

SİLİSIUM NANOELEKTRONİKASININ PROBLEMLƏRİ VƏ ONLARIN HƏLLİ YOLLARI

E.Ə. KƏRİMOV, S.N. MUSAYEVA*

Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Azadlıq pr. 16/21, AZ 1010

*Azərbaycan Texniki Universiteti, H. Cavid pr.25, AZ 1073**

e-mail: E_Kerimov.fizik@mail.ru

Silisiyum sahə tranzistorlarının ölçülərinin kiçildilməsi, əsasən də kanalın minimal uzunluğunun müasir nailiyyəti olan 45 nm qiymətinin alınması nəticəsində bir çox problemlər yaranır. İdarəedici elektrodun altında yerləşən silisiyum dioksidinin nazik təbəqəsində kvant-mexaniki tunel cərəyanı müşahidə olunur. Nəticədə, kanalın və həm də istok və stokun oblastlarında tranzistorun qapalı və açıq vəziyyətlərində cərəyanların nisbətinin, kanaldan axan işçi cərəyanının artmasının lazım olan yüksək qiymətlərini əldə etmək üçün, aşqar atomların miqdarına və paylanmasına dəqiq nəzarət həyata keçirilməlidir.

Açar sözlər: nanoelektronika, mikroelektronika, keçiricilik, tranzistor, tunel cərəyanı, inteqral sxem, istok, stok.

PACS: 72.80.Rj, 73.25.+i, 73.61.Wp

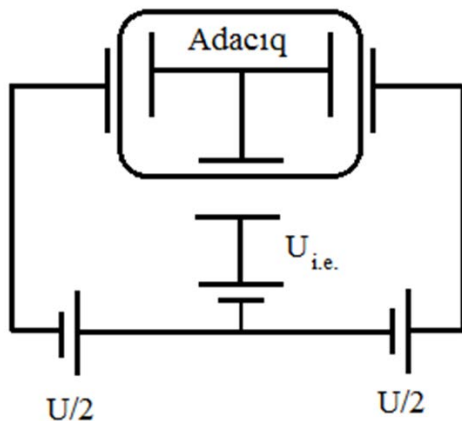
UOT: 538.9

Aktiv nanocihazda bir elektronun yerdəyişməsinə nəzarət nanoelektron sxemlərdə ultraaşağı səviyyədə enerji istifadəsini təmin etmək nöqtəy-nəzərindən mühüm maraq kəsb edir. Nanokondensatorda hətta bir elektronun xarici dövrədən bu kondensatorun kiçik köynəyinə keçməsi, yüklərin yenidən paylanmasına və kondensatorun köynəklərində ΔU gərginliyinin artmasına gətirir. Belə olan halda

$$\Delta U = \frac{e}{C} \quad (1)$$

burada, e – elektronun yükü; C – nəzərdən keçirilən nanokondensatorun tutumudur.

Elektronun dielektrikdən keçidi tunel üsulu ilə reallaşdığından, virtual nanokondensatorun yüklənən nanoköynəyini “adacıq” adlandırırlar (şəkil 1).



Şəkil 1. İki simmetrik tunel keçidinə malik birelektronlu sahə tranzistoru. İdarəedici elektroda $U_{i.e.}$ gərginliyi verilir.

Effektin alınması üçün enerjinin minimal dəyişikliyinə böyük temperatur fluktuasiyalarının olması vacib şərtidir [1,2]:

$$\Delta Ue \gg kT, \quad (2)$$

burada, k – Bolsman sabiti, T – isə ətraf mühitin temperaturudur.

Qeyd edək ki, adacığın nanometrik ölçülərində və elektrik yüklərinin diskret təbiətində yük və gərginlik (adacığın potensialı) kvantlanır. Aydın ki, müəyyən şərtlər daxilində sonrakı elektronun adacığa keçidini bloklamaq olar – elektron öz yükünün elektrostatik itələmə sahəsi vasitəsi ilə digər elektronların adacığa keçidinə mane olur. Bu hadisə kulon blokadası adlanır. Beləliklə, sonrakı elektron yalnız əvvəlki elektron adacıqdan çıxdıqdan sonra ora daxil ola bilər. Kulon blokadasını isə tunel keçidinə gərginlik tətbiq edildikdə kulon itələmə qüvvəsi hesabına cərəyanın olmaması ilə təyin etmək olar. Kulon blokadasını dəf etmək üçün keçidə tətbiq olunan gərginlik aşağıdakı ifadə ilə müəyyən edilir:

$$U_{k.ö} = e/(2C) \quad (3)$$

Elektronların adacığa (kvant nöqtəsi) təkrar olunan f - keçid tezliyini bu birelektronlu sistemdən keçən I – cərəyanı təyin edir:

$$I = ef \quad (4)$$

Belə ossilyasiya birelektronlu ossilyasiya adlanır. Elektronun adacığa tunel keçidi kimi tipik hadisə zamanı (kvant keçiricisi vasitəsi ilə keçid də mümkündür) isə “tunel” sözü əlavə edilir. (2) ifadəsindən və (3) bərabərliyindən görünür ki, effektin müşahidə olunması üçün aşağıdakı şərt ödənilməlidir [3]:

$$C \ll e^2/(2kT). \quad (5)$$

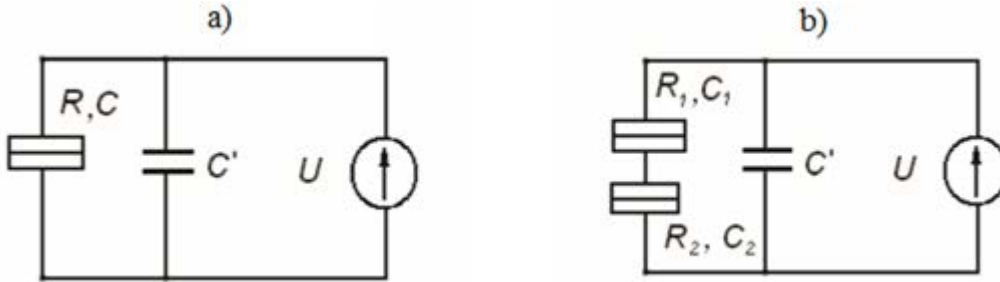
Bolsman sabitinin və elektronun yükünün ədədi qiymətlərini yerinə yazsaq, məlum olur ki, 4,2 K temperaturda lazım olan tutum $C \ll 2 \cdot 10^{-16} \text{F}$, 77 və 300K temperaturlarda isə uyğun olaraq $C \ll 2 \cdot 10^{-17} \text{F}$ və $C \ll 3 \cdot 10^{-18} \text{F}$ olacaqdır. Beləliklə, birelektronlu effektin müşahidə olunması üçün lazım olan tutum attofarad (10^{-19}F) tərtibində olmalıdır.

(2) bərabərliyindən aydın olur ki, müəyyən bir kritik temperatur mövcuddur ki, bu temperaturdan yuxarı qiymətlərdə elektron kulon blokadasını qırır və

struktur işləmir. Bu temperatur keçidin sahəsinə əks mütənasibdir. Keçidin R müqaviməti də onun əhəmiyyətli xarakteristikası sayılır. Əks kəmiyyət – keçidin keçiriciliyi Landauer ifadəsi ilə təyin olunan keçiricilik kvantından nəzərəcarpacaq dərəcədə kiçikdir. Nə-

hayət, birelektronlu cihazın işləməsinə kontaktların parazit tutumları kifayət qədər təsir göstərə bilər.

Bir və ya iki tunel keçidinə malik birelektronlu cihazların ekvivalent sxemləri şəkil 2a və b-də göstərilmişdir. Mərkəzində düz xətt təsvir olunan düzbucaqlı tunel keçidini təsvir edir.



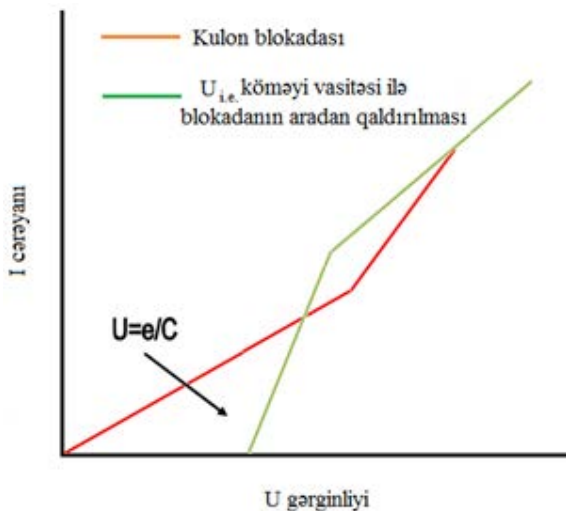
Şəkil 2. Bir (a) və iki (b) tunel keçidinə malik birelektronlu cihazın ekvivalent sxemi.

Bir keçidli cihaz üçün C və R , iki keçidə malik cihaz üçün isə C_1, R_1, C_2, R_2 parametrləri mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Parazit tutum C' -lə işarə olunmuşdur. Əgər C' parazit tutumu keçidin tutumundan böyük olarsa, sistemin tutumu bu şuntlayıcı tutumun qiyməti ilə təyin olunacaqdır (şəkil 2a). Real cihazlarda şuntlayıcı tutumu 10^{-15} F-dan kiçik almaq mümkün olmur ki, bu da hətta helium temperaturunda belə birelektronlu tunelləşmə üçün tələb olunan tutumdan yüz dəfələrlə artıqdır. Bu problemin həlli üçün iki keçidə malik cihaz təklif olunur (şəkil 2b). Belə olan halda parazit tutum hər bir tunel keçidini şuntlamır. Bu halda ümumi elektrostatik enerji aşağıdakı ifadə ilə hesablanır [4]:

$$E = Q^2/2C_{\Sigma}, \quad (6)$$

burada, Q – adacıqdakı yük; $C_{\Sigma} = C_1 + C_2$ – keçidlərin tutumlarının cəmidir.

Əgər iki keçid simmetrikdirsə, onların volt-ampere xarakteristikası hamar olub, şəkil 3-də göstərilirdiyi təsvirə malik olacaqdır. Adacıqda olan yükü onun yaxınlığında yerləşən idarəedici elektroddan istifadə etməklə tənzimləmək mümkündür.



Şəkil 3. İki simmetrik tunel keçidinə malik birelektronlu sahə tranzistorunun volt-ampere xarakteristikası.

Tunelləşən elektronlar Heyzenberq prinsipinə görə $\Delta E \Delta t \sim h$, kondensatorun enerjisi $\Delta E = e^2/2C$ və kondensatorun yüklənmə müddəti $\Delta t = RC$ olduğundan tunel keçidində müqavimət:

$$R \sim 2h/e^2 \text{ və ya } R > h/e^2, \quad (7)$$

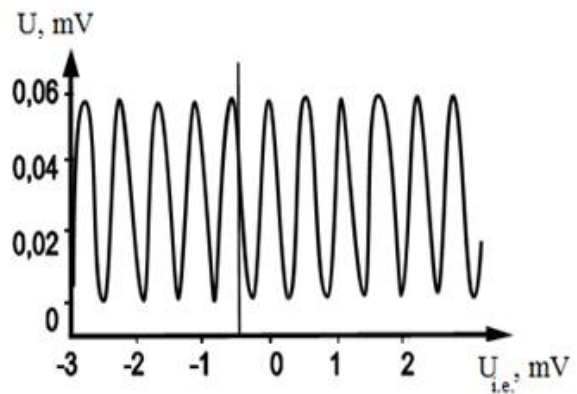
burada, h – Plank sabitidir.

Müxtəlif keçidlərdə tunelləşmə tempi müxtəlif olur. Adacığa gələn və çıxan elektronların sayı fərqlidir. Hər bir zaman anında adacıqda tətbiq olunmuş gərginliyin qiymətindən asılı olaraq müəyyən sayda elektron olacaqdır. Keçid nə qədər qeyri-simmetrik olarsa, volt-ampere xarakteristikasındakı pillələr daha parlaq ifadə olunacaqlar. (6) ifadəsində olan yükün miqdarı aşağıdakı bərabərlikdən təyin olunur:

$$Q = Q_0 - nq, \quad (8)$$

burada, n – elektronların tam sayı, Q_0 – adacığın polarlaşıma yüküdür.

Bu yük $U_{i.e.}$ gərginliyinin dəyişməsi ilə kəsilməz olaraq dəyişir və kulon blokadası şərti periodik olaraq yerinə yetiriləcəkdir. Uyğun olaraq adacıqdan keçən cərəyan və ya istok və stok, yəni kontaktlar arasında gərginlik düşgüsü də periodik olaraq dəyişəcəkdir (şəkil 5).

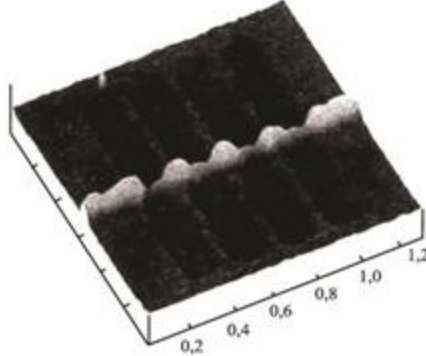


Şəkil 4. $I = 300$ pA sabit cərəyanında kvant nöqtəsindəki gərginliyin idarəedici elektrodun gərginlikdən asılılığı.

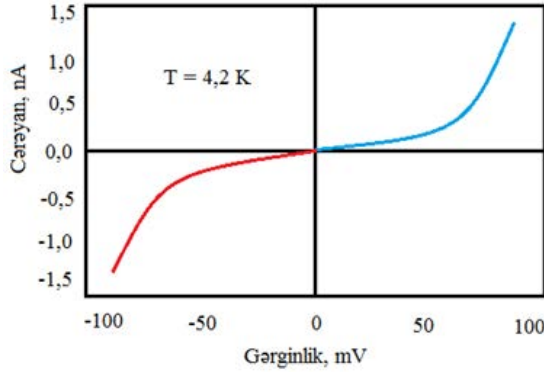
Çoxlu sayda keçidə malik sistemlərdə, potensial çəpərin hündürlüyünü dəyişən xarici sahələrin təsiri olduqda, və ya adacığın forma və ölçüləri dəyişdikdə daha mürəkkəb proseslər gedir.

Birelektronlu tranzistorların və onlar əsasında sxemlərin alınması zamanı çox kiçik ölçülər olduğundan, bir qayda olaraq, müasir texnologiyalardan, o cümlədən – nazik təbəqələrin alınması, elektron litoqrafiya və s. istifadə edilir [5].

Metal birelektronlu tranzistorun digər konstruksiyası şəkil 5-də verilmişdir. Bir neçə adacığın ardıcıl birləşdirilməsi - ümumi tutumun azaldılması yəni, cihazın işlək temperaturunun artırılması məqsədi ilə edilmişdir. Şəkilə 50 nm ölçüyə malik maye azot temperaturunda (77 K) işləyən struktur göstərilmişdir. Bu məqsəd üçün dielektrikdə pillə istifadə olunmuşdur (silisiumdan hazırlanmış monokristallik təbəqənin səthi üzərində 200 nm qalınlığa malik termiki silisium oksid). Metal cızıq (şəkilə daha açıq rəngdə) titandan hazırlanmış və pilləkanın yuxarı pilləsinə çəkilmişdir.



Şəkil 5. Atom-güc mikroskopunda metal birelektronlu tranzistorun təsviri.



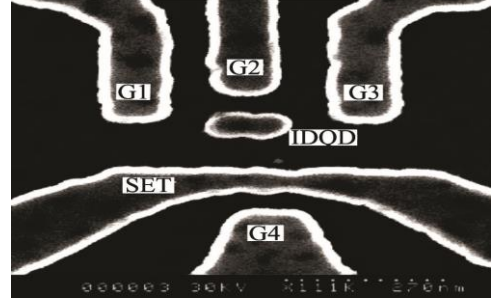
Şəkil 6. Şəkil 5-də göstərilmiş birelektronlu tranzistorun volt-ampere xarakteristikası.

Bundan əvvəl təbəqənin səthi üzərində yarıqlar (əvvəlcə elektron litoqrafiya, sonradan isə ion yeridilməsi üsulu ilə) açılmışdır. İon yeridilməsi 10 nm dərinliyə qədər anizotropdur. Titan cızıq ikinci elektron litoqrafiya üsulunun köməyi ilə alınmışdır. Bundan sonra titan təbəqə yaranmış və əks litoqrafiya vasitəsi ilə cihazın şəkilə müşahidə olunan 8 tunel keçidli aktiv hissəsi alınmışdır. Alınmış birelektronlu tranzistorun elektrik xarakteristikalarının çıxarılması maye azot və ya heliuma salınmış nümunə üzərində aparılır. Adacıqlarının seriyasının 110 nm uzunluğuna malik tranzistorun 4,2 K temperaturunda volt-ampere xarakte-

ristikası şəkil 6-da göstərilmişdir. Kulon blokadası ± 25 mV gərginlikdə müşahidə olunur. Modullaşma təbəqənin əks tərəfində yerləşən idarəedici elektrod vasitəsi ilə həyata keçirilir. Cihaz kulon ossilyasiyasını 77 K temperaturda generasiya edir.

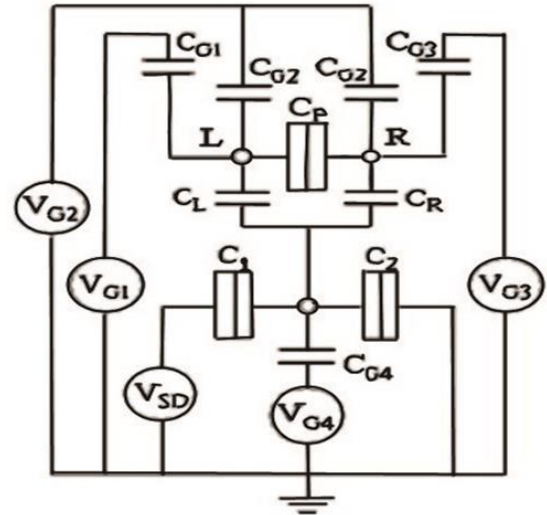
Kiçik kimyəvi klasterlərdən təşkil olunmuş aktiv hissənin tədqiqi zamanı kulon blokadası hətta otaq temperaturunda belə müşahidə olunmuşdur. Problemlər əsasən potensialın ciddi fiksə olunmasını tələb edən təbəqənin əks tərəfində yaranır.

Birelektronlu tranzistor ideyasının inkişafına misal olaraq, şəkil 7-də və 8-də uyğun olaraq mikrofotograf və gələcək kvant kompüterlərin sxemi verilmişdir.



Şəkil 7. Skanediçi elektron mikroskopunda kvant kompüter üçün strukturun mikrofotografı.

Bu kompüterlər təsadüfi hadisələr baş verən sistemlər və ehtimallı həlli olan tam ifadə olunmamış məsələlər məsələn, kvant mexikanası üçün daha əlverişlidir. Kvant kompüterləri külli sayda riyazi hesablamaları olan məsələlərin həllini tapacaqdır. Məsələn, 300 işarəyə malik olan ədədin sadə vuruqlarını təyin etmək üçün $5 \cdot 10^{24}$ əməliyyat aparılmalıdır. Bunun üçün müasir kompüterə 150 min il vaxt lazım gəlir. Kvant kompüterisi isə bu prosesi $5 \cdot 10^{10}$ əməliyyat aparatla cəmi 1 saniyəyə edəcəkdir.



Şəkil 8. Şəkil 7-də göstərilən nanoqurğunun ekvivalent sxemi.

Şəkil 8-də izolə olunmuş ikiqat kvant nöqtəsi (IDQD) tutum əlaqəli mərkəzdə G_1 , G_2 , G_3 , SET və G_4 idarəedici elektrodlarla birləşdirilmişdir. Ekvivalent sxemdə sadəlik üçün eninə parazit tutumlar nəzərə alınmır.

Kvant kompüterlərin ideyası kvant fizikası və kvant informatikasının nailiyyətlərinə əsaslanmışdır. İnformatikada bitin kvant versiyasına kvant kompüterlərində kubit uyğun gəlir. Lakin, kvant kompüterlərinin yaradılmasına müəyyən qədər zaman tələb olunur. Bir çox kvant sistemləri belə qurğuların element baza-

sı qismində istifadə olunmasına səy göstərir. Bura elektronun potensial çuxurda vəziyyəti, elektron və nüvələrin spin vəziyyəti, ayrı-ayrı atom hissəcikləri, çoxsəviyyəli hallar və s. aiddir. Kvant kompüterində hesablama prosesi interferensiya xarakteri daşıyır.

-
- [1] *K.Ng. Kwok*. Complete Guide to Semiconductor Devices, McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [2] *D. Vasileska, S.M. Goodnick*. Computational Electronics, Morgan&Claypool Publishers, 2006.
- [3] *D.A. Hodges, H.G. Jackson, R.A. Saleh*. Analysis and Design of Digital Integrated Circuits in Deep Submicron Technology, McGraw-Hill, Inc., 2004.
- [4] *K.F. Brennan, A.S. Brown*. Theory of Modern electronic Semiconductor Devices, Wiley, 2004.
- [5] *Y. Tsvetkov*. Operation and Modeling of the MOS Transistors, Oxford University Press, 2003.
- [6] *И.П. Степаненко*. Основы микроэлектроники: Уч. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000.

E.A. Kerimov, S.N. Musaeva

PROBLEMS OF SILICON NANOELECTRONICS AND WAYS OF THEIR SOLUTION

There are many problems with size reduction of silicon field MDS transistors, especially in the case of minimum dimension of channel length from 45 nm. The quantum-mechanical tunnel current is observed through thin layer of silicon dioxide under gate. We need to carry out the detail control of quantity and distribution of impurity atoms in channel region and also in source and sink regions in order to achieve the necessary high values of current relation of switched on and switched off transistor states.

Э.А. Керимов, С.Н. Мусаева

ПРОБЛЕМЫ КРЕМНИЕВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

С уменьшением размеров кремниевых полевых МДП транзисторов, особенно в случае достижения современного минимального размера длины канала от 45 нм, возникает множество проблем. Через тонкий слой диоксида кремния под затвором наблюдается квантово-механический туннельный ток. Приходится осуществлять точный контроль количества и распределения примесных атомов в области канала, а также в областях истока и стока, чтобы достичь необходимых высоких величин соотношения токов включенного и выключенного состояния транзистора.

Qəbul olunma tarixi: 24.10.2019