فصلنامه آموزش مهندسی ایران، سال نوزدهم، شماره ۷۵، پاییز ۱۳۹۶، صص. ۵۴-۲۳

آینده نانوالکترونیک

محمدحسن آرام [۱]، طه رجب‌زاده [۲]، مجید عالی‌زاده [۳] و سینا خراسانی [۴]

چکیده: در شش دهه گذشته از هنگام پیدایش ترانزیستور دوقطبی در آزمایشگاه‌های تلفن بل، گسترش پایدار صنعت الکترونیک اندازه ادوات نیمه‌هادی فعال را به کرانه‌های آن کوچک‌سازی کرده است. قانون مور که بیان می‌دارد هر هجده ماه سرعت ادوات دوبرابر و ابعاد آنها نصف می‌شود، به پایان سلطه خود نزدیک می‌شود. فناوری تجاری کنونی از یک سو به ابعاد اتمی و از سوی دیگر به چگالی توان حرارتی محدود می‌شود. به‌طور خلاصه، علی‌رغم نیروی محرک و توان اقتصادی عظیم پشت این صنعت، گلوگاه‌هایی واقعی در این فناوری وجود دارند و خود را هم‌اکنون به وضوح نشان می‌دهند. مسیرهایی که احتمالاً این محدودیت‌ها را مرتفع خواهند ساخت خیلی متعدد نیستند، و شامل نانوالکترونیک دوبعدی، شبکه‌های مِمریستوری، اسپینترونیک، ادوات نیمه‌هادی مرکب، الکترونیک نوری و نانوپتیک، می‌شود. هم‌چنین، انرژی خورشیدی و رایانش کوانتومی از دیگر مقوله‌های مرتبط هستند که به توسعه فیزیک و علم مواد اتکا دارند. این مقاله سه پرسش اساسی را مورد کاوش قرار می‌دهد: (۱) تاریخچه توسعه این فناوری از بدو پیدایش چگونه بوده است؟ (۲) مسیرهای پژوهشی فعلی در دنیا کدام‌اند؟ (۳) ریشه‌های واماندگی در کشور چیست و راه‌کارهای جبران آن و همراهی با فعالیت‌های جهانی چگونه است؟ در این متن سعی خواهد شد به اختصار برخی از اساسی‌ترین سوء برداشت‌ها در مراکز علمی ـ پژوهشی ملی موشکافی شده و پیشنهادهایی برای اختصاص بودجه و شتاب‌دهی به ورود و پیشرفت در این قلمرو بیان شود، به امید آن‌که نسل بعدی متخصصان ما از فضای گسترده‌تر و فعال‌تری برای پژوهش و پیشرفت برخوردار باشند.

واژه‌های کلیدی: نانوالکترونیک، نیمه‌هادی، ترانزیستور، نانوفناوری، فناوری‌های کوانتومی، سلول خورشیدی

---

۱. پژوهشگر پسا دکتری مهندسی الکترونیک، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران .mharam@ee.sharif.edu
۲. دانشجوی کارشناسی مهندسی الکترونیک، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
۴. استاد گروه مهندسی الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. (نویسنده مسئول).
khorasani@sina.sharif.edu

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴)
(پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۸/۶)
DOI: 10.22047/ijee.2017.77765.1440

۱. مقدمه

بی‌شک صنعت نیمه‌هادی و نانوالکترونیک اثرگذارترین صنعت در قرن بیستم بوده است. این صنعت نه‌تنها موجب رشد و توسعه اقتصادی کشورهای دارای فناوری آن شده است، بلکه موتور محرک اکثر صنایع دیگر نیز بوده است. می‌توان گفت تمام صنایعی، که در آنها از پردازنده‌ها و رایانه استفاده می‌شود، رشد امروزی خود را وام‌دار این صنعت هستند. همچنین توسعه و تکامل این صنعت موجب پیدایش صنایع دیگری همچون نرم‌افزار، ارتباطات و فناوری اطلاعات شده است که هرکدام از آنها به تنهایی یکی از بزرگ‌ترین و سودآورترین صنایع امروزی به شمار می‌رود.

صنعت نیمه‌هادی عملاً با ساخت نخستین نمونه ترانزیستور دوقطبی توسط باردین[۱]، براتین[۲] و شاکلی[۳] در سال ۱۹۴۷ پایه‌گذاری شد (Lojek, 2007; Chodos et al., 2001). حدوداً دو دهه پیش از این، لیلینفِلد[۴] ایده ترانزیستور اثر میدانی را مطرح کرد (Arns, 1998; Lilienfeld, 1930; Lilienfeld, 1933). اما از آنجا که در آن زمان تولید نیمه‌هادی و کنترل آلایش در عایق اکسید آن با خلوص بسیار بالا کاری دشوار بود، این ایده تا اوایل دهه ۱۹۷۰ عملی نشد و نخستین ترانزیستوری، که ساخته شد، از نوع دوقطبی بود. تا پیش از ساخت ترانزیستور، لامپ خلأ عنصر کلیدی در بسیاری از تجهیزات الکترونیکی مانند رادیو، تلویزیون، رایانه و ... بود، اما ترانزیستور به‌سبب مزایای متعددی که نسبت به آن داشت در اکثر کاربردها جایگزین آن شد. دومین عنصر محرک صنعت نیمه‌هادی ایده مجتمع‌سازی و ساخت مدارات الکترونیکی به‌صورت یکپارچه بر روی یک قطعه نیمه‌هادی بود. امروزه به این قطعه ریزتراشه یا مدار مجتمع می‌گوییم. این ایده را اولین بار در سال ۱۹۴۹ یک مهندس آلمانی به نام جاکوبی[۵] مطرح کرد (Jacobi & Siemens, 1952)، اما چند سالی تا عملی شدن آن طول کشید.

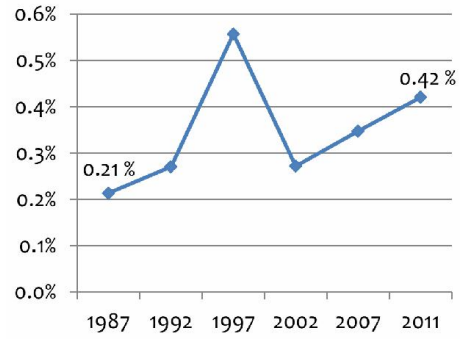
از آن زمان این صنعت رشد خیره‌کننده‌ای داشته است به‌طوری‌که هیچ صنعت دیگری تاکنون چنین شتابی را تجربه نکرده است. این رشد سریع موجب شده است تا بیشتر کشورهای صنعتی و نیمه‌صنعتی از اواسط قرن بیستم سرمایه‌گذاری بسیاری در این صنعت کنند. امروزه سهم قابل توجهی از اقتصاد این کشورها، مستقیماً به این صنعت وابسته است. به‌عنوان مثال، سهم صنعت نیمه‌هادی از کل تولید ناخالص داخلی[۶] امریکا در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۱ همانطور که در شکل

---

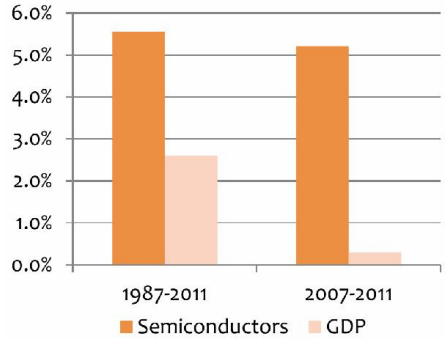
1. John Bardeen
2. Walter Brattain
3. William Shockley
4. Julius Edgar Lilienfeld
5. Werner Jacobi
6. GDP

شکل ۱ دیده می‌شود، دوبرابر شده و به عدد ۴۲ درصد رسیده است. همچنین اگر این صنعت رشد امروزی خود را، که در حدود ۵/۵ درصد است، حفظ کند، این سهم تا سال ۲۰۲۴ دوبرابر خواهد شد (Parpala, 2014).

نکته مهم دیگر درباره صنعت نیمه‌هادی آن است که طی چند دهه گذشته با وجود فراز و فرودهای اقتصاد جهانی، تغییر چندانی در رشد آن ایجاد نشده است. شکل ۲ میانگین رشد سالانه تولید ناخالص داخلی و صنعت نیمه‌هادی امریکا را در دو بازه زمانی ۲۰۱۱-۱۹۸۷ و ۲۰۱۱-۲۰۰۷ نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود این صنعت در سه دهه گذشته رشد میانگینی در حدود ۵ درصد داشته است و در سال‌های اخیر نیز همین رشد را تجربه کرده است (Parpala, 2014).

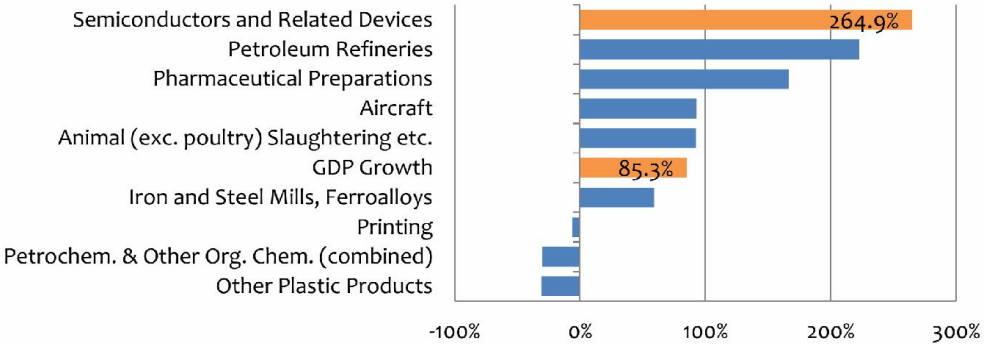


شکل۱: سهم صنعت نیمه‌هادی از کل تولید ناخالص داخلی (GDP) امریکا (Parpala, 2014)



شکل۲: میانگین رشد سالانه تولید ناخالص داخلی و صنعت نیمه‌هادی امریکا (Parpala, 2014)

صنعت نیمه‌هادی بیشترین رشد در ارزش افزوده به اقتصاد امریکا را در بازه زمانی ۲۰۱۱-۱۹۸۷ در بین صنایع تولیدی این کشور داشته است. رشد ارزش افزوده این صنعت در مقایسه با صنایع دیگر امریکا در شکل ۳ نمایش داده شده است. ناگفته نماند که در سال ۲۰۱۱ این صنعت با ۶۵ میلیارد دلار رتبه سوم ارزش افزوده را (پس از پالایش نفت و دارو) در میان صنایع تولیدی امریکا داشته است (Parpala, 2014).



شکل۳: رشد ارزش افزوده صنعت نیمه‌هادی در مقایسه با صنایع دیگر امریکا در بازه سال‌های ۲۰۱۱-۱۹۸۷ (Parpala, 2014)

اشتغال‌زایی پایدار و مولد از دیگر ویژگی‌های صنعت نیمه‌هادی است. هم‌اکنون حدود ۲۵۰۰۰۰ نفر در امریکا به‌طور مستقیم و ۴ برابر آن یعنی یک میلیون نفر به‌صورت غیرمستقیم در این صنعت مشغول به کار هستند که نشان‌دهنده بازار کار گسترده آن است (USIA, 2016).

در انتهای این بخش لازم است به این نکته اشاره کنیم که سرعت بالای رشد این صنعت به‌سبب سرمایه‌گذاری بسیار زیاد شرکت‌ها در بخش تحقیق و توسعه (R&D) است؛ به‌طوری‌که میزان سرمایه‌گذاری در این بخش به نسبت فروش این صنعت (حدود ۱۹درصد)، بالاترین نسبت در میان تمام صنایع بوده است. در سال ۲۰۱۵ فعالان این صنعت در امریکا، ۳۴ میلیارد دلار برای تحقیق و توسعه هزینه کرده‌اند (USIA, 2016). این موضوع حکایت از آن دارد که درحال‌حاضر رقابت در این صنعت بسیار دشوار و برای تازه‌واردها تقریباً غیرممکن است.

در ادامه این مقاله ابتدا به بررسی پیشینه صنعت نیمه‌هادی و نحوه رشد و پیشرفت آن می‌پردازیم. سپس دورنمای این صنعت را در آینده ترسیم می‌کنیم و نهایتاً وضعیت آن را در ایران تشریح خواهیم کرد.

۲. پیشینه نانوالکترونیک

امروزه سیر تاریخی و چگونگی تحول صنعت نیمه‌هادی و نانوالکترونیک با نام گوردون مور[1] گره خورده است. مور یک فیزیک ـ شیمی‌دان امریکایی بود که در آغاز شکل‌گیری صنعت نانوالکترونیک (۱۹۵۷) به همراه چند تن دیگر شرکت فِرچایلد[2] را پایه‌گذاری کرد. پس از آن در سال ۱۹۶۸ شرکت

1. Gordon E. Moore
2. Fairchild

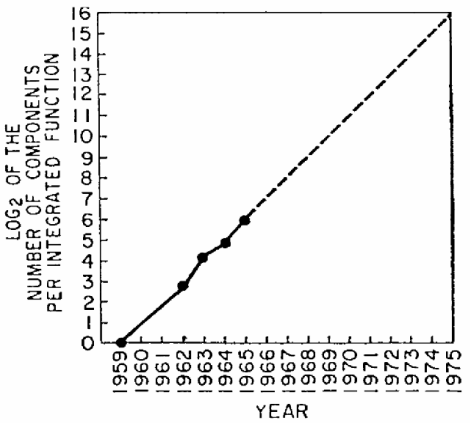
اینتل را بنا نهاد. فرچایلد یکی از شرکت‌های پیش‌گام در ساخت مدارهای مجتمع و نوآوری در این حوزه بود. ایده استفاده از آلومینیوم برای ساخت اینترکانکت[1] و برقراری اتصال الکتریکی بین اجزای مدار مجتمع را یکی از مهندسان این شرکت مطرح کرد. این شرکت نخستین مدار مجتمع با ۴ ترانزیستور را در سال ۱۹۶۱ ساخت. با پیشرفت تکنیک‌های مجتمع‌سازی، فرچایلد توانست در سال ۱۹۶۵ مدار مجتمعی با ۶۴ ترانزیستور بسازد. مور، که دستاوردهای فرچایلد را از نزدیک مشاهده می‌کرد، در سال ۱۹۶۵ با بررسی آنها مقاله‌ای در یک نشریه تجاری به نام *الکترونیک* منتشر کرد. او در این مقاله سیر تحول صنعت میکروالکترونیک را تا ده سال پس از آن پیش‌بینی کرد (Mack, 2015).

مور در مقاله خود تعداد اجزای مدارهای مجتمع ساخته‌شده توسط فرچایلد را طی ۶-۵ سال بر حسب سال ساخت آن روی یک شکل رسم کرد که در شکل ۴ نشان داده است. او با یک برون‌یابی ساده پیش‌بینی کرد که در سال ۱۹۷۵ مدارهای مجتمع باید از حدود ۶۵۰۰۰ المان تشکیل شده باشند. در واقع او با رسم این شکل متوجه شد که تعداد اجزای مدارهای مجتمع هر سال دو برابر خواهد شد (Parpala, 2014). پیش‌بینی او تا حد خوبی درست از آب درآمد. اینتل در همان سال (۱۹۷۵) یک حافظه بر اساس فناوری CCD ساخت که دارای ۳۲۰۰۰ جز بود (Mack, 2015).

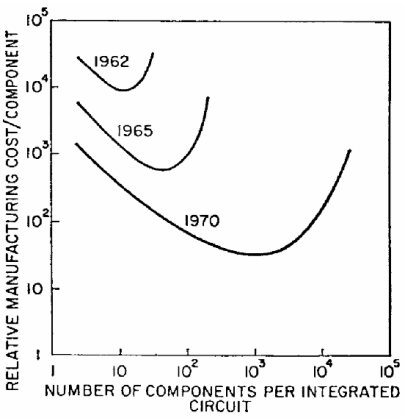
محتوای اصلی مقاله مور بحث پیرامون هزینه‌های ساخت مدارهای مجتمع بود. او در آن زمان متوجه شده بود که با افزایش تعداد اجزای ساخته‌شده روی یک تراشه، هزینه هر یک از اجزای به تنهایی کاهش می‌یابد. اما می‌دانست که اگر این تعداد از حدی بالاتر رود، عملاً تعداد تراشه‌هایی، که به سبب ناخالصی‌های موجود در سیلیکون و همینطور مشکلات موجود در فرایند ساخت قابل استفاده نخواهند بود، افزایش می‌یابد و این یعنی بالارفتن هزینه نهایی. بنابراین او در شکل دیگری که در شکل ۵ نشان داده شده است، هزینه تمام‌شده برای یک جز مدار را بر حسب تعداد اجزای به‌کاررفته در آن مدار مجتمع در سال‌های مختلف رسم کرد. او به نتیجه‌ای مشابه نتیجه قبل رسید و پیش‌بینی کرد هر سال قیمت تمام‌شده یک المان مدار نصف شود (Moore, 1998).

---

1. Interconnect



شکل۴: تعداد اجزای مدارهای مجتمع ساخته‌شده توسط فرچایلد برحسبِ سال ساخت (Moore, 1998)



شکل۵: هزینهٔ تمام‌شده برای یک جزء مدار مجتمع بر حسب تعداد اجزای به‌کاررفته در آن مدار در سال‌های مختلف (Moore, 1998)

طی ۵۰ سال گذشته قیمت یک المان مدار از ۳۰ دلار (با ارزش امروزی آن) به حدود یک نانو دلار کاهش یافته است. این افت شدید قیمت حتی برای مور هم در آن سال‌ها باورکردنی نبود (Mack, 2015).

ده سال پس از انتشار اولین مقاله، مور متوجه شد که پیش‌بینی او نیاز به اصلاح دارد. او در یک کنفرانس «مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک»[1] در سال ۱۹۷۵ بیان کرد که پیش‌بینی او برای نصف‌شدن سالانه قیمت یک المان مدار مبتنی بر سه راهکار کاهش ابعاد اجزای مدار، افزایش مساحت تراشه و فشرده‌تر قرارگرفتن اجزای مدار بوده است. او همچنین گفت که فشرده‌ترشدن اجزای مدار از نظر او عامل نصف این روند بوده است. اما از آنجا که در همان سال‌ها اینتل با ساخت نوعی حافظه عملاً نشان داده بود که امکان فشرده‌ترکردن اجزای مدار وجود ندارد، مور پیش‌بینی کرد روند نصف‌شدن قیمت هر دو سال یک‌بار اتفاق بیفتد (Mack, 2015).

پیش‌بینی مور تقریباً تا امروز درست بوده است. اما دلیل اصلی آن، روند کاهش ابعاد ترانزیستورها بوده است و نه افزایش مساحت تراشه. کاهش ابعاد ترانزیستورها همانطور که دنارد (۱۹۷۴) نشان داد علاوه بر بازکردن فضا برای افزایش تعداد اجزای مدار، موجب سریع‌ترشدن ترانزیستورها و کاهش توان مصرفی آنها نیز می‌شود.

1.The Institute of Electrical and Electronics and Engineers (IEEE)

به‌سبب دقت بالای پیش‌بینی مور طی چند دهه، این پیش‌بینی نام قانون به خود گرفت و امروزه با نام *قانون مور* شناخته می‌شود. البته این قانون به مرور زمان شکل‌های مختلفی به خود گرفته است. در آغاز آن، هدف اصلی افزایش تعداد المان‌های مدار بوده است اما در ۳-۲ دهه اخیر، هدف کاهش ابعاد و قیمت ترانزیستورها است. علت این تغییر رویکرد هم در آن بود که با کوچک‌شدن ابعاد المان‌ها، مدارهای بسیار نادری به آن تعداد زیاد ترانزیستور نیاز داشتند و لذا کاهش ابعاد ترانزیستور صرفاً موجب کاهش سطح تراشه و قیمت تمام‌شده مدار می‌شد (Mack, 2015).

روند رشد صنعت نانوالکترونیک در سال‌های اخیر با دو چالش جدی روبه‌رو شده است. اولین چالش نزدیک‌شدن قانون مور به پایان حیات خود است. با وجود آنکه هر فناوری ساخت نسبت به نسل پیش از خود اصولاً گران‌تر و پرهزینه‌تر است، اما در دهه‌های گذشته سه عامل این هزینه بیشتر را پوشش می‌دادند و امکان بقای قانون مور را فراهم می‌کردند. این عوامل عبارت بودند از (Mack, 2015):

- بالارفتن بازدهی ساخت از حدود ۲۰ درصد به حدود ۹۰ درصد
- بزرگ‌شدن اندازه ویفرهای سیلیکون
- افزایش بهره‌وری و عملکرد تجهیزات ساخت

در سالهای اخیر بهبود چندانی در عوامل بالا حاصل نشده است و مضاف بر آن، هزینه‌های ساخت خصوصاً فرایند لیتوگرافی به‌شدت بالا رفته است. این مسئله موجب شده است که امکان کاهش قیمت تمام‌شده بر اساس قانون مور با مخاطره روبه‌رو شود. درواقع، هنوز امکان کاهش ابعاد ترانزیستورها وجود دارد ولی دیگر این کاهش ابعاد به کاهش قیمت تمام‌شده منجر نخواهد شد. مثلاً، در سال ۲۰۰۲ طول گیت ترانزیستورها ۱۸۰ نانومتر بود و می‌شد با یک دلار ۲/۶ میلیون ترانزیستور، البته بر روی یک ریزتراشه، خرید. در سال ۲۰۱۴ طول گیت به ۲۰ نانومتر رسید و هر دلار ارزشی معادل ۲۰ میلیون ترانزیستور مجتمع روی یک ریزتراشه داشت. در سال ۲۰۱۵ با وجود آنکه طول گیت به ۱۴ نانومتر رسید اما بهای یک دلار به۱۹ میلیون ترانزیستور محدود می‌شد (NMAI, 2013).

قابل ذکر است که از نقطه‌نظر قیمت هر ترانزیستور و فشردگی، یاخته‌های حافظه دینامیک[1]، و حافظه‌های فلَش[2]، بسیار بیش‌تر از پردازنده‌های مجتمع است. به‌عنوان مثال، یک تراشه مدرن با گنجایش ۱ ترابایت، درحقیقت تقریباً از 8×10^{12} بیت تشکیل شده که هر بیت به‌طور میانگین بین ۲/۲ تا ۲/۵ ترانزیستور برای آدرس‌دهی و خوانش و نوشتن نیاز دارد. بنابراین دستِ‌کم نزدیک به 2×10^{13} ترانزیستور فعال روی یک تراشه قرار گرفته است. اگر بهای یک حافظه فلش 1TB را بر

1. Dynamic Random-Access Memory (DRAM)
2. Flash Memory

اساس قیمت جهانی آن حدود ۱۴ دلار در نظر بگیریم، بهای هر ترانزیستور تنها ۰/۷ یک پیکودلار یا 7×10^{-11} ¢ خواهد بود. این در حالی است که با درنظرگرفتن سطح تراشه‌ای معادل $2cm^2$، هر ترانزیستور مساحت میانگینی نزدیک به $10nm^2$ اشغال می‌کند. این میزان فشردگی حیرت‌آور ناشی از ورود فناوری یک‌پارچه‌سازی سه‌بعدی[1] به این عرصه است که امکان چیدمان تا ۲۴ لایه انباشته رویِ‌هم را فراهم آورده است.

دومین چالش پیشِ‌روی این صنعت، که چند سالی است بروز کرده، عدم کاهش توان مصرفی ترانزیستورها براساس محاسبات دنارد برای فناوری زیر ۱۰۰ نانومتر است. در فناوری‌های امروزی ضخامت گیت به‌قدری کوچک شده که موجب شده جریان‌های نشتی ترانزیستورها بسیار زیاد شود. این مسئله مانع از کاهش توان مصرفی و افزایش سرعت ترانزیستورها در نسل‌های اخیر شده است (Mack, 2015).

اُفت سرعت رشد صنعت نیمه‌هادی مسئله کاملاً بدی نیست. بلکه از چند جنبه می‌تواند مفید هم باشد. تا امروز رشد نمایی این صنعت عملاً مانع از آن می‌شد که مهندسان الکترونیک رقمی[2] بتوانند تلاش چندانی برای بهینه‌کردن مدار خود بکنند. درواقع، اگر آنها می‌خواستند روی مدار خود که بر اساس یک فناوری طراحی‌شده تمرکز کنند و آن را بهبود ببخشند، پیش از آنکه به نتیجه نهایی برسند فناوری ساخت جدیدی وارد بازار می‌شد. در نتیجه آنها باید کل مدار خود را کنار گذاشته و به سراغ طراحی مدار دیگری بر اساس فناوری روز بروند. اما اکنون با کندشدن این رشد و پایان‌یافتن قانون مور به شکلی که تا امروز وجود داشت، فرصت بیشتری برای مهندسان برای کار بر روی مدارها به‌منظور بهینه‌سازی آنها وجود دارد. از طرف دیگر رشد سریع فناوری ساخت، مانع از حضور شرکت‌ها و گروه‌های کوچک‌تر در بازار و رقابت با شرکت‌های بزرگ می‌شد که این مسئله نیز با کندشدن سرعت رشد لزوماً ادامه نخواهد یافت. با پایدارشدن فناوری فرهنگ تعمیر و تعویض قطعه مجدداً رایج خواهد شد و با معیوب‌شدن قطعه کوچکی از دستگاه، مجبور به جایگزین کردن آن با یک دستگاه جدید نخواهید بود (Huang, 2015).

هرچند قانون مور با سیر تکاملی صنعت نیمه‌هادی در چند دهه اخیر دیگر نمی‌تواند برقرار باشد، اما بسیاری معتقدند ظهور فناوری‌هایی، غیر از آنچه تاکنون وجود داشته است، می‌تواند همچنان این قانون را زنده نگه دارد. از جمله این فناوری‌ها می‌توان به الکترونیک دوبعدی، نانولوله‌های کربنی،

---

1. Three-dimensional (3D) Packaging
2. Digital Electronics

کلیدهای زیستی[1]، تونل‌زنی کوانتومی، اسپینترونیک[2] و ... اشاره کرد (Rhines, 2016). امروزه می‌دانیم اگر روند کاهش ابعاد ترانزیستورها بخواهد مانند گذشته ادامه یابد، در یکی ـ دو دهه آینده، ترانزیستورها هم‌اندازه اتم‌ها خواهند شد که این امر میسر نمی‌نماید. پیش‌بینی آن است که کاهش طول گیت در ۵ نانومتر متوقف شود. هم‌اکنون IBM مدعی دستیابی به فناوری 7 nm بر اساس لیتوگرافی EUV است (Hruska, 2015) و سرمایه‌گذاری عظیمی برای ورود محصولات 7nm به بازار تا سال ۲۰۱۷ یا ۲۰۱۸ میلادی به جریان انداخته است. گرچه این ادعا با تردیدهایی از سوی عده‌ای از کارشناسان مواجه شده است؛ اما نشان می‌دهد ما به پایان روند سابق در کاهش ابعاد بسیار نزدیک شده‌ایم.

۳. آینده نانوالکترونیک

در بخش پیشین گفتیم در آینده نه چندان دور باید شاهد بروز فناوری‌های جدید و کاملاً متفاوتی در صنعت نیمه‌هادی باشیم. در این بخش مروری گذرا بر تعدادی از این فناوری‌ها خواهیم داشت.

۳. ۱. الکترونیک دوبُعدی

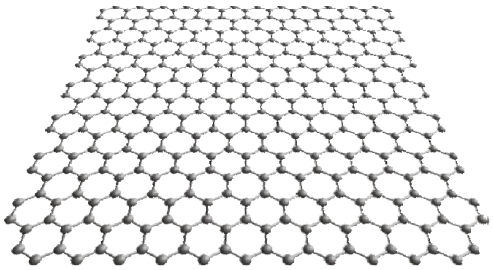
ادوات دوبُعدی به افزاره‌هایی می‌گویند که در آنها از موادی مانند گرافین، که ساختار دوبُعدی دارند، استفاده شده است. گرافین یک شبکه شانه‌عسلی از اتم‌های کربن است که ضخامت آن تنها به اندازه یک اتم کربن است (Geim & Novoselov, 2007). ساختار این ماده در شکل ۶ نشان داده شده است. در گذشته تصور نمی‌شد که این ماده بتواند به‌صورت پایدار در طبیعت یافت شود، اما در سال ۲۰۰۴، گیم[3] و نووسلوف[4] در دانشگاه منچستر انگلستان توانستند آن را در آزمایشگاه با روشی ابتدایی روی زیرلایه کوارتز تولید و لایه‌نشانی کنند. نوبل فیزیک ۲۰۱۰ هم به سبب این کار به آنها داده شد (Geim & Novoselov, 2010).

گرافین از ویژگی‌های منحصربه‌فردی برخوردار است. این مسئله موجب توجه خاص مهندسان الکترونیک به آن برای گشودن افق‌های تازه به روی صنعت نانوالکترونیک شده است. بعضی از این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: گاف انرژی تقریباً صفر (Son et al., 2006)، پاشندگی انرژی ـ تکانه خطی، هدایت بالای الکتریکی (تا هزار برابر سیلیکون) (Neto et al., 2009)، نازکی بسیار زیاد، هدایت گرمایی بسیار بالا (Ghosh et al., 2008; Balandin et al., 2008)، شفافیت و انعطاف بالا، استحکام زیاد (Lee et al., 2008; Frank et al., 2007)، نیمه‌عمر اسپین بالا (Han & Kawakami, 2011)، تقارن کامل میان

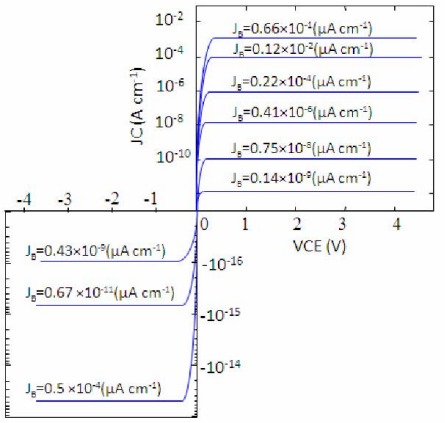
---

1. Bio-switches
2. Spintronics
3. Geim, A.
4. Novoselov, K.

الکترون‌ها و حفره‌ها و ... . تاکنون طرح‌های مختلفی برای استفاده از گرافین و مشتقات نیمه‌رسانای آن مانند گرافان (گرافین هیدروژن‌دارشده) و یا سایر مواد دوبُعدی دیگر مانند MoS_2 در ساخت ترانزیستورهای دوقطبی و اثر میدانی داده شده است (Schwierz, 2010; Gharekhanlou et al., 2014). در شکل ۷ مشخصه امیتر مشترک یک ترانزیستور دوقطبی برپایه گرافان که به‌صورت نظری محاسبه شده است، دیده می‌شود. این ترانزیستورها شباهت‌های زیادی با ترانزیستورهای دوقطبی سه بُعدی متداول دارند. قابل ذکر است که مجموعه مواد $MoSe_2$، WS_2، و WSe_2 نیز از خواص مطلوب و مشابهی برخوردارند ولی تنها $MoSe_2$ است که تاکنون قابلیت پیوند اهمی و آلایش شیمیایی[1] را یافته است.



شکل۶: آرایش تک‌لایه اتم‌های کربن در ساختار بلور شانه‌عسلی گرافین



شکل۷: مشخصه خروجی ترانزیستور دو قطبی بر پایه گرافین. تحلیل‌شده در حالت امیتر مشترک (قره‌خانلو، ۱۳۹۳)

به سبب ضخامت بسیار اندک گرافین، این امکان وجود دارد که طول گیت را در ترانزیستورهای اثر میدانی مبتنی بر آن بدون برخورد با مشکلات رایج در ترانزیستورهای سه‌بُعدی، بسیار کاهش داد. همچنین تحرک‌پذیری[2] بسیار بالای الکترون در گرافین، نوید داشتن فرکانس آستانه[3] بسیار بالا را در

---

1. Chemical Doping
2. Mobility
3. Threshold frequency

این ترانزیستورها می‌دهد. مزیت عمده ادوات ترانزیستور دوقطبی دوبعدی در معیار برازش توان-تأخیر[1] بسیار کوچک و مطلوب آنها است که طبق محاسبات (قره‌خانلو، ۱۳۹۳) به زیر 10fJ می‌رسد.

غیر از گرافین مواد دیگری نیز با ساختار دوبُعدی کشف شده‌اند که از آن جمله می‌توان به سیلیسن[2]، ژرمنن[3] و فسفورن[4] اشاره کرد. ایده‌هایی نیز برای ساخت ترانزیستور اثرمیدانی با استفاده از آنها داده شده است (Le Lay, 2015). ولی ترانزیستورهای اثرمیدانی رایج دوبّعدی که تاکنون ساخته شده‌اند خیلی کند هستند و زمان کلیدزنی آنها از مرتبه چنددهم میلی‌ثانیه است که کاربرد آنها را به فرکانس‌های چند کیلوهرتز محدود می‌کند. غیر از ترانزیستورهای دوقطبی و اثر میدانی متداول، ایده‌های دیگری نیز برای استفاده از گرافین یا سایر مواد دوبُعدی در ساخت ترانزیستور وجود دارد. یکی از این ایده‌ها، ترانزیستور اثرمیدانی تونلی است که در دانشگاه سان‌دیه‌گو واقع در ایالت کالیفرنیا ساخته شده است. سرعت مطلوب تا چند گیگاهرتز، توان مصرفی کم و تغییرات بیشتر جریان درین[5] با ولتاژ گیت در ناحیه زیرآستانه[6] از مزیت‌های این ترانزیستور است. همچنین ادوات دیگری مانند ترانزیستور دوقطبی بالیستیک، و نیز ادوات نوری (مثل LED و سلول خورشیدی) هم بر پایه گرافین یا سایر مواد دوبُعدی موجود طراحی و ساخته شده است (Khorasani, 2014; Peleg, 2015).

۳. ۲. اسپینترونیک

اکثر ادواتی، که امروزه در صنعت الکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند، از بار الکترون برای برقراری ارتباط و ذخیره‌سازی اطلاعات استفاده می‌کنند. در فناوری اسپینترونیک، اسپین یا همان تکانه زاویه‌ای ذاتی الکترون برای این منظور استفاده می‌شود (Wolf et al., 2001; Bader & Parkin, 2010).

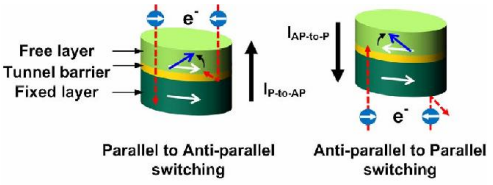
دو کشف مهم اساس این فناوری را شکل دادند. نخست در سال ۱۹۷۵ پدیده تونل‌زنی مقاومت مغناطیسی[7] پیش‌بینی شد. بر اساس این پدیده می‌توان میزان تونل‌زنی الکترون از یک لایه عایق را با قراردادن دو لایه فرومغناطیس در دو طرف آن و دست‌کاری جهت‌گیری نسبی مغناطش این دو لایه کنترل کرد. به این ساختار اتصال تونل مغناطیسی[8] گفته می‌شود. اما این پدیده به‌تنهایی قابلیت

---

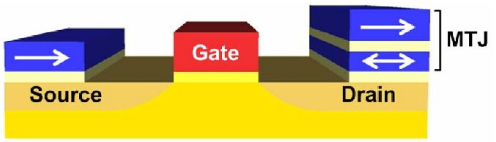
1. Power-Delay Product (PDP) Figure of Merit (FOM)
2. Silicene
3. Germanene
4. Phosphorene
5. Drain
6. Sub-threshold
7. Tunnel magnetoresistance (TMR)
8. Magnetic Tunnel Junction (MTJ)

به‌کارگیری در صنعت را نداشت؛ چراکه برای تغییر مغناطش لایه فرومغناطیس باید از یک میدان مغناطیسی خارجی استفاده می‌شد که این کار خود مشکلات زیادی را پیش‌رو داشت. پیش‌بینی اسلونچوسکی[1] در IBM در سال ۱۹۹۶ مبنی بر آنکه امکان تغییر مغناطش با استفاده از جریان اسپینی وجود دارد، عملاً امکان استفاده از پدیده تونل‌زنی مقاومت مغناطیسی را فراهم آورد. به این روش برای تغییر مغناطش انتقال گشتاور اسپین[2] گفته می‌شود(Kim et al., 2015).

با استفاده از این فناوری می‌توان یک مقاومت متغیر ساخت. مقاومت متغیر می‌تواند هم برای ذخیره‌سازی اطلاعات و هم برای کلیدزنی استفاده شود. در شکل ۸ سازوکار عملکرد این فناوری برای تغییر مقاومت نشان داده شده است. همانطور که در طرح‌واره سمت راست این شکل دیده می‌شود، وقتی جریان از سمت لایه پایین که مغناطش آن ثابت و بدون تغییر است وارد اتصال می‌شود، آن دسته از الکترون‌ها، که اسپین در راستای مغناطش این لایه دارند، امکان تونل‌زنی یافته و وارد لایه فرومغناطیس بالایی می‌شوند. در نتیجه مغناطش لایه بالایی هم‌راستا با لایه پایین خواهد شد و این امر سبب کاهش مقاومت در این اتصال می‌شود. اما اگر جریان از لایه بالایی که امکان تغییر در مغناطش دارد، وارد اتصال شود، الکترون‌هایی که اسپین مخالف با راستای مغناطش لایه پایین دارند بازتاب می‌یابند و امکان تونل‌زنی نخواهند داشت. در نتیجه مغناطش لایه بالایی خلاف جهت لایه پایین شده و مقاومت اتصال افزایش می‌یابد (Kim et al., 2015).



شکل ۸: سازوکار عملکرد فناوری TMR برای تغییر مقاومت در یک MTJ(Kim et al., 2015)



شکل۹: یک حافظه تک‌بیتی ساخته‌شده با MTJ(Kim et al., 2015)

ایده‌های مختلفی برای ساخت حافظه و سوئیچ بر اساس این فناوری داده شده است (Parkin et al., 2003; Wolf et al., 2010; Wang et al., 2013). مزیت اصلی حافظه‌های ساخته شده با این فناوری، سرعت بالا (مشابه SRAM)، تراکم زیاد بیت‌ها (مشابه DRAM) و غیر فرّار بودن[3] (مانند

---

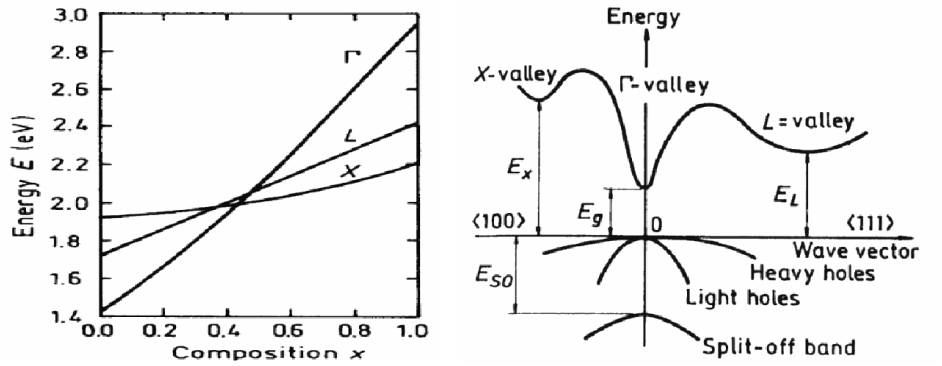
1. Slonczewski
2. Spin Transfer Torque (STT)
3. Non Volatile

FLASH) است. همچنین ساخت این حافظه‌ها کاملاً منطبق با فناوری شناخته‌شده CMOS است. ایده ساخت یکی از این حافظه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. این حافظه یک ترانزیستور MOS است که یک MTJ بر روی درین آن قرار داده شده است. می‌توان ضمن ذخیره یک بیت اطلاعات در MTJ، مقدار آن را از اتصال منبع ترانزیستور خواند (Kim et al., 2015).

۳. ۳. ترکیبات III-V

غیر از بعضی عناصر گروه ۴ جدول تناوبی یعنی Si و Ge که نیمه‌هادی هستند، ترکیباتی از عناصر گروه ۳ با ۵، گروه ۲ با ۶ و همینطور آلیاژهای گروه ۴ با ۴ نیز خصوصیت نیمه‌هادی دارند. حتی بعضی ترکیبات از سه عنصر این گروه‌ها مانند AlGaAs و InGaN نیز دارای خصوصیت نیمه‌هادی هستند (McAlpine et al., 2004; Tiwari, 2013). در آغاز شناخت این ترکیبات و تحقیقات بر روی آنها تصور می‌شد که آنها به‌زودی جایگزین سیلیکون خواهند شد، چراکه امکان مهندسی و به‌دست‌آوردن بعضی خصوصیات، که در سیلیکون وجود نداشت، برای آنها میسر بود. اما به‌سبب نبود عایق مناسب برای به‌کارگیری در گیت ترانزیستورها و نیز گرانی عناصر و فرایند لایه‌نشانی نیمه‌هادی‌های مرکب III-V، سیلیکون و نهایتاً آلیاژ سیلیکون ـ ژرمانیوم همچنان به‌عنوان نیمه‌هادی اصلی مورد استفاده باقی مانده است. لازم به ذکر است اکسید سیلیکون، که به‌سهولت قابل لایه‌نشانی با خلوص بالا است، عایق بسیار مناسبی برای این منظور است. امروزه در مدارهای مجتمع با طول کانال زیر 50nm از اکسیدهای جایگزین با ضریب دی‌الکتریک بالاتر مانند اکسید زیرکونیوم ZrO_2 و اکسید هافنیوم HfO_2 بهره می‌گیرند (Desai et al., 2016; Bohr et al., 2007).

در آلیاژهای سه‌تایی از زوج مواد مرکب عناصر می‌توان با تغییر نسبت دو عنصر موجود خصوصیات متفاوتی برای نیمه‌هادی به‌دست آورد. به‌عنوان مثال، در $Al_xGa_{1-x}As$ و $In_xGa_{1-x}N$ تغییر x به تغییر گاف انرژی و بسیاری از خصوصیات این مواد مرکب نیمه‌هادی منجر می‌شود (Lee et al., 1990; Saxena, 1980; Saxena, 1981). شکل ۱۰ ساختار نوار انرژی $Al_xGa_{1-x}As$ را در حالت $x<0.45$ به‌همراه تغییرات فاصله لبه نوار ظرفیت با لبه نوار هدایت با تغییر x در سه راستای انتشار موج نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل۱۰(الف) ساختار نواری $Al_xGa_{1-x}As$ در حالت $x<0.45$. (ب) تغییرات فاصله لبه نوار ظرفیت با لبه نوار هدایت $Al_xGa_{1-x}As$ با تغییر x در سه راستای تغییر بردار موج (NSM Archive)

با وجود مزیت ارزانی فرایند تولید ادوات مبتنی بر نیمه‌هادی سیلیکون، اما این نیمه‌هادی در بسیاری موارد قابل استفاده نیست. در ادامه به چند نمونه از آنها اشاره می‌کنیم.

- در سوئیچ‌های مورد استفاده در مبدل‌های توان، ولتاژ بالا برای رسیدن به بازدهی بالا ضروری است. این مسئله هم در تجهیزات سیار که ناچار به استفاده از باتری هستند و هم در خطوط انتقال انرژی که از این مبدل‌ها استفاده می‌کنند بسیار مهم است. سیلیکون برای این منظور گزینه مناسبی نیست. در عوض GaN MOSFET می‌تواند ولتاژهای بالا را تحمل کند و در نتیجه بازدهی بالاتری داشته باشد (Matocha et al., 2005; Dnnard et al., 1974).
- در مدارهای RF و مایکروویو نیاز به سوئیچ‌های بسیار پرسرعت است. معمولاً ترانزیستورهای با تحرک‌پذیری الکترون بالا[1] و ترانزیستورهای دوقطبی نامتجانس[2] رکورددار سرعت‌های بسیار بالا، به ترتیب تا حدود 600GHz و 750GHz هستند. این ترانزیستورها با نیمه‌هادی‌های ترکیبی خصوصاً ترکیبات III-V ساخته می‌شوند (Ali, 1991).

شاید ادوات اپتیکی و الکترونیک‌نوری بیشترین بهره را از این ترکیبات نیمه‌هادی ببرند. علت اصلی هم امکان مهندسی گاف انرژی در این ترکیبات بر خلاف سیلیکون است. در

---

1. High-Electron-Mobility Transistors (HEMT)
2. Heterojunction Bipolar Transistors (HBT)

لیـزرهـا، آشکارسازهای نوری، و دیود نورافشان این وابستگی به نیمه‌هادی‌های مرکـب محرز است (Kobayashi & Suematsu, 1982).

در ادواتی مانند دیود نورافشان[1] طیف نور خروجی اهمیت اصلی را در طراحی دارد. عامل اصلی در تعیین این طیف، گاف انرژی در نیمه‌هادی مورد استفاده است. برای تغییر گاف انرژی چاره‌ای جز استفاده از ترکیبات نیمه‌هادی به‌جای عناصر نیمه‌هادی وجود ندارد. چند دهه پیش LEDهایی با طیف نور قرمز و سبز ساخته شده بود ولی امکان ساخت LED آبی با درخشش بالا[2] همچنان به‌صورت یک معمای حل‌نشدنی باقی مانده بود. پس از ابتکار ناکامورا[3] در ساخت LED با طیف نور آبی به وسیله GaN امکان تولید نور سفید با LED فراهم شد. ناکامورا به خاطر این کار برنده بخشی از نوبل فیزیک در سال ۲۰۱۴ شد (Akasaki et al., 2014). امروزه لامپ‌های LED پربازده‌ترین لامپ‌ها هستند که روزبه‌روز مصارف گسترده‌تری می‌یابند. یکی از آنها استفاده در نمایشگرهاست که موجب تحول بزرگی در این صنعت شده است. بازار جهانی LED در صنایع روشنایی آن‌قدر رشد شتابان داشته است که تمام فناوری‌های ایجاد روشنایی دیگر را از رده خارج کرده است.

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای استفاده از فوتون‌ها به‌جای الکترون‌ها و ساخت مدارهای مجتمع نوری صورت گرفته است (Hunsperger & Meyer-Arendt, 1992) . لیزرهای نیمه‌هادی و آشکارسازهای نوری از اجزای کلیدی این مدارها هستند. بستر اصلی مطرح برای ساخت این مدارها، بلور فوتونی است. هرچند این تلاش‌ها در میانه راه است و مدارهای کاملاً فوتونی هنوز تولید نشده‌اند، اما این فناوری نیز می‌تواند در آینده یکی از گزینه‌ها برای رفع موانع رشد چشمگیر صنعت نانوالکترونیک باشد. هم‌اکنون امکان اتصال بین هسته‌های پردازشگرهای سیلیکونی و حافظه جانبی توسط کانال‌های ارتباطی نوری مجتمع از جنس نیمه‌هادی‌های مرکب، با نرخ انتقال داده بسیار بالا توسط کنسرسیومی از چند دانشگاه در امریکا به نمایش گذاشته شده است. این دستاورد بسیار برجسته در حالی ظهور کرد که امیدها در سایر فناوری‌های ارتباط و اتصال میان پردازشگرها رو به افول بود. در نتیجه، یک سرمایه‌گذاری دولتی۲۵۰ میلیون دلار را برای گسترش فناوری الکترونیک‌نوری مجتمع جذب کرده است.

---

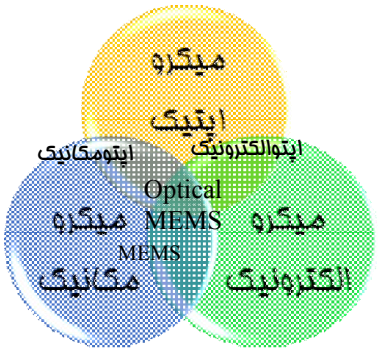
1. Light Emitting Diode (LED)
2. High Brightness LED
3. Shuji Nakamura

۳. ۴. سیستم‌های میکرو ـ نانو الکترومکانیک نوری

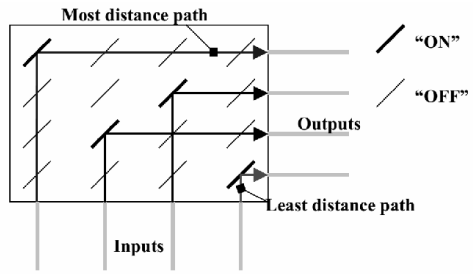
به‌سبب ظرفیت بالای فیبرهای نوری در انتقال اطلاعات، امروزه اکثر شبکه‌های مخابراتی به سمت استفاده از کابل‌های فیبر نوری رفته‌اند. این بدان معناست که اکنون علاوه بر ادوات الکترونیک به ادواتی مانند کلید و ... برای کنترل فوتون‌ها نیازمندیم. روش سنتی برای این کار تبدیل علایم نوری به الکترونی و استفاده از ادوات ازپیش‌ساخته‌شده الکترونیکی بود. اما این روش مشکلات زیادی دارد. بزرگ‌ترین مشکل محدودیت سرعت کلیدهای الکترونیکی و تلفات بالا در تبدیل اطلاعات نوری به الکترونیکی و بالعکس است. به نظر می‌رسد محدودیت اصلی مخابرات نوری در آینده نه‌چندان دور ادوات کلیدزنی[1] باشد؛ نه فیبرهای نوری. برای رفع این مشکل تلاش‌های زیادی برای ایجاد شبکه‌های مخابراتی کاملاً نوری صورت گرفته است. در این شبکه‌ها تمامی ادوات از جمله کلیدها باید به‌صورت کاملاً نوری عمل کنند و نیازی به تبدیل علایم نوری به علایم الکترونی نباشد. تاکنون ایده‌های مختلفی برای ساخت کلیدهای کاملاً نوری داده شده است. یکی از این ایده‌ها استفاده از فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی[2] است (Yeow et al., 2001). در شکل ۱۱ جایگاه این فناوری در بین چند فناوری میکرو و نانو امروزی نشان داده شده است. این فناوری در سایر عرصه‌های دیگر مانند ریزماشین‌کاری[3]، ریزسیالات[4]، سنجش و فناوری زیستی نیز از پیش کاربرد داشته است (Jha, 2008; Lyshevski, 2002; Gad-el-Hak, 2005)؛ ولی رشد آن در این زمینه‌ها در طی سال‌های اخیر محدود مانده است و هنوز سهم قابل‌اعتنایی در مقایسه با الکترونیک مجتمع ندارند. تنها استثنا در این مورد فیلتر UHF رایج در تمام گوشی‌های همراه دنیا است که منحصراً براساس این فناوری ریزالکترومکانیک بسط یافته است (Nguyen, 2007; Nguyen, 2013).

---

1. Switching
2. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)
3. Micro-Machining
4. Micro-Fluidics

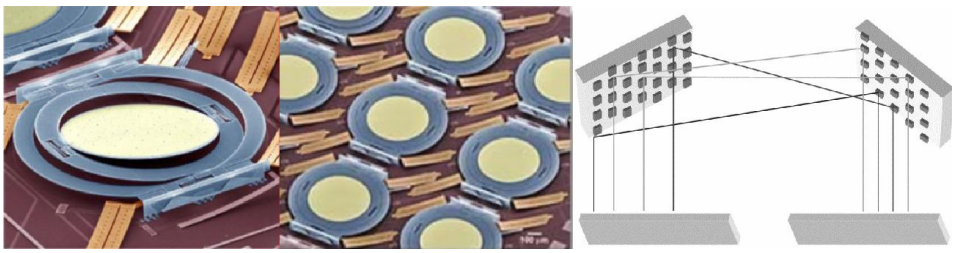


شکل۱۱: جایگاه فناوری سیستم‌های میکرو ـ نانو الکترومکانیک نوری در بین چند فناوری میکرو و نانو امروزی



شکل۱۲: طرح‌واره‌ای از کلید اپتیکی دوبُعدی با ۴ پورت ورودی و ۴ پورت خروجی (Yeow et al., 2001)

تاکنون دو نوع کلید اپتیکی مبتنی بر فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی پیشنهاد شده است. کلیدهای دوبُعدی و سه‌بُعدی. کلیدهای دوبُعدی، آرایه‌ای از آینه‌های تخت هستند که هر آینه می‌تواند در وضعیت روشن (منعکس‌کننده نور) یا خاموش (عبوردهنده نور) باشد. برای یک کلید با N دهانه ورودی و N دهانه خروجی تعداد N^2 آینه نیاز است. شکل ۱۲ طرح‌واره‌ای از این نوع کلید را نشان می‌دهد. در کلیدهای سه‌بُعدی، که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، حداکثر به 2N آینه برای همان عملکرد نیاز است. آینه‌های این نوع کلیدها می‌توانند در دو راستا بچرخند که قابلیت بالایی برای هدایت نور در راستاهای مختلف به آنها می‌دهد (Yeow et al., 2001).



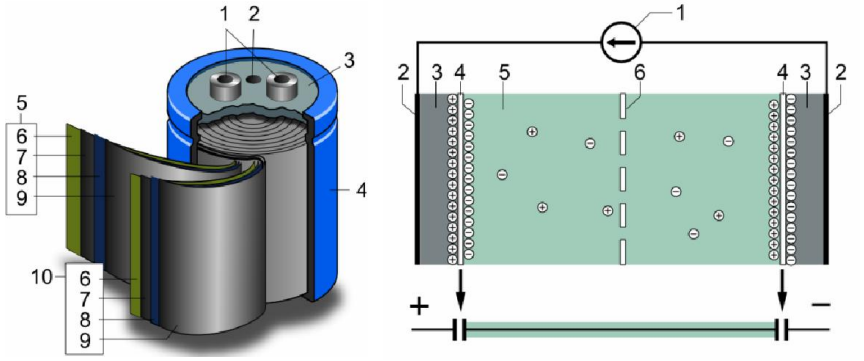
شکل۱۳: یک نمونه سوئیچ اپتیکی سه‌بُعدی به همراه طرح‌واره‌ای از آن (Yeow *et al.*, 2001)

۳. ۵. اَبَرخازن

یکی از فناوری‌هایی، که در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته و می‌تواند در آینده نزدیک منشأ تحول در صنایع مختلف از جمله الکترونیک شود، فناوری ساخت اَبَرخازن‌ها است. می‌توان گفت اَبَرخازن نوعی واسط بین خازن‌های الکترولیت و باتری‌های قابل‌شارژ است. این خازن‌ها می‌توانند تا

۱۰۰ برابر بار بیشتری نسبت به انواع الکترولیت در حجم مساوی ذخیره کنند و با سرعت بسیار بیشتری نسبت به باتری شارژ و تخلیه شوند. البته هنوز این خازن‌ها تا ۱۰ برابر بار کمتری نسبت به بعضی انواع باتری در حجم مساوی ذخیره می‌کنند (Johnson, 2015). باتوجه‌به این ویژگی‌ها، اَبَرخازن‌ها در مواردی، که نیاز به دفعات مکرر شارژ و تخلیه باشد، سرعت شارژ بالا موردنیاز باشد و یا نیاز به تخلیه ناگهانی بار باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Lu, 2013). تاکنون مصرف عمده آنها در صنایع الکترونیک به‌عنوان پشتیبان برای حافظه‌های SRAM بوده است.

طرح‌واره‌ای از یک اَبَرخازن در شکل ۱۴ الف نشان داده شده است. ایده اصلی برای رسیدن به ظرفیت بالای خازنی کاهش فاصله بارهای مثبت و منفی در خازن است. طراحی این خازن‌ها به گونه‌ای است که ضخامت لایه دی‌الکتریک در آنها از یک یا چند ملکول تجاوز نمی‌کند. در شکل ۱۴ الف لایه شماره ۴ دی‌الکتریک حایل بین بارهای مثبت و منفی است که ضخامت بسیار ناچیزی دارد. ماده شماره ۵ هم الکترولیتی است که حاوی یون‌های مثبت و منفی است. با قراردادن پتانسیل بین الکترودهای خازن، یون‌های منفی به سمت الکترود مثبت و یون‌های مثبت به سمت الکترود منفی حرکت می‌کنند. نهایتاً دو خازن، که به‌صورت سری به هم وصل شده‌اند، به دست می‌آید. شکل ۱۴ ب ساختار داخلی یک اَبَرخازن از نوع پیچیدنی را نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل۱۴: (الف) طرح داخلی یک اَبَرخازن. (ب) ساختار داخلی یک اَبَرخازن پیچیده‌شده (Supercapacitor)

۳. ۶. شبکه‌های مِمریستوری

با نزدیک‌شدن صنایع نانوالکترونیک به پایان دوران طلایی خود، بسیاری از شرکت‌ها و مؤسسات پیشتاز در فناوری‌های الکترونیک به این نتیجه رسیده‌اند که برای بقای قانون مور در سال‌های آتی،

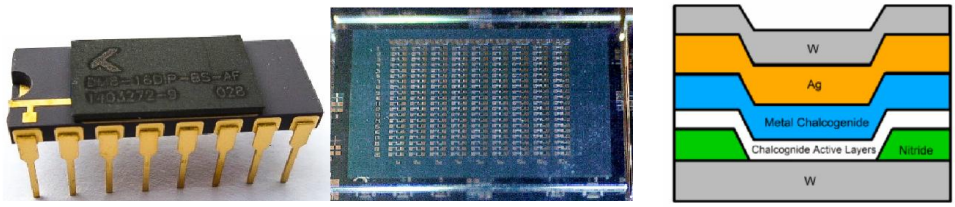
ناچار به تقلید از عملکرد مغز برای طراحی و ساخت مدارهای آینده خواهند بود. دانش شبکه‌های عصبی، که از سال‌ها پیش شکل گرفته است، بیشتر به دنبال شناخت نحوه عملکرد مغز و نحوه تعامل با آن است. تاکنون این دانش دستاورد قابل‌ملاحظه‌ای در ساخت مداری، که مشابه مغز عمل کند، نداشته است. اما در سال‌های اخیر با تولید عنصری به نام ممریستور[1] امیدها برای ساخت یک چنین مداری افزایش یافته است (Mazumder et al., 2012; Thomas, 2013).

واژه ممریستور از ترکیب دو کلمه ممووری[2] و رزیستور[3] ساخته شده است. این عنصر، مقاومتی است که اندازه مقاومت آن به میزان جریان عبوری از آن در گذشته وابسته است. به عبارت دیگر این المان یک مقاومت دارای حافظه است. ممریستور را می‌توان به‌عنوان چهارمین المان پایه در کنار مقاومت، سلف و خازن قرار داد که بار الکتریکی (انتگرال جریان نسبت به زمان) را به شار مغناطیسی (انتگرال ولتاژ نسبت به زمان) مرتبط می‌کند (Johnsen, 2012). گرچه در ممریستورهای امروزی شار مغناطیسی وجود ندارد، رفتار افزاره به گونه‌ای است که در آن انتگرال جریان با انتگرال ولتاژ متناسب است.

امروزه رفتار مغز به شکلی بسیار محدود توسط اَبَررایانه‌ها شبیه‌سازی می‌شود اما هنوز مداری، که کاملاً مشابه مغز عمل کند، ساخته نشده است. ابررایانه‌ها برای شبیه‌سازی رفتار مغز هزاران وات توان مصرف می‌کنند و فضای زیادی نیز اشغال می‌کنند. پیش‌بینی می‌شود شبکه‌های ممریستوری، که مشابه مغز عمل کنند (و نه‌تنها عملکرد مغز را شبیه‌سازی کنند)، تنها توانی در حد ۲۰ وات نیاز داشته باشند. اگرچه HP اولین سازنده یک المان مجتمع با ویژگی ممریستور بود، در حال حاضر شرکت نوم[4] بیشترین فعالیت در زمینه ساخت و توسعه این المان را انجام می‌دهد و اخیراً بسته حاوی ۸ ممریستور و یک تراشه بسته‌بندی‌نشده حاوی ۱۸۰ ممریستور روانه بازار کرده است (NMAI). در شکل ۱۷ ساختار ممریستور ساخته‌شده توسط این شرکت به همراه دو محصول تجاری آن نشان داده شده است.

---

1. Memristor
2. Memory
3. Resistor
4. Knowm



(ب) (الف)

شکل ۱۷: (الف) ساختار ممریستور شرکت Knowm (ب) دو محصول شرکت Knowm: سمت راست بسته حاوی ۸ ممریستور. سمت چپ تراشه رو باز حاوی ۱۸۰ ممریستور(NMAI, 2013)

غیر از تحقیقات بر روی شبکه‌های عصبی بر پایه ممریستور، فناوری‌های دیگری نیز برای تقلید از عملکرد مغز پیشنهاد شده است. از آن جمله می‌توان به فناوری پردازش تقریبی اشاره کرد. در این فناوری نتیجه محاسبات ریاضی کاملاً دقیق نیستند، بلکه نزدیک به نتیجه دقیق هستند و به‌تدریج با آموزش یافتن و پردازش داده‌های بیشتر به مقادیر دقیق نزدیک می‌شوند. مثلاً در ۱+۱ که در این روش ممکن است حاصل ۱/۹۸ یا ۲/۰۱ شود. نتایج تحقیقات اولیه نشان می‌دهد پردازنده‌های مبتنی بر این فناوری می‌توانند در بعضی کاربردها ضمن پردازش بسیار سریع‌تر، توان بسیار کمتری مصرف کند (Simonite, 2016).

۳. ۷. نانولوله‌های کربنی

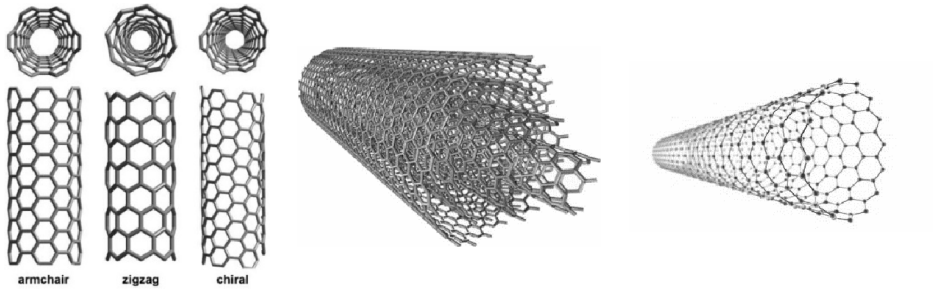
نانولوله‌هـای کربنی لوله‌هایی هستنـد که دیواره آن گرافین است. این لوله‌ها همانطور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، می‌توانند تک‌دیواره یا چنددیواره باشند. از طرفی بسته به نحوه پیچیدن و آرایش اتم‌های کربن در لبه لوله، در سه صورت دسته‌صندلی[1]، زیگزاگ یا کایرال[2] یافت می‌شوند. این سه شکل نانولوله کربنی خصوصیات بسیار متفاوتی دارند. مثلاً ساختار دسته‌صندلی رفتار هادی فلزی دارد درحالی‌که ساختار کایرال رفتار یک نیمه‌هادی با گاف انرژی کوچک را دارد (Reich et al., 2008; Avouris et al., 2000).

نانولوله‌های کربنی ویژگی‌های الکتریکی و مکانیکی منحصربه‌فردی دارند. به‌عنوان مثال، یک نانولوله فلزی قادر به حمل جریان الکتریکی با چگالی $۴\times۱۰^{۹} A/cm^2$ است که هزار برابر بیشتر از مس است (Ounaies et al., 2003; Wei et al., 2001). این ویژگی‌ها سبب شده تا از این ماده در ساخت ادوات الکترونیکی مانند ترانزیستورها استفاده شود. نانولوله‌های کربنی به‌عنوان جایگزینی برای

---

1. Armchair
2. Chiral

سیلیکون در کانال ترانزیستور MOSFET مطرح شده‌اند. نانولوله‌ها می‌توانند بعضی مشکلات کاهش طول کانال در ترانزیستور مانند تونل‌زنی الکترون از داخل کانال یا از گیت به داخل کانال را تا حدودی مرتفع کنند (Martel et al., 1998; Javey et al., 2003; Guoet et al., 2006).



(ج) (ب) (الف)

شکل۱۸: (الف) نانولوله کربنی تک‌دیواره (ب) نانولوله کربنی چنددیواره (ج) سه ساختار مختلف نانولوله کربنی (CLab)

قوس الکتریکی (Ebbesen, 1992)، فرسایش لیزر[1] (Guoet et al., 1995)، لایه‌نشانی بخار شیمیایی[2] (Kim et al., 2007; Inami et al., 2007) و ... از جمله روش‌های تولید نانولوله کربنی هستند. نانولوله‌ها غیر از ترانزیستور در ساخت سنجه‌ها (Kong et al., 2000; Modi et al., 2003)، فعال‌کننده‌ها[3] (Baughman et al., 1999)، خازن (Futaba et al., 2006; Frackowiak et al., 2000) و همچنین در بسیاری از صنایع دیگر استفاده می‌شوند.

مشکل اصلی در به‌کارگیری نانولوله‌ها عمدتاً در آن است که باید به‌صورت خوابیده روی سطح استفاده شوند تا بتوان به آنها پیوند زد و اتصال فلزی برای حصول رفتار ترانزیستوری برقرار کرد. این در حالی است که نانولوله‌ها عمودی رشد می‌کنند. مضاف بر این، باید امکان کنترل دقیق روی ویژگی‌های هر نانولوله و نیز مکان رشد و طول آن وجود داشته باشد که علی‌رغم تلاش‌های فراوان در طی دو دهه تاکنون محقق نشده است. ولی چنانچه فرض شود نانولوله‌های نیمه‌هادی و فلزی به‌دقت دلخواه قابل رشد و جهت‌دهی روی سطح هستند، امکان فشرده‌سازی و افزایش سرعت هرچه بیشتر الکترونیک مجتمع را فراهم خواهند کرد.

---

1. Laser ablation
2. Chemical Vapor Deposition (CVD)
3. Actuators

۳. ۸. پردازش کوانتومی

پردازش کوانتومی به نوعی از پردازش گفته می‌شود که در آن از مکانیک کوانتومی برای ذخیره‌سازی و پردازش اطلاعات استفاده می‌شود. اینکه آیا فیزیک کوانتومی می‌تواند مزیتی بر فیزیک کلاسیک در زمینه پردازش و محاسبات داشته باشد، تا چند دهه پیش محل تردید و پرسش بود. اما امروزه می‌دانیم مفاهیمی همچون برهم‌نهی، درهم‌تنیدگی و ...که صرفاً در دنیای کوانتوم وجود دارند، توانایی رایانه‌های کوانتومی را در انجام بعضی محاسبات بسیار بیشتر از قوی‌ترین ابررایانه‌های کلاسیک می‌کند. درواقع، این مفاهیم نوعی قابلیت پردازش موازی در رایانه‌های کوانتومی ایجاد می‌کنند که ویژگی ذاتی آنها است و علت اصلی توانایی منحصربه‌فرد این رایانه‌ها هم در این مسئله نهفته است.

یکی از نخستین کسانی که پیشنهاد استفاده از خواص دنیای کوانتوم را در محاسبات مطرح کرد، فاینمن(۱۹۸۲) بود. او در مقاله خود، که در سال ۱۹۸۲ منتشر شد، به بررسی امکان استفاده از رایانه‌های کاملاً کوانتومی برای شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی پرداخته است. پس از او دانشمندان بسیاری الگوریتم‌های مختلفی برای استفاده از رایانه‌های کوانتومی ارائه کرده‌اند که معادل کلاسیک آنها بسیار زمان‌بر است. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم شور[1](Shor, 1994)، برای تجزیه یک عدد به عوامل اول اشاره کرد که در رمزگشایی و نظریه اطلاعات کاربرد فراوان دارد.

اطلاعات کوانتومی در بیت‌های کوانتومی یا به اختصار کیوبیت‌ها[2] ذخیره می‌شوند. حالت یک کیوبیت بر خلاف بیت کلاسیک می‌تواند ترکیبی از دو حالت خالص $|1\rangle$ و $|2\rangle$ باشد. کلی‌ترین حالت یک کیوبیت به صورت $\alpha|1\rangle + \beta\ |2\rangle$ است که در آن شرط بهنجارش، $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$، برقرار است. بنابراین حالت یک کیوبیت در یک فضای برداری مختلط دو بعدی قابل نمایش است. اما اگر n کیوبیت داشته باشیم، حالت آنها در یک فضای 2^n بعدی قابل نمایش خواهد بود.

لازم به ذکر است که حالت یک کیوبیت پس از اندازه‌گیری به یکی از دو حالت خالص تبدیل می‌شود. بنابراین برای شبیه‌سازی یک الگوریتم کوانتومی با رایانه کوانتومی با ۱۰۰۰ کیوبیت، بزرگ‌ترین ابررایانه‌های کلاسیک موجود و قابل‌تجسم تا ده‌ها سال بعد هم کاملاً ناتوان خواهند بود (Monroe, 2002; Jelezko et al., 2010; Bennett & DiVincenzo, 2000; DiVincenzo, 1995; Steane, 1998).

اطلاعات یک کیوبیت می‌تواند در قطبش فوتون، اسپین الکترون، اتم با دو حالت پایه و برانگیخته و ... ذخیره شود. برای ساخت پردازنده کوانتومی روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از آنها استفاده از گیت‌های

---

1. Shor
2. Qubits

کوانتومی است. از جمله گیت‌های کوانتومی گیت هادامارد[۱]، گیت‌های X،Y و Z پاولی[۲] و گیت CNOT است (Nielsen & Chuang, 2000; Rieffel & Polak, 2011; Everitt, 2007).

تاکنون بسترهای[۳] مختلفی برای ساخت یک پردازنده کوانتومی پیشنهاد شده‌اند. مهمترین آنها عبارت‌اند از: الکترودینامیک کوانتومی کاواک، اتم‌های به‌دام‌افتاده در تله پاول[۴]، مدارهای ابررسانا، فوتون و قطبش آن، نقاط کوانتومی(Everitt,2007; Jelezko et al., 2010)، و اسپینترونیک در گرافین، اسپین الکترون در کاواک نیتروژن الماس[۵]؛ در این میان، الکترودینامیک کوانتومی کاواک و اسپین الکترون در کاواک نیتروژن الماس چند مزیت عمده نسبت به بقیه دارند؛ از جمله امکان یکپارچه‌سازی در ابعاد زیرمیکرون، کار در دمای اتاق، و سازگاری با فناوری موجود نیمه‌هادی؛ ولی تنها رایانه کوانتومی تجاری جهان، محصول شرکت کانادایی دی‌ویو[۶]، فعلاً بر اساس ابررساناهای دمای پایین و با کمک ادغام فناوری هلیوم مایع و سرمایش لیزری[۷] در دمای زیر دوهزارم کلوین کار می‌کند.

هنوز پردازنده کوانتومی با تعداد زیاد کیوبیت، که قادر باشد الگوریتم شور را اجرا کند، ساخته نشده است و نمونه‌های ساخته‌شده در حدود ۱۰-۸ کیوبیت بیشتر ندارند (Knill, 2010). اما اخیراً دی‌ویو مدعی ساخت نوعی پردازنده کوانتومی با ۲۰۰۰ کیوبیت شده است. الگوریتم پردازشی این پردازنده بر اساس پایدارسازی کوانتومی[۸] است که طی آن وضعیت کیوبیت‌ها از یک حالت برهم‌نهی به یکی از حالت‌های خالص طی فرایندی موسوم به پختن[۹] تبدیل می‌شود. دیده شده است که این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌سازی بسیار از معادل کلاسیک سریع‌تر عمل می‌کند. تاکنون شرکت‌ها و مؤسساتی مانند گوگل، لاکهید مارتین[۱۰] و ناسا مشتری این محصول دی‌ویو شده‌اند (dWave).

با این اوصاف، هنوز جای یک پردازش‌گر پایدار، که بتواند الگوریتم‌های کوانتومی را به معنی حقیقی و با کنترل درهم‌تنیدگی کیوبیت‌ها و غلبه بر مشکل نوفه و خطای کوانتومی اجرا کند، در بازار خالی است. شرکت معظم IBM اخیراً یک پردازنده کوانتومی کامل با پنج کیوبیت را ساخته و با

---

1. Hadamard
2. Pauli
3. Quantum Computing Platforms
4. Paul trap
5. Nitrogen Vacancy in Diamond
6. DWave
7. Laser-Cooling Technology
8. Quantum Anealing
9. Baking
10. Lockheed Martin

کمک یا واسطه نرم‌افزاری کلاسیک، به صورت برخط در اینترنت در دسترس همگان برای هرگونه آزمایش دلخواه قرار داده است تا از میزان پایداری این فناوری مدرن و شگفت‌انگیز آگاه و مطمئن شوند (IBM-Q).

۴. وضعیت نانوالکترونیک در ایران

روشن است که وضعیت نانوالکترونیک و جایگاه آن در کشور ما بسیار نامطلوب است. متأسفانه طی چند دهه گذشته هیچ اقدامی، که بتوان از آن به‌عنوان تلاش برای ارتقای این فناوری و صنعت در کشور یاد کرد، مشاهده نمی‌شود. باید گفت ما تقریباً در ابتدای راه این فناوری هستیم و حداقل ۵-۶ دهه از کشورهای پیشرو عقب هستیم. نگرانی ما دوچندان می‌شود وقتی مشاهده می‌کنیم این فاصله به‌صورت نمایی در حال افزایش است و همچنان اقدام جدی برای توسعه این فناوری در کشور صورت نمی‌گیرد.

با این وضعیت، ممکن است این پرسش مطرح شود که بحث درباره آینده نانوالکترونیک در ایران چه فایده‌ای دارد؟ پاسخ آن است که وقتی تاریخچه علم و فناوری بشر را مطالعه می‌کنیم، به پیچ‌ها و دگرگونی‌های زیادی در آن برمی‌خوریم. می‌توان پیشرفت دانش بشری را به حرکت یک قطار تشبیه کرد. معمولاً قطار در پیچ‌ها سرعت خود را کم می‌کند و در مسیرهای مستقیم سرعتش زیاد می‌شود. در مورد فناوری نیمه‌هادی و نانوالکترونیک این پیچ حدوداً ۶۰ سال پیش طی شده و از آن زمان دائماً سرعت رشد آن بیشتر شده است. این حقیقت بیانگر آن است که امکان سوارشدن به این قطار در حال حاضر برای ما میسر نیست. اما نباید ناامید بود. انتظار می‌رود با نزدیک‌شدن به پایان عمر قانون مور، این قطار وارد مسیر پرپیچ‌وخمی شود، در آن صورت امکان سوارشدن برای ما وجود خواهد داشت. آنچه بدیهی است آن است که فرد خوابیده یا نشسته نمی‌تواند سوار قطار شود؛ بلکه باید بایستد و شروع به دویدن کند و هرگاه قطار سرعت خود را کم کرد، سوار آن شود. در ادامه این بخش مختصری درباره نحوه ایستادن و دویدن در این مسیر سخن می‌گوییم.

پایه اساسی نانوالکترونیک، فناوری ساخت در ابعاد نانو[1] است. هرچند امکان تغییرات اساسی در مدارهای آینده وجود دارد، اما حتماً این مدارها با همین فناوری یا چیزی بسیار شبیه به آن ساخته خواهند شد. لذا در قدم نخست نیاز داریم یک تشکیلات ساخت در ابعاد نانو بسیار مجهز و با جدیدترین فناوری ممکن در ایران احداث کنیم. نکته‌ای که لازم است در اینجا به آن توجه شود آن است که نباید انتظار هرگونه سود اقتصادی کوتاه‌مدت یا میان‌مدت از این تشکیلات داشت بلکه باید به آن همانند صنعت هسته‌ای و هوافضا نگاه کرد. علت این مسئله در آن است که برای رسیدن به

---

1. Nano Fabrication

سود یا باید فناوری انحصاری و قابل‌رقابت با کشورهای توسعه‌یافته داشته باشیم یا بتوانیم از نظر قیمت تمام‌شده محصولات با کشورهایی مانند چین و تایوان رقابت کنیم. بدیهی است در حال حاضر هیچ‌کدام از این دو امر میسر نیست. اما احداث این تشکیلات موجب آشنایی استادان، دانشجویان و متخصصین در صنایع مختلف با این فناوری خواهد شد. در نتیجه اگر در آینده نیاز باشد مدارهای جدیدی، که هنوز فناوری آنها پیچیده نشده است، در داخل ساخته شوند، می‌توان با تجربه و دانشی، که از پیش حاصل شده است، این کار را انجام داد. بنابراین سرمایه‌گذاری بدون چشم‌داشت سود در این تشکیلات جزء ضروری‌ترین اقدامات است. برای سرمایه‌گذاری به شکل مذکور جذب سرمایه خیرین و موقوفه از بخش خصوصی در کنار حمایت دولتی می‌تواند یکی از راه‌ها باشد.

۴. ۱. کرسی پژوهشی

در این راستا، ایجاد کرسی‌های پژوهشی[1] در دانشگاه‌ها بسیار کارگشا است. کرسی پژوهشی دقیقاً موقوفه نیست، بلکه اصل حقوق عضو هیأت‌علمی کماکان دانشگاه پرداخت می‌کند و فردی که کرسی را اشغال کرده عضو هیأت‌علمی پیوسته و تمام‌وقت محسوب می‌شود. امتیاز آن هم این است که امکان جذب نیروهای با تخصص بالاتر به دلیل اعطای بودجه تخصیص‌یافته پژوهشی تا پنج سال خیلی بیشتر است؛ زیرا سرعت فعالیت‌ها را بسیار افزایش داده و شتاب می‌بخشد.

کرسی پژوهشی از ابتدا به‌صورت تمام‌وقت و به هنگامی که بودجه مکمل آن فراهم شده باشد آگهی می‌شود. در دانشگاه‌های بزرگ این کرسی‌ها مستمراً در اختیار یک شخص نیست و در طول چنددهه بارها دست به دست می‌شوند تا استادان جوان‌تر هم به‌عنوان سکوی پرتاب فرصت استفاده بیابند. علاوه بر این، کرسی پژوهشی از افتخار بالاتری برخوردار است؛ زیرا مجهز به موتور محرکه قدرتمندتری است و لذا در اعطای کرسی باید نهایت دقت را در گزینش علمی داوطلبان کرد. دانشجویان یا پژوهشگران پسادکتری تنها یکی از استفاده‌کنندگان بخشی از بودجه کرسی‌ها هستند.

به‌طورکلی ایجاد کرسی پژوهشی به همراه اسلوب صحیح استخدام و جست‌وجوی داوطلبان خواهان عضویت هیأت‌علمی با توانایی‌های ممتاز و استثنایی، بسته مشوق قدرتمندی است که نیروهای کارآمد را از سراسر جهان به‌خوبی جذب می‌کند. دانشگاه‌های تازه‌تأسیس کرسی‌های متعددی با بودجه‌های از ۰/۵ تا ۵۰ میلیون دلار هم ایجاد می‌کنند و بدین ترتیب دانشمندان بزرگی از سراسر جهان را به استخدام خود درمی‌آورند. همچنین برقراری ارتباط با استادان و متخصصان این حرفه و تبادلات علمی و دعوت از آنها برای حضور در ایران به‌منظور آموزش عملی فناوری ساخت به

---

1. Endowed Chair Professorships

دانشجویان و استادان می‌تواند به حرکت ما در این مسیر سرعت بیشتری دهد. استفاده از تجربیات کشورها و دانشگاه‌های دیگر همچون دانشگاه ملی سنگاپور[1] و دانشگاه علم و فناوری ملک‌عبدالله[2] عربستان در تأسیس کرسی‌های پژوهشی و این رابطه می‌تواند مفید باشد.

در سراسر جهان بیش از نیمی از بودجه‌های کرسی‌های پژوهشی از موقوفه‌ها و هدایای بخش خصوصی تأمین می‌شود و کرسی به نام خود شخص یا شرکت حامی نامیده می‌شود. متأسفانه این فرهنگ اهدا و خرج‌کردن برای ترویج علم در ایران کاملاً ناشناخته مانده است.

۴. ۲. تولید ادوات نیمه‌هادی گسسته با بازار وسیع

پس از راه‌اندازی تشکیلات ساخت نانو و آشنایی عملی محققان با فرایندهای ساخت، می‌توان در گام‌های بعدی اقدام به ساخت بعضی قطعات در داخل کشور کرد. از جمله این قطعات می‌توان به ادوات الکترونیک قدرت مانند SCR، سلول‌های خورشیدی بر اساس موادی مانند پروسکایت‌ها[3]، نمایشگرهای با وضوح تصویر کم، بعضی قطعات گسسته مثل دیود نوری و دیود لیزر اشاره کرد. البته ساخت این قطعات در داخل با برنامه‌ریزی صحیح و تمرکز بر محصولات محدود می‌تواند اقتصادی باشد و بازار داخلی را از چنگ تولیدکنندگان چینی درآورد و به صادرات هم بینجامد. مهم آن است که این خانواده از ادوات نیمه‌هادی، در حقیقت گسسته هستند، و نیاز به پرتونگاری[4] با قدرت تفکیک بالا ندارند. لذا تولید آنها در کارخانجاتی با سرمایه‌گذاری نسبتاً اندک امکان‌پذیر است.

با شتاب‌گرفتن تولید و کاربرد سیستم‌های الکترومکانیکی با کنترل الکترونیک در منازل (مانند کولرها و یخچال ـ فریزرهای مجهز به اینورتر) و خیابان‌ها (خودروهای برقی) و کارخانجات و صنایع سنگین و سبک، اهمیت و ارزش ادوات الکترونیک قدرت و به‌خصوص SCR و IGBT روزبه‌روز فزونی می‌یابد. بازار این حوزه با سرعت روبه‌رشد است و هم کشورهای صنعتی و توسعه‌یافته و هم کشورهای درحال‌توسعه به‌شدت نیازمند این خانواده از محصولات هستند.

در این میان، به بازار بسیار باارزش پروسکایت‌ها باید اشاره کرد. این دسته از مواد امکان جایگزینی سیلیکون را در سلول‌های خورشیدی و تولید الکتریسیته دارند و نشان داده شده است که بازدهی آنها به مقدار نظری ۳۱ درصد هم قابل افزایش است. هم‌اکنون سلول‌های خورشیدی پروسکایت با بازدهی بالای ۲۲درصد به نمایش گذاشته شده‌اند و این در حالی است که قیمت تمام‌شده

---

1. National University Singapour (NUS)
2. King Abdullah University of Science and Technology
3. Pervoskite
4. Lithography

این مواد بسیار نازل است زیرا تک‌بلور نیستند و با فرایندهای سریع و ارزان کاملاً شیمیایی سنتز می‌شوند. تنها معضل اساسی باقی‌مانده در به‌کارگیری پروسکایت در سلول‌های خورشیدی، تجزیه آنها در مجاورت با هوا است. خوشبختانه، با ساخت فلزات شفاف در دانشگاه پردو، امکان پایدارسازی شیمیایی پروسکایت به علت جدایی از معرض هوای آزاد، و درعین‌حال امکان جذب نور فراهم شده است. بیابان‌های گسترده فلات مرکزی ایران منطقه‌ای بکر و دست‌نخورده با مساحت بسیار زیاد برای تأسیس نیروگاه‌های خورشیدی است. به‌زعم مؤلفان، گزینه مناسب برای تمرکز سرمایه‌گذاری در این زمینه همان سلول‌های پروسکایت هستند. از آن جایی که بهای تولید الکتریسیته با قیمت بر واحد سطح نسبت مستقیم، و با بازدهی کوانتومی نسبت عکس دارد، قابل پیش‌بینی است که بهای الکتریسیته تولیدی از نیروگاه خورشیدی پروسکایت، دست‌کم ده‌برابر کمتر از مشابه سیلیکونی خود باشد. در واقع سلول‌های پروسکایت آن‌قدر مقرون‌به‌صرفه خواهند بود که پوشانیدن تمام ساختمان‌های یک شهر با آنها نیز از نظر اقتصادی معقول و ممکن است.

البته شایان ذکر است که پیش از تصمیم به سرمایه‌گذاری اقتصادی در این حوزه (تولید ادوات الکترونیک قدرت یا سلول‌های خورشیدی) باید از نظر اقتصاد مهندسی، حجم سرمایه موردنیاز، نرخ بازگشت سرمایه، و توجیه اقتصادی آن به‌درستی روشن و مقایسه شود که نیازمند مطالعه مفصل و جداگانه‌ای است. اگر بتوانیم در آینده به یکی از کشورهای اثرگذار در این صنعت مبدل شویم، ضمن بالابردن سطح دانش و تخصص دانشگاه‌ها، ده‌ها هزار شغل مولد نیز در داخل کشور ایجاد خواهد شد.

۵. برخی نکات پایانی

در پایان لازم است یادآوری و تأکید کنیم که فرایند ورود به این عرصه زمان‌بر و در ابتدای راه پرهزینه است، و نیازمند دانشی است که بدون تردید روابط بین‌المللی سالم و پویا با کشورهای اروپا، غرب و ایالات متحده را می‌طلبد. این فناوری با تکیه به کشورهای شرقی مانند چین و کره شمالی و حتی سنگاپور و مالزی قابل‌حصول نیست و کشور ما به دلایل واضح، تمام متخصصان این عرصه را به شکلی غیر قابل جبران و بازسازی از دست داده است. به‌زعم مؤلفان، سرمایه‌گذاری کلان در فناوری نیمه‌هادی، به‌جز راه‌حل‌های پیشنهادی فوق در بخش پیش، اساساً مناسب وضع کنونی اقتصاد و اشتغال کشور نبوده، و در وجه عام و خاص آن هم قابل خودکفایی و اقتصادی نیست. حتی پیشرفته‌ترین کشورها هم قادر به تأمین تمام ابزارهای لازم آن به‌تنهایی نیستند.

باید در نظر داشت که فناوری نیمه‌هادی بسیار گسترده و ژرف است و تجسم اینکه می‌توان آن را توسط یک نفر یا افرادی معدود به دست آورد، بدون شک نشان‌دهنده فقدان تخصص در این زمینه

است. اتخاذ و اعمال دیدگاهی این چنین، کشور را به ورطه مشکلات گسترده و جدید و در نهایت اتلاف بیش از اندازه بودجه و ضایع‌کردن نیروی انسانی و تباه‌شدن امیدهای آینده خواهد انداخت.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا مروری داشتیم بر روندی که در فناوری نانوالکترونیک تاکنون در جهان طی شده است. سپس با اشاره به محدودیت‌ها و گلوگاه‌هایی، که این فناوری امروزه با آن مواجه است، به معرفی فناوری‌های جدیدی پرداختیم که هریک می‌تواند برطرف‌کننده بخشی از این محدودیت‌ها باشد. در بخش آخر این مقاله به بررسی جایگاه کشورمان در این حوزه پرداختیم و پیشنهاد و راه‌کارهایی عملی به‌منظور تحرک بخش دانشگاهی و صنعتی کشور برای ورود به این حوزه ارائه کردیم.

مراجع

بهناز قره‌خانلو، ترانزیستورهای دو قطبی دو بعدی، پایان‌نامه دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، خرداد ۱۳۹۳.

Akasaki, I.; Amano H. and Nakamura, S. (2014). *The Nobel prize in physics.*

Ali, F. (1991). *HEMTs and HBTs: Devices, fabrication, and circuits*: Artech House Publishers.

Arns, R. G. (1998). The other transistor: early history of the metal-oxide semiconductor field-effect transistor. *Engineering Science and Education Journal*, 7(5), 233-240.

Avouris, P.; Dresselhaus, G. and Dresselhaus, M. S. (2000). Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties and applications. *Topics in Applied Physics*.

Bader, S. D. and Parkin, S. S. P. (2010). Spintronics. *Annual Reviews of Condensed Matter Physics*, 1(1), 71-88.

Balandin, A. A.; Ghosh, S.; Bao, W.; Calizo, I.; Teweldebrhan, D.; Miao, F. and Lau, C. N. (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 8(3), 902-907.

Baughman, R. H.; Cui, C.; Zakhidov, A. A.; Iqbal, Z.; Barisci, J. N.; Spinks, G. F.; Wallance, G. G.; Mazzoldin, A.; De Rossi, D.; Rinzler, A. G.; Jaschinski, O.; Roth, S. and Kertesz, M. (1999). Carbon nanotube actuators. *Science*, 284(5418), 1340-1344.

Bennett, C. H. and DiVincenzo, D. P. (2000). Quantum information and computation. *Nature*, 404(6775), 247.

Bohr, M. T.; Chau, R. S.; Ghani, T. and Mistry, K. (2007). The high-k solution. *IEEE Spectrum*, 44(10), 29-35.

Chodos, A.; Ouellette, J. and Tretkoff, E. (2001). This month in physics history. American Physical. Retrieved from ttps://www.aps.org/publications/apsnews/200011/history.cfm.

CLab, Carbon lab, Retrieved from http://carbonlab.roma2.infn.it/.

Dennard, R. H.; Gaensslen, F. H.; Rideout, V. L.; Bassous, E. and LeBlanc, A. R. (1974). Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 9(5), 256-268.

Desai, S. B.; Madhvapathy, S. R.; Sachid, A. B.; Llinas, J. P.; Wang, Q.; Ahn, G. H.; Pitner, G.; Kim, M. J.; Bokor, J.; Hu, C. and Wong, H. S. P. (2016). MoS2 transistors with 1-nanometer gate lengths. *Science*, 354(6308), 99-102.

DiVincenzo, D. P. (1995). Quantum computation. *Science*, 270(5234), 255-261.

dWave, Retrieved from http://www.dwavesys.com/

Ebbesen, T. W. and Ajayan, P. M. (1992). Large-scale synthesis of carbon. *Nature*, 358, 220-222.

Everitt, H. O. (Ed.). (2007). *Experimental aspects of quantum computing*: Springer Science.

Feynman, R. P. (1982). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6), 467-488.

Frackowiak, E.; Metenier, K.; Bertagna, V. and Beguin, F. (2000). Supercapacitor electrodes from multiwalled carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 77(15), 2421-2423.

Frank, I. W.; Tanenbaum, D. M.; van der Zande, A. M. and McEuen, P. L. (2007). Mechanical properties of suspended graphene sheets. *Journal of Vacuum Science and Technology* B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, *Measurement, and Phenomena*, 25(6), 2558-2561.

Futaba, D. N.; Hata, K.; Yamada, T.; Hiraoka, T.; Hayamizu, Y.; Kakudate, Y.; Tanaike, O.; Hatori, H.; Yumura, M. and Iijima, S. (2006). Shape-engineerable and highly densely packed single-walled carbon nanotubes and their application as super-capacitor electrodes. *Nature Materials*, 5(12), 987.

Gad-el-Hak, M. (Ed.). (2005). *MEMS*: *Introduction and fundamentals*. CRC Press.

Geim, A. K. and Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183-191.

Geim, A. and Novoselov, K. (2010). *The Nobel prize in physics*.

Gharekhanlou, B.; Khorasani, S. and Sarvari, R. (2014). Two-dimensional bipolar junction transistors. *Materials Research Express*, 1(1), 015604.

Ghosh, S.; Calizo, I.; Teweldebrhan, D.; Pokatilov, E. P.; Nika, D. L.; Balandin, A. A.; ... and Lau, C. N. (2008). Extremely high thermal conductivity of graphene: Prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits. *Applied Physics Letters*, 92(15), 151911.

Guo, J.; Koswatta, S. O.; Neophytou, N. and Lundstrom, M. (2006). Carbon nanotube field-effect transistors. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 16(04), 897-912.

Guo, T.; Nikolaev, P.; Thess, A.; Colbert, D. T. and Smalley, R. E. (1995). Catalytic growth of single-walled manotubes by laser vaporization. *Chemical Physics Letters*, 243(1), 49-54.

Han, W. and Kawakami, R. K. (2011). Spin relaxation in single-layer and bilayer graphene. *Physical Review Letters*, 107(4), 047207.

Hruska, J. (2015). IBM announces 7nm breakthrough, builds first test chips on new process with EUV. Retrieved from http://www.extremetech.com/extreme/209523-ibm-announces-7nm-breakthrough-builds-first-test-chips-on-new-process-with-euv.

Huang, A. (2015). The death of Moore's law will spur innovation. IEEE Spectrum. Special report: 50 years of Moore's law. Retrieved from https://spectrum.ieee.org/static/special-report-50-years-of-moores-law.

Hunsperger, R. G. and Meyer-Arendt, J. R. (1992). Integrated optics: theory and technology. *Applied Optics*, 31, 298.

IBM-Q, International Business Machines, Retrieved from http://www.ibm.com/ quantumcomputing.

Inami, N.; Mohamed, M. A.; Shikoh, E. and Fujiwara, A. (2007). Synthesis-condition dependence of carbon nanotube growth by alcohol catalytic chemical vapor deposition method. *Science and Technology of Advanced Materials*, 8(4), 292-295.

Jacobi, W. and Siemens, A. (1952). Halbleiterverstärker. [Semiconductor Amplifier], German patent, 833366.

Javey, A.; Guo, J.; Wang, Q.; Lundstrom, M. and Dai, H. (2003). Ballistic carbon nanotube field-effect transistors. *Nature*, 424(6949), 654.

Jelezko, F.; Ladd, T. D.; Laflamme, R.; Monroe, C.; Nakamura, Y. and O'Brien, J. L. (2010). Quantum computers. *Nature*, 464.

Jha, A. R. (2008). MEMS and nanotechnology-based sensors and devices for communications, *Medical and Aerospace Applications*: CRC Press.

Johnsen, G. K. (2012). An introduction to the memristor-a valuable circuit element in bioelectricity and bioimpedance. *Journal of Electrical Bioimpedance*, 3(1), 20-28.

Johnson, D. (2015). Supercapacitors take huge leap in performance. *IEEE Spectrum*.

Khorasani, S. A. (2014). Tunable spontaneous emission from layered graphene/dielectric tunnel junctions. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 50(5), 307-313.

Kim, J.; Paul, A.; Crowell, P. A.; Koester, S. J.; Sapatnekar, S. S.; Wang, J. P. and Kim, C. H. (2015). Spin-based computing: device concepts, current status, and a case study on a high-performance microprocessor. *Proceedings of the IEEE*, 103(1), 106-130.

Kim, K. S.; Cota-Sanchez, G.; Kingston, C. T.; Imris, M.; Simard, B. and Soucy, G. (2007). Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by induction thermal plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(8), 2375.

Knill, E. (2010). Physics: Quantum computing. *Nature*, 463(7280), 441-443.

Kobayashi, K. and Suematsu, Y. (1982). Effects of optical feedback on the characteristics of semiconductor lasers. *Optical Devices and Fibers* (OHM and North-Holland), 39.

Kong, J.; Franklin, N. R.; Zhou, C.; Chapline, M. G.; Peng, S.; Cho, K. and Dai, H. (2000). Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science*, 287(5453), 622-625.

Le Lay, G. (2015). 2D materials: Silicene transistors. *Nature Nanotechnology*, 10(3), 202-203.

Lee, C.; Wei, X.; Kysar, J. W.; and Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385-388.

Lee, S. J.; Chung, H. S.; Nahm, K. and Kim, C. K. (1990). Band structure of ternary-compound semiconductors using a modified tight-binding method. *Physical Review B*, 42(2), 1452.

Lilienfeld, J. E. (1930). Method and apparatus for controlling electric currents. U.S. Patent No. 1, 745, 175. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Lilienfeld, J. E. (1933). U.S. Patent No. 1,900,018. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Lojek, B. (2007). Shockley semiconductor laboratories. *History of Semiconductor Engineering*, 67-101.

Lu, M. (2013). *Supercapacitors: Materials, systems and applications*: John Wiley & Sons.

Lyshevski, S. E. (2002). *MEMS and NEMS: Systems, devices, and structures*: CRC Press.

Mack, C. (2015). The multiple lives of Moore's law. *IEEE Spectrum*, 52(4), 31-31.

Martel, R.; Schmidt, T.; Shea, H. R.; Hertel, T. and Avouris, P. (1998). Single-and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors. *Applied Physics Letters*, 73(17), 2447-2449.

Matocha, K.; Chow, T. P. and Gutmann, R. J. (2005). High-voltage normally off GaN MOSFETs on sapphire substrates. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 52(1), 6-10.

Mazumder, P.; Kang, S. M. and Waser, R. (2012). Memristors: Devices, models, and applications. *Proceedings of the IEEE*, 100(6), 1911-1919.

McAlpine, T. C.; Greene, K. R.; Santilli, M. R.; Olafsen, L. J.; Bewley, W. W.; Felix, C. L.; Vurgaftman, I.; Meyer, J. R.; Yang, M. J.; Lee, H. and Martinelli, R. U. (2004). Progress in compound semiconductor materials III-electronic and optoelectronic applications. *In MRS Symposia Proceedings*, 799, 211.

Modi, A.; Koratkar, N.; Lass, E.; Wei, B. and Ajayan, P. M. (2003). Miniaturized gas ionization sensors using carbon nanotubes. *Nature*, 424(6945), 171.

Monroe, C. (2002). Quantum information processing with atoms and photons. *Nature*, 416(6877), 238-246.

Moore, G. E. (1998). Cramming more components onto integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 82-85.

Neto, A. C.; Guinea, F.; Peres, N. M.; Novoselov, K. S. and Geim, A. K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*, 81(1), 109.

Nguyen, C. T. C. (2007). MEMS technology for timing and frequency control. *IEEE Transactions on Ultrasonic*, *Ferroelectrics, and Frequency Control*, 54(2).

Nguyen, C. T. C. (2013). MEMS-based RF channel selection for true software-defined cognitive radio and low-power sensor communications. *IEEE Communications Magazine*, 51(4), 110-119.

Nielsen, M. A. and Chuang, I. (2000). *Quantum computation and quantum information*: Cambridge University Press.

NMAI, Neuro-memristive artificial intelligence, Retrieved from http://knowm.org/No Moore?, (2013,November).Retrieved from https://www.economist.com/news/21589080-golden-rule-microchips-appears-be-coming-end-no-moore.

NSM archive, aluminum gallium arsenide (AlGaAs), Retrieved from http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/AlGaAs/index.html.

Ounaies, Z.; Park, C.; Wise, K. E.; Siochi, E. J. and Harrison, J. S. (2003). Electrical properties of single wall carbon nanotube reinforced polyimide composites. C*omposites Science and Technology*, 63(11), 1637-1646.

Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. *35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*.

Parkin, S.; Jiang, X.; Kaiser, C.; Panchula, A.; Roche, K. and Samant, M. (2003). Magnetically engineered spintronic sensors and memory. *Proceedings of the IEEE*, 91(5), 661-680.

Parpala, M. (2014). The US semiconductor industry: A key contributor to US economic growth. Semiconductor Industry Association.

Peleg, R. (2015, June 15). Strengthening solar cell performance with graphene. Retrieved from http://www.renewableenergyworld.com/articles/2015/06/strengthening-solar-cell-performance-with-graphene.html.

Reich, S.; Thomsen, C. and Maultzsch, J. (2008). *Carbon nanotubes: Basic concepts and physical properties*: John Wiley & Sons.

Rhines, W. C. (2016, April). Moore's law and the future of solid-state electronics. Retrieved from http://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/moore-s-law-and-the-future-of-solid-state-electronics/.

Rieffel, E. G. and Polak, W. H. (2011). *Quantum computing: A gentle introduction*: MIT Press.

Saxena, A. K. (1980). The conduction band structure and deep levels in ga1-xAlxAs alloys from a high-pressure experiment. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 13(23), 4323.

Saxena, A. K. (1981). Electron mobility in ga1− xAlxAs alloys. *Physical Review B*, 24(6), 3295.

Schwierz, F. (2010). Graphene transistors. *Nature nanotechnology*, 5(7), 487-496.

Simonite, T. (2016, April 2014), Why a chip that's bad at math can help computers tackle harder problems. Retrieved from https://www.technologyreview.com/s/601263/why-a-chip-thats-bad-at-math-can-help-computers-tackle-harder-problems/.

Son, Y. W.; Cohen, M. L. and Louie, S. G. (2006). Energy gaps in graphene nanoribbons. *Physical Review Letters*, 97(21), 216803.

Steane, A. (1998). Quantum computing. *Reports on Progress in Physics*, 61(2), 117.

Supercapacitor, Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor.

The U.S. Semiconductor Industry Association(2016). Fact book.

Thomas, A. (2013). Memristor-based neural networks. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(9), 093001.

Tiwari, S. (2013). *Compound semiconductor device physics*: Academic Press.

Wang, K. L.; Alzate, J. G. and Amiri, P. K. (2013). Low-power non-volatile spintronic memory: STT-RAM and beyond. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(7), 074003.

Wei, B. Q.; Vajtai, R. and Ajayan, P. M. (2001). Reliability and current carrying capacity of carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 79(8), 1172-1174.

Wolf, S. A.; Awschalom, D. D.; Buhrman, R. A.; Daughton, J. M.; Von Molnar, S.; Roukes, M. L.; Chtchelkanova, A. Y. and Treger, D. M. (2001). Spintronics: A spin-based electronics vision for the future. *Science*, 294(5546), 1488-1495.

Wolf, S. A.; Lu, J.; Stan, M. R.; Chen, E. and Treger, D. M. (2010). The promise of nanomagnetics and spintronics for future logic and universal memory. *Proceedings of the IEEE*, 98(12), 2155-2168.

Yeow, T. W.; Law, K. E. and Goldenberg, A. (2001). MEMS optical switches. *IEEE Communications Magazine*, 39(11), 158-163.