

نمذجة خلايا الخزن النانو بلورية

أزهار داود محمد سليم

سامي محمد طاهر عبد الموجود

لقمان سفر علي

جامعة الموصل / كلية الهندسة / قسم الهندسة الكهربائية

الخلاصة

تم عمل برنامج يوضح التحليلات الإحصائية للمتغيرات العشوائية بتطبيق طريقة (Monte Carlo) الإحصائية لمحاكاة نموذج نبيطة ذاكرة نانوبلورية ذات إلكترون-أحادي (5×5) نقاط كم لدراسة العلاقة بين الأبعاد الهندسية للنبيطة والخواص الكهربائية ، وتأثيرات الشحن - الأحادي في خواص البرمجة الاستاتيكية التي تتضمن العلاقات المتداخلة بين النقاط، وكذلك تمت دراسة المتغيرات التي ينبغي تحديدها خلال تنفيذ البرنامج وعرض وتحليل النتائج التي تم الحصول عليها عند تنفيذ عملية المحاكاة لدراسة الخواص الكهربائية لعملية البرمجة.

Modeling of Nanocrystal Storage Cells

L. S. Ali

S. M. T. Abdul Mawjoud

A. D. Mohammed Saleem

University of Mosul - College of Engineering- Electrical Engineering Department

Abstract

The computer program is prepared for applying Montecarlo simulation and modeling for single-electron nanocrystal memories. The nanocrystal memory device of (5×5) quantum dots is used for studying the relationship between, geometrical dimensions, electrical characteristics and charging effects for single electron static programming characteristics. The nanocrystal inter-dot effects are included. All parameters got in the memory simulation programming are studied and discussed.

Keywords: Nanocrystal Memories.

1- المقدمة :

إن الدراسة المتعلقة بأشباه الموصلات في خزن البيانات والتفسير الفيزيائي لكيفية الخزن هي أساس بناء الذاكرات المايكروية من أشباه الموصلات. إن الخزن يتم عن طريق الاحتفاظ بالالكترونات داخل مادة موصلة موجودة في وسط عازل (بوابة عائمة).

قامت مجموعة من الباحثين الكوريين [1] (Yu et al., 2001) باقتراح نموذج خلية ذاكرة الكترون - أحادي جديدة. وقد أظهرت نتائج التمثيل طريقة عمل مقبولة لخلية الذاكرة.

نفذت مجموعة من الباحثين الكوريين [2] (Sung et al., 2002) طريقة نمذجة جديدة لذاكرة الكترون - أحادي نوع (MOS) ذات نقطة كم محددة. وأظهرت النتائج أن نبائط الذاكرة المصنعة تعطي سمات جيدة بخصوص شحن الالكترون والتأرجح بفولتية العتبة وكذلك تبين مقدار الزحف بفولتية العتبة كدالة لانحياز البوابة عند درجة حرارة الغرفة.

وفي العام نفسه قامت مجموعة من الباحثين [3] (Brault et al., 2002) بدراسة لتصغير حجم (MOSFETs) ، حيث اهتم العاملون في هذا البحث بتحقيق نبائط ذكرات (MOSFET) ذات نقاط كم خزنية سلوكية صغيرة أقل من (10 nm) التي تقع بين البوابة والقناة للـ (MOSFET) ، والتي تقوم بخزن الالكترونات ، حيث تتم السيطرة بدقة على عدد الالكترونات في النقطة بتأثير حيز الشحنة (Coulomb Blocked) (CB) .

وفي عام 2004 قامت مجموعة من الباحثين [4,5] بتقديم نموذج ذاكرة نانوبلورية للنقاط العائمة التي تستغل ميكانيك الكم. وأظهرت النتائج أن الزيادة في زحف فولتية الحزم المستوية تعود إلى الالكترونات المخزونة في النقاط النانوبلورية. وكذلك فإن عمليات الشحن والتفريغ عبر نقاط خزنية متتالية تؤدي إلى تولد زمن استبقاء طويل وبالتالي نقل السرعة.

والهدف من البحث هو تصميم نموذج خلية خزنية للذاكرة النانوبلورية من نقاط الكم الصغيرة ذات العدد (5×5 = 25) ومحاكاته بطريقة مونت كارلو الإحصائية في دوائر تنفيذ الالكترون الأحادي لغرض دراسة خواصه البرمجية.

2- الفرضيات والنتائج :

تم إجراء بعض الحسابات الرياضياتية والإحصائية لمعرفة أداء نموذج الذاكرة المبين في الشكل (1) والذي تمت محاكاته بطريقة (Monte Carlo) لدراسة تأثير الأبعاد الهندسية في خواص البرمجة الاستاتيكية للشحن - الأحادي وفيما يأتي تفاصيل ذلك :

تم افتراض درجة الحرارة (T) تساوي (300°K) وإن زمن فترة البرمجة طويلة بما يكفي للوصول لحالة حيز الشحنة ولكن لا يسمح بتفريق إضافي. عند زيادة قيمة (T) فوق (0°k) فإن طاقة التذبذب الحراري (thermal fluctuation energy) (K_BT) تزداد بمقدار قليل عن طاقة الشحن الحجزية (Coulomb charging) (q²/2C) (energy) حيث (K_B) ثابت بولتزمان ، (q) شحنة الالكترون ، و (C) المتسعة الكلية لنقاط الكم. وهذا يؤدي الى توهين تأثير الشحن- الأحادي في الخواص الكهربائية ، ووفقاً لما ورد في بحوث سابقة [4,5] فإن طاقة الشحن لنقطة كم بقطر (~5 nm) لا تزال أكبر من الطاقة الحرارية حتى عند درجة حرارة الغرفة. لقد تم اختيار الأبعاد الهندسية وحجم النبيتية بعناية وفقاً للعيود من التقارير حول صناعة هذه النبائط فعلى سبيل المثال في حالة (T_{gap} = 4 nm و T_{qd} = 4 nm) تكون كثافة الشحنة السطحية للنقطة (dot density) في الذاكرة النانوبلورية حوالي (1.6 × 10¹² cm⁻²) وحجم النبيتية (L/W = 20 nm / 20 nm) وهذا ما يقارن بالتقنيات الحديثة.

ولغرض تنفيذ البرنامج يجب مراعاة قيم المتغيرات والقواعد الآتية :

أولاً - عند البدء بتنفيذ البرنامج إعطاء قيم للمتسعيات (C_{gap} و C_{ctrl} و C_{ox} و C_{frg}) والأبعاد الهندسية (T_{ox} , T_{ctrl} , T_{qd} , T_{gap}) والموضحة في الشكل (1) والمذكورة قيمها في الجدول (1).

ثانياً - تم إيجاد القيم الابتدائية لحالة الشحنة لنقاط الكم (F₀, Q_{g0}, V_{g0}) من القوانين الآتية [4]:

$$V_{g0} = q / (C_{ctrl} + C_{ox}) = 0.25 \quad \text{Volt} \quad \dots(1)$$

$$Q_{g0} = \left(\sum_{i=1}^{25} C_{ctrl-i} + C_{frg} \right) V_{g0} = 2.5825 \times 10^{-19} \quad \text{Coulomb} \quad (i = 1, 2, \dots, 9) \quad \dots(2)$$

$$F_0 = - 0.5 \times Q_{g0} \times V_{g0} = - 3.228125 \times 10^{-20} \quad \text{Joule} \quad \dots(3)$$

علي : نمذجة خلايا الخزن النانو بلورية

حيث أن (V_{g0}) هي الفولتية اللازمة لانتقال أول إلكترون إلى نقطة الكم و (Q_{g0}) هي الشحنة الابتدائية للبوابة الرئيسية و (F_0) تمثل الطاقة الكلية للنظام قبل التنفيق .
ثالثاً - ولحالة انحياز جديدة :

• تم إيجاد قيم (V_{dot-i}) من المعادلة :

$$-q [n_i] = [C] [V_{dot-i}] \quad \dots (4)$$

ومن تعويض قيم المتسعات ($C_{ij} = C_{gap}$) و ($C_{ij} = C_{ox}$) وبأخذ معكوس مصفوفة المتسعات نوجد قيم (V_{dot-i}) وكما يأتي :

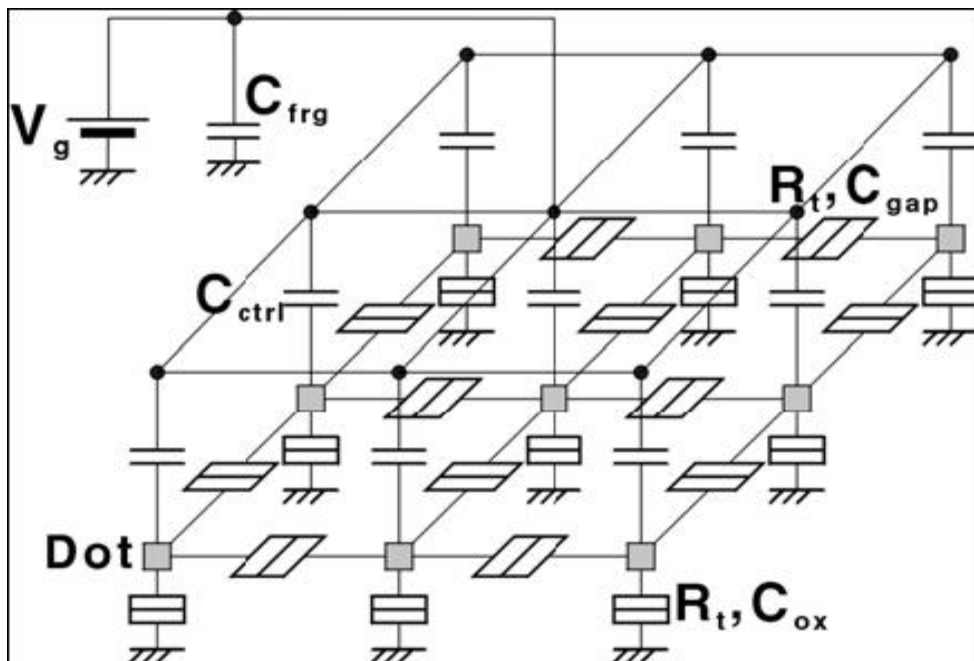
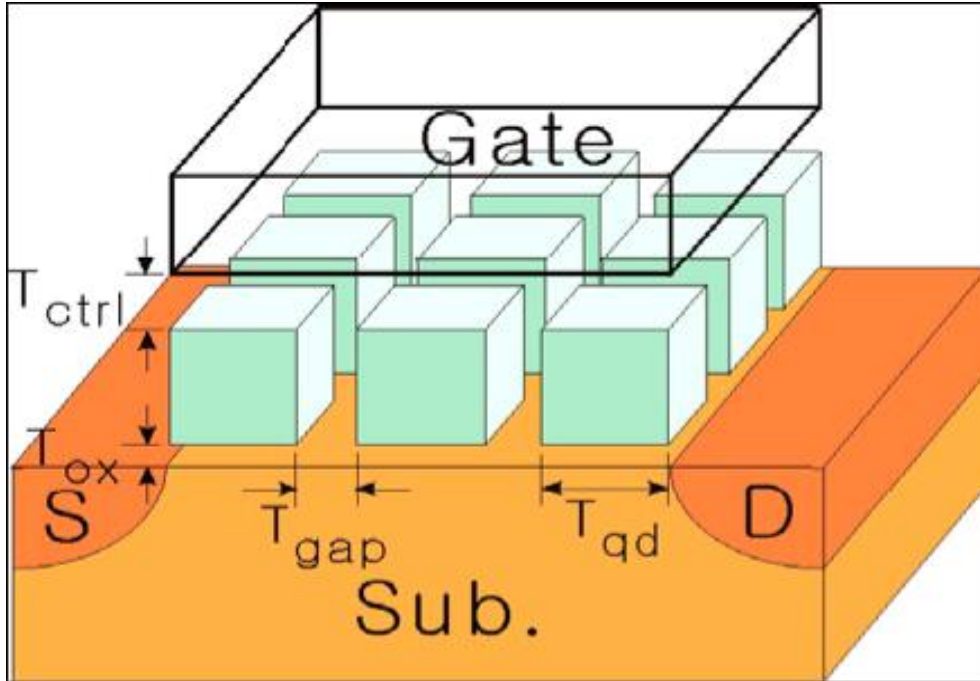
$$[V_{dot-i}]_{1 \times 25} = -q [C]^{-1}_{25 \times 25} [n_i]_{1 \times 25} \quad \dots (5)$$

حيث تم الأخذ بنظر الاعتبار التنفيق بين النقاط المتجاورة كما في الشكل (1) عبر (C_{gap}) والتنفيق من القناة لنقطة عبر (C_{ox}) ومن تعويض قيم (C_{gap}) و (C_{ox}) من الجدول (1) وبما ان انتقال الإلكترونات يكون عشوائياً إلى النقاط ، فقد تم أخذ جميع الاحتمالات الممكنة في كون انتقال الإلكترون الأول إلى النقطة رقم (1 أو 2 أو 3 ... أو 25) من القناة أو من نقاط الكم المجاورة ، ويتم تحديد أي من هذه النقاط حسب قيمة (t_{min}) والذي سيتم ذكره لاحقاً ، وبعبارة أخرى (أما $n_1 = 1$ أو $n_2 = 1 \dots n_{25} = 1$).

الجدول (1) قيم المتسعات المستخرجة لابعاد معاملات هندسية مختلفة للذاكرات النانوبلورية [4].

	Split 1	Split 2	Split 3	Split 4	Split 5	Split 6
T_{ox} (nm)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
T_{ctrl} (nm)	20	20	20	20	20	10
T_{qd} (nm)	4	4	4	3	5	4
T_{gap} (nm)	4	2	6	4	4	4
C_{ox} (aF)	0.655	0.528	0.744	0.415	0.952	0.655
C_{ctrl} (aF)	0.160	0.107	0.213	0.114	0.214	0.306
C_{gap} (aF)	0.282	0.516	0.163	0.179	0.370	0.261
C_{frg} (aF)	0.631	0.006	3.213	1.125	0.244	1.224
$C_{qd-to-ch1}$ ($\mu F cm^{-2}$)	2.04	1.96	2.06	1.83	2.17	2.04
$C_{qd-to-ch2}$ ($\mu F cm^{-2}$)	0.825	1.15	0.654	0.775	0.860	0.825
$C_{qd-to-ch3}$ ($\mu F cm^{-2}$)	0.407	0.728	0.281	0.398	0.411	0.405
$C_{gate-to-ch2}$ ($\mu F cm^{-2}$)	0.119	0.003	0.343	0.259	0.039	0.231
$C_{gate-to-ch3}$ ($\mu F cm^{-2}$)	0.200	0.006	0.533	0.390	0.073	0.387

حيث أن ($j =$ عدد الإلكترونات في المرحلة) و ($k =$ موقع الإلكترون في النقطة) أي أن احتمالية انتقال أول إلكترون إلى أي من النقاط ($j=1, k=1,2,---,25$) وانتقال ثاني إلكترون ($j=2, k=1,2,---,25$) وقد تم إيجاد قيمة Q_{gk} بعد انتقال أول إلكترون وتساوي ($C \times 10^{-19} = 4.1825$) لأية نقطة .



الشكل (1) : (a) رسم تخطيطي لهيكل الذاكرة النانوبلورية (b) دائرة مفارق التنفيق الاحادي (STJs) المكافئة للذاكرة النانوبلورية خلال عملية البرمجة [4] .

علي : نمذجة خلايا الخزن النانو بلورية

- تم إيجاد قيم $(\sum V_{di}, V_{dot-i})$ لجميع الاحتمالات (وعددها خمسة وعشرون) ثم إيجاد قيم فولتية البوابة من المعادلة :

$$V_{g-kj} = (Q_{kj} + \sum C_{ctrl-i} \times V_{dot-i}) / (\sum C_{ctrl} + C_{frg}) \quad \dots (7)$$

علماً أن فولتية النقطة تتخفض بمقدار $\left(\frac{nk \times q}{C_{ctrl} + C_{ox}} \right)$ في حالة انتقال إلكترون إليها ويعوض هذا النقصان بالفولتية من الزيادة الإضافية لفولتية البوابة (V_{g-k}) الى أن تصل (V_{th}) للإلكترون المنتقل وقيمة (V_{dot-i}) كما في المعادلة التالية :

$$V_{dot-i} = \left(V_{dot-i} - \frac{n \times q}{C_{ctrl} + C_{ox}} \right) \quad \dots (8)$$

- ومن القيم السابقة تم إيجاد (F_k) لكل عمليات التنفيق الممكنة عند (STJs) عند إنتقال أول إلكترون مثلاً وحسب المعادلة [5]:

$$F_k = -0.5 q (\sum n_i \times V_{dot-i}) - 0.5 Q_{g-k} V_{g-k} \quad \text{(Joule)} \quad \dots (9)$$

حيث F_k تمثل الطاقة الكلية للنظام بعد عملية التنفيق ، ونلاحظ بأن قيمة (F_k) قد ازدادت بعد انتقال أول إلكترون عن القيمة الابتدائية قبل التنفيق ، لذلك قد يحدث إخماد للانتقال عند هذا المدى وهذا ما يسمى بحجز الشحنة ، ثم تم إيجاد قيمة (ΔF) والتي تساوي الفرق بالطاقة للنظام قبل وبعد التنفيق فعند أول إلكترون $k-1 = 0, k = 1$ فإن:

$$\Delta F = F_k - F_{k-1} \quad \text{(Joule)} \quad \dots (10)$$

$$\Delta F = F_1 - F_0$$

وقد تم حساب قيم $(\sum V_{dot}$ و V_{dot-i} و Q_{gk} و V_{gk} و F_k و $\Delta F)$ سابقاً.

رابعاً - هناك نوعان من عمليات التنفيق عبر (STJs) هما :

1- التنفيق عبر (STJs) من القناة الى نقاط الكم :

- حيث تم إيجاد قيمة المجال الكهربائي (E_{ox1}) المسلط على أكسيد التنفيق في (تركيب MOS) من المعادلة :

$$EOX_{ch-d ik} = (V_{dot-i} - V_{FB}) / T_{ox} \quad \text{(V/m)} \quad \dots (11)$$

مع العلم أن (V_{FB}) هي فولتية الحزمة المستوية ، وتم إيجادها بالطريقة الآتية :
من المعلوم أن الذاكرات النانوبلورية هي نبائط من نوع (MOS) ولغرض حساب فولتية الحزمة المستوية لمتسعة الـ (MOS) نفرض ما يأتي [34]:

(i) أن تركيب بدن النبيطة شبه الموصل من نوع (P-type) مطعم بتركيز $(Na=10^{15} \text{cm}^{-3})$.

(ii) أن نقاط الكم النانوبلورية ذات تطعيم عال $(n^+) = (10^{20} \text{cm}^{-3})$.

(iii) كثافة الشحنة السطحية $(Q_{ss} = 1.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2})$.

لقد تم إيجاد الفرق في دالة الشغل بين البوابة والبدن وقيمتها $(\phi_{ms} = -1.03 \text{ Volt})$ وإيجاد متسعة الأوكسيد :

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} = 1.3806 \quad \mu \text{ F/cm}^2$$

وكثافة شحنة سطح الأوكسيد المكافئة من :

$$Q'_{ss} = Q_{ss} \times q = 2.56 \times 10^{-7} \quad \text{Coulomb / cm}^2$$

ومن ثم إيجاد فولتية الحزمة المستوية من :

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q'_{ss}}{C_{ox}} = -1.21542626 \quad \text{Volts}$$

- وبعد إيجاد قيم المجال الكهربائي (EOX_{ch-d}) لقيم معينة من $(V_{ox} = V_{dot-i})$ ولجميع احتمالات انتقال الإلكترون الى أي من النقاط الخمسة والعشرين (أي بتعبير آخر إيجاد قيمة (E_{ox1}) عند انتقال الإلكترون الى نقطة رقم (1) أي $(n_1=1)$ وإيجاد (E_{ox2}) لقيم (V_{ox2}) عند انتقال الإلكترون لنقطة رقم (2) أي $(n_2=1)$ وهكذا ، أي أن هناك خمسة وعشرين احتمالاً لحدوث مثل هذا التنفيق لأي من نقاط الكم . ومن ثم يتم تحديد نوعين من معادلات التيار لإيجاد كثافة تيار التنفيق وفقاً لقيمة فولتية النقطة مقارنة بالجهد الحاجز وكما يأتي [5]:

(a) معادلة تيار التنفيق المباشر

علي : نمذجة خلايا الخزن النانو بلورية

تم استخدام المعادلة التالية في حالة كون جهد النقطة أقل من الجهد الحاجز.

$$V_{ox} < \phi_b$$

$$J_{\text{tunnel, direct}} = A \frac{V_{ox}}{\phi_b} \left(\frac{2\phi_b}{V_{ox}} - 1 \right) E_{ox}^2 \times \exp \left(\frac{-B \left[1 - \left(1 - V_{ox} / \phi_b \right)^{1.5} \right]}{E_{ox}} \right) \quad \dots (12)$$

(b) معادلة فولر - نوردهام (Fowler - Nordheim F/N)

تم استخدام المعادلة التالية في حالة كون جهد النقطة أكبر من الجهد الحاجز [5].

$$J_{\text{tunnel, F/N}} = A E_{ox}^2 \exp \left(\frac{-B}{E_{ox}} \right) \quad \dots (13)$$

حيث أن:

$$A = q^3 / (8\pi h(q\phi_b)) = 4.9559 \times 10^{-7} \quad A / \text{cm}^2$$

$$B = 8\pi(2m_{ox})^{1/2}(q\phi_b)^{3/2} / (3hq) = 241.3272 \quad \text{MV} / \text{cm}$$

ومنها تم إيجاد قيم كل من (R_t, I_{FN}, I_{dt}) , ومن قيمة $(R_t, \Delta F)$ تم حساب نسبة التنفيق (Γ) وحسب المعادلات التالية:

$$I = J \times \text{area} \quad \text{area} = (T_{qd} \times T_{qd}) \text{ cm}^2$$

$$R_t = V_{dot} / I$$

$$\Gamma = - \Delta F / q^2 R_t [1 - \exp(\Delta F / K_B T)]$$

- حيث أن قيمة $(K_B T = 4.14 \times 10^{-21} \text{ J})$ عند درجة حرارة الغرفة $(T = 300^\circ \text{K})$.
- بعد حساب قيم نسب التنفيق (Γ) لكل عمليات التنفيق عبر $(STJs)$ بين القناة والنقطة ولكل احتمالات انتقال الإلكترون الأول الى إحدى النقاط الخمسة والعشرين من معرفة قيم (ΔF) و (R_t) . كذلك تم حساب فترة التنفيق (tunnel interval) لكل $(STJs)$ والذي يتولد عشوائياً من قيم (Γ) بالاستناد على التوزيع الأسّي الذي تكون دالة كثافة الاحتمالية له [6]:

$$F(t) = \Gamma \exp(-\Gamma t) \quad \dots (14)$$

ومن ثم تحسب فترة التنفيق (t_{tun}) باستخدام مولد الرقم العشوائي (random number generator = r) بمدى $(0 \leq r \leq 1)$:

$$t_{\text{tun}} = \frac{-1}{\Gamma_{\pm}} \ln(r) \quad \dots (15)$$

حيث أن (\pm) في المعادلة (15) تبين اتجاه انتقال الإلكترون ، وبما أن التنفيق عشوائي واحتمالية الانتقال الى إحدى النقاط مساو للأخر وهي [7]:

$$P(r) = \frac{1}{9} = 0.1111$$

ونلاحظ القيم المحسوبة (t, Γ, R, I, J) .

2. احتمالية التنفيق بين نقاط الكم :

- تم إيجاد قيمة المجال الكهربائي (E_{ox}) عبر الأوكسيد بين النقطتين من المعادلة [6]:

$$E_{ox} = \Delta V_{dot} / T_{gap}$$

ومن المعلوم أن (ΔV_{dot}) هي الفرق بين جهد نقطتين متجاورتين وهناك نوعان من تيارات التنفيق :

(a) تيار التنفيق المباشر وتستخدم المعادلة (12) في حالة $(V_{ox} < \phi_b)$.

(b) معادلة (F/N) للتنفيق بين النقاط المتجاورة وتستخدم المعادلة (13) في حالة $(V_{ox} > \phi_b)$ ومنها تم إيجاد (I_{dt}) و (R_t) و (I_{FN}) من القوانين الآتية :

$$I = J \times \text{area} \quad \text{area} = T_{qd} \times T_{qd}$$

$$R_t = \Delta V_{dot} / I$$

ومن قيمة (R_t) و (ΔF) تم إيجاد نسبة التنفيق (Γ) ومنها فترة التنفيق (t_{tun}) وحسب المعادلات

$$\Gamma = - \Delta F / q^2 R_t [1 - \exp(\Delta F / K_B T)] \quad \dots (16)$$

$$t_{\text{tun}} = -\frac{1}{\Gamma} \ln(r) \quad \dots (17)$$

وقد تم إيجاد جميع القيم المحسوبة ، وكان عدد احتمالات التنفيق (80 حالة) بين النقاط.
خامساً -

• بعد أن تم الحصول على مجموعة احتمالات لفترة التنفيق (t_{tun}) لانتقال أول الكترون من كافة الاحتمالات الممكنة للتنفيق (من القناة الى النقطة ومن نقطة لأخرى) ولكافة النقاط (وعدد هذه الاحتمالات $25+80=105$) واختيار قيمة (t_{tun}) الأكثر احتمالية يكون ما يأتي :

1- حسب نظرية (orthodox) ولغرض حصول تنفيق يجب أن يتحقق الشرط التالي [6]:

$$R_t > R_Q = h^2 / e \approx 25.8 \text{ k}\Omega \quad (\text{مقاومة الكم})$$

2- من شروط تأثيرات الحجز الكمي (CB) أن تكون ($R_t \gg 25.8 \text{ k}\Omega$) لذلك تم اختيار قيمة (R_t) من القيم التي وجدت سابقاً بحيث تكون أكبر من ($25 \text{ k}\Omega$) لتحقق نظرية (orthodox) لكن ليس أكبر بكثير لكي لا تحقق تأثيرات الحجز الكمي [6]. ولهذا تم إهمال جميع قيم (t) التي عندها ($R \leq 25 \text{ k}\Omega$) وتم إيجاد :

(1) أقل قيمة لفترة التنفيق ($t_{\text{tun min}}$) من الاحتمالات الـ (49).

(2) قيمة (F_1) عند ($t_{\text{tun min}}$) والتي تساوي (F_0) للمرحلة الثانية.

(3) موقع الإلكترون في أي من نقاط الكم .

(4) قيمة الانحراف المعياري ($S_{\text{td.Dev.}}$) لعدد الإلكترونات في النقاط ($S_{\text{td}}(n_i)$) من المعادلة [6]:

$$S_{\text{td}} = \left(\frac{1}{n-1} \sum (x_i - x)^2 \right)^{1/2} \quad \dots (18)$$

(5) ولإيجاد قيمة (V_{th}) للإلكترون المنقل وحسب المعادلة التالية :

$$V_{\text{th-k}} = m \left(\frac{n \times q}{25C_{\text{ctrl}} + C_{\text{frg}} \frac{C_{\text{ox}} + C_{\text{ctrl}}}{C_{\text{ox}}}} \right) \quad \dots (19)$$

حيث أن (n) عدد الإلكترونات المنقلة و(m) عدد المراحل.

• بذلك تم تحديد أول نقطة لرسم المنحني التابع لقيم (split-2) في الجدول (1) .

• في الخطوات السابقة تم تحديد انتقال أول إلكترون الى نقطة الكم ، ثم يتم تكرار هذه الخطوات خمسة وعشرين مرة لانتقال خمس وعشرون الكترون الى نقاط الكم (والممثل بالجزء المائل من المنحني الذي يوضح علاقة فولتية البرمجة بمعدل عدد الكترونات في نقاط الكم (Mean Number of Electrons) في الشكل (2)) للوصول الى فولتية العتبة للنبيطة. وحيث أن انتقال الإلكترون الثاني والثالث ... والى الخامس والعشرون خلال الأوكسيد تنتج عنه شحنة الكترولستاتيكية عند قطب البوابة فتصبح شحنة البوابة :

$$Q_{g-k} = Q_{g0} + jq \quad \dots (20)$$

حيث أن انتقال الإلكترون الثاني يعني ($k = 1, 2, \dots, 25, j = 2$)

• وبعد انتقال الإلكترونات الخمسة والعشرين يتم الوصول الى فولتية العتبة للنبيطة التي يتم إيجادها من المعادلة التالية [6]:

$$V_{\text{th}} = m \left(\frac{25 \times q}{25C_{\text{ctrl}} + C_{\text{frg}}} \right) \quad m = 1, 2, \dots \quad \dots (21)$$

• بعد الوصول الى فولتية العتبة للنبيطة ، ولكي ينتقل أول إلكترون للمرحلة الثانية (أي الإلكترون رقم (26)) يحتاج شحنة ابتدائية (Q_{g0}) مضافة للشحنة (Q_{g-i}) وكما يأتي:

$$Q_{g-m} = mQ_{g0} + jq \quad \dots (22)$$

وبتكرار جميع الخطوات السابقة للمرحلة الأولى أي انتقال خمس وعشرون الكترون أخرى للوصول الى فولتية العتبة (أي المرحلة المستوية الثانية من المنحني) وهي المرحلة الثانية لحجز الشحنة وبتكرار المراحل تزداد الشحنة الكترولستاتيكية على البوابة الرئيسة بنفس المقدار [5].

علي : نمذجة خلايا الخزن النانو بلورية

ومنها تحسب قيمة (V_g) وبتكرار هذه العمليات الى أن تصل فولتية (V_g) الى (5V) وينتهي تنفيذ البرنامج ، وبذلك يمكن رسم المنحنيات الخاصة بعلاقة فولتية البوابة بمعدل عدد الالكترونات وفولتية العتبة والانحراف المعياري للقيم المأخوذة من (split-2) من الجدول (1) والموضحة بالشكل (2).

سادساً -

تم تغيير قيم الادخالات (التي هي قيم المتسعوات والابعاد الهندسية وعدد الالكترونات) من (split 1,2,...,6) في الجدول (1) وتنفيذ البرنامج لرسم مجموعة من المنحنيات وكما يأتي:

(1) قيم ($T_{gap}=6nm, 4nm, 2nm$) في حالة تثبيت البعدين الآخرين على ($T_{ctrl}=20nm$) و ($T_{qd}=4nm$) والمبينة في (split 1,2,3) بالجدول) . وقد تم رسم مجموعة من المنحنيات تمثل علاقة فولتية البرمجة بكل من معدل عدد الالكترونات في النقاط وفولتية العتبة والانحراف المعياري لعدد الالكترونات وهذا مبين في الشكل (2)

(2) قيم ($T_{qd}=5nm, 4nm, 3nm$) في حالة تثبيت البعدين الآخرين على ($T_{ctrl}=20nm$) و ($T_{gap}=4nm$) والمبينة في (split-1,4,5) بالجدول) وتم رسم مجموعة من المنحنيات تمثل أيضاً علاقة فولتية البرمجة بكل من معدل عدد الالكترونات وفولتية العتبة والانحراف المعياري وهذا مبين بالشكل (3) .

(3) قيم ($T_{ctrl}=20nm, 10nm$) عند تثبيت البعدين الآخرين على ($T_{gap}=4nm$) و ($T_{qd}=4nm$) والمبينة في (split-1,6) بالجدول) وقد تم رسم مجموعة المنحنيات المذكورة سابقاً للقيم الجديدة وهذا موضح بالشكل (4).

3- تحليل النتائج :

ويشمل التحليل الخواص الآتية :

3-1 دراسة خواص البرمجة الستاتيكية :

تمت دراسة تأثير المعاملات الهندسية ($T_{ctrl}, T_{qd}, T_{gap}$) في خواص البرمجة الستاتيكية للشحن-الأحادي ومن خلال استخدام القوانين السابقة في عمل برنامج يبين تأثير الأبعاد الهندسية عليها ، تظهر عدة منحنيات توضح العلاقة بين فولتية البرمجة وكل من معدل عدد الالكترونات المنتقلة للنقاط وفولتيات العتبة وكذلك الانحراف المعياري لعدد الالكترونات والتي تكون بشكل متدرج وعلى أساسها يمكن اختيار أفضل حالة لتصميم خلية خزنية. فيما يأتي تحليل تأثيرات تغير أحد هذه المعاملات مع تثبيت قيم المعاملات الأخرى وكما يأتي:

3-1-1 تأثير المسافات بين النقاط (T_{gap}) على خواص البرمجة :

يوضح الشكل (2) أن تغير المسافات بين النقاط يؤثر بشكل كبير على خواص البرمجة ، حيث أن معدل عدد الالكترونات في النقاط النانوبلورية كدالة لفولتية البرمجة لقيم متعددة من (T_{gap}) والمبينة في الشكل (2-a) يظهر نتائج مختلفة عن ما تم استنتاجه في البحوث السابقة من ان الصفة المشابهة- للخطوة المثالية ممكنة في خواص البرمجة للذاكرات النانوبلورية كما هي في ذاكرة نقطة الكم-الأحادية في حالة ضمان انتظام نقاط الكم من حيث الحجم والمسافات. لكن وفقاً للنتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث ، ان الصفة المشابهة للخطوة تتوهن عندما تتقارب النقاط من بعضها على الرغم ان الحجم والمسافات بين النقاط منتظمة تماماً وذلك لأن البحوث السابقة أهملت أهمية التفاعل بين النقاط [7]. وحيث أن المسافات القريبة بين نقاط الكم تزيد من قيمة متسعة الترابط بين النقاط وبالتالي التفتيق لذلك فإن طاقة النظام الكلية تتأثر بشدة بالعلاقات المتداخلة بين النقاط .

يمثل الشكل (2-b) العلاقة بين الانحراف المعياري لعدد الالكترونات في نقاط الكم كدالة لفولتية البرمجة حيث يوضح طريقة توزيع هذه الالكترونات في نقاط الكم وفقاً للشكل (2-a) حيث توجد دائماً منطقة متدرجة بين الاجزاء المستوية من المنحنى ، ويمثل الجزء المستوي حالة حجز الشحنة الكامل عند فولتية بوابة معينة ويكون عدد الالكترونات متساوياً في نقاط الكم كلها وبذلك تكون حالة الشحنة منتظمة وطاقة النظام الكلية تكون اقل ما يمكن ، اما في المنطقة المتدرجة (الجزء المائل) التي تمثل الحالة الانتقالية (العابرة) فلعدد الالكترونات توزيع خاص يشابه التوزيع الطبيعي في نقاط الكم يقلل طاقة النظام . ويعتبر الشكل (2-b) كمقياس لنسبة الخطأ في التوزيع العشوائي. ومن الملاحظ انها نسبة مقبولة حيث أن اعلى قيمة (0.5) عندما يكون ترتيب النقاط في مسافات كبيرة نسبياً بما يكفي لتقليل تأثير النقاط المتجاورة فان لكل نقطة خاصية مستقلة لذلك فان علاقة معدل عدد الالكترونات في النقاط مع فولتية البرمجة تصف الشكل المتدرج ، وان ترتيب النقاط بمسافات متقاربة يؤدي الى توسيع المنطقة المتدرجة فتضعف صفة التدرج وبذلك تشابه الصفة المستمرة للذاكرات الوضوية التقليدية وهذا ما يناقض الاعتقاد السائد من ان الكثافة العالية او المسافات المتقاربة لنقاط الكم هي

علي : نمذجة خلايا الخزن النانو بلورية

الصفة الجيدة لتحسين اداء النبيلة وفي الحالات الواقعية يكون من الصعب عند تصنيع النبائط الحصول على صفات أو ميزات برمجة حادة تماماً حتى عند درجة حرارة (0°K). والسؤال المطروح هو، هل ان المسافات البعيدة دائماً جيدة لتجنب التفاعل بين نقاط الكم النانوبلورية؟ فللملاحظة الاكثر دقة على تأثير المعاملات الفيزيائية على خواص البرمجة يجب دراسة علاقة فولتية العتبة للذاكرات النانوبلورية لفولتية البرمجة وكما موضح في الشكل (2-c). أما من جهة إمكانية تطبيق ذاكرة-الإلكترون الأحادي كخلايا متعددة المستويات فمن المستحسن أن تكون الصفة المترجة حادة أو الجزء المستوي من المنحني عريضة .

من الشكل (2-c) يمكن ملاحظة أن الترتيب المتباعد لنقاط الكم نتج عنه زحف صغير بفولتية العتبة لكل إلكترون (ΔV_{th}) والتي تعتبر من المساوىء في التطبيقات العملية. وذلك لأن الترتيب ذات المسافات المتباعدة يقلل تأثير النقاط على منطقة القناة.

ان الزيادة بفولتية البرمجة المطلوبة لإضافة الكترون واحد (ΔV_p) الى نقطة الكم (والتي لا تتأثر بشكل ملحوظ بالمسافات بين النقاط لان سمك اوكسيد السيطرة والبوابة وحجم النقطة ثابت. من الشكل (2-a)) نلاحظ انه بزيادة المسافة بين النقاط يزداد عدد الالكترونات المخزونة فيها عند فولتية برمجة (3V) وذلك لانه بزيادة المسافة تقل متسعة الترابط فيقل التنفيق المتبادل وتقل طاقة الشحن للالكترون فتقل (ΔV_p) ويزداد عدد الالكترونات .

3-1-2 تأثير حجم النقطة (T_{qd}) على خواص البرمجة :

يوضح الشكل (3) تأثير حجم النقطة (T_{qd}) على خواص البرمجة حيث ان الزيادة في فولتية البرمجة المطلوبة لإضافة إلكترون واحد (ΔV_p) في نقطة الكم، تكون أكثر عندما تكون النقطة أصغر حجماً ، وذلك لأن المتسعات الصغيرة لنقاط الكم الصغيرة تؤدي الى زيادة طاقة الشحن حيث أن طاقة الشحن هي $W_c = \frac{q^2}{2C_{th}}$.

ان التغير في فولتية العتبة (ΔV_{th}) في كل حالة يظهر تغيراً بسيطاً ، وذلك لسببين رئيسين: الأول - هو حتى وإن كانت المتسعات الصغيرة لنقاط الكم تؤدي الى زيادة طاقة الشحن و(ΔV_{th}) فإن المظهر الجانبي للنقاط الصغيرة تقلل السيطرة عبر منطقة القناة. والثاني - أنه في حالة الحجم الأصغر للنقاط عند نفس المسافات بين النقاط تقل بشدة كثافة مساحة النقطة في منطقة القناة الكلية والتي تؤدي الى إضعاف تأثير الشحنة المخزونة على (ΔV_{th}). وهذان العاملان هما ما يميز الذاكرات النانوبلورية مقارنة بالذاكرة الومضية ذات نقطة الكم الأحادية والتي تعوض تأثير زيادة طاقة الشحن .

الشكل (3) يبين علاقة حجم النقطة بعدد الالكترونات المنقولة للنقاط حيث انه في حالة نقاط الكم الصغيرة تزداد طاقة الشحن فتزداد الفولتية التي يحتاجها الالكترون في الانتقال لذلك يقل عدد الالكترونات المنقولة خلال فولتية برمجة معينة ويقل عدد مستويات الخزن .

3-1-3 تأثير أوكسيد السيطرة (T_{ctrl}) على خواص البرمجة :

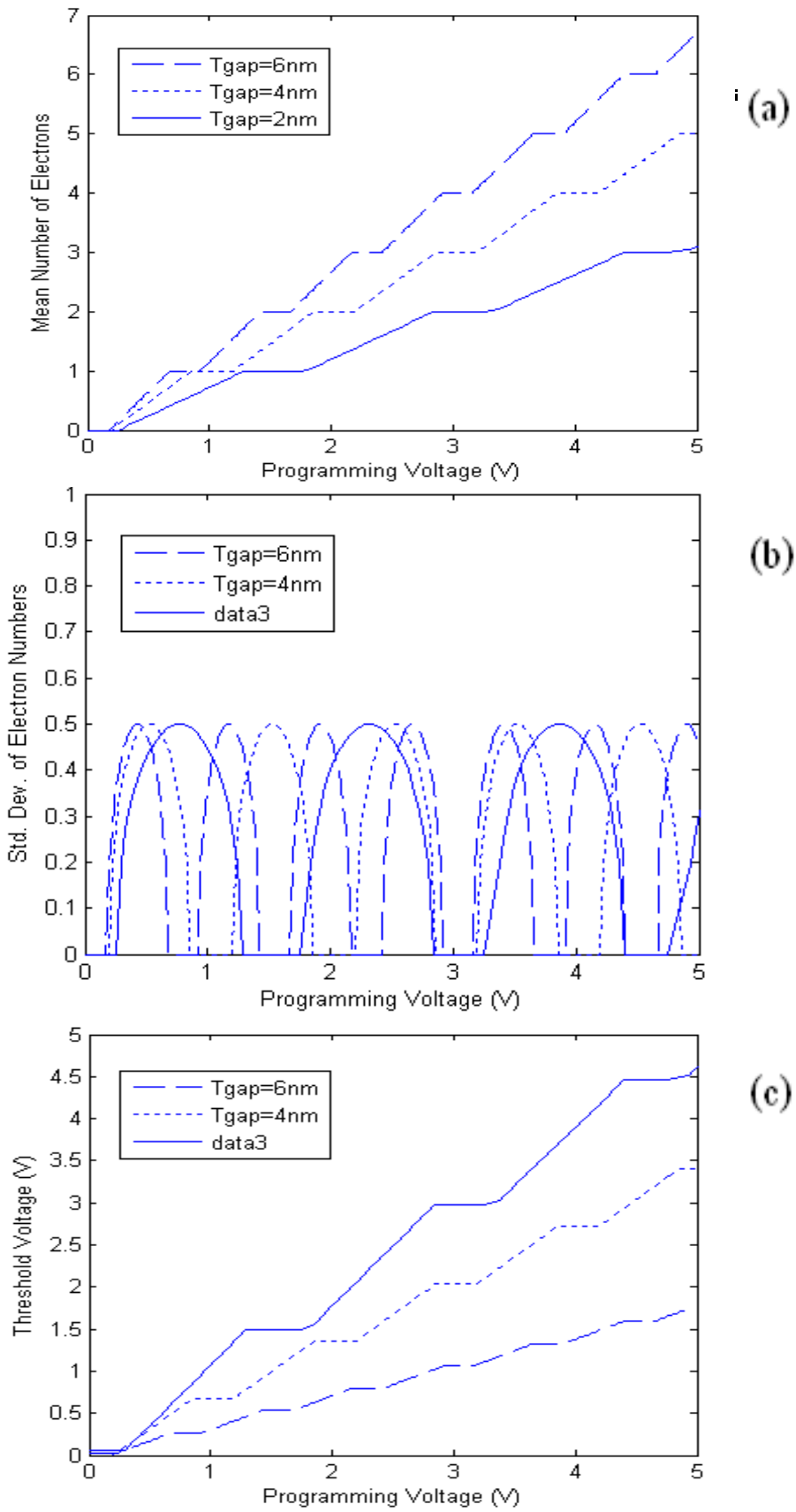
يوضح الشكل (4) تأثير سمك أوكسيد السيطرة على خواص البرمجة :

من المعروف أن زيادة (ΔV_{th}) تحتاج لأوكسيد سيطرة سميك، لكنه يلزم ذلك زيادة (ΔV_p) وهي من المساوىء وذلك لأن زيادة سمك أوكسيد السيطرة يضعف المجال الكهربائي على القناة عند فولتية إنبياز معينة على البوابة لذلك يقل عدد الالكترونات التي يمكن خزنها في النقطة. من ناحية أخرى في حالة شحنة ثابتة لنقاط الكم فإن سمك أوكسيد السيطرة الأكبر يحتاج الى فولتية بوابة أكبر ليحدث نفس الكمية من حاملات الشحنة في القناة والذي يؤدي الى زيادة (ΔV_{th}).

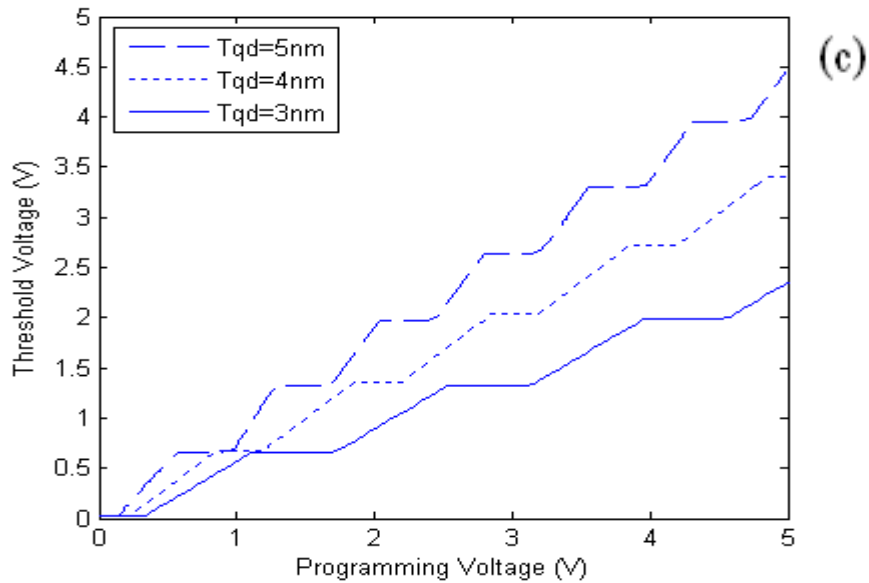
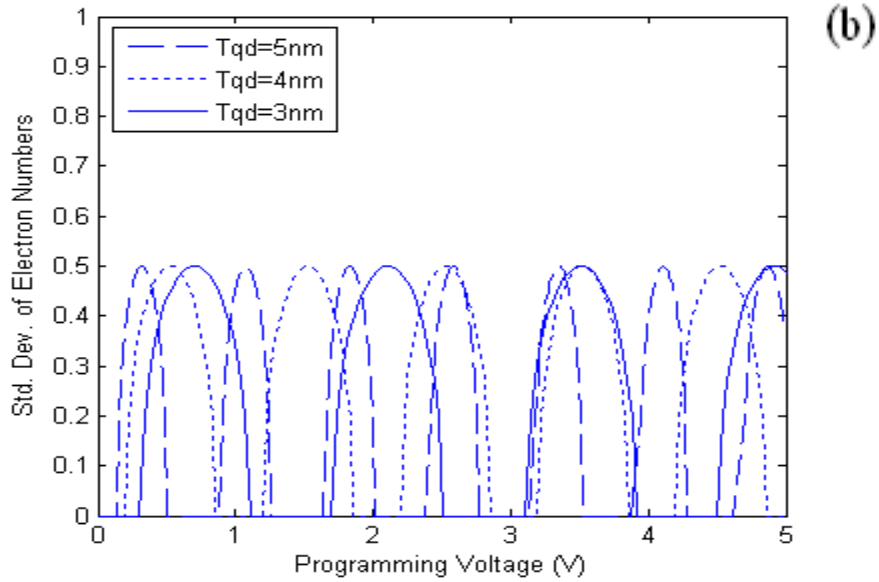
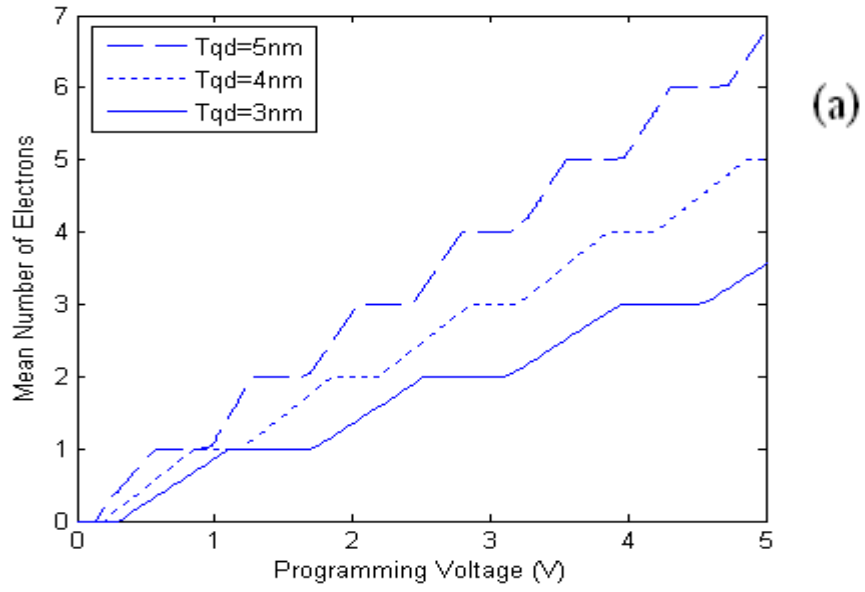
الشكل (4-c) يظهر بوضوح أن (ΔV_p و ΔV_{th}) عند ($T_{ctrl} = 20nm$) تقارب ضعف ما هي عليه في حالة ($T_{ctrl} = 10nm$) ، لذلك يتداخل المنحنيان باتجاه زيادة الفولتية.

وبالمقارنة مع الدراسات السابقة فإن تأثير الأبعاد الهندسية للذاكرة على خواص البرمجة الستاتيكية لعدد اكبر من نقاط الكم فانها تتشابه فيما عدا ان عدد الالكترونات المستخدمة اكبر أي سعة خزن اكبر ، ويدل على ان عدد النقاط لا يؤثر كثيراً في الخواص الستاتيكية للبرمجة.

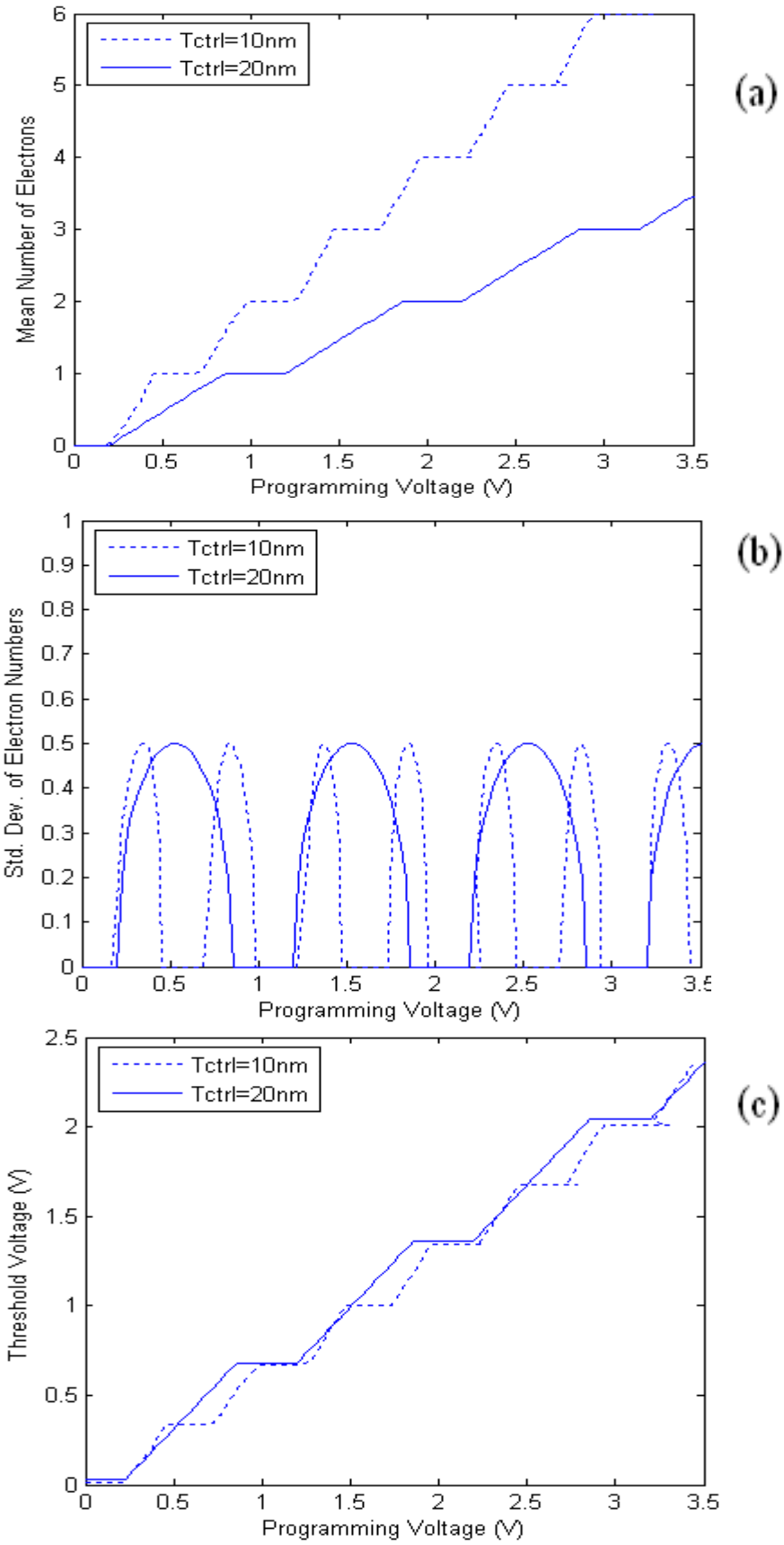
في الشكل (5a) و (5b) يتبين أن عدد الالكترونات يزداد بزيادة المسافة بين نقاط الكم الخزنية وهذا يؤدي إلى زيادة سعة الخزن. أما الشكل (5c) فالملاحظ فيه أن عدد الالكترونات يقل بزيادة سمك أوكسيد السيطرة والذي يعمل على نقصان سعة الخزن.



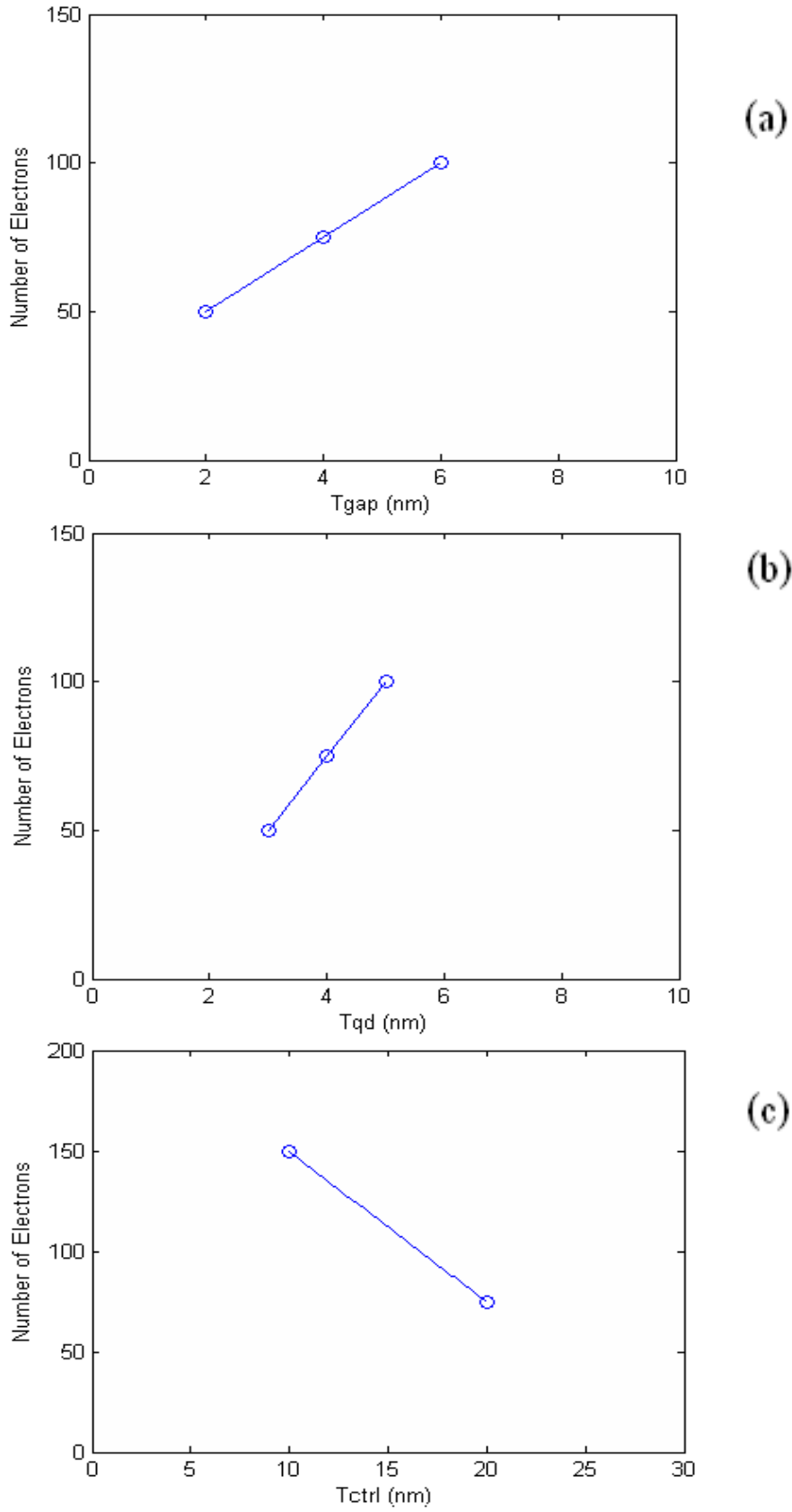
الشكل (2) علاقة المسافة بين النقاط بفولتية البرمجة الستاتيكية للنموذج (5×5)



الشكل (3) علاقة حجم النقطة بخواص البرمجة الستاتيكية للنموذج (5×5)



الشكل (4) علاقة سمك لوكسيد السيطرة بخواص البرمجة الستاتيكية للنموذج (5x5)



الشكل (5) العلاقة بين عدد الالكترونات في نقاط الكم والابعاد الهندسية عند $(V_g = 3 \text{ V})$ للنموذج (5×5)

4- الاستنتاجات :

لقد تم بناء تقنية محاكاة ومعالجتها للتنبؤ بخواص الذاكرات النانوبلورية بالاعتماد على معاملات مختلفة للنبيطة وذلك بدمج طريقة (مونتي- كارلو) لمحاكاة شبكات مفارق النفق-الاحادي مع نموذج مقاومة القناة. من هذه الطريقة يمكن ايجاد العلاقة بين اداء الذاكرات النانوبلورية ومعاملات النبيطة مثل حجم وعدد النقاط والمسافة بينها وسمك اوكسيد بوابة التنفيق وسمك اوكسيد السيطرة. إن أسلوب المحاكاة المستخدم لدراسة خواص الشحن-الاحادي في الذاكرات النانوبلورية هي :

تصميم نموذج خلية خزن للذاكرة النانوبلورية كمنظومة من نقاط الكم الصغيرة ذات العدد $(5 \times 5 = 25)$ ومحاكاتها بطريقة مونتي كارلو الاحصائية في دوائر تنفيق الالكترن- الاحادي لغرض دراسة خواص البرمجة. فقد تبين من النموذج (5×5) انه عندما تكون المسافات بين النقاط كبيرة تظهر صفة التدرج للشحن-الاحادي , بينما يقل الزحف بفولتية العتبة بين كل حالات حجز الشحنة كذلك عند حالة شحنة ثابتة يكون عدد الالكترونات المخزونة في النقاط اكبر . وبخلاف ذلك فعندما تكون النقاط متقاربة يزداد الزحف بفولتية العتبة بين حالات حجز الشحنة , بينما يقل عدد الالكترونات عند حالة شحنة ثابتة ويتلاشى الشكل المتدرج نتيجة التنفيق المتداخل ويشابه ذلك الذاكرات الومضية التقليدية وهذا ما يناقض الاعتقاد السائد بان المسافات القريبة بين النقاط أو الكثافة العالية للنقاط هي دائماً العنصر الفعال في احداث تأثير الالكترن-الاحادي . اما من ناحية حجم النقطة فعندما يكون صغيراً تزداد فولتية البرمجة المطلوبة لاضافة الكترن واحد (ΔV_p) ويقل عدد الالكترونات المنقلة للنقاط عند حالة شحنة ثابتة فتضعف صفة التدرج , ولكن التغير بفولتية العتبة في كل حالة يكون بسيطاً . واما تأثير اوكسيد السيطرة فانه لزيادة (ΔV_{th}) نحتاج اوكسيد سيطرة كبير يلزم ذلك زيادة (ΔV_p) . وفي حالة شحنة ثابتة لنقاط الكم فان سمك الاوكسيد الاكبر يؤدي الى زيادة (ΔV_{th}) ويلاحظ ان (ΔV_{th}) و (ΔV_p) تساوي ضعف ما هي عليه عند مضاعفة سمك الاوكسيد. وقد تبين من نموذجنا (5×5) أن عدد الالكترونات في نقاط الكم عند حالة شحنة ثابتة يكون اكبر مما يعني امكانية زيادة عدد بتات الخزن أي زيادة الكثافة الخزنية .

المصادر :

1. Yu Y.S., Choi B.H., Oh J.H., Hwang S.W. & Ahn D., December 2001, "Single Electron Memory with Silicon Self - Assembled", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 39, PP. 527 N S29.
2. Sung S.K., Kim D.H., Sim J.S., kim K.R., Lee Y.K., Lee J.D., Chae S. D., Kim B.M. & Park B.G., April 2002, "Single - Electron MOS Memory with a Defined Quantum Dot Based on Conventional VLSI Technology", The Japan Society of Applied Physics, Vol.41, PP. 2606 – 2610.
3. Brault J., Saitoh M., Kim I., Yanagidaira K. & Hiramoto T., 2002, "Fabrication of nano - scale MOSFETs for the Realization of Single-Electron Memories", Limms/ Cnrs – IIS, University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro, Ku, 153-8505 Tokyo Japan.
4. Sim J.S., Lee J.D. & Park B.G., 2004, "The Simulation of Single-Charging Effects in the Programming Characteristics of Nanocrystal Memories", IOP Publishing Ltd, Seoul National University.
5. Sim J.S., Kong J., Lee J.D. & Park B.G., 2004, "Monte-Carlo Simulation of Single-Electron Nanocrystal Memories", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, No.4B, PP. 2041-2045.
6. Sim J. S., Kong J., Lee J. D. & Park B.G., 2003, "Monte-Carlo Simulation of Single-Electron Nanocrystal Memories", Extended Abstracts of the 2003 International Conference on Solid State Devices & Materials, Tokyo, PP. 850-851.
7. Neamen D. A., 1992, "Semiconductor Physics and Devices", Richard D. Irwin, INC. Australia.