

تصميم وحدة الحساب والمنطق باستخدام الإلكترونيات الجزيئية

م. علي رجب سقور *

(تاريخ الإيداع 2023/5/28 . قبل للنشر في 2023/7/26)

□ ملخص □

شاعَ في الآونة الأخيرة استخدام البوليمرات ومركبات الكربون في تصنيع العناصر والدارات الإلكترونية الجزيئية، لما لها من خصائص جعلت الباحثين يلجؤون إليها كبديل للدارات المتكاملة الحالية التي وصلت لنهاية قانون مور.

تُمثّل الإلكترونيات الجزيئية ثورة جديدة في تكنولوجيا الدارات الإلكترونية وذلك بسبب استهلاكها القليل للطاقة، وحجمها الصغير جداً بالمقارنة مع الدارات المتكاملة الحالية، ولا يزال الباحثون يعملون على تركيب وتصنيع العناصر الإلكترونية بالصيغة الجزيئية، كالأسلاك والمقاومات والصمامات الثنائية والترانزستورات والبوابات المنطقية، ويزيد الأمر صعوبة إنَّ العمل على المستوى الجزيئي يتطلب دراسة الطبيعة الكيميائية للذرات بشكل فيزيائي كنقل الشحنة والعبور النفقي للإلكترون وسويات طاقة الاتصال بين جزيئين ولا يوجد محاكيات لهذا النوع من الدارات الجزيئية.

لذلك سنقوم في هذا البحث بدراسة تصميم الأسلاك الجزيئية والصمامات الثنائية والنفقية الرنانة، وإيجاد كثيرات الحدود لها لنتمكن من تصميم هذه العناصر الجزيئية عبر الحاسب باستخدام برنامج Matlab، بالإضافة لدمج التصاميم الجزيئية للصمامات بأسلاك البوليفينيلين، والاعتماد على ما سبق في تصميم النواة الأساسية لوحدة الحساب والمنطق الجزيئية لتكون خطوة في طريق تصميم الحاسب الجزيئي.

الكلمات المفتاحية: الإلكترونيات الجزيئية، البوليمرات، أسلاك البوليفينيلين، الصمامات النفقية الرنانة، وحدة الحساب والمنطق.

* مهندس - ماجستير في هندسة تكنولوجيا الإلكترونيات - قسم هندسة النظم الحاسوبية والإلكترونية - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا

Design of Arithmetic logic unit using molecular electronics

Eng. Ali Rajab Sakor *

(Received 28/5/2023 . Accepted 26/7/2023)

□ ABSTRACT

Recently, polymers and carbon compounds have been widely used in the manufacture of molecular electronic components and circuits, due to their properties that made researchers resort to them as an alternative to the current integrated circuits that have reached the end of Moore's Law. Molecular electronics represent a new revolution in electronic circuit technology, due to its low energy consumption and very small size compared to current integrated circuits. Researchers are still working on assembling and manufacturing electronic components in molecular form such as wires, resistors, diodes, transistors, and logic gates. It is even more difficult to work at the molecular level. It requires studying the chemical nature of atoms physically, such as charge transfer, electron tunneling, and contact energy levels between two molecules. There are no simulators for this type of molecular circuit. Therefore, in this research, we studied the design of molecular wires and diodes and resonant tunnel diode, and found polynomials for them to be able to design these molecular elements through the computer using the Matlab program, in addition to integrating the molecular designs of the diode with polyphenylene wires, and relying on the above in designing the basic nucleus of the molecular arithmetic and logic unit To be a step in the way of molecular computer design.

Key words: Molecular electronics, polymers, polyphenylene wires, resonant tunnel diode, arithmetic logic units.

* Engineer – Master in Electronics Technology Engineering – Computer and Electronics Systems Engineering Department – Information and communication Technology Engineering – Tartous University, Syria.

1- مقدمة

تمثل الدارات الإلكترونية عصب التطور في مجال التكنولوجيا الحديثة، وإن السبيل الأساسي للتقدم هو تطوير قدرة هذه الدارات من ناحية السرعة والأداء واستهلاك الطاقة لتلائم متطلبات التكنولوجيا الحديثة، لذلك عمل الباحثون خلال عقود ماضية من الزمن على استخدام البوليمرات والمركبات العضوية في تصنيع العناصر الإلكترونية لمحاولة تصنيع دارات صغيرة الحجم والتغلب على مشاكل الدارات المتكاملة الحالية التي وصلت لنهاية قانون مور من حيث تصغير حجم العنصر على الشريحة بسبب الحرارة العالية التي تنتج من صغر مساحة الشريحة والعمل على مستوى عدة ذرات.

عمل الباحثون في مجال الإلكترونيات الجزيئية على تصميم نواقل تتألف من سلسلة بوليمرات [1][2]، واستخدامها في تصميم الصمامات الثنائية والترانزستورات [3][4][5]، ويوجد مجموعة تجارب لتصميم دارات إلكترونية جزيئية [6][7][8]، تمثل هذه التجارب والدراسات النواة الأساسية لتصميم حاسب جزيئي يمكنه العمل في ظروف عمل الحواسيب التقليدية على عكس الحاسب الكومبي الذي يتطلب كمية كبيرة من الشروط الخاصة لدرجة الحرارة القريبة من الصفر المطلق لتحقيق التوصيلية الفائقة ودارات الترددات العالية والحجم الكبير لهذه المتطلبات يحول دون استخدامه من قبل الأشخاص.

2 - هدف البحث

يهدف هذا البحث لتصميم النواة الأساسية لوحدة الحساب والمنطق في الحاسب بشكل جزيئي، وذلك بدراسة تصميم الأسلاك الجزيئية القائمة على مركبات البنزن، واستخدامها في تصميم الصمامات الثنائية الجزيئية، ومن ثم إيجاد كثيرات الحدود لها لنتمكن من نمذجة التصاميم في برنامج matlab والتأكد من وظيفتها، كونه حتى الآن لا يوجد محاكيات لنمذجة هذه الدارات الهجينة وتتم نمذجة أغلب الدارات الجزيئية رياضياً [9][10].

3- طرائق البحث ومواده

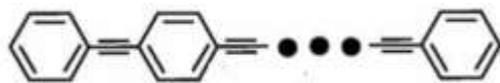
أنجز هذا البحث اعتماداً على دراسات ومراجع علمية عديدة تختص في هذا المجال وقد أخذت نتائجها وتوصياتها بعين الاعتبار، حيث تم استخدام التصاميم الجزيئية لأسلاك البوليفينيلين والصمامات الثنائية الجزيئية والنفقية الرنانة واستخراج كثيرات الحدود لكل منها بناءً على تجارب أجراها الباحثون، ثم القيام بتصميم دارة الجامع الكامل بشكل جزيئي وتطبيقها باستخدام برنامج ماتلاب Matlab.

3-1- الأسلاك الجزيئية:

يوجد نوعين من العقبات في مجال الإلكترونيات الجزيئية وهي تصميم عناصر إلكترونية جزيئية، بالإضافة لربط هذه العناصر معاً بشكل جزيئي على شريحة جزيئية واحدة [11]، لذلك عمد الباحثون لاستخدام سلاسل جزيئية مكونة من البوليفينيلين [12] أو الأنابيب الكربونية [13]، سنستخدم في هذا البحث أسلاك البوليفينيلين وهي عبارة عن حلقات بنزين عطرية مرتبطة بروابط الأستيلين [14] وقد أثبت الباحثون في هذا المجال أنّ لهذه الأسلاك القدرة على نقل تيارات كهربائية صغيرة [2][14][7]، بكثافة تقريبية $4 * 10^{12}$ إلكترون في الثانية لكل 1 ملم مربع وهي كثافة أعلى من الأنابيب الكربونية.

يتم تصنيع هذه الأسلاك عن طريق نزع ذرتي هيدروجين من حلقة البنزن (C_6H_6) لتكوّن مركب فينيل (C_6H_4)، ومن ثم يتم ربط حلقات الفينيل بعضها ببعض بواسطة روابط ثلاثية لتشكيل ما يشابه السلك كما

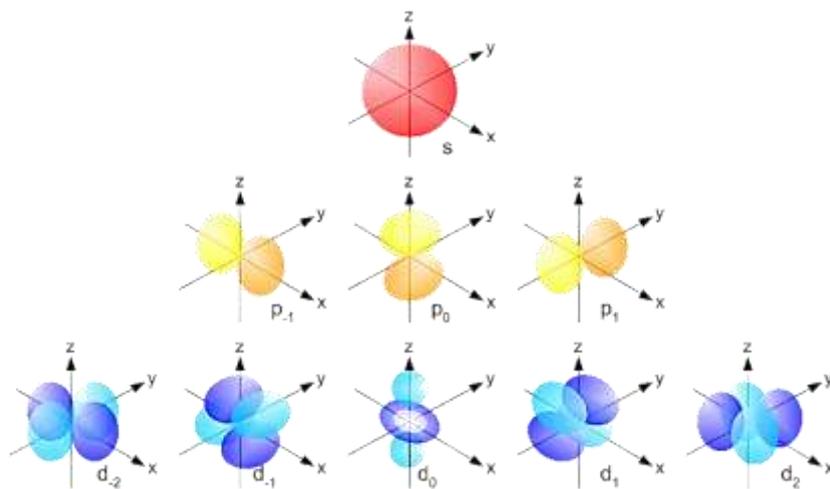
يوضح الشكل (1)، وتتوفر الآن لدى الكيميائيين طرق لدمج هذه الأسلاك مع الدارات الجزيئية وهو ما يعرف بأسلاك TOUR [16].



الشكل (1) أسلاك البوليفينيلين

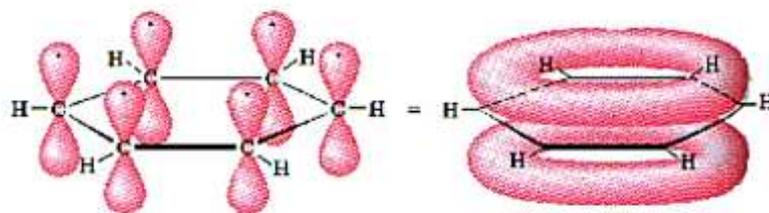
1-1-3- نقل التيار في الأسلاك الجزيئية:

ترتبط الذرات بعضها ببعض بروابط نوع σ أو π ، وذلك حسب طريقة التهجين بين المدارات، ويوضح الشكل (2) توضع المدارات الإلكترونية حول النواة.



الشكل (2) مدارات الإلكترون

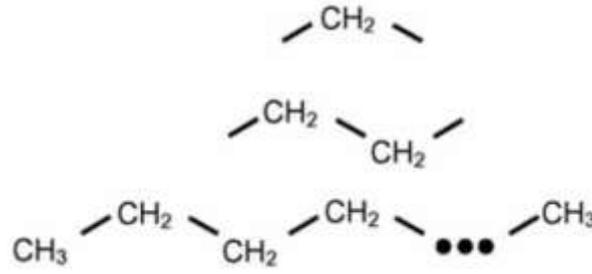
بالنسبة لأسلاك البوليفينيلين ترتبط الذرات بروابط نوع باي وتتشكل عندما تتداخل المدارات p جنباً إلى جنب على جانبي النواة كما يوضح الشكل (3)، مما يسمح للإلكترونات بالعبور عبر السلك الجزيئي [16][17][18].



الشكل (3) رابطة باي في جزء البنزن

1-1-3- العوازل الجزيئية:

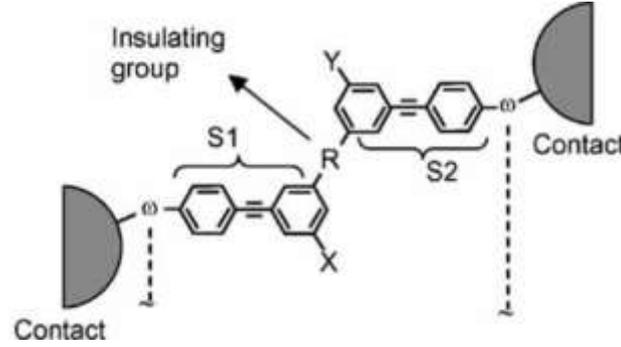
وهي مجموعة من الجزيئات المنفردة المرتبطة، وعلى عكس اسلاك البوليفينيلين فإن الرابطة بين ذرات هذه الجزيئات من نوع σ فقط، بالتالي تشكل أنوية الذرات حاجزاً لمرور الإلكترونات مما يمنع هذه الجزيئات من نقل التيار الكهربائي، ويتم استخدام هذه الجزيئات ضمن السلك الجزيئي كمقاومات أو عوازل لمرور التيار الكهربائي، ويوضح الشكل (4) سلسلة أثيلين وهي سلسلة الفاتية عازلة، وتزداد المقاومة لمرور الإلكترون بزيادة تكرار هذه السلسلة حتى تصل لقيمة الممانعة المطلوبة [19].



الشكل (4) سلاسل الإيثيلين

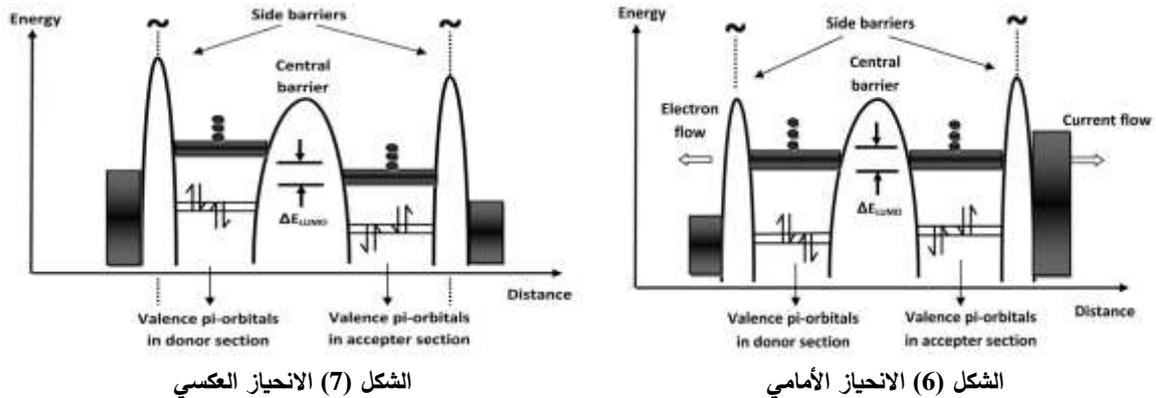
2-3- الثنائي الجزيئي:

بدأت المحاولات من قبل Aviram و Ratner في عام 1974 [20] لبناء نموذج جزيئي للصبام الثنائي التقليدي، وذلك باستخدام هيكل مصنوع من البوليفينيلين، وبدأ اهتمام الباحثين يزداد لمحاولة تصنيع صمامات ثنائية جزيئية باستخدام أسلاك البوليفينيلين [21]، وإدخال مجموعات جزيئية تعمل كشوائب لزيادة الإلكترونيات في جزء وانقاصها في الجزء الآخر، ويتم الفصل بينهما باستخدام جسر فاصل مكون من جزيء ألفاتي عازل R كما يوضح الشكل (5):



الشكل (5) التصميم الجزيئي للصبام الثنائي

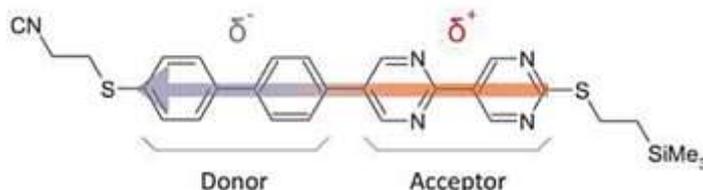
حيث استخدم المركب OCH₃ كمتبرع للإلكترونات، والمركب C≡N كأخذ للإلكترون، وتم اختيار مجموعة ثنائي الميثيلين (CH₂CH₂) جسر عازل بين الطرفين، وأظهرت المحاولات أن أدنى مدار جزيئي غير مشغول (LUMO) وأعلى مدار جزيئي مشغول (HUMO) يمكن مواءمتهما بطريقة تجعل التوصيل ممكناً فقط في اتجاه واحد وذلك بتطبيق جهد أمامي أو عكسي، كما يوضح الشكل (6) للانحياز الأمامي والشكل (7) للانحياز العكسي:



الشكل (7) الانحياز العكسي

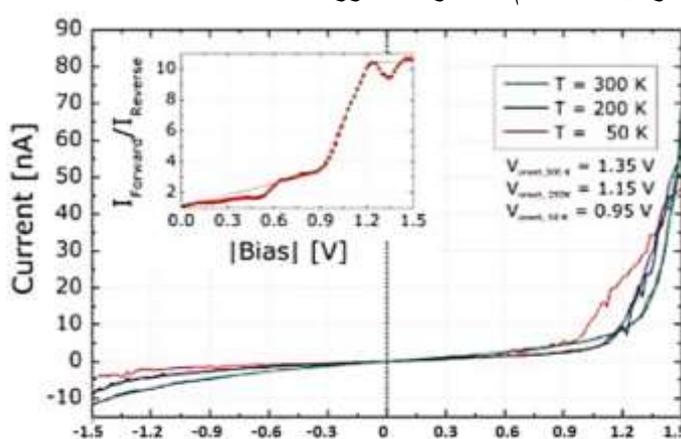
الشكل (6) الانحياز الأمامي

عمل الباحثون لوقت طويل في استثمار هذه التصاميم والتعديل عليها، ولكن من الصعب جداً تركيب الصمام الثنائي بشكل نقي كيميائياً، حيث لا يمكن ضمان الفصل الكامل بين المدارات المانحة والمستقبلة دائماً، لذلك أُقترح تعديل على التصميم السابق بحيث يتم تصميم الثنائي الجزيئي بالشكل الآتي [22]:



الشكل (8) الثنائي الجزيئي المعدل

لا يتضمن هذا التصميم جسر عازل بين جزئي المانح والمستقبل، وترتبط الذرات المانحة والمستقبلة ببعضها تشاركياً، يوضح الشكل (9) مميزة الجهد والتيار لهذا التصميم عند درجات حرارة مختلفة.



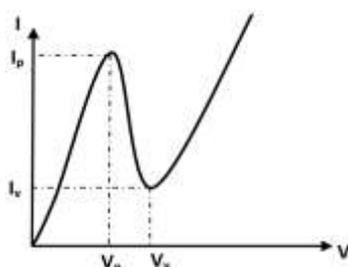
الشكل (9) مميزة الصمام الجزيئي المعدل [22]

استخدمنا هذا التصميم للصمام الثنائي في تصميم وحدة الحساب والمنطق بشكل جزيئي.

3-3- الثنائي النفقي الرنان RTD:

يعمل هذا الثنائي عند الترددات العالية، ويتميز باستجابة قصوى عند قيمة جهد محده، كما يوضح

الشكل (10).



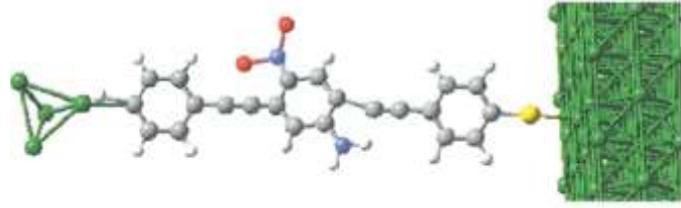
الشكل (10) استجابة الصمام الثنائي النفقي الرنان

يستخدم في العديد من تطبيقات الترددات العالية بالإضافة لتصميم البوابات المنطقية، وكان لابد من محاولة

تصميم هذا الثنائي بشكل جزيئي ليتمكن الباحثون من تصميم بوابات جزيئية تماثل البوابات الرقمية الحالية.

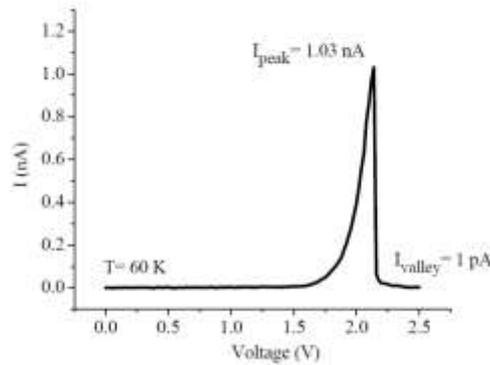
أدى التقدم في مجال الإلكترونيات الجزيئية إلى تصميم هذا الصمام الثنائي بمجموعة من التصاميم [23]

[24][25]، يوضح الشكل (11) التصميم الجزيئي للثنائي [26].



الشكل (11) الصمام الثنائي النفقي الرنان الجزيئي

يعتمد هذا التصميم على ثلاث حلقات بنزين، حيث يتألف من حلقة فينيل في المنتصف يتم إشبائها بمركبي NO_2 ، NH_2 ويفصلها عن حلقتي الفينيل المجاورتين عوازل الأيثيلين CH_2 لتكوين حواجز طاقة تمنع مرور الإلكترونات إلا عند تطبيق جهد رنين مناسب لعبور الإلكترونات نفقياً، ويمكن توصيل هذا الثنائي الجزيئي بأسلاك البوليفينيلين، يوضح الشكل (12) المنحني المميز للثنائي النفقي الرنان الجزيئي [26].



الشكل (12) المنحني المميز للثنائي النفقي الرنان

لذلك سنستخدم هذا التصميم للثنائي النفقي الرنان في تصميم وحدة الحساب والمنطق.

3-4- معادلة كثير الحدود للثنائيات الجزيئية:

لنتمكن من محاكاة الثنائي الجزيئي في برنامج matlab نحتاج لمعادلة كثير الحدود الخاص به، سنقوم باستخراج المعادلة من مميزة الجهد والتيار للصمام الجزيئي وتطبيق طريقة مقارنة التوابع، حيث يتم خلالها إيجاد معادلة كثير الحدود المار بمجموعة من النقاط المعلومة، ويتم الحساب كالآتي:

يُعطى الشكل العام لكثير الحدود من الدرجة n كالآتي :

$$f(x) = a_0x^0 + a_1x^1 + a_2x^2 + a_3x^3 \dots \dots \dots + a_nx^n \quad (1)$$

بفرض لدينا m نقطة تابعة للمنحني الأصلي كما في الجدول (1) :

الجدول (1) إحداثيات نقاط المنحني

x	x_0	x_1	x_2	x_m
y	y_0	y_1	y_2	y_m

يتم حساب قيمة المعاملات ($a_0 \dots a_n$) بحل جملة المعادلات الآتية:

$$\begin{pmatrix} m & \sum_{k=0}^m x^1 & \sum_{k=0}^m x^2 & \dots & \sum_{k=0}^m x^n \\ \sum_{k=0}^m x^1 & \sum_{k=0}^m x^2 & \sum_{k=0}^m x^3 & \dots & \sum_{k=0}^m x^{n+1} \\ \sum_{k=0}^m x^2 & \sum_{k=0}^m x^3 & \sum_{k=0}^m x^4 & \dots & \sum_{k=0}^m x^{n+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{k=0}^m x^n & \sum_{k=0}^m x^{n+1} & \sum_{k=0}^m x^{n+2} & \dots & \sum_{k=0}^m x^{n+n} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=0}^m yx^0 \\ \sum_{k=0}^m yx^1 \\ \sum_{k=0}^m yx^2 \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^m yx^n \end{pmatrix} \quad (2)$$

بالتالي :

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = inv \begin{pmatrix} m & \sum_{k=0}^m x^1 & \sum_{k=0}^m x^2 & \dots & \sum_{k=0}^m x^n \\ \sum_{k=0}^m x^1 & \sum_{k=0}^m x^2 & \sum_{k=0}^m x^3 & \dots & \sum_{k=0}^m x^{n+1} \\ \sum_{k=0}^m x^2 & \sum_{k=0}^m x^3 & \sum_{k=0}^m x^4 & \dots & \sum_{k=0}^m x^{n+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{k=0}^m x^n & \sum_{k=0}^m x^{n+1} & \sum_{k=0}^m x^{n+2} & \dots & \sum_{k=0}^m x^{n+n} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \sum_{k=0}^m yx^0 \\ \sum_{k=0}^m yx^1 \\ \sum_{k=0}^m yx^2 \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^m yx^n \end{pmatrix} \quad (3)$$

بتطبيق ما سبق على مجموعة نقاط من المنحني الخاص بالصمام الثنائي الجزئي يكون كثير الحدود كما يلي:

$$f(x) = 38.705x^3 - 45.254x^2 + 14.639x + 0.0492 \quad (4)$$

حيث:

$f(x)$: تيار الثنائي الجزئي nA.

x : فرق الجهد على طرفي الثنائي V.

وتكون معادلة كثير الحدود للصمام الثنائي النفقي الرنان بالشكل الآتي:

$$f(x) = \begin{cases} 0.0998x^6 - 0.4079x^5 + 0.4571x^4 + 0.1819x^3 - 0.5229x^2 & [0v \rightarrow 2.25v] \\ 319.6x^6 - 5172x^5 + 34829x^4 - 124925x^3 + 251719x^2 & [2.25v - 3v] \\ -270151x + 120644 & \end{cases} \quad (5)$$

حيث:

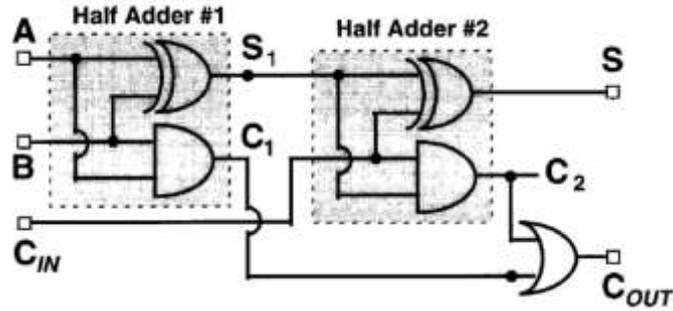
$f(x)$: تيار الثنائي الجزئي nA.

x : فرق الجهد على طرفي الثنائي V.

3-5- تصميم وحدة الحساب والمنطق باستخدام الإلكترونيات الجزيئية:

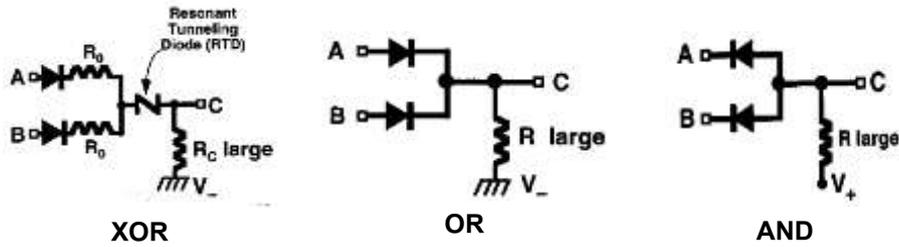
إن النواة الأساسية لوحدة الحساب والمنطق في الحاسب هي دائرة الجامع الكامل، لذلك سنقوم بتصميم دائرة

الجامع الكامل بشكل جزئي، يوضح الشكل (13) التصميم المنطقي للجامع الكامل [22].



الشكل (13) التصميم المنطقي للجامع الكامل

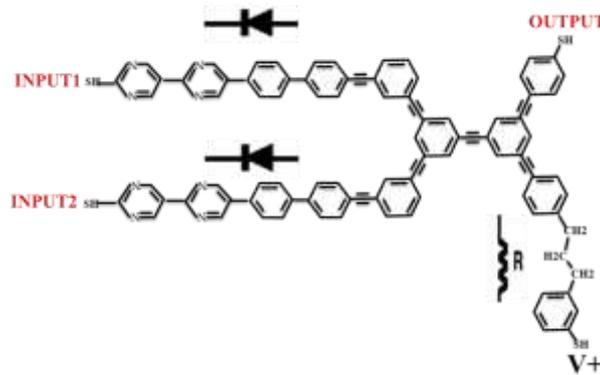
يوضح الشكل (14) الدارة الكهربائية لبوابة AND,OR,XOR [22].



الشكل (14) الدارة الكهربائية لبوابات AND,OR,XOR

قمنا بتصميم هذه البوابات جزيئياً بالاعتماد على طريقة التصميم المتبعة من قبل الباحثين [21]، ويوضح

الشكل (15) التصميم الجزيئي لبوابة AND.

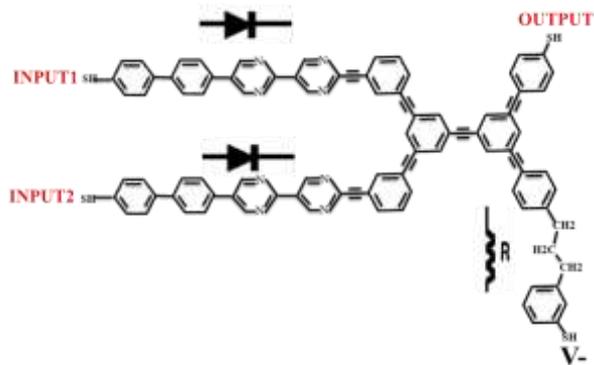


الشكل (15) التصميم الجزيئي لبوابة AND

بالنسبة للمقاومة يتم تمثيلها كما تحدثنا سابقاً بسلسلة ألفاتية (CH2) ذات روابط σ ، ويزداد طول السلسلة

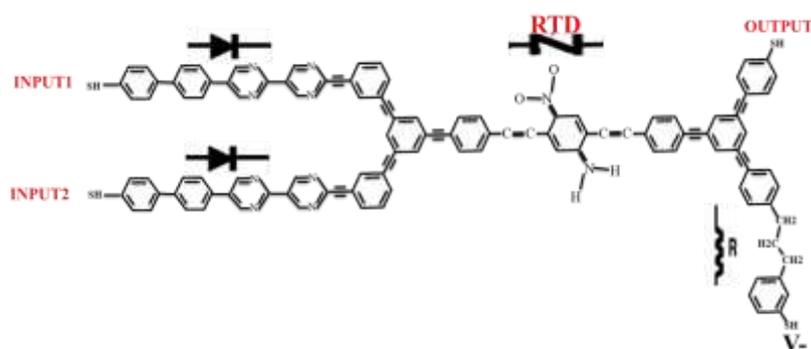
تجريبياً للحصول على قيمة المقاومة المطلوبة.

يوضح الشكل (16) التصميم الجزيئي لبوابة OR.



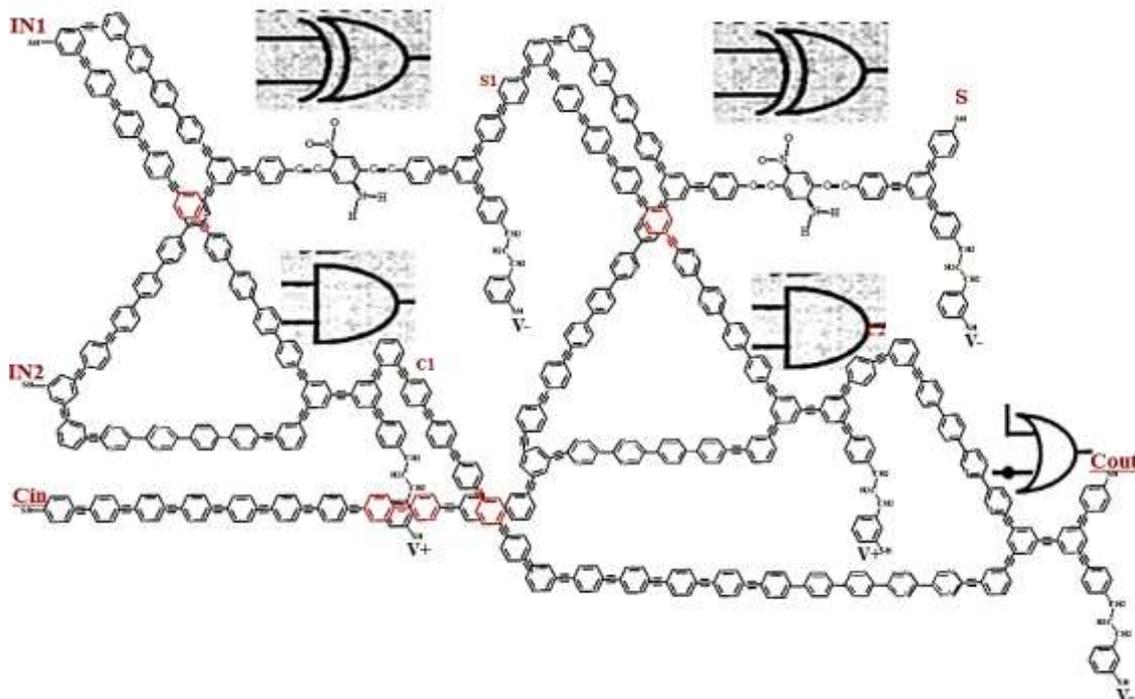
الشكل (16) التصميم الجزيئي لبوابة OR

يوضح الشكل (17) التصميم الجزيئي لبوابة XOR.



الشكل (17) التصميم الجزيئي لبوابة XOR

بالتالي يكون التصميم النهائي للجامع الكامل بعد ربط البوابات الجزيئية بعضها ببعض كما في الشكل الآتي:

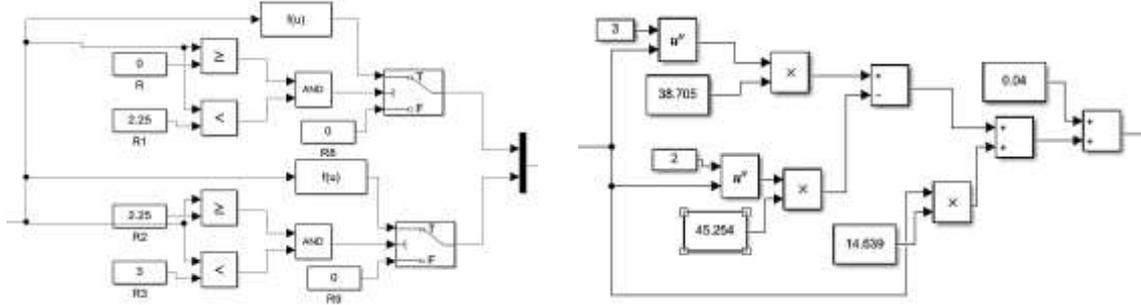


الشكل (18) التصميم الجزيئي للجامع الكامل

عند تقاطع سلكين بوليفينيلين مختلفين يتم انشاء جسر فوق احدهما لتمرير السلك الآخر، لتجنب دوران السلسلة بشكل غير مرغوب به فيؤدي لتكسير الرابطة باي المكونة حول الجزيئات [21].

6-3- نمذجة الدارة الجزيئية لوحدة الحساب والمنطق

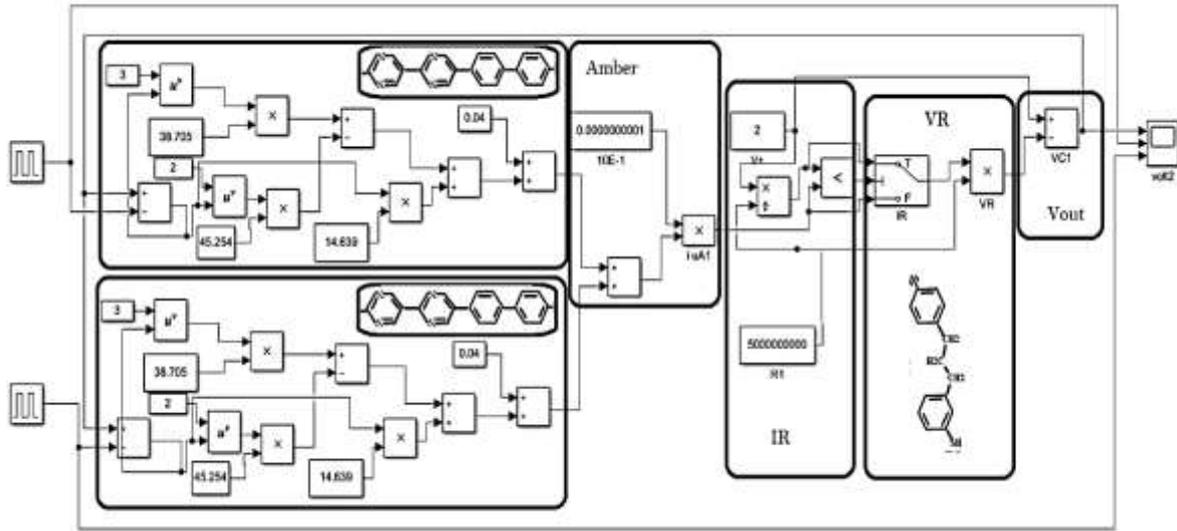
باستخدام برنامج Matlab قمنا بنمذجة الدارة الجزيئية لوحدة الحساب والمنطق بالاعتماد على توابع النقل للثنائيات الجزيئية المستخدمة، يوضح الشكل (19) المخطط الصندوقي للثنائي الجزيئي، والشكل (20) المخطط الصندوقي للثنائي النقي الرنان.



الشكل (20) المخطط الصندوقي للثنائي النقي الرنان

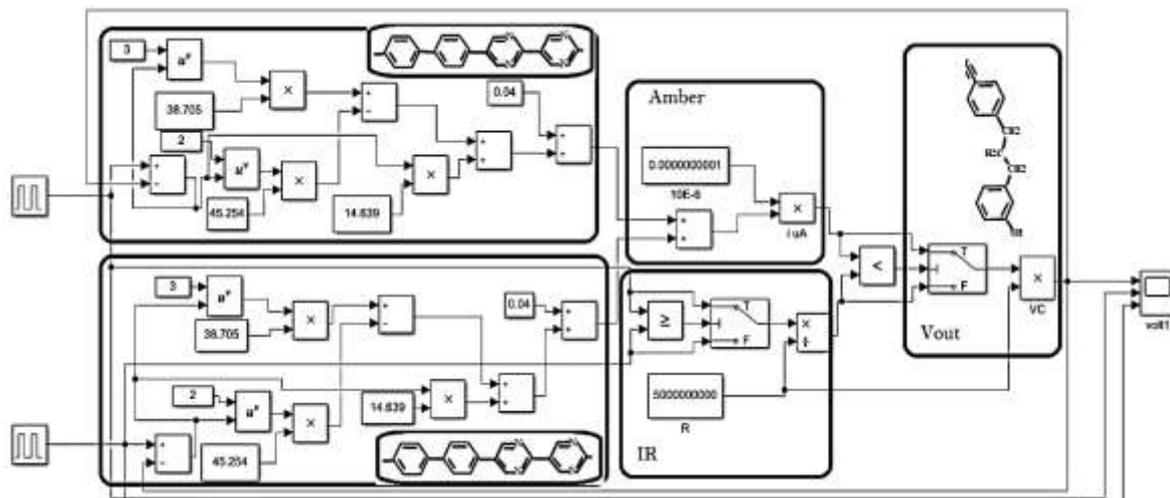
الشكل (19) المخطط الصندوقي للثنائي الجزيئي

يوضح الشكل (21) نمذجة بوابة AND الجزيئية باستخدام matlab.



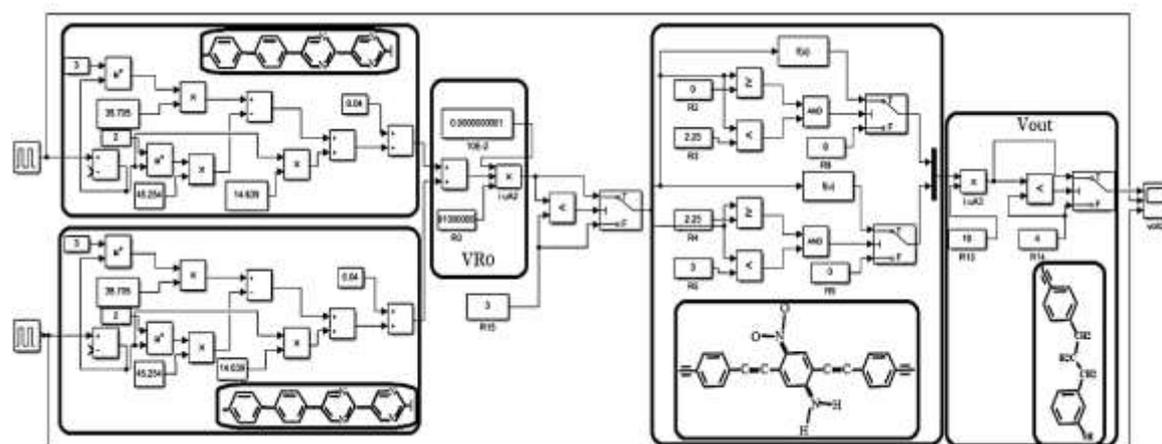
الشكل (21) المخطط الصندوقي لبوابة AND الجزيئية

يوضح الشكل (22) نمذجة بوابة OR الجزيئية باستخدام matlab.



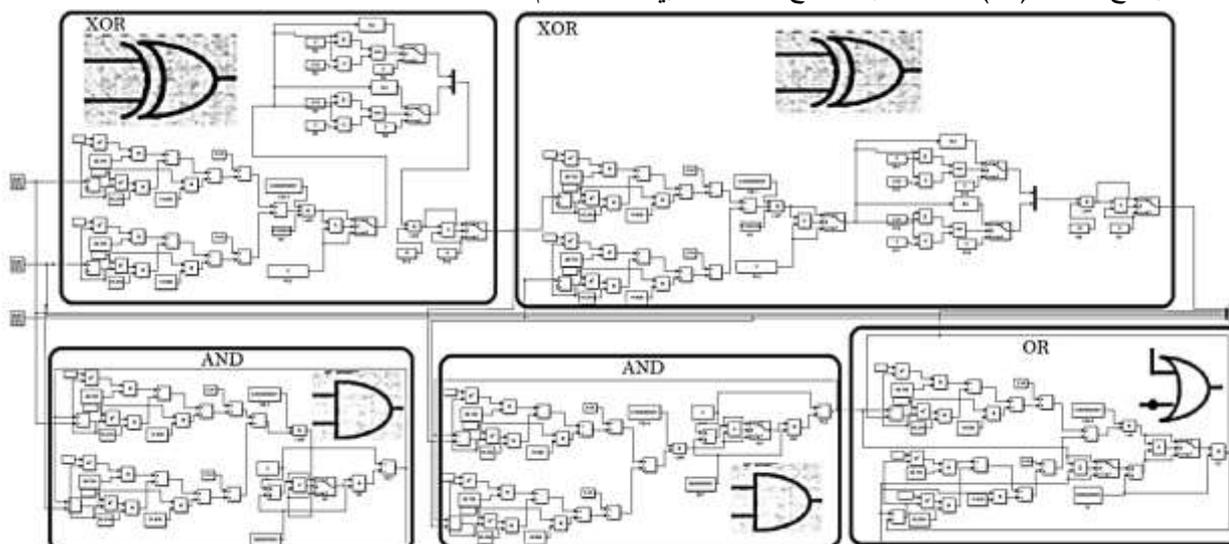
الشكل (22) المخطط الصندوقي لبوابة OR الجزيئية

يوضح الشكل (23) نمذجة بوابة XOR الجزيئية باستخدام matlab.



الشكل (23) المخطط الصندوقي لبوابة XOR الجزيئية

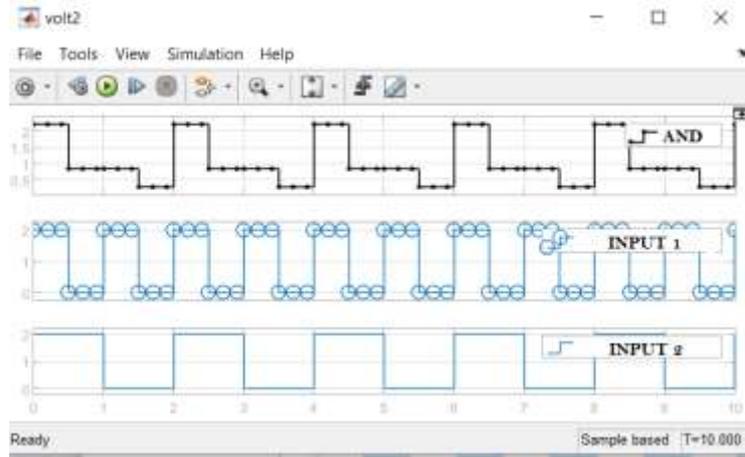
يوضح الشكل (24) نمذجة دائرة الجامع الكامل الجزيئية باستخدام matlab.



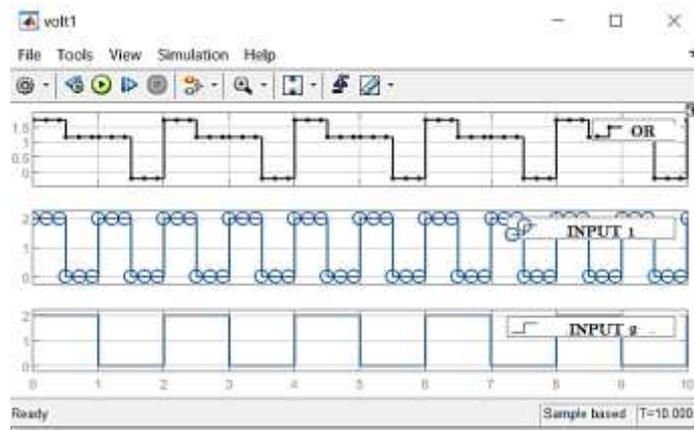
الشكل (24) المخطط الصندوقي لدائرة الجامع الكامل الجزيئية

4- النتائج والمناقشة

سوف نناقش نتائج نمذجة البوابات الجزيئية المكونة للجامع الكامل ونتائج نمذجة الجامع الكامل الجزيئي الذي يعد النواة الأساسية لوحدته الحساب والمنطق. يوضح الشكل (25) خرج بوابة AND الجزيئية، والشكل (26) خرج بوابة OR الجزيئية عند تطبيق إشارة دخل مربعة ضمن المجال [0-2V].



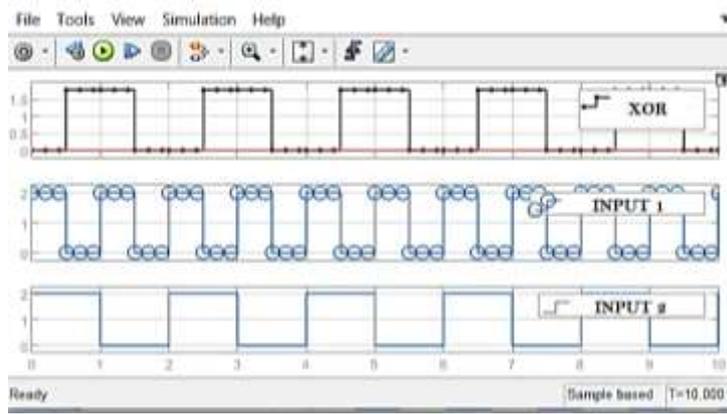
الشكل (25) إشارتي الدخل والخرج للدارة الجزيئية لبوابة AND



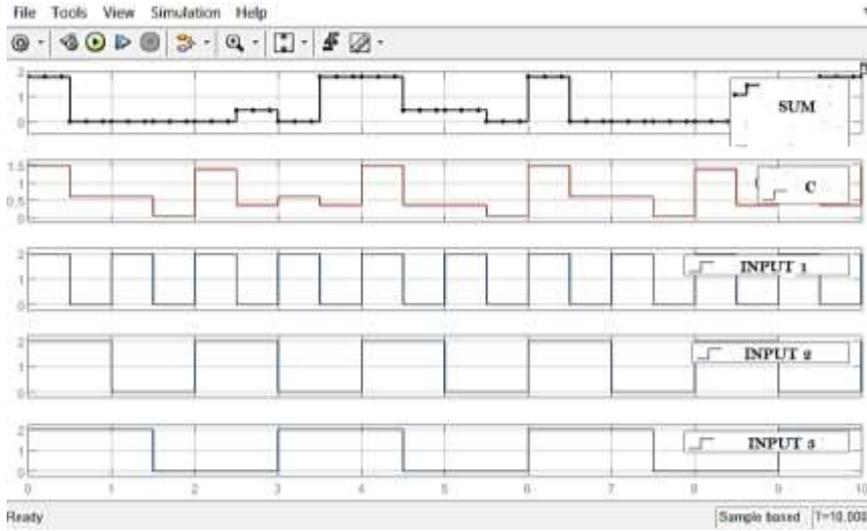
الشكل (26) إشارتي الدخل والخرج للدارة الجزيئية لبوابة OR

نلاحظ من إشارتي الخرج للبوابتين أنّ الخرج له ثلاث سويات ونحتاج لتحديد عتبة جهد تساوي 1V تفصل بين الجهد المرتفع والمنخفض.

يوضح الشكل (27) خرج بوابة XOR الجزيئية، والشكل (28) خرج دارة الجامع الكامل الجزيئية.



الشكل (27) إشارتي الدخل والخرج للدارة الجزيئية لبوابة XOR



الشكل (28) إشارات الدخل والخرج للدارة الجزيئية للجامع الكامل

بدراسة إشارتي الخرج للجامع الكامل نجد أنَّ الخرج له ثلاث سويات وذلك بسبب سويات الخرج لبوابات AND,OR ونحتاج لتحديد عتبة جهد خرج تساوي 0.2V تفصل بين الجهد المرتفع والمنخفض. نلاحظ من تطبيق إشارات الدخل على دارة الجامع الكامل الجزيئية أنَّ الدارة الجزيئية السابقة يمكنها أن تقوم بدور الجامع الكامل وبالتالي تمثل هذه الدارة النواة الأساسية لتصميم وحدة الحساب والمنطق الجزيئية.

5- الاستنتاجات والتوصيات

- إنَّ استخراج كثيرات الحدود للثنائيات الجزيئية يساعد في استخدام البرامج الحاسوبية لتصميم الدارات الجزيئية، مما يسهل العمل على الباحثين في هذا المجال.
- إنَّ تصميم نماذج للأجزاء الحاسوبية باستخدام الإلكترونيات الجزيئية كوحدة الحساب والمنطق يشكل أحد الركائز الأساسية في تصميم الحاسب الجزيئي.
- حققت الإلكترونيات الجزيئية تطوراً كبيراً في مجال الدارات الإلكترونية المتكاملة حيث ساهمت في إعادة الحياة لقانون مور بعد أن وصلت الدارات المتكاملة لحدود تصنيع 1nm.
- يجب العمل على توفير أدوات البحث العلمي والتجريبي في مجال الإلكترونيات الجزيئية لدى الباحثين لنتمكن من استثمار هذه التكنولوجيا بالشكل الأمثل.

6- المراجع

- [1] Reed, M. A; Zhou, C; Muller, C. J; Burgin, T. P; Tour, J. M; 1997, *Conductance of a Molecular Junction*. Science, vol. 278, pp. 252-254.
- [2] Tans, S. J; Devoret, M. H; Dai, H; Thess, A; Smalley, R. E; Geerligs, L. J; Dekker, C. 1997, *Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires*. Nature, 386(6624), 474–477.
- [3] Ottaviano, L; Santucci, S; Di Nardo, S; Lozzi, L; Passacantando, M; Picozzi, P. 1997, *Rectifying behavior of silicon–phthalocyanine junctions investigated with scanning tunneling microscopy/spectroscopy*. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 15(3), 1014–1019.
- [4] Xu, Q; Scuri, G; Mathewson, C; Kim, Ph; Nuckolls, C; Bouilly, D. 2017, *Single Electron Transistor with Single Aromatic Ring Molecule Covalently Connected to Graphene Nanogaps*. Nano Letters, acs.nanolett.7b01745.
- [5] S, safapour; R, sabbaghi; F, razaghian; A, shokri. 2022, *Modeling flip-flops based on molecular diode structures*. Journal of Molecular.
- [6] Bumm, L. A; Arnold, J. J; Cygan, M. T; Dunbar, T. D; Burgin, T. P; Jones, L; Weiss, P. S. 1996, *Are Single Molecular Wires Conducting?*. Science, 271(5256), 1705–1707..
- [7] Zhou, C; Deshpande, M. R; Reed, M. A; Jones, L; Tour, J. M. 1997, *Nanoscale metal/self-assembled monolayer/metal heterostructures*. Applied Physics Letters, 71(5), 611–613.
- [8] Metzger, R. M; Chen, B; Höpfner, U; Lakshmikantham, M. V; Vuillaume, D; Kawai, T; Ashwell, G. J. 1997, *Unimolecular Electrical Rectification in Hexadecylquinolinium Tricyanoquinodimethanide*. Journal of the American Chemical Society, 119(43), 10455–10466.
- [9] Mathew, P. T; Fang, F. 2018, *Advances in Molecular Electronics: A Brief Review*. Engineering.
- [10] Chen, H; Fraser Stoddart, J. 2021, *From molecular to supramolecular electronics*. Nature Reviews Materials, 6(9), 804–828.
- [11] Fukuyama H. 2006, *Physics of molecular conductors*. J Phys Soc Japan, 75 (5): Art. No. 051001.
- [12] Berresheim AJ, Muller M, Mullen K. 1999, *Polyphenylene nanostructures*. Chem Rev; 99 (7): 1747-1785.
- [13] Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. 1985. *C60 Buckminsterfullerene*. Nature, 318(6042), 162–163. doi:10.1038/318162a0.
- [14] Reed, M. A. 1999, *Molecular-scale electronics*. Proceedings of the IEEE, 87(4), 652–658.
- [15] James, D. K., & Tour, J. M. (2005). *Molecular Wires. Topics in Current Chemistry*, 33–62. doi:10.1007/b136066.
- [16] Ratner, M. A; Jortner J. 1997, *Molecular Electronics: Some Directions . in Molecular Electronis*. J. Jortner and M. Ratner, Eds. London, U.K.: Blackwell Science Ltd, , pp. 5-72.
- [17] Mujica, V; Kemp, M; Ratner, M. A. 1994, *Electron conduction in molecular wires. I. A scattering formalism*. The Journal of Chemical Physics, 101(8), 6849–6855.

- [18] Mujica, V; Kemp, M; Roitberg, A; Ratner, M. 1996. *Current-voltage characteristics of molecular wires: Eigenvalue staircase, Coulomb blockade, and rectification*. The Journal of Chemical Physics, 104(18), 7296–7305.
- [19] Ellenbogen, J. C., & Love, J. C. 2000. *Architectures for molecular electronic computers. I. Logic structures and an adder designed from molecular electronic diodes*, Proceedings of the IEEE, 88(3), 386–426. doi:10.1109/5.838115.
- [20] Aviram, A., & Ratner, M. A. 1974. *Molecular rectifiers*. Chemical Physics Letters, 29(2), 277–283. doi:10.1016/0009-2614(74)85031-1
- [21] J. Ellenbogen, and J. Love, 2000. *Architectures for molecular electronic computers: 1. Logic structures and an adder designed from molecular electronic diodes*, Proceedings of the IEEE, Vol. 88, No. 3, pp. 386-426.
- [22] Lörtscher, E., Gotsmann, B., Lee, Y., Yu, L., Rettner, C., & Riel, H. 2012. *Transport Properties of a Single-Molecule Diode*. ACS Nano, 6(6), 4931–4939.
- [23] Y. Karzazi, J. Cornil, and J. Brédas, 2002. *Resonant tunneling diodes based on molecular wires incorporating saturated spacers: a quantum-chemical study*, Nanotechnology, Vol. 122, No. 13, pp. 336-340.
- [24] P. Manzumder, S. Kulkarni, M. Bhattacharya, p. S. Jian, and G. I. Haddad, 1998. *Digital circuit applications of resonant tunneling devices*, Proceeding of the IEEE, Vol. 86, No. 4, pp. 664-686.
- [25] M. Khalid, M. J. Siddiqui, S. A. Rahman, and J. K. Singh, 2010. *Implementation of threshold logic gates using RTDs*, Journal of Electronic and Electrical Engineering , Vol. 1, No. 2, pp. 13-17.
- [26] J. M. Seminario, A. G. Zacarias, and J. M. Tour, 2000. *Theoretical study of a molecular resonant tunneling diode*, Journal of American Chemical Society, Vol. 122, pp. 3015-3020.