



هندسة الترانزستور السبيني الكمومي

جمال الشوفي

دكتوراه في الفيزياء النووية، كلية الهندسة المعلوماتية
جامعة الاتحاد الخاصة، سوريا

منذ أن اقترح ريتشارد فاينمان إمكانية استخدام الفيزياء الكمومية/الكوانتية في بناء نظام الحوسبة الكمومية، وذلك لتجاوز التوقعات العلمية المبكرة لغولدن مور¹ عند الوصول للبعد الذري في بناء الدارات الرقمية للكمبيوتر الكلاسيكي، والتي ستقف حائلاً أمام إمكانية تطويره، ولا تزال البحوث العلمية النظرية والتقنية تحاول تصنيع دارات الكمبيوتر الكمومي، ذات الكفاءة المتفوقة أسياً، سرعة وتخزيناً، على الكلاسيكية منها.

في هذه الورقة، سنلقي الضوء على مفهوم الترانزستور السبيني وخصائصه الفيزيائية والكمومية ومستقبله التقني في بناء الدارات الرقمية للكمبيوتر الكمومي.

1- العزم السبيني:

عزم اللف الذاتي (سبين) خاصية فيزيائية اكتشفتها قوانين الفيزياء الكمومية، وهي الناتجة عن دوران الإلكترون، أو نواة الذرة، حول نفسها، ما يؤدي إلى توليد عزم مغناطيسي يحدد استقطاب الإلكترون للأعلى أو الأسفل. ويعتبر العزم السبيني بهذه الحالة العدد الكمومي الرابع المميز لتموضع إلكترونات الذرة، ويعطى إحدى القيمتين الكموميتين $\pm \frac{1}{2}$ حسب معادلات ديراك، والتي فسرت خاصية استقطاب الذرة عند تعرضها لحقل مغناطيسي.

القيم السبينية للإلكترون هذه قادت للتفكير بإمكانية تحويلها لقيم رقمية يمكنها أن تشكل بتات كمومية (Qbit) تأخذ إحدى القيمتين الأساسيتين في الدارات الرقمية الكلاسيكية 1 أو 0. حيث أن الأساس التقني في بناء الكمبيوتر هي الدارات الرقمية التي بنيت على أساس الترانزستورات وداراتها الرقمية وهو ما سنلخصه أدناه.

2- هندسة الترانزستور السبيني:

التحدي العلمي والتقني أمام تطور عالم الكمبيوتر إلى حالة كمومية هو إمكانية صناعة ترانزستورات ودارات رقمية من مرتبة أقل من 100 نانومتر وتجاوز حالة أنصاف النواقل والترانزستورات وداراتها المغموسة في واحدة المساحة بعد أن أصبحت من البعد الذري، مجال عمل الفيزياء الكمومية، وإمكانية التحكم بقوانينها الاحتمالية الموجية والغريبة عن مدركاتنا الحسية والمحكمة بالعالم المرئي



والجسيمي المعروف جيداً سابقاً، وتسخيرها لعمل دارات وبوابات رقمية لمستقبل الهندسة الكوموية للكمبيوترات.

في الأصل، حققت التقنية قفزة نوعية في عالم الحواسيب عند اكتشاف قوانين أشباه النواقل والترانزستورات والدارات الرقمية والمتكاملة، حتى وصلت ثورة التقنية إلى عالم من التحكم الصناعي والإلكتروني والذكاء الصناعي فاق حدود الخيال المتوقع منها أصلاً. اليوم ثمة محاولة للعودة للفيزياء الكوموية، التي فسرت أصلاً وعبر نظرية العصب الكوموية حالة أنصاف النواقل وجعلتها قيد الاستخدام، في محاولة التعامل مع احتمالاتها الناتجة عن قوانينها الموجية في ابتكار دارات رقمية وتجهيزات جديدة ومتطورة قائمة بذاتها تنتقل من البعد الميكروي للنانوي. هذا ما فتح المجال واسعاً أمام العديد من الخوارزميات الكوموية النظرية والتطبيقية المخبرية بغية الوصول لتلك الهندسة الممكنة، واحداها تلك الخواص السبينية للإلكترون، ومنها:

1- **الحقل المغناطيسي السبيني:** ويعتمد على خصائص السبين النووي بتأثره بالحقل المغناطيس، أو ما يسمى العزم المغناطيسي النووي، والذي يؤدي إلى استقطاب التوجه السبيني. وتفيد هذه التجارب على نوى الذرات والجزيئات في بناء البوابات الرقمية للكمبيوتر الكوموي، على أساس التقييم الثنائي، ليصبح التوجه السبيني مرقماً 1 أو 0 وأساساً في بناء الـ البت الكوموي (Qbit)ⁱⁱⁱ.

2- **من الـ RAM إلى MRAM:** حيث عرفت خاصية السبين الإلكتروني وتأثره بالحقل المغناطيسي في بناء وقراءة الذاكرة الداخلية للكمبيوتر المعروفة بالـ RAM والتخزين في السواقات الليزرية برزم من المعلومات في واحدة المساحة. أما اليوم مع السبين الكوموي هناك توجه باتجاه الذاكرة الداخلية الممغنطة MRAM^{iv} والتي تتميز بقدرتها على الاحتفاظ بالمعلومات حتى عند انقطاع التيار الكهربائي، كما وقابلية التبديل السبيني في تجاه الإلكترون تجعل إمكانية تبديل المعلومات ومسحها بشكل أسرع من الـ RAM الحالية.

3- **النفق السبيني:** تمتاز الخصائص الكوموية بإمكانية العبور النفقي لتجاوز الحواجز الطاقية. فإن كانت خاصية ترانزستور المفعول الحقلي الكلاسيكي قائمة على مرور الإلكترونات بتطبيق فولطية على أحد مسريه فيحولها لعازل والعكس صحيح، فبناء وصلة نفقية كوموية قامت على اقتراح تأثير الحقل المغناطيسي على توجه سبين الإلكترون، وبالتالي استبدال أنصاف النواقل بطبقتين حديدتين ممغنطتين، قابلة للتعامل مع استقطاب الحق المغناطيسي، بحيث تبقى السبينات الموجهة وتطرح المختلفة عنها عبر النفق الكوموي^v.



والتي تتميز عن سابقتها بالسرعة الأعلى ودوام التوجه السبيني حتى بعد إزالة الحقل المغناطيسي، تلك التي قادت للترانستور السبيني الكمومي.

4- **الترانزستور السبيني الكمومي:** قادت التجارب التقنية على الوصلات النفقية الكمومية إلى إمكانية بناء بوابات رقمية سبينية عبر إضافة اشابة قابلة للمغنطة كالمغناز لأنصاف النواقل، واستخدام الأثر النفقي في بناء الترانستور السبيني الكمومي^{vi}، على أرضية ذات الترانستور التقليدي ولكن بإضافة الخواص السبينية للمغنطة، فأمكن بناء المرشحات والديودات السبينية النفقية الكمومية والتي باتت قابلة لبناء الدارات الرقمية الكمومية فائقة السرعة.

5- **من المهم الإشارة إلى المشاكل التقنية التي تظهر من عملية الترابط الكمومي الخاصة بسبينات الإلكترون والتي هي مختلفة زمنياً عن الثقوب، والتي من الممكن التغلب عليها بالإشابة الزائدة^{vii} التي تعطي الكترونات بلا ثقوب مقابلة وذلك في نطاق التوصيل.**

بينما تقوم غوغل اليوم بإجراء التدريبات الأولى على بواكير كمبيوترها الكمومي^{viii}، تبدو لليوم تطبيقات هندسة الكمبيوتر الكمومي وهندسة الترانستور السبيني الكمومي بعيدة عن المجتمع العلمي العربي، فمن غير المستغرب أبداً ان تبقى أبحاثها وتقنياتها نظرية ونادرة في العالم العربي. فليوم لا زلنا مستثمرين للتقنية بكل أصنافها ولا نمتلك أدوات العمل التقني التجريبي بها، ومع هذا ثمة ضرورة علمية لوضع الخلفية العلمية والأبحاث التقنية الحالية في آخر تحديثاتها العصرية أمام جيل المبرمجين والمهندسين والباحثين، حتى تشكل حافزاً للمؤسسات البحثية في إمكانية تشكيل فرق بحثية عملية، حتى وإن كانت نظرية بداية قابلة للتطور المستقبلي ومجاراة التطور العالمي به.

الدخول في عالم التقنية وخاصة الكمبيوتر الكمومي، يعني التفوق العالمي تقنياً وعلمياً وبالضرورة حضارياً، أقله للجمع بين علم الفيزياء الكمومية من جهة والتقنية الهندسية للكمبيوتر من جهة أخرى.



المراجع

-
- i _Feynman R., International Journal of Theoretical Physics, 21(6-7), (1982).
- ii -Moore G., IEEE-Explore, 86(1), (1998).
- iii -Jones J., Centre for Advanced ESR. OX1 3QR, UK, (2018).
- iv -Pathak S., Nature, 2799 (2020)
- v _Park Y. et al ., Nature, 7:46671, (2017).
- vi -Jiang Sh. et al., Nature Electronics , 2(4):1, (2019).
- vii -Ullah S. et al., J. Phys. Conf., 864 (2017).
- viii -Savage N., Scientific American, (2019).

جمال الشوفي

دكتوراه في الفيزياء النووية، كلية الهندسة المعلوماتية
جامعة الاتحاد الخاصة، سوريا
البريد الإلكتروني: jalshoufi2001@gmail.com