък. Следователно в съответствие с уравнение (2) Кулоновата зарядна или блокираща енергия E_C ще бъде много голяма и поради тази причина електроните са неспособни да се движат едновременно, а преминават един по един. Кулоновата енергия е отговорна за подтискането на едновременния трансфер на електрони. Този феномен е известен като Кулонова блокада (Grabert, 1992). Подтискането на трансфера може да бъде отстранено по един от следните два възможни начина:

А. Когато Кулоновата зарядна енергия се надвиши от термичните възбуждания при температура T , т.е.

$$T \sim T = E_C / K_B \quad (3)$$

Б. Когато Кулоновата зарядна енергия се превиши от външно приложено напрежение V , т.е.

$$V \sim V_{th} = E_C / e = e / (2C) \quad (4)$$

V_{th} е известно като прагово напрежение, което се дефинира като приложеното напрежение достатъчно да увеличи енергията на електрона над Кулоновата блокада. Следователно, ако напрежението V е по-малко от праговото напрежение V_{th} , системата е в състояние на Кулонова блокада. За да се изясни концепцията за Кулонова блокада, отново разглеждаме схемата с един електрон, в която при определено напрежение ще протече ток. Ако отстраним допълнителните ефекти, токът от тунелинг с първо приближение е пропорционален на приложеното напрежение. С други думи тунелният преход се държи като резистор с постоянна стойност, която зависи от дебелината на бариерата. Увеличаването на съпротивлението на тунелния преход около нулевото напрежение, се разглежда като Кулонова блокада. Следователно Кулоновата блокада може да бъде дефинирана като увеличено съпротивление на тунелния преход при много ниски напрежения на устройство, което се състои от поне един тунелен преход с малък капацитет. Кулонова блокада може да се получи само когато следните три условия са изпълнени:

а. Напрежението трябва да бъде по-ниско от елементарния заряд, разделен на собствения капацитет на острова, $V_{bias} < e/C$.

б. Термичната енергия $K_B T$ трябва да бъде под зарядната енергия, т.е. $K_B T < e^2/C$. В противен случай електронът ще премине през квантовата точка чрез термично възбуждане.

в. Тунелното съпротивление R_T трябва да бъде по-голямо от $h/(2\pi e^2)$, което е изведено от принципа за неопределеност на Хайзенберг $R_T > h/(2\pi e^2) = 25813 \Omega$.

Класическа теория за работата на SET

Класическата теория за SET е квантово механичен анализ, който описва транспорта на електрони през тези елементи и също изразява произхода на Кулонова блокада. В този подход енергията (Yen et al., 2005), която определя транспорта през SET, е свободната енергия на Хелмхолц (F). Тази енергия може да се дефинира като разликата между общата енергия, съхранена в SET, означавана като E_Σ и работата, извършена от запазващите източници, означавана с W :

$$F = E_\Sigma - W \quad (5)$$

Общата енергия, съхранена в SET, включва всички три компонента, които трябва да се разгледат, когато един остров е зареден с един електрон. Общата енергия, съхранена в SET, може да се напише като

$$E_\Sigma = E_C + \Delta E_F + E_N \quad (6)$$

където E_C е енергията отразяваща взаимодействието електрон електрон;

ΔE_F – енергията на Ферми;

E_N – енергията на затваряне.

Промяната в свободната енергия на Хелмхолц показва оценяването на вероятността за тунелно събитие на електрон.

Взаимодействие Електрон-Електрон

Класическият модел на взаимодействие електрон-електрон се базира на електростатичната капацитивна зарядна енергия. Фактът зад взаимодействието електрон-

електрон е, че, когато един допълнителен заряд dq се транспортира към проводник, трябва да се извърши работа спрямо полето, което се създава от вече съществуващи заряди върху този проводник. Основното изискване за остров с капацитет C , който може да бъде зареден с един електрон със заряд „ e “, се дава чрез (2).

Енергия на Ферми

Всички системи с един електрон, имащи малки острови, демонстрират и вторична енергия на взаимодействие електрон-електрон, която е известна като енергия на Ферми. Тази енергия може да се променя, когато островът е зареден с един електрон.

Енергия на затваряне

В случай когато намалява размерът на острова, разстоянието между енергийните нива на състоянията на един електрон се увеличава в някаква пропорция, която е индиректно свързана с квадрата на размера на квантовата точка. Ако се използва безкраен потенциал и прост модел на квантова точка, енергията на затваряне E_N може да се изчисли чрез решаване на следното уравнение на Шрьодингер:

$$E_N = (1/2m)(hN/2d)^2, \quad (8)$$

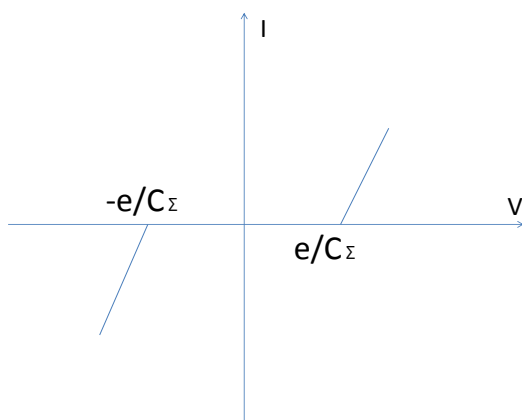
където d е диаметърът на острова.

Работа, извършена от захранващите източници

Термодинамично взаимодействащият остров представлява една отворена система. Следователно, работата, извършена от системата захранващи източници, трябва да бъде включена с цел да се определи общата налична енергия за събитие тунелинг.

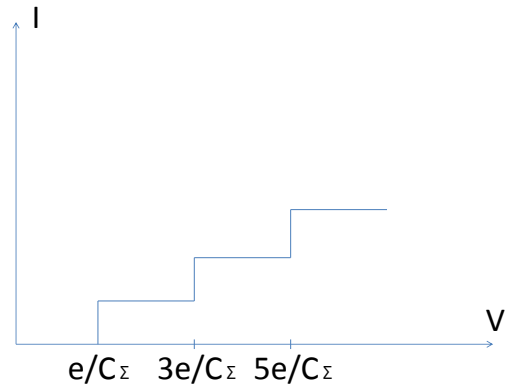
Волт-амперна характеристика на SET

Волт-амперната характеристика (VAx) за схема на SET със симетричен преход, където $C_1=C_2$ и $R_1=R_2$, е показана на фиг.3. Вижда се, че за $|V| < e/C_\Sigma$ токът е нула (Dubejsky, 2007). Ако външно приложеното напрежение V се увеличи до едно ниво, което е над праговото напрежение V_{th} , Кулоновата блокада се преодолява и започва да протича ток. В тази ситуация преходът се държи като резистор. Последващото влизане и излизане на един електрон от един преход към друг е известно като „Корелиран тунелинг на електрони“.



Фиг.3. VAx на SET със симетричен преход

Фиг.4 представя VAx за схема със силно асиметричен преход $R_1 \ll R_2$.



Фиг.4. VAx на SET с асиметричен преход

В този случай токоносителите - електрони влизат през единия преход и се насочват към втория поради наличието на високо съпротивление. Електроните се движат от единия преход към другия много бързо. Следователно това бързо движение на излишни електрони от единия преход към другия повишава общата енергия на острова. Ако напрежението се повиши, то ще увеличи популацията на електрони в острова. В този случай VAx представлява стъпаловидна графика, която е известна като „Кулонова стълба“.

Разлика между характеристики на MOSFET и SET

Структурата на SET е почти същата като тази на MOSFET, но има някои разлики между тях:

1. SET има тунелен преход на мястото на p-n-преход в MOSFET;
2. SET има малък проводящ остров – квантова точка на мястото на канал в MOSFET.

При SET електроните се предават един по един през канала (остров) от сорса към дрейна поради ефекта на Кулонова блокада. В случай на конвенционален MOSFET, брой от електрони се предава през канала за определено време. Следователно за разлика от SET в MOSFET много електрони едновременно участват в дрейновия ток. За разлика от идеалния MOSFET сорсът и дрейнът на SET са разделени от канала чрез достатъчно големи съпротивления, които действат като тунелни бариери. Характеристиките на SET и MOSFET са много различни една от друга. Общото е електростатичният ефект, който управлява и двата елемента, но в случая на SET електроните не са свободни да се движат от сорса към дрейна поради наличието на тунелни преходи. Поради ефекта на Кулонова блокада един електрон, създаващ малък отрицателно зареден регион, усеща електростатичното отблъскване от предишния електрон в този регион. Това регулира броя на електроните един по един в канала. При MOSFET дрейновият ток I_D зависи от броя на електроните, преминали през канала – повече електрони в канала, по-голям дрейнов ток. Следователно характеристиката $I_D=f(V_G)$ е монотонна (с V_G е означено напрежението на гейта). Това остава вярно и при ниска температура, тъй като скоростта на Ферми се увеличава с плътността на електроните. При SET дрейновият ток I_D не зависи от броя

на електроните, преминаващи през канала, или от скоростта на Ферми. Характеристиката $I_D=f(V_G)$ е периодична, което показва краен дрейнов ток само за специфични гейтови напрежения, където енергиите за N и $N+1$ електрон в канала са достигнати. Когато температурата надвиши зарядната енергия $e^2/(2C_\Sigma)$, нива N и $N+1$ нива са термично достъпни. Следователно и поведението на MOSFET е покрито от SET.

Предимства и недостатъци на SET

Предимствата на SET са следните (Kumar, 2010):

- ниска консумация на енергия;
- висока чувствителност;
- компактни размери;
- висока скорост;
- опростена схема;
- възможност за репродуктивност;
- прост принцип на работа;
- перспективна интеграция с традиционни CMOS схеми;
- по-висока производителност поради компактния размер;
- висок входен импеданс и ниско усилване по напрежение. Заедно с това те са много чувствителни към случаен предишен заряд. Поради това SET измества MOSFET в много приложения, където нисък изходен импеданс и голямо усилване по напрежение са необходими.

Недостатъците на SET са следните (Kumar, 2010):

- необходимост от интеграция на SET в голяма степен. За да работи SET при стайна температура, трябва да се синтезират големи количества от монодисперсни наночастици по-малки от 10 nm в диаметър. Трудно се произвеждат големи количества SET чрез традиционна оптична литография и обработка на полупроводници;
- трудно се свързва SET с външната среда;
- практически трудно се произвеждат SET.

Заклучение

Тази статия се фокусира върху теоретичната дискусия на основните принципи на SET и неговата важност в ерата на нанотехнологиите. Елементът предоставя ниска консумация и висока скорост и е подходящ за производството на различни схеми с ултрависока степен на интеграция.

Литература

- Amiza R. & U. Hashim. 2005. Single-electron transistor (SET): Literature Review, *Journal 2005*, Koieg, Malaysia.
- Averin D.V., K.K. Likharev, B.L. Altshuler, P.A. Lee, R.A. Webb. 1991. Mesoscopic Phenomena in Solids, *Elsevier*, Amsterdam.
- Deep Karan. 2006. Simulation and E-beam patterning of single-electron transistor, *M.S.Thesis in electrical engineering*, Univ. of Texas at Arlington.
- Dubejsky, Gregory S., 2007. Fabrication and DC characterization of Single electron transfers at low temperature, *M.S.Thesis*, Queen`s Iniv. Kingston, Ontario, Canada.
- Grabert H., M.H. Devoret. 1992. Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures, *Plenum Press*, New York.
- Kumar Om, M. Kaur. 2010. Single electron transistor: Applications and Problems, *International journal of VLSI design and communication system (VLSICS)* Vol.1, №4.
- Likharev, Konstantin K. 1999. Single-electron device and their applications, *Proc. IEEE* Vol.87, 606-632.
- Scholze, Andreas. 2000. Simulation of single-electron devices. *Ph.D. Dissertation*, Univ. of Jena, Germany.
- Yen L.J., Ahmad Radzi Mat Isa, Karsono Ahmad Dasuki, 2005. Modeling and Simulation of single-electron transistor, *Journal of Fundamental Science* 1, 1-6.
- Yu Qiaoyan. 2006. Single-electron devices, *Student-member IEEE Manuscript*.