الفصل الأول

تطور صناعة الإلكترونيات

التحول من «الميكرو» إلى «النانو»، مليون ترانزستور في حبة رمل

obeikandl.com

obeikandl.com

الفصل الأول

تطور صناعة الإلكترونيات

التحول من «الميكرو» إلى «النانو»، مليون ترانزستور في حبة رمل

1- مقدمة

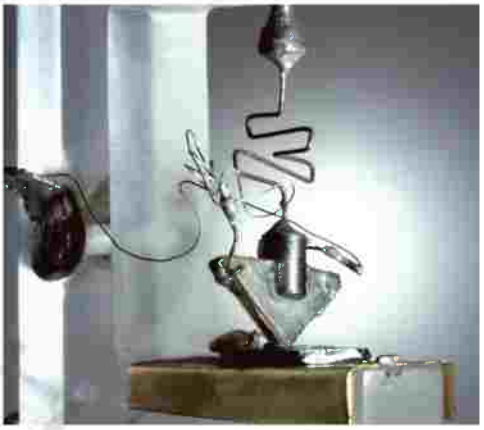
نعرض في هذا الفصل تطور صناعة الإلكترونيات منذ اختراع أول ترانزيستور في منتصف القرن العشرين. ونبين كيف اقتحمت هذه الصناعة مجال النانوتكنولوجيا حيث استطاع مهندسو المركبات الإلكترونية تقليص أبعاد الترانزيستور من السنتيمتر إلى أقل من المكرومتر خلال نصف قرن من الزمن. سوف نعرض كيفية تمكن هؤلاء المهندسين من تصميم دوائر كهربائية تتكون من ملايين الترانزيستورات في قطعة من السيلكون بحجم قطعة نقدية. وسوف نبين أن تكنولوجيا السيلكون تكاد تبلغ أقصى ما يمكنها أن تقدمه لصناعة الإلكترونيات، وأن الباحثين قد بدؤوا بالتفكير في بدائل

تمكنهم من مواصلة تقليص أبعاد الترانزيستور وزيادة قدرة الحاسوب. ومن أهم هذه البدائل (الإلكترونيات الجزيئية molecular electronics) التي تعتمد على جزيئات نانوية الأبعاد تؤدي وظيفة ترانزيستر السليكون. ولكن قبل الحديث عن هذه التطورات دعنا نعايش القصة من بدايتها التي تزامنت مع اختراع أول ترانزيستور سنة 1947.

2 - الترانزيستور: اختراع مهّد لميلاد الإلكترونيات الحديثة

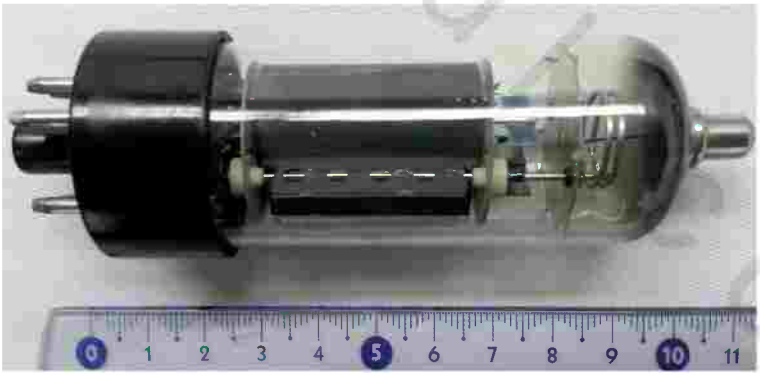
اخترع الترانزيستور ثلاثة فيزيائيين كانوا يعملون في مختبرات (بل لاب Bell lab) في الولايات المتحدة الأمريكية، هم : شوكلي، وباردين وبراتين Shockley, Bardeen and Brattein. ونالوا بهذا الإنجاز جائزة نوبل للفيزياء سنة 1947 (الشكل 1.1).

كان أول ترانزيستور عبارة عن ثلاث قطع من مادة الجرمانيوم ذات خواص كهربائية مختلفة وصلت ببعضها. سميت قطعتان منها (الباعث Emitter) و(المجمّع Collector) وأطلق على الثالثة اسم (القاعدة Base) لأنها تحمل القطعتين الأخريين. أما الباعث والمجمّع فقد سميا بذلك لأن الشحنات الكهربائية تنبعث من الأول، وتتجمع في الثاني حين يستخدم الترانزيستور لتضخيم التيار. وتجلت بوضوح للمختصين بعض مميزات الترانزيستور مقارنة بالصمامات الإلكترونية (vacuum tubes) التي تؤدي وظيفة مماثلة في الدوائر الكهربائية (الشكل1.2).



(الشكل 1.1) أول ترانزيستور من مادة الجرمانيوم تبلغ أبعاده سنتيمترات عدة

Credit: AT&T Bell Labs/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.

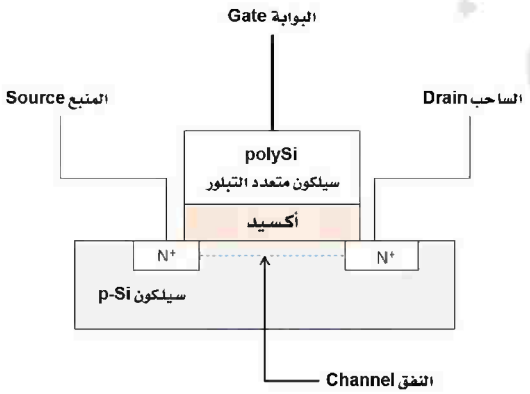


(الشكل 1.2) صمام إلكتروني (vacuum tube)

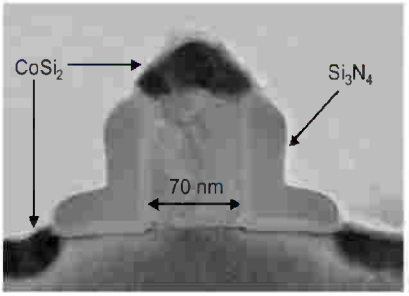
لكن أهمية الترانزيستور الكبرى تكمن في إمكانية تقليص أبعاده بدرجة ربما لم يتخيلها شوكلي وزميلاه، حيث أصبح ممكناً بعد نصف قرن من

البحث، إدماج ملايين الترانزيستورات في قطعة سليكون بحجم قطعة نقدية كما سنبين لاحقاً. وسمح ذلك بتقليص حجم الحاسوب الذي كان (يشغل الغرف) كما قال فاينمان. فأول حاسوب رقمي (ENIAC) صمم سنة 1945م كان يحتوي على 2800 صمام إلكتروني، ويزن 2700 كيلوغرام (Kg) ويستهلك 1800 كيلوواط (kW) من الطاقة. يمكنك أن تدرك أهمية الترانزيستور عندما تلاحظ أن قدرة هذا الحاسوب الضخم أقل من قدرة بعض حاسبات الجيب التي تجدها اليوم في الأسواق. ولذلك يعد المختصون اختراع الترانزيستور ميلاداً للإلكترونيات الحديثة، وقد استحق مخترعوه أن يكرموا بمنحهم جائزة نوبل للفيزياء.

طورت خلال النصف الثاني من القرن الماضي أنواع مختلفة من الترانزيستورات من أهمها (الموسفت MOSFET) الذي يتكون اسمه المختصر من الحروف الأولى للكلمات الآتية: (Metal–Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ومعناها (معدن- أكسيد- شبه موصل- ترانزيستور ذو تأثير المجال). (الشكل 1.3).



(الشكل 1.3) ترانزيستور (مسفت MOSFET)



(الشكل 1.4) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لترانزيستور (موسفت MOSFET).
لاحظ أن طول البوابة 70 نانومتر. البقع السوداء الثلاثة هي الوصلات للمنبع والبوابة والساحب. Credit Intel.

لا يسمح المقام هنا بعرض التفاصيل التقنية المتصلة بالوظائف الإلكترونية للترانزيستور. ربما يكون من المهم الإشارة إلى وظيفتين أساسيتين له، هما: تضخيم التيار الكهربائي (current amplification) واستعماله مفتاحاً لتوصيل التيار أو قطعه (switch). تكتسب الوظيفة الأخيرة أهمية بالغة؛ لأنه بفضلها تتم العمليات الحسابية داخل جهاز الحاسوب.

لنحاول أن نفهم فيما يأتي كيف يتم ذلك بشيء من التيسير.

يمكن تمثيل الأعداد بواسطة النظام الثنائي Binary System أي باستخدام رمزين اثنين فقط، وهما 0 و1. أطلق على كل من هذين الرمزين اسم (بت Bit) وهو اختصار لكلمتي (Binary Digit) التي تعني (رقم ثنائي). ويمكن كذلك التعبير عن كل حرف من الحروف الأبجدية في اللغات المختلفة بسلسلة معينة تتكون من الرمزين (0) و(1). وهكذا يصبح ممكناً التعامل مع النصوص والأعداد بواسطة رمزين فقط، هما (0) و(1). هذا النظام يشبه ما يعرف بخطوط الرمز bar code المستخدم في الأسواق للتعرف على مختلف المواد المعروضة للبيع. يكفي أن يُمرّر الرمز أمام شعاع ليزر موصول بجهاز حاسوب

ليتعرف هذا الأخير على المنتج، ويبين لنا سعره. فاسم المنتج وسعره ومعلومات أخرى يمكن أن تكتب على شكل سلسلة من الخطوط البيضاء والسوداء... ما يفعله الحاسوب هو ترجمة هذه الخطوط إلى سلسلة من الأرقام 1 و0 ليتمكن من معالجة المعلومات التي تتضمنها هذه الأرقام.

يبدو هذا واضحاً إلى حد ما، لكن ما علاقة هذا كله باستخدام الترانزيستور مفتاحاً قاطعاً أو موصلاً للتيار الكهربائي؟ يكفي أن ننسب 0 إلى إحدى الحالتين، مثلاً تلك التي يكون فيها الترانزيستور قاطعاً للتيار- أي لا تيار يمر خلاله- وننسب الرمز 1 للحالة التي يكون فيها الترانزيستور موصلاً للتيار. ولكن كيف نجعل الترانزيستور يتأرجح بين حالتي التوصيل والقطع للتيار الكهربائي؟

لو نظرت إلى الشكل 1.3 فسوف تلحظ أن (الموسفت) يتكون من ثلاثة أجزاء هي (المنبع) أو (المصدر Source) و(الساحب Drain) و(البوابة Gate). وتسمى المنطقة التي تربط بين المنبع والساحب (النفق Channel). يمر التيار بين المنبع والساحب، ويُتحكم فيه بواسطة جهد كهربائي يطبق على البوابة. يمكن فتح (البوابة) بواسطة الجهد المطبق عليها ليتدفق من خلالها التيار من (المنبع) إلى (الساحب) ويمكننا أن نغلقها لتوقيف التيار. وهكذا يتضح جليًّا لماذا سميت أطراف الترانزيستور الثلاثة (المنبع) و(الساحب) و(البوابة). هذا أهم ما يجب أن نعرفه من حيث المبدأ لنفهم عمل الترانزيستور. لاحظ أولاً أن الجهد المطبق على البوابة لا يولد تياراً بين البوابة والمنبع أو الساحب؛ لأن البوابة تحتوي على طبقة رقيقة من أكسيد السليكون العازلة كهربائيًّا. إن الجهد على البوابة ينشئ فقط مجالاً كهربائيًّا في النفق، ومن ثم كانت تسمية الترانزيستور (ذو تأثير المجال). يمكننا أن نجعل الترانزيستور ينتقل

من حالة التوصيل إلى حالة القطع بتغيير جهد البوابة. وهكذا يمكن استعمال الترانزيستور بوصفه (قلماً إلكترونيًّا) يكتب الأعداد والكلمات بواسطة رمزين اثنين، هما 0 و1 فقط. لاحظ أن كتابة كل حرف على شكل سلسلة طويلة من الأرقام لا يبدو أقصر الطرائق للتعبير عن أيسر عنصر للكلمة! لكن علينا أن نفهم أنها طريقة يفرضها استخدام الترانزيستور الذي يتأرجح بين حالتين اثنتين فقط! ويمكن أن ندرك الآن أن سرعة قراءة الحاسوب للكلمات تحددها سرعة تأرجحه بين حالتي التوصيل والقطع للتيار الكهربائي.

من الواضح أن زمن تأرجح الترانزيستور بين الحالتين 0 و1 متصل بالفترة الزمنية التي تحتاج إليها الشحن الكهربائية المكونة للتيار لقطع المسافة من المنبع إلى الساحب. ولذلك، فإنها متعلقة بطول النفق. فإذا تناقص طول النفق تناقص زمن تأرجح الترانزيستور أي تزايدت سرعة التأرجح. وبعبارة أخرى، إذا أردنا أن نصمم ترانزيستور سريع التأرجح، ومن ثم زيادة سرعة معالجة البيانات، علينا بتقصير طول النفق، أي بتقليص أبعاد الترانزيستور. وهذا ما عكف على تحقيقه عدد من العلماء والمهندسين العاملين في هذا المجال منذ السبعينيات. وقد نجحوا في مهمتهم نجاحاً باهراً، كما سنرى في الفقرة الآتية:

3 - الانتقال من (الميكرو) إلى (النانو) إلكترونيات

سنة 1961م تمكن المهندس كِلبي (Kilby) الذي كان يعمل لدى شركة (تكساس أنسترومانت Texas Instrument) من دمج كثير من الدوائر الكهربائية

المكونة من عدد من الترانزستورات والمكثفات والمقاومات في شريحة سليكونية واحدة، فتكون (دائرة متكاملة أو مدمجة Integrated Circuit). لم تتضح أهمية هـذه الفكرة إلا بعد مرور سـنين عدة، حيث مهدت لانطـلاق ثورة حقيقية في صناعة الإلكترونيات، وأمكن بفضلها تصميم الحاسوب الشخصي. ونال كلبي جائزة نوبل للفيزياء سنة 2000 م وتوفي سنة 2005م.

من الواضـح أن زيادة عدد الترانزيسـتورات في الدوائر المتكاملة ترفع من قدرتها الحسـابية لسببين: أولهما، زيادة سـرعة الترانزيستور بسبب تناقص المسـافة التـي تقطعها الإلكترونات بين المنبع والسـاحب. وعليـه، فإن تقليص طول النفق في (الموسـفت) يسمح بتصنيع دوائر ذات قدرات أعلى. وثانيهما، زيادة عدد الترانزستورات التي يمكن إدماجها في الدوائر لصغر حجمها.

سـنة 1965 كتب جـوردون مـور (Gordon Moore)، أحد مؤسسـي شـركة (إنتال Intel)، مقالاً توقع فيه تضاعف عدد الترانزستور في وحدة المعالجة، أي الميكروبروسيسـور (Microprocessor) كل سـنتين. من المحتمل أن الرجل حين كتـب هذه الكلام كان ينظر إلى السـنوات القليلة القادمة. لكـن أثبتت الأيام أن تقليص أبعاد الموسفت وزيادة عدد الترانزستورات داخل الميكروبروسيسور تواصلا بالوتيرة نفسها التي تنبأ بها السيد مور تقريباً حتى اليوم. وأصبح ذلك يعرف (بقانون مور Moore's law). لقد تضـاعف بالفعل عدد الترانزستورات داخل الميكروبروسيسـور كل سنتين منذ تلك الفترة؛ فقد كان يقدر بالآلاف في بدايـة السـبعينيات، وبلغ 50 مليونـاً في (البانتيـوم Pentium 4) وزاد عن ألف مليـون في أحدث ميكروبروسيسـور صـنعته شـركة إنتـال Intel. وتقلص طول البوابة خلال الفترة نفسـها ليبلغ اليوم 35nm نانومتراً. تجدر الإشارة إلى أن

حجم مثل هذا الترانزيستور أصبح قريباً من حجم فيروس الإنفلوانزا الذي يبلغ قطره نحو 100 نانومتر.

ربما تتساءل الآن عن التقنية التي تستخدم لتصنيع مركب إلكتروني بهذا الحجم الصغير وبدقة كبيرة وإدماج ملايين الترانزستورات في قطعة سليكون لا تتجاوز مساحتها مساحة قطعة نقدية. يطلق على هذه التقنية اسم (الفوتوليثوجرافي Photolithography). هذه الكلمة مركبة من ثلاث كلمات إغريقية، و هي (فوس phos) التي تعني (ضوء) و(ليثوس lithos) التي تعني (الحجر) و(جرافوس graphos) التي تعني الكتابة أو الرسم. تقنية الليثوجرافي هي تقنية الطباعة التي اخترعها ألوى سينيفلدير Alois senefelder النمساوي سنة 1798. يمكن التعرف على بعض تفاصيل هذه التقنية في الملحق الثالث.

تمكنت شركة (إنتال Intel) سنة 2004 بفضل هذه التقنية من تصميم وتصنيع ترانزستور من نوع موسفت لا يتجاوز طول بوابته خمسة وثلاثين نانومتر (35nm) وله مساحة إجمالية تقل عن نصف ميكرومتر مربع ($0.5um^2$) أي ما يعادل نصف الجزء من المليون من المليمتر المربع. علينا أن نتصور بدقة حجم هذا الإنجاز. من أجل ذلك، يكفينا أن نلاحظ أن المليمتر المربع هو تقريباً مساحة حبة رمل. يعني هذا أن المساحة الإجمالية لمليوني ترانزيستر تساوي مساحة حبة رمل. وبالفعل، سمح هذا الإنجاز لشركة إنتال (Intel) أن تضع بين أيدي صناع الحاسوب رقيقة من نوع Chip SDRAM يضم أكثر من نصف مليار ترانزيستور.

يتضح مما سبق أننا لم نعد نتعامل مع مركبات ميكرومترية، بل نانوية حقًّا. وعليه، لم يعد مبرراً استخدام مصطلح (ميكرو إلكترونيات Microelectronics)

والأجدر أن يعوض بـ (نانو إلكترونيات Nanoelectronics). ولكن هذا لم يحدث على أرض الواقع، حيث ما زالت تستعمل كلمة ميكروإلكترونيات. ولا يزال المجهر الإلكتروني الذي يسمح بالكشف عن الأبعاد النانومترية يسمى (ميكروسكوباً) وليس (نانوسكوباً) إلكترونيًّا علما بأن كلمة (ميكروسكوب) أطلقت على المجهر الضوئي؛ لأنه يسمح برؤية الأجسام التي تقارب أبعادها الميكرومتر.

ويتوقع أن يتواصل تقلص طول بوابة الموسفيت ليقترب من عشرة نانومترات قبل سنة 2015م حسب بعض التوقعات. هذه التطورات المدهشة في صناعة الإلكترونيات تطرح بعض التساؤلات. ترى، هل يستمر تقليص حجم الترانزيستور حسب قانون مور أو لا بد أن يصل إلى حد يتوقف عنده؟ وما البدائل الممكنة لمواصلة تطوير صناعة الإلكترونيات؟

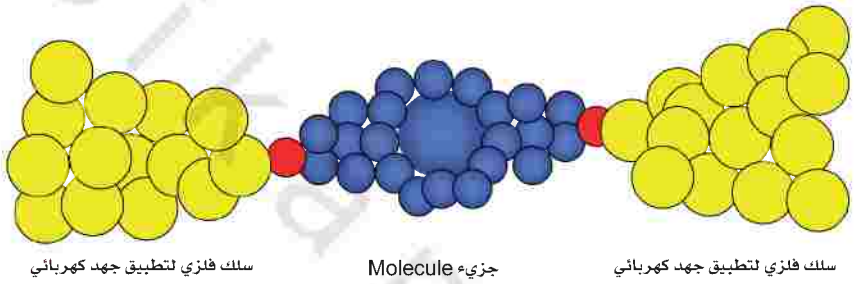
يمكن الإجابة عن السؤال الأول بالنفي بداهة. ذلك لأننا نحتاج إلى مسافة تفصل بين المنبع والساحب، وإن انحصرت في عدد قليل من الذرات. ونحتاج إلى طبقة من الأكسيد العازل، حتى لو كانت رقيقة جدًّا، نتحكم من خلالها في التيار المار بين المنبع والساحب كما أسلفنا. يُجمع الخبراء على أنه من المستبعد أن يُصنع موسفت ذو مواصفات مقبولة ومتحكم فيها بطول بوابة يقل عن عشرة نانومترات (10nm). وليست هذه العقبة الوحيدة، بل هناك صعوبات أخرى تحول دون مواصلة تقليص سمك طبقة أكسيد السليكون العازلة، حيث يلاحظ ظهور تيار (نفقي Tunnelling Current) يخترق الأكسيد حين يقل سمكه عن حد معين. ولذلك يبدو محتملاً جدًّا أن تقليص أبعاد موسفت السيلكون سيبلغ حدًّا لا يمكن تجاوزه مع نهاية العشرية الثانية من هذا القرن. يعني ذلك

أن ما سمي بالمقاربة (من الأعلى إلى الأسفل Top-Down approach) في تطوير الترانزيستور تكون قد بلغت نهايتها. هذا تحدٍّ كبير يصعب على المعنيين بتطوير صناعة الإلكترونيات الاستسلام له دون محاولة تخطيه. فالحاجة أم الاختراع كما يقال. لا بد من التفكير في بدائل أخرى لموسفيت السليكون. بعبارة أخرى، يجب أن نفكر في (شيء) يؤدي وظيفة الترانزيستور، ولكنه أصغر بكثير من موسفيت السليكون. نحن نتحدث هنا في صلب الموضوع الذي يشغل بال المعنيين بتطوير صناعة الإلكترونيات وصناعة الحاسوب. وربما يسهل إدراك الأسباب التي تجعل السباق إلى تطوير ترانزيستور من نوع جديد سباقاً محموماً. نحن جميعا ندرك الأثر الهائل الذي أحدثه تطوير الحاسوب في مختلف المجالات من شبكة الإنترنت وثورة المواصلات إلى تفكيك الإرث الجيني للإنسان مروراً برصد التقلبات الجوية ومعالجة المعلومات الأمنية للدول. وعلى مستوى الفرد، لا يقدر أحد منا اليوم على الاستغناء عن الحاسوب في عمله أو حتى في بيته. بعبارة موجزة، يمكن القول: إن تطوير قدرات الحاسوب مسألة تتعلق بمستقبل الحضارة الإنسانية كلها.

ينقسم عادة العلماء أمام التحديات النظرية أو التكنولوجية الكبرى التي يواجهونها إلى فريقين. فريق يميل إلى التفكير في تحسين الموجود من النظريات أو التقنيات. يمكنك أن تصف هؤلاء العلماء بلغة السياسيين بأنهم (إصلاحيون). وفريق آخر يفضل البحث عن نظريات أو تقنيات جديدة تختلف جذريًّا عن تلك المتداولة. هؤلاء هم (الراديكاليون) أو (الثوريون). نعرض فيما يأتي بعضاً من الحلول التي يقترحها الفريقان قد تسمح بمواصلة تطوير قدرات الحاسوب، حين تعجز تكنولوجيا السليكون عن المزيد من العطاء.

4 - الإلكترونيات الجزيئية Molecular Electronics

قد تبدو فكرة استعمال الجزيئيات بوصفها مركبات إلكترونية غريبة؛ لأننا نعرف أن التيار الكهربائي المار خلال سلك موصل يتناقص بتناقص مقطع السلك. وعليه، فإننا نتوقع أن يكون التيار منعدماً تقريباً، حين يطبق جهد كهربائي على طرفي جزيء (الشكل 1.5).



(الشكل 1.5) جزيء تحت جهد كهربائي

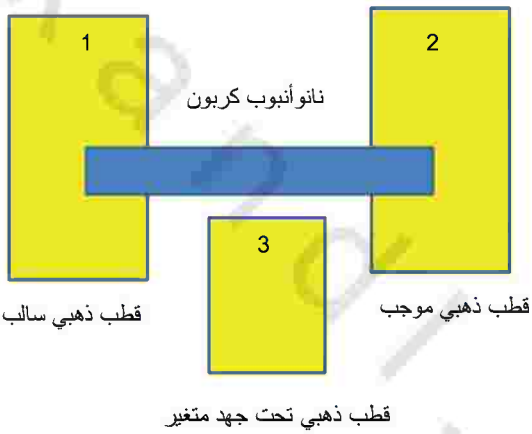
ذلك لأن الجهد يكون مطبقاً على ذرتين فقط على طرفي الجزيء، فتكاد تنعدم مساحة المقطع بين الجزيء والسلك الفلزي الواصل. كان هذا الاعتقاد من بين الأسباب وراء تشاؤم الفيزيائيين تجاه إمكانية تطوير فكرة الإلكترونيات الجزيئية. ولكن سنة 1974 نجح ماك جينس McGinness وزملاؤه في تصميم أول مركب إلكتروني جزيئي، وكان عبارة عن مفتاح (سويتش switch) يُمكن التحكم فيه بواسطة جهد كهربائي. ونُشِر هذا الإنجاز في المجلة المشهورة (Science). وبذلك فتح باب الاجتهاد لتطوير الإلكترونيات الجزيئية على مصراعيه. وسنة 1988 نشر أفيرام Aviram بحثاً نظريًّا عن استخدام جزيء بوصفه ترانزيستور. وبذل الباحثون منذ ذلك الوقت جهوداً كبيرة لتحويل المفهوم النظري إلى واقع التطبيقات.

سنة 1991، اكتشف الباحث الياباني إجيما (Iijima) أنابيب الكربون النانوية التي أصبحت تعرف بـ (أنابيب الكربون النانوية Carbon Nanotubes). سوف نعرض قصة اكتشاف هذه الأنابيب وطرق تحضيرها وبعض خواصها وتطبيقاتها بشيء من التفصيل في الفصل الثاني من هذا الكتاب. يكفينا هنا أن نصفها بأنها أنابيب ذات قطر نانوي مكونة من ذرات الكربون فقط. بينت البحوث أن الخواص الكهربائية لبعض هذه الأنابيب النانوية تسمح باستخدامها بوصفها ترانزيستور للتحكم في التيار الكهربائي تماماً، كما يفعل بموسفيت السليكون! نشأت فكرة استخدام نانو أنابيب الكربون مكان ترانزيستور السيلكون عندما لاحظ الباحثون تغيرا في شدة التيار حين يطبق جهد كهربائي على أطراف الأنابيب الكربونية النانوية . ويرجع الفضل في إنجاز هذا النوع من الدراسة التجريبية إلى تطور مجهر القوة الذرية الذي سمح بالمشاهدة المباشرة للنانوأنابيب وتحريكها من مكان إلى آخر (انظر الملحق الثاني). وقد تمكن فريق من الباحثين في شركة (آي ب م IBM) وغيرهم من وضع نانو أنبوب الكربون بين قطبين من الذهب فوق طبقة من أكسيد السليكون العازل، ووضعوا بين القطبين قطباً ثالثاً على بعد بضعة نانومترات من النانو أنبوب (الشكل1.6).

يلاحظ مرور تيار في الأنبوب النانوي، حين يطبق جهد على طرفيه. هذا متوقع ولا غرابة فيه. الأكثر أهمية هو أنه بالإمكان التحكم في هذا التيار بتغيير الجهد المطبق على القطب الثالث البيني، غير المتصل بالأنبوب مباشرة. ويلاحظ أن تغير التيار بدلالة هذا الجهد يشبه تماماً تغير التيار في ترانزيستور الموسفت بين المنبع والساحب بدلالة جهد البوابة! معنى هذا أننا حصلنا على (ترانزيستور) نانوي الأبعاد يعمل عمل موسفت السيلكون. لكن

تعويض موسفيت السليكون بالنانوأنابيب الكربونية لا يزال بعيد المنال؛ لأنه لا يكفي توصيل نانو أنبوب واحد والتحكم في التيار المار بطرفيه لنصيح صيحة أرخميدس: (وجدتها!).

نحن في الحقيقة نحتاج إلى التمكن من ربط مئات الملايين من هذه الأنابيب النانوية لنحصل على الدوائر الكهربائية المعقدة التي نحتاج إليها في تصميم الحاسوب.



(الشكل 1.6) نانو أنبوب كربون موصول بقطبين من الذهب بينهما فرق جهد كهربائي. يتحكم في التيار المار في الأنبوب النانوي عن طريق الجهد المطبق على القطب الثالث غير الموصول بالنانو أنبوب. انظر المرجع http://www.research.ibm.com/nanoscience/fet.html

وهذه هي المشكلة نفسها التي تحول دون استعمال الجزيئات بوصفها ترانزيستورات وتطوير الإلكترونيات الجزيئية. هذه عقبة كبيرة لم يستطع الباحثون التغلب عليها حتى الآن، وربما تبقى كذلك مدة طويلة.

5 - الحاسوب الكمي

يتواصل البحث عن ترانزيستور أقل حجماً يدخل ضمن إطار التطوير التدريجي للتكنولوجيا. أما (الراديكاليون) من الباحثين فإنهم يرون ضرورة إعادة النظر في طريقة عمل الحاسوب الحالي بصفة جذرية. رأينا أن هذه الطريقة تعتمد على النظام الثنائي Binary System والترانزيستور موسفيت الذي يتأرجح بين حالتين اثنتين فقط : 0 و1. لا بد من التأكيد على كلمة (فقط). في نهاية السبعينيات اقترح الفيزيائي فينمان Feynman وآخرون فكرة تصميم (الحاسوب الكمي Quantum computer). هذا الحاسوب يختلف تماماً عن الحاسوب الذي نستعمله اليوم. كانت الفكرة وليدة تطور الفيزياء الحديثة، وما يسمى بنظرية (ميكانيكا الكم Quantum Mechanics). دعنا نحاول تيسير الفكرة دون استعمال الرياضيات التي لا غنى عنها في عرض دقيق للموضوع.

أولاً، يجب أن نشير إلى أن قوانين ميكانيك الكم تتحكم في عالم الجزيئات والذرات المحجوب عن أعيننا، بينما تتحكم قوانين نيوتن Newton في الظواهر التي نشاهدها بأعيننا المجردة، مثل سقوط التفاحة من شجرتها. من أهم نتائج هذه النظرية أن الإلكترونات في الذرات والجزيئات يمكنها أن توجد في حالات (States) تتميز بطاقات مختلفة. وكل ما يمكن حسابه نظريًّا هو احتمال وجود إلكترون في إحدى هذه الحالات الممكنة. ولا يمكن القطع بوجود الإلكترون في إحدى حالاته الممكنة إلا بالتجربة والقياس. نعم، هكذا تقول لنا قوانين الفيزياء الحديثة. معرفتنا (لحال الذرات) معرفة ظنية، لذا نحتاج إلى التجربة حتى تصبح قطعية! فكرة الحاسوب الكمي تتمثل في تعويض الترانزيستر موسفيت بـ (نظام فيزيائي) يتأرجح بين حالات ممكنة متعددة

وإجـراء الحسـابات دون أن نحتاج إلى معرفة (قطعية) حـول وجود (النظام الفيزيائي) في إحدى هذه الحالات الممكنة. ليس يسـيراً التفصـيل في طريقة عمل مثل هذا الحاسـوب دون الإخـلال بتعهدنا بالتزام التيسـير في العرض. ولكن ربما يساعد المثال الآتي على تقريب الفكرة إلى ذهن القارئ دون معرفة سـابقة بالفيزيـاء الحديثة وغرابة قوانينهـا. ويجب أن نؤكـد أنه مثال فقط، فالقياس عملية لا تخلو عادة من ضعف في الدقة العلمية للتحليل، ولكن اللجوء إليه قد يساعد على تقريب الفكرة المراد توضيحها. لنأخذ مثلاً النص اللغوي، فهو يحوي كلمات تتكون من عدد من الحروف. وقد تحمل الكلمة الواحدة عدداً من المعاني. ولكن القارئ يسـتطيع أن ينتقي من هذه (المعاني الممكنة) المعنى الـذي يقصـده الكاتب... يتم ذلك لحظـة قراءة النصـ ودون توقف... قد لا يكـون هذا صـحيحاً عند قراءة نصـ يتعمد كاتبه الغموض!..... فلنتسـاءل: كيف يستطيع المخ البشري أن يفرز المعاني الممكنة لكل كلمة في الجملة، ويختار منها ما هو مناسـب ليكون للجملة معنى في مدة زمنية تكاد تكون منعدمة؟... علـى المـخ أن يأخـذ في الحسـبان كل المعـاني الممكنـة لأي كلمـة في النصـ لاسـتخلاص معنى كل جملة. وفي حالة النص العربي غير المشكول، يزيد عدد الأوجه الممكنة لكل كلمة.... فكلمة (قدر)، مثلاً، قد تعني (المصـير) كقولنا: (هذا قدَرُنا المحتوم)، وقد تعني (الوعاء) إذا كان حرف القاف مكسوراً، وقد نقصـد بها فعل (تغلب) كقولنا: (قدَرَ عليه) أو معنى (حدد قيمته) إذا كانت الدال مشددة، كقولنا: (قدر سعر الشيء بقيمة كذا...) أو بمعنى (ضاق وقل) كقـول الله ﷻ في القـرآن الكـريم: ﴿لِيُنفِقْ ذُو سَعَةٍ مِّن سَعَتِهِۦ ۖ وَمَن قُدِرَ عَلَيْهِ رِزْقُهُۥ فَلْيُنفِقْ مِمَّآ ءَاتَىٰهُ ٱللَّهُ ۚ لَا يُكَلِّفُ ٱللَّهُ نَفْسًا إِلَّا مَآ ءَاتَىٰهَا ۚ سَيَجْعَلُ ٱللَّهُ بَعْدَ عُسْرٍ يُسْرًا﴾. (سورة الطلاق: الآية 7).

ولكن العقل البشري له القدرة العجيبة على استحضار كل هذه المعاني أو بعضها، حسب ثقافة القارئ، وانتقاء المناسب منها خلال قراءة النص في زمن لا يكاد يقاس. على كل، فالحديث عن طريقة عمل مخ الإنسان موضوع شائق، ولكن البحث فيه لا يزال في طفولته. فنحن ما زلنا بعيدين عن فهم ظواهر يسيرة مثل السرعة الكبيرة التي نتعرف بها على شخص لم نره منذ سنوات طويلة، علما بأن صورته مخزنة في ذاكرتنا بين مئات الملايين من الصور. ما نود إبرازه من خلال سرد مثال المخ البشري هو أنه فعلاً توجد (طرق لمعالجة المعلومات) أسرع بكثير من تلك التي يعتمد عليها حاسوب اليوم. تشير الدراسات الجارية إلى أن قدرة الحاسوب الكمي، إن تم إنجازه، ستفوق بكثير قدرة الحاسوب الحالي. السبب وراء ذلك هو أنه يسمح بما يسمى بـ(المعالجة المتوازية الضخمة Massive Parallel Processing) التي تمكّن من إجراء حسابات تبدو مستحيلة الآن لطول الزمن الذي ستستغرقه لو حاولنا إجراءها علي الحاسوب (التقليدي) الموجود بين أيدينا اليوم.

ترى، ما الذي حال دون تصنيع هذا النوع من الحاسوب حتى الآن؟ العقبة الأساسية تكمن في إيجاد النظام الفيزيائي الذي يمكن أن يتأرجح بين حالات معدودة، ويتصف بـ(التناسق coherence). ويعني بشرط التناسق أن يحتفظ النظام الفيزيائي بخواصه مدة زمنية كافية تسمح بإجراء الحسابات. في الحقيقة، هناك كثير من الأنظمة الفيزيائية التي يمكنها أن تتأرجح بين حالات متعددة، وتم ترشيحها لتصميم الحاسوب الكمي. ومن أحدث المقترحات التي نالت اهتمام الباحثين في السنوات الأخيرة هو غرس ذرتين لعنصر الفوسفور في طبقة سليكون على مسافة تقاس بعشرات النانومترات. يفصل بين الذرتين

طبقة عازلة ذات سمك نانومتري. ويطلق على هذه التقنية اسم (الزرع الأيوني الأحادي Single Ion Implantation). لكن المطلب الثاني المتمثل في التناسق هو الذي يبدو مستعصياً على الفيزيائيين حتى الآن. بل ذهب بعض الباحثين من معهد لورنز بجامعة ليدن الهولاندية (Leiden University, Netherlands) في بحث نشر في مجلة متخصصة سنة 2005 إلى أن فيزياء الكم تبين أنه لا يمكن توفير شرط التناسق حتى ولو كان النظام الفيزيائي المستخدم معزولاً تماماً. بعبارة أخرى، هناك مدة أدنى أساسية يفقد أي نظام بعدها تناسقه بصفة تلقائية دون الحاجة إلى تأثير خارجي. واقترح الفريق معادلة تسمح بحساب هذه المدة الزمنية، وطالبوا الباحثين المختصين في إجراء التجارب أن يقوموا بالقياسات الضرورية لتأكيد حساباتهم النظرية أو تفنيدها.

على الرغم من هذه الصعوبات والنظريات المتشائمة، فما زالت البحوث متواصلة بقوة في عدد من المختبرات العالمية؛ لأن إنجاز مثل هذا الحاسوب من شأنه أن يحدث قفزة علمية وتكنولوجية هائلة تفوق كل ما شهدناه حتى الآن.

في ختام حديثنا عن مستقبل الحاسوب لا يمكننا أن نتجنب الحديث عن فكرة (الحاسوب الضوئي) التي لا تقل راديكالية عن سابقتها. تتمثل الفكرة في استخدام الضوء بدلاً من التيار الكهربائي لنقل المعلومات داخل الحاسوب ومعالجتها؛ فيكون بذلك الحاسوب ضوئيًّا (Optical Computer). ما الذي يجعل الحاسوب الضوئي أقدر من الحاسوب التقليدي؟ الجواب يكمن أساساً في الفرق الكبير بين سرعة الإلكترونات وسرعة الضوء. فسرعة الإلكترونات التي تحمل المعلومات في حاسوب اليوم تقاس بمئات الكيلومترات في الثانية، أما سرعة الضوء فتقاس بمئات الآلاف من الكيلومترات في الثانية. إضافة

إلى ذلك، يمكن إرسال عدد من الإشارات الضوئية في الوقت نفسه دون أن تتداخل هذه الإشارات. وعليه يُتوقع أن يكون الحاسوب الضوئي أسرع بكثير من الحاسوب التقليدي. ويتوقع أن المسائل التي نحتاج اليوم إلى سنوات عدة لحلها قد نتمكن من حلها بواسطة الحاسوب الضوئي في دقائق معدودة. هذا هو السبب وراء الاهتمام الكبير الذي توليه المختبرات لتطوير الحاسوب الضوئي. وقد أعلنت شركة IBM سنة 2008 عن تمكن باحثيها من التحكم في خواص الضوء المنبعث من أنبوب كربون قطره 2 نانومتر ممهدين بذلك الطريق لتصميم دوائر ضوئية قد تحل محل الدوائر الكهربائية في حاسوب المستقبل.

6 - الخلاصة

رأينا أن صناعة الإلكترونيات اقتحمت مجال النانوتكنولوجيا عن طريق تقليص أبعاد الترانزيستر المصنع من مادة السليكون منذ الثلث الأخير من القرن العشرين، ولا يزال هذا التقليص مستمراً حتى كتابة هذه الأسطر. ويتوقع أن يزيد عدد الترانزيسترات في الحاسوب عن المليار خلال السنوات القليلة القادمة. ويتفق الخبراء على أن تكنولوجيا السليكون تكاد تصل إلى أقصى ما يمكنها أن تقدمه، حيث يبدو مستحيلاً تصنيع ترانزيستور ببوابة تقل عن 10 نانومترات. وحينئذ سوف نحتاج إلى تعويض ترانزيستور السليكون بشيء آخر يعمل عمله، ويكون أقل حجماً. وقد رشحت لذلك أنابيب الكربون النانوية، ولكن التحكم فيها وتوصيلها، بحيث تكون جزءاً من دوائر إلكترونية شديدة التعقيد يبدو تحدياً يصعب تجاوزه في الوقت الحاضر على الأقل. وهناك دراسات جارية لتطوير ما يسمى بالإلكترونيات الجزيئية التي يؤدي

فيها دور الترانزيستر جزيئات نانوية الأبعاد. ولكن المشكلة نفسها التي تواجه استخدام أنابيب الكربون كذلك تطرح نفسها. فالتحكم في التوصيل الدقيق لمئات الملايين من الجزيئات لا يبدو في متناول الخبراء في المستقبل القريب. ولكن جهود الباحثين مستمرة وحثيثة لإيجاد بديل عن ترانزيستور السليكون.

وأخيراً تم اكتشاف خواص كهربائية غير متوقعة لأنابيب الكربون النانوية وجزيئات مختلفة؛ حيث تبين أنها قد تعمل عمل الترانزيستور (موسفيت) حين يطبق جهد خارجي على أطرافها. والأهم في الأمر أن المادة بصفة عامة تتغير معظم خواصها حين تصبح أبعادها نانوية. هذا الاكتشاف فتح آفاقاً واسعة للبحث عن تطبيقات جديدة في مختلف المجالات، وهو موضوع حديثنا في الفصل المقبل.

ماذا تعلمنا في هذا الفصل؟

(1) تعرفنا على تطورات صناعة الإلكترونيات منذ اختراع أول ترانزيستور إلى الدوائر المتكاملة التي تحتوي على مئات الملايين من الترانزيستورات. فتحولت صناعة الإلكترونيات الميكروية microelectronics إلى إلكترونيات نانوية nanoelectronics نتيجة التقليص المستمر لحجم الترانزيستور.

(2) تعلمنا كيف يتم تصنيع الترانزيستور موسفت بطول بوابة نانوية الطول بفضل تقنية الفوتوليتوجرافي. وبذلك اتضح لنا أن صناعة الإلكترونيات دخلت فعلاً عصر النانوتكنولوجيا.

(3) تعرفنا على مفهوم الإلكترونيات الجزيئية بديلاً ممكناً لإلكترونيات اليوم، حين يصبح مستحيلاً مواصلة تقليص أبعاد ترانزيستور السليكون.

(4) تعرفنا على مفهومي (الحاسوب الكمي) و(الحاسوب الضوئي) اللذين تفوق قدرتهما بكثير قدرة الحاسوب التقليدي، ولكن تصنيعهما يبدو بعيد التحقيق في المستقبل القريب.

obeikandl.com

obeikandl.com

مراجع الفصل الأول

(1) McGinness, Corry, and Proctor: Vol 183, (1974) 853.

(2) A. Aviram, J. Am. Chem. Soc. 110 (1988), 5687.

(3) Takahiro Shinada,a) Yoshinori Kumura, Jun Okabe, and Takashi Matsukawa J. and Iwao Ohdomari, Vac. Sci. Technol. B 16 (4), (1998) 2489.

(4) Rita P McKinnon, Fay E Stanley, Nancy E Lumpkin, Eric Gauja Linda D Macks, Mladen Mitic, Victor Chan, Katia Peceros, Tilo M Buehler, Andrew S Dzurak, Robert G Clark, Changyi Yang, David N Jamieson and Steven D Prawer, Smart Mater. Struct. 11 (2002) 735.

(4) M. Mitic, S.E. Andresen, C. Yang, T. Hopf, V. Chan, E. Gauja, F.E. Hudson, T.M. Buehler, R. Brenner, A.J. Ferguson, C.I. Pakes, S.M. Hearne, G. Tamanyan, D.J. Reilly, A.R. Hamilton, D.N. Jamieson, A.S. Dzurak, R.G. Clark, Microelectronic Engineering 78–79 (2005) 279.

(5) Jasper van Wezel, Jeroen van den Brink, and Jan Zaanen, Phys. Rev. Lett. 94, (2005) 230401.

مواقع على شبكة الإنترنت للمزيد من الاطلاع:

(1) تطور صناعة الميكروبروسيسر (موقع شركة إنتل Intel).

http://www.intel.com/technology/silicon/65nm_technology.html

(2) تقنية الفوتوليثوجرافي

http://www.ee.washington.edu/research/microtech/cam/PROCESSES/photolithographypdf.html

http://www.ece.gatech.edu/research/labs/vc/theory/photolith.html

(3) تقنية الطباعة بالحزمة الإلكترونية Electron Beam Lithography:

http://www.elettra.trieste.it/experiments/beamlines/lilit/htdocs/people/luca/tesihtml/node37.html

(4) الحاسوب الكمي:

http://www.qubit.org/library/intros/comp/comp.html

http://www.cs.caltech.edu/~westside/quantum-intro.html

http://www.qubit.org

http://whatis.techtarget.com/definition/0,,sid9_gci283992,00.html

http://www.physorg.com/news3679.html

(5) الحاسوب الضوئي:

http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast28apr_1m.html

obeikandl.com