

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОРОЗМІРНОГО ТРАНЗИСТОРА

© Павлиш В.А., Закалик Л.І., Корж Р.О., Доскоч З.І., 2008

Розглянуто можливість формалізації фізичних процесів в одноелектронному транзисторі (ОЕТ). З усіх розглянутих методів моделювання нанотранзисторів найбільш близькою до реальних умов роботи цих елементів є функція Гріна для неврівноважених процесів, оскільки вона враховує квантову природу електрона за рахунок поєднання Гамільтоніана і хвильової функції Шредінгера. Це дає можливість через функцію Гріна моделювати електричні характеристики ОЕТ. Ця робота ще вдосконалюється, але перші результати близькі до реальних характеристик.

Theoretical modeling of physical processes in one-electron transistor (OET) is considered in present article. Among all considered theoretical methods for nanotransistors modeling most close to real operation of this element is Green function for non-equilibrium processes because it considers quantum nature of electron combining Hamiltonian and Schrödinger wave function. This allows modeling of OET electric characteristics through Green function. Present work is in process but first results are very close to real characteristics.

Вступ

Дослідження і моделювання електричних характеристик нанорозмірних квантових елементів сьогодні і на перспективу є одним із важливих напрямів розвитку мікроелектроніки, оптоелектроніки і наноелектроніки. Для прискорення процесу створення елементів нового класу для вказаних областей науки і техніки важливо мати загальні уявлення, конкретні знання про фізичні процеси, на яких ґрунтується їх принцип дії, і вміння моделювати їх електричні характеристики. Це обумовлено тим, що елементи, розміри яких є меншими за 100 нм, найчастіше демонструють інші фізичні процеси, а також вимагають нового підходу до моделювання їх електричних характеристик.

Сьогодні створено багато нанорозмірних квантових транзисторів, в основу яких покладені різні фізичні принципи. Це є високої швидкодії транзистори, створені на багатошарових структурах GaAs-AlGaAs [1], квантові транзистори на основі ефекту Шубнікова-Гааса [2], транзистори на вуглецевих трубках, фулеренах [3], одноелектронний транзистор [4] тощо. Усі ці транзистори є цікавими з точки зору створення електронної апаратури нового покоління. Зокрема, одноелектронний транзистор цікавий для створення логічних елементів, пам'яті, мікропроцесорів, оскільки частотний діапазон їх становить порядку 1000 ГГц, споживають надзвичайно малу енергію, що на декілька порядків менша порівняно із сучасними напівпровідниковими елементами, та забезпечують надзвичайно високу густину елементів [5].

Як відомо, у 70-х роках минулого століття як альтернатива кремнієвим польовим транзисторам з'явилися польові транзистори на арсеніді галію, що значно підвищило швидкодію пристроїв на цих елементах. Особливо це відчутно було під час використання їх в комунікаційних системах, таких як мобільні телефони, сателітарні телевізійні декодери тощо. Але з часом ця швидкодія вже не задовольняла вимоги і на зміну їм з'явилися багатошарові тонкоплівкові польові транзистори на гетеропереходах типу GaAs-AlGaAs, що на декілька порядків підвищило їх швидкодію внаслідок розділення зарядів на контакті двох напівпровідників з різною шириною забороненої зони. Ще їх перевага полягає в тому, що, формуючи 2Д системи і використовуючи магнітне поле, силові лінії якого направлені перпендикулярно до потоку електронів, задаємо дискретність енергетичного спектра електронів, які відомі як рівні Ландау. Це квантування енергій електронів було виявлено під час вимірювання опору робочого каналу за низької температури. Цей

ефект був досліджений у 1966 році Шубніковим та Гаасе. У 1980 році К. Клітцінгом та співробітниками [6] в 2Д гетероструктурах досліджено квантування провідності Хола як функцію магнітного поля з константою q^2/h , що було підтверджено в пізніших роботах [7] і названо фракційним квантовим ефектом, що було використано для створення надшвидкодіючих квантових польових транзисторів.

У 1998 році було створено інтерференційний квантовий транзистор, який має специфічну форму у вигляді круга в 2Д просторі. Ще інакше їх називають точковими квантовими пристроями [8]. Всередині круга знаходиться квантова точка. Електроди витоків і стоків субмікронних розмірів сформовані на поверхні напівпровідника методом електронно-променевої літографії з лівого і з правого боків від квантової точки. Оскільки електронна хвиля знаходиться в крузі, то вона розповсюджується вліво і вправо навколо квантової точки. Якщо дві хвилі (ліва і права) накладаються, то виникає інтерференція та між витоків і стоком протікає струм за прикладення напруги між ними. Коли дві хвилі не накладаються, інтерференції не буде і струму не буде. Цей прилад яскраво демонструє хвильову і корпускулярну природу електрона.

До квантових транзисторів належить також одноелектронний транзистор, структура якого порівняно з вищеописаними набагато простіша. Сучасна технологія і засоби для її реалізації створюють можливість сформувати нанорозмірну структуру. Застосування одноелектронних транзисторів під час формування логічних елементів, запам'ятовуючих пристроїв, мікропроцесорів для квантових комп'ютерів значно збільшиться швидкість оброблення інформації, а також збільшиться одночасно кількість логічних операцій і надзвичайно підвищиться густина елементів на одиницю площі.

1. Фізична модель одноелектронного транзистора

Для створення одноелектронного транзистора використовують різні матеріали, але структура їх однакова. Це є витік, стік та заслін, розділені діелектричними проміжками. Сабто структура його така сама, як в МОН-транзистора на кремнії, але роль робочого каналу виконує наночастинка діаметром, не більшим за 10 нм, яка створює для електрона "кулонівську блокаду".

Чим менші розміри наноострівка, тим менше буде вільних електронів. Такі структури називають штучними атомами. Подібно до енергії іонізації енергія, яка необхідна для додавання чи усунення електрона за межі атома, називається зарядовою енергією E_c . Цю енергію визначає кулонівська взаємодія і контролюється вона за допомогою сумарної ємності C_Σ між наноострівком і металевими контактами. Зарядова енергія є набагато більша від теплової і визначається як $E_c = q^2/C_\Sigma$. Чим менші розміри має наноострівок, тим менше електронів може він захопити, а за довжини, меншої від 10 нм, тільки декілька. Вийти з нього за відповідної напруги на заслоні може тільки один електрон. Провідність робочого каналу дорівнюватиме q^2/h .

Оскільки фізичні процеси в одноелектронному транзисторі мають квантово-механічний характер, тому фізична модель повинна базуватися на розв'язку рівнянь Пуассона і Шредінгера. Але у різних авторів різні підходи до фізичного моделювання нанотранзисторів. Зокрема, в [9] пропонується так звана "drift-diffusion" модель, де за основу взято рівняння Больцмана. В [10] автори запропонували гідромеханічну модель, яка також ґрунтується на рівнянні Больцмана.

Ще є багато робіт [11, 12], які також включають два підходи: і "drift-diffusion", і гідромеханічний, але вже з врахуванням квантово-механічних ефектів. Запропоновані моделі є громіздкими і не повністю адекватні до експериментальних даних, а також в них розглядають "короткоканальні" транзистори, виконані на кремнії, чи кремнії з введенням атомів германію. Найбільш близька до фізичної моделі одноелектронного транзистора є модель транзистора, де робочий канал сформований на нанотрубках [13]. Власне ці автори вважають, що для балістичних транзисторів з довжиною каналу, меншим, ніж 10 нм, попередньо названі моделі є хибними.

На рис. 1, а показано схематичне зображення одноелектронного транзистора, а на рис. 1, б – розподіл енергії залежно від позиції електрона.

$$N_2(E) = N_1(E) \text{ і за } \tau_1 = \tau_2 \quad N_1(E) = \frac{N(E-U)}{2},$$

де τ_1 – час проходження електрона від витоку до наноострівка, а τ_2 – з наноострівка до стоку; $N(E-U)$ – ефективна густина рівнів в області наноострівка. Тоді

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \right] N(E-U) [f_1(E) + f_2(E)] dE, \quad (4)$$

а струм стоку

$$I_C = \frac{2q}{h} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{W \cdot (2mE)^{\frac{1}{2}}}{\pi \hbar} [f_1(E) - f_2(E)] dE, \quad (5)$$

де W – ширина робочого каналу; m – ефективна маса електрона.

Якщо врахувати розміри одноелектронного транзистора, то електрони будуть локалізуватися в межах двовимірної площини і кількість заряду, яка пройде через робочий канал з врахуванням прикладених напруг, буде

$$Q = \frac{Q_{2D}}{2} WL [F_0(\gamma_{F1}) + F_0(\gamma_{F2})], \quad (6)$$

де $\gamma_{F1} = \frac{(E_{F1} - E_c + q\varphi_s)}{k_b T}$; $\gamma_{F2} = \frac{(E_{F1} - E_c - qU_{cb} + q\varphi_s)}{k_b T}$; k_b – балістичний хвильовий вектор,

а струм стоку можна записати як

$$I_C = \frac{Q_{2D}}{2} \frac{WL}{(\tau_1 + \tau_2)} [F_{1/2}(\gamma_{F1}) - F_{1/2}(\gamma_{F2})]. \quad (7)$$

Оскільки $\frac{L}{(\tau_1 + \tau_2)} = \langle v \rangle$, де $\langle v \rangle$ – середня швидкість електрона, тоді, враховуючи прикладені напруги, її можна записати у вигляді

$$\langle v \rangle = \left(\frac{2k_b T}{\pi m} \right) \left[\frac{F_{1/2}(\gamma_{F1})}{F_0(\gamma_{F1})} \right] \left\{ \frac{1 - \frac{F_{1/2}(\gamma_{F2})}{F_{1/2}(\gamma_{F1})}}{1 + \frac{F_0(\gamma_{F2})}{F_0(\gamma_{F1})}} \right\}, \quad (8)$$

і якщо врахувати, що $C_3(U_{36} - U_{30}) = \frac{qQ_{2D}}{2} [F_0(\gamma_{F1}) + F_0(\gamma_{F2})]$,

$$I_C = C_3(U_{36} - U_{30}) \langle v \rangle [F_{1/2}(\gamma_{F1}) - F_{1/2}(\gamma_{F2})], \quad (9)$$

де $F_{1/2}$ – інтеграл Фермі-Дірака.

2. Функція Гріна для невірноважених процесів

Функція Гріна з усіх розглянутих методів [14, 15] є найкращим методом формалізації невірноважених процесів, які мають квантово-механічну природу, оскільки можна отримати розв'язок рівняння Пуассона і Шредінгера. Цей метод був запропонований для моделювання електричних характеристик нанотранзисторів з робочим каналом на одностінних нанотрубках [13]. Вводимо відповідні позначення, які додатково показані на рис. 2.

Позначаємо

$$\begin{aligned} \varepsilon &\rightarrow H \\ E_1, E_2 &\rightarrow [\Sigma_1], [\Gamma_1], [\Sigma_2], [\Gamma_2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U &\rightarrow [u] \\
Q &\rightarrow [\rho] \\
n(E) &\rightarrow [G^n(E)] \\
\text{Вплив заслону} &\rightarrow [\Sigma_3].
\end{aligned}$$

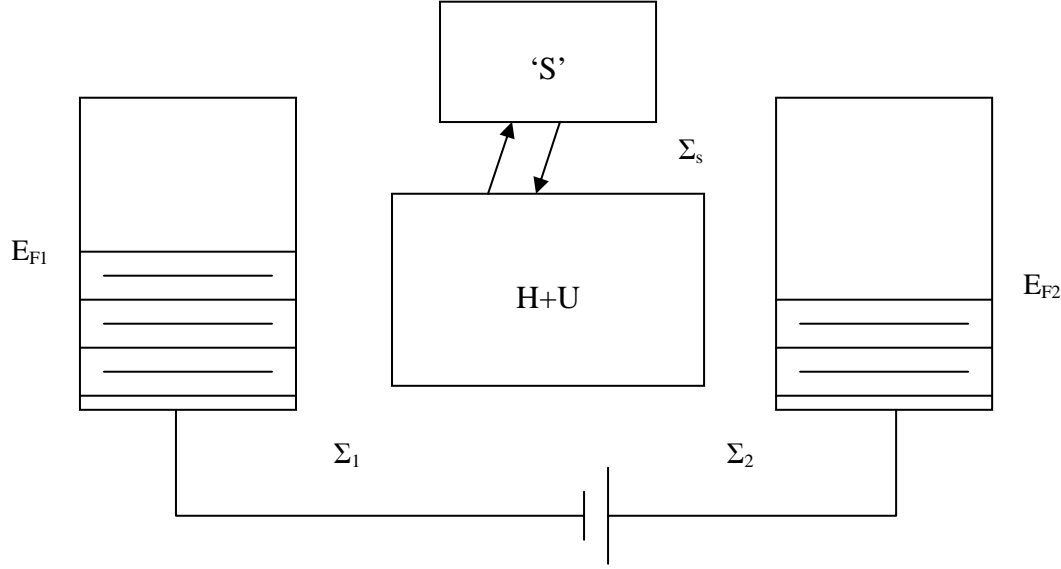


Рис. 2. Схематичне зображення одноелектронного транзистора

Враховуючи прийняті позначення, функція Гріна матиме вигляд

$$G_k(E) = [ES - H - \Sigma_1 - \Sigma_2]^{-1}, \quad (10)$$

де H – Гамільтоніан.

Локальна густина станів в каналі

$$N(E - U) = G\Gamma_{1(2)}G^+, \quad (11)$$

де $\Gamma_{1(2)} = i(\Sigma_{1(2)} - \Sigma_{1(2)}^+)$.

Якщо записати струм стоку як

$$I_C(U) = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(E, U) [f_2(E) - f_1(E)] dE, \quad (12)$$

де

$$\Gamma(E, U) = \text{Tr}(G_k^+ \Gamma_2 G_k \Gamma_1 - A_k \Gamma_1); \quad (13)$$

A_k – спектральна функція і визначається як

$$A_k = 2\pi N(E - U) |k(E) \gg k(E)|, \quad (14)$$

де k – балістичний хвильовий вектор.

Густина заряду в каналі

$$\rho = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_i f(E_i) G_k \Gamma_i G_k^+, \quad (15)$$

де $f(E) = \frac{1}{\exp(\frac{E_n - E_F}{kT}) + 1}$.

Другий рівень моделі одноелектронного транзистора можна записати у вигляді

$$I_C = \frac{2q}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Tr}(G_k^+ \Gamma_2 G_k \Gamma_1 - A_k \Gamma_1) [f_1(E) - f_2(E)] dE. \quad (16)$$

Висновок

Моделювання електричних характеристик наноелектронних транзисторів необхідне під час апробації нових матеріалів, конструкцій і для адаптації до моделей схем, а також для масового виробництва нанотранзисторів. Глибше розуміння фізичних процесів в цій області розкриє величезні потенціальні можливості цього типу транзисторів. Аналізуючи роботи, які пропонуються для моделювання електричних характеристик нанотранзисторів, бачимо, що найбільше відповідає функція Гріна для неврівноважених процесів, оскільки для них можна отримати розв'язок рівняння Пуассона і Шредінгера.

1. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. – М.: Мир, 1989. 2. Ford C., Washburn S., Buttiker C., Knodler C. *Phys. Rev. Lett.* 62,1998, 2724–27 p. 3. Datta S. *Nanotechnology*, 15, 2004, 433–451 p. 4. Fulton T., Dolan G. *Phys. Rev. Lett.*, 59,1987, 109–112 p. 5. Altmeyer S., Hamidi A., Spangenberg B., Kurz H., J. *Vac. Sci. Technol.*, B14, 1996, 4034–4037. 6. Klizing K., Dorda G., Pepper M. *Phys. Rev., Lett.*, 48, 1980, 494–497 pp. 7. Tsui D., Stormer H., Gossard A. *Phys. Rev., Lett.*, 48, 1982, 1559–1562 p. 8. Buks E., Schuster R., Heiblum M., Umansky V. *Nature* 391, 1998, 871–874 p. 9. Sondora K., Taniguchi K., Hamagachi C. *IEEE Trans Electron Devices*, 1991, 2662–2668 pp. 10. Sond J., Park Y. *IEEE Trans Electron Devices*, 43, 1996, pp. 1870–1875. 11. J. Tersoff. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 52, 465–568, 1984. 12. S. Wind, J. Appenzeller, R. Martel, V. Derycke, P. Avouris. *Appl. Lett*, vol. 80, pp. 3817–3819, 2002. 13. Datta S. *IEDM. Techn. Dig.* – 2002. 14. Zhibin Ren, Ramesh Venugopal, S. Goasguen, S. Datta, M. Lundsfrom. *IEEE Trans Electron Dev.*, vol. 50, pp.1914–1925, 2003. 15. Svizhenko A., Anantan M., Govindan T. et. *el J. Appl. Phys.*, vol. 91, p. 2343, 2002.

УДК: 385.832

М.Й. Николишин

Національний університет "Львівська політехніка "

ОЦІНКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПЛОЩ МІКРООБ'ЄКТІВ СКАНУЮЧИМ ОПТИЧНИМ МІКРОСКОПОМ

© Николишин М.Й., 2008

Розглянуто оцінку функціонування скануючого оптичного мікроскопа, а також його точності під час вимірювання площ мікрооб'єктів. Для покрокового сканування досліджуваного об'єкта, яке використовується у скануючому оптичному мікроскопі, проаналізовано чинники, що впливають на точність вимірювання.

Estimation of scanning optical microscope functioning is reviewed as well as its precision at microobjects squares measuring. Factors, influencing to the measuring precision at specimen under investigation step scanning used in scanning optical microscope are analyzed.

Вступ

Сутність функціонування скануючого оптичного мікроскопа (СОМ) полягає у покроковому просвітлюванні сфокусованим світловим променем досліджуваного об'єкта – деякої скляної пластинки, на якій зафіксовано досліджуваний мікрооб'єкт (МО) або сукупність МО біологічного та (чи) небіологічного походження.

Відтак частина енергії світлового променя відбивається, частина поглинається досліджуваним об'єктом (ДО), а частина проходить наскрізь, створюючи з протилежного боку сукупність елемен-