مواد دو بعدی از آزمایشگاه تا صنعت

مترجمان:
صادق قربان زاده – کارشناسی ارشد مهندسی فناوری نانو – دانشگاه علم و صنعت ایران
زهرا اکرمی – کارشناسی ارشد مطالعات ترجمه – دانشگاه علامه طباطبایی

مسیر فناوری‌های نوظهور از پیدایش تا بلوغ صنعتی، با چالش‌های بیشماری همراه است. موضوعات مهم در معرض خطر شامل میزان تکرارپذیریِ عملکرد مطلوب و سطح تولید با حداقل هزینه و حداکثر اطمینان هستند. از دیگر جنبه‌هایی که اهمیت یکسانی دارد می‌توان به میزان سازگاری نمونه اولیه تایید شده در آزمایشگاه با استانداردهای محیط‌های صنعتی اشاره کرد. با اینکه کنترل کامل پارامترهای این الزامات کار بسیار دشواری است، اما چرخه عمر هر مفهوم تجاری، محصول یا فرآیند جدید با نقاط عطف زیادی روبه‌رو می‌شود که با نظارت بر فرآیند در راستای مقیاس سطح آمادگی فناوری (TRL) می‌توان آن‌ها را ارزیابی نمود. سطح آمادگی فناوری ۹ شاخص است که رشد فناوری مورد نظر را می‌سنجد. این شاخص‌ها در دهه ۱۹۷۰ توسط ناسا ایجاد شده و پس از آن در کمیسیون اروپا به عنوان رویکردی دائمی برای ارزیابی نتایج تکنولوژیکی تحقیقات و پروژه‌های نوآورانه تحت پوشش مالی اتحادیه اروپا به کار گرفته شده‌اند. این شاخص‌ها از نظارت بر اصول اساسی (TRL1) تا نمایش عملکرد واقعی یک سیستم در شرایط عملیاتی مربوط به آن (TRL9) را در بر می‌گیرد.

گرافن و مواد دوبعدی مربوط به آن در مرکز سرمایه‌گذاری ۱ میلیارد یورویی کمیسیون اروپا قرار دارد که منجر به پیدایش گرافن فلَگشیپ (Graphene Flagship) شده است. این برنامه جاه‌طلبانه ده ساله که بیش از ۱۵۰ سهام‌دار آکادمیک و صنعتی از ۲۱ کشور دنیا را گرد هم جمع کرده، در تلاش است تا فناوری‌های نوظهور مبتنی بر مواد دوبعدی را از آزمایشگاه‌های دانشگاهی به محیط‌های صنعتی انتقال دهند تا در آنجا به محصولات تجاری تبدیل شوند. با توسعه صنعتی نیمه رسانای اکسید فلز مکمل (CMOS) که هم اکنون در حال نزدیک شدن به محدودیت فیزیکی اندازه‌ی ساخت دستگاه‌های نیمه هادی است، ممکن است مواد دو بعدی به علت طبیعت اتمی کوچک خود و فقدان ذاتی اثرات کانال باریک که ترانزیستورهای مبتنی بر سیلیکون معمولی را گرفتار می‌کند، به سمت کوچک‌سازی شدید قطعات الکترونیکی

پیش رود. بنابراین در تضاد با نگرانی‌هایی که در مورد الزامات یکپارچه‌سازی وسایل الکترونیکی سیلیکونی بر اساس قانون مور (Moore) وجود دارد (تعداد ترانزیستورهای موجود بر یک قطعه، حدوداً هر ۱۸ تا ۲۴ ماه دو برابر می‌شود)، در اصل هیچ محدودیت فیزیکی برای کوچکی عناصر الکترونیکی دو بعدی وجود ندارد. این چالش‌های مقیاس در واقع می‌تواند باعث رشد گرافن و مواد مربوط به آن شده و آن‌ها را تبدیل به کاندیدایی برای نسل بعدی نانو الکترونیک‌های "فراتر از مور" سازد.

اما با رشد فناوری این پرسش که "تاثیر تجاری آن چه زمانی ملموس خواهد شد" بیشتر مطرح می‌گردد، همچنین با در نظر گرفتن این که طرح گرافن فلگشیپ هم اکنون در پنجمین سال خود قرار دارد، این پرسش پر رنگ‌تر می‌شود. این فناوری نیز همچون دیگر فناوری‌های نوظهور، تا کنون میان بررسی پرسش‌های فیزیکی بدون پاسخ در تحقیقات بنیادی و حرکت به سوی تحقیق و توسعه کاربردی برای فعال‌سازی برنامه‌های قابل بازاریابی، به تعادل خوبی دست یافته است. علیرغم فرآیند مداوم ورود مواد نازک اتمی به بازار، موانع مهمی نیز وجود دارد که یکی از آن‌ها مشکل استانداردهای ناکامل است. فرآیند کامل استانداردسازی، نقش مهمی در تقویت یک برنامه تجاری سازی دارد، چراکه با کسب اطمینان از پذیرفته بودن اصطلاحات توصیف کننده اشکال مختلف مواد نازک اتمی، در فرآیند آزمایش و اعتبار از شرکت‌ها پشتیبانی می‌کند. در عین حال، ارزیابی‌های ایمنی با تاکید بر ارزیابی تاثیر احتمالی این مواد بر سلامت انسان و محیط زیست، هنوز در حال انجام‌اند. هنگامی که این مواد شیمیایی برای استفاده ایمن شوند، تجهیزات آزمایش و پردازش بایستی مطابق با استانداردهای بین‌المللی به صورت کامل با زنجیره‌های ارزش جهانی هماهنگ شوند. علاوه بر این، کلید به کار گیری واقع‌گرایانه گرافن و مواد مرتبط با آن و دستیابی به این تغییر بلندپروازانه در صنعت، کاهش چشمگیر هزینه‌های مرتبط با تولید مواد و افزایش سود تولید می‌باشد. بنابراین طرح گرافن فلگشیپ بر این باور است که هم اکنون زمان انجام حرکتی بزرگ در زمینه توسعه اعضا و یکپارچه سازی سیستم فرا رسیده است. تبدیل دستگاه‌های فعلی مبتنی بر گرافن از TRL4 (معتبر بودن فناوری در آزمایشگاه) به TRL7-8 (مربوط به یک نمونه از سیستم کامل و واجد شرایط که در محیط عملیاتی آن به نمایش گذاشته می‌شود) می‌تواند نشانه‌ای ملموس از به کارگیری موفقیت آمیز این تغییر باشد. اما برای نمایش ساخت دستگاه‌ها در محیط آزمایشی بایستی پیش از فرآیند تولید در مقیاس کامل، پلی میان محیط آکادمیک و صنعتی ایجاد شده و در عین حال همکاری داخلی میان سهامداران صنعت تقویت گردد.

طرح خط تولید آزمایشی

نوآوری تنها به معنای تجسم یک مسیر احتمالی برای رسیدن به یک مفهوم تجاری با کاربردهای دور از دسترس نیست؛ اگر راهی روشن و ملموس برای دستیابی به یک محصول رقابتی تجاری وجود نداشته باشد، هر تلاشی در جهت آن بیهوده خواهد بود. طرح گرافن فلگشیپ با در نظر گرفتن این اصل، برای راه‌اندازی خط تولید آزمایشی لوازم الکترونیکی مبتنی بر

گرافن، الکترونیک نوری و حسگرها، یک فراخوان عمومی ۱۸٫۶۵ میلیون یورویی تنظیم کرده است. مبحث کاربردهای این طرح در سپتامبر ۲۰۱۹ بسته شده و مدت زمان اجرای آن ۴۸ ماه است که از اکتبر ۲۰۲۰ آغاز می‌شود. هدف این طرح، توسعه تعدادی از فناوری‌های پیشرفته همچون عناصر الکترونیکی مبتنی بر گرافن برای تبادل داده‌ها می‌باشد. این طرح شامل طراحی و تولید گیرنده‌ها – گیرنده‌ها و فرستنده‌های یکپارچه بی‌سیم – است که در آن عناصر الکترونیکی و فوتونیک برای دستیابی به تبادل داده با سرعت بالا و مصرف کم یکپارچه شده و در سیستم‌های واقعی انتقال، اعتبار کسب می‌نمایند. ماژول‌های الکترونیک نوری همچون آشکار سازهای نوری گرافنی، نور را از میان محدوده وسیعی از طول موج‌ها از نور مرئی تا محدوده حرارتی تشخیص می‌دهند؛ پیشرفت آن‌ها در مقیاس صنعتی مقرون به صرفه بوده و می‌تواند منجر به ارائه فرصت‌های ارزشمند تجاری در زمینه دید در شب، طیف‌سنجی و سنجش دما شود. علاوه بر آن، مواد اتمی نازک می‌توانند به عنوان حسگرهایی قدرتمند برای انواع مختلف پارامترهای فیزیکی عمل کنند (گونه‌های شیمیایی، رطوبت، نیرو و غیره)؛ این پلتفرم‌های یکپارچه را می‌توان به همراه آنتن‌های شناسایی فرکانس رادیویی، به عنوان ردیاب‌هایی که از دور قابل خواندن هستند به کار برد.

هدف اصلی این طرح، راه‌اندازی یک نمونه از خط تولید اصلی در محیطی است که نمایانگر تنظیمات عملیاتی نهایی باشد، اما از لحاظ اندازه و کارآیی‌های موجود در مقیاس کوچکتری شکل گیرد. این اکوسیستم در صورت موفقیت، قادر به ارزیابی عملکرد دستگاه‌های نمونه و توانایی آن‌ها در پوشش ملزومات مورد نیاز برای تبدیل آن‌ها از TRL4 به TRL7-8 می‌باشد. این جدول زمانی بلندپروازانه است: فرآیند خط تولید ابتدائی باید دو سال فعالیت کند و انتظار می‌رود پروتکل‌ها و نیروهای کار خط تولید آزمایشی تا سال ۲۰۲۴ عملکرد کاملی داشته باشند. آندریا فراری، مسئول علوم و فناوری و رئیس هیئت مدیره گرافن فلگشیپ می‌گوید: "خط تولید آزمایشی بایستی تا اکتبر سال ۲۰۲۴ خودکفا شده و شامل فعالیت‌هایی شود که راه را برای انتقال دانش به محیط تولید صنعتی هموار می‌کند، در این صورت به یک خط صنعتی کامل، بینش مسائل مالی مرتبط و دیدگاه‌های بازار دست می‌یابد."

تخصص و کالاهای تحویلی که انتظار می‌رود کنسرسویم آن را پوشش دهد، چند برابر شده و شامل گردش‌های تولیدی سازگار با صنعت، قابلیت اطمینان، تطبیق پذیری و کنترل فرآیند می‌باشد. این مورد برای پایداری بایستی به فعالیتی مداوم تبدیل شود. در واقع هدف این فراخوان عمومی جذب چند سهام‌دار است که به منظور ایجاد یک محیط رقابتی و در عین حال مشارکتی، مایل به ساخت یک پلتفرم توزیع شده و همکاری در شرایطی باشند که لوازم، مواد و عرضه کنندگان مشترک است. مدل مالکیت معنوی از استاندارد اتحادیه اروپا که برای پروژه‌های تحقیق و نوآوری "افق ۲۰۲۰" تنظیم شده پیروی می‌نماید، که بر اساس آن شرکا صاحب مالکیت معنوی ساخته‌ی خود هستند، اما دیگر اعضای کنسرسیوم از حقوق دسترسی مشخصی برخوردارند.

نکته قابل توجه این است که همچون شرکت‌های سنتی نیمه هادی که با عنوان سازندگان دستگاه‌های یکپارچه شناخته

می‌شوند، هیچ تاسیسات ساخت واحدی برای طراحی و تولید محصولات وجود نخواهد داشت. بلکه هدف این نوآوری به کارگیری مدل تجاری برون سپاری است که به موجب آن مراحل فرآیند در کارخانه تولیدی حذف شده و بر اساس تخصص اعضای کنسرسیوم به آن‌ها تخصیص می‌یابد. رویکرد برون سپاری برای تقویت جمع‌آوری دانش و به کارگیری آن در بازار، از موقعیت مناسبی برخوردار است. در وهله اول با فراهم آوردن امکان نمونه سازی، مطالعات آزمایشی و تولید سیستم‌های یکپارچه با حجم کم، زمینه مناسب و پشتیبانی لازم از استارت‌آپ‌ها و اسپین‌آف‌ها را ارائه می کند. علاوه بر این، آن‌ها را از مزایای بهینه سازی تولید بهره‌مند ساخته – از جمله امکان مقابله با تمامی چالش‌های تولید در گذشته – و همچنین خطرات مالی مربوط به خطوط تولید در مقیاس کامل را به حداقل می‌رساند. مارکو روماگنولی مدیر فعالیت‌های مربوط به سیستم یکپارچه در مقیاس ویفر سیلیکونی در گرافن فلگشیپ می‌گوید: "فقط یک همکاری در مقیاس بزرگ می‌تواند اکوسیستمی فراهم کند که قادر به پاسخگویی پرسش‌های زیاد برآمده از رشد فناوری و زمینه‌های کاربردی متعدد آن‌ها باشد. نوآوری‌های توسعه یافته خواستار تولید دستگاه‌های مبتنی بر گرافن در مقیاس ویفر سیلیکونی هستند تا برای کاربردهای متعدد، از لوازم الکترونیکی برای مصرف‌کنندگان گرفته تا کاربردهای گسترده برای شرکت‌های کوچک و متوسط و یا حتی خدمات چند منظوره به کار گرفته شوند." کنسرسیوم پیش‌بینی می‌کند که مدل برون سپاری همچون دیگر کارخانجات تولیدی نیمه هادی، خدمات خود را در ازای پرداخت هزینه در اختیار هر کاربر قرار دهد.

گرچه مدل برون سپاری نیز با چالش‌هایی همراه است؛ ایجاد هماهنگی پروتکل‌ها، طراحی و نیروی کار تولید در میان تولیدکنندگان مربوطه، پیش‌نیاز اساسی برای کاربری موثر این مدل است. تنها در صورت استاندارد بودن فرآیندها می‌توان طراحی دستگاه‌های نانو مقیاس مبتنی بر گرافن را از تولید آن‌ها جدا نمود. کنسرسیوم خط تولید آزمایشی می‌بایست برای کسب موفقیت، با تولیدکنندگان یکپارچه دستگاه اروپایی تعاملاتی نزدیک ایجاد کند؛ این افراد تمامی فرآیندها – طراحی، تولید و فروش محصول نهایی – را انجام می‌دهند، تا از تناسب فناوری توسعه یافته با نیازهای مشتریان اطمینان حاصل نمایند. فراری می‌گوید: "در طول مرحله استارت‌آپ، مدل برون سپاری جریانات یا ماژول‌های اساسی پردازش را راه‌اندازی می‌کند و آن‌ها را با دریافت کارمزد در اختیار شرکت‌ها و موسسات آموزشی اروپایی و غیر اروپایی قرار می‌دهد. در این مرحله، کاربران اروپایی از هزینه کمتر و اولویت دسترسی بهره می‌برند و از کاربران غیر اروپایی هزینه کامل دریافت می‌شود تا سهم اتحادیه اروپا در تاسیس مدل برون سپاری نمایش داده شود."

استراتژی مبتنی بر صنعت

مسیر پذیرش استراتژی مبتنی بر صنعت، چندین نقطه عطف مهم دارد. یک مدار مجتمع با کارآیی بالا شامل مجموعه‌ای از قطعات الکترونیکی فعال و غیرفعال است که همگی به یک تراشه نیمه رسانا متصل هستند. این تراشه معمولاً از سیلیکون ساخته می‌شود. گرافن و مواد مربوطه که بلور با کیفیت و رسانایی بالایی داشته و برای دستگاه‌های الکترونیکی

مصرفی مناسب هستند، به طور کلی در بسترهای خاصی سنتز می‌شوند (همچون مس) که لزوماً با پلتفرم سیلیکونی نهایی که دستگاه در آن یکپارچه می‌شود همخوان نیست. بنابراین، ایجاد زیرساخت‌های فرآیندی که امکان انتقال این مواد اتمی نازک را از زمان رشد به بستر هدف فراهم می‌سازد، نشانگر یک نقطه عطف اساسی است. دستکاری گرافن و مواد مربوطه، یکی از مهمترین مراحل برای یکپارچه سازی آن‌ها روی سیلیکون است که در زمان انتقال باید در یک محیط کنترل شده انجام شود، چراکه در غیر این صورت منجر به آلودگی، حفره‌های کنترل نشده بار و نوسانات کرنش تصادفی می‌شود، که اختلالاتی مهم در دستگاه‌های الکترونیکی ایجاد خواهد کرد.

میناداگاس لوکوسیوس که در زمینه نوآوری‌های IHP GmbH برای میکروالکترونیک‌ها با کارآیی بالا فعالیت می‌کند، می‌گوید: "این بازدید عمومی از خط تولید آزمایشی، فرصتی کمیاب جهت بررسی جنبه‌های مهندسی آماده سازی دستگاه گرافنی در بستر تولید کارآمد فراهم می‌نماید."

این خط تولید آزمایشی برای نزدیک شدن به مرحله‌ی سازگاری روند ساخت دستگاه‌ها با مقیاس‌های تولیدی فناوری استاندارد CMOS، قصد دارد از ویفرهای سیلیکونی با سایز حداقل ۲۰۰ میلیمتر به عنوان بسترهای هدف استفاده نماید. اما از آن‌جایی که مدارهای مجتمع تجاری در نهایت می‌توانند صدها تا میلیون‌ها قطعه الکترونیکی، که انتظار می‌رود به صورت تجدیدپذیر عمل کنند را در خود نگاه دارند، برای ردیابی تغییرات ویفر به ویفر، نظارت کامل بر بازده فرآیند بایستی هم بر تک ویفر و هم بر چندین ویفر صورت گیرد. مواد دو بعدی برای رسیدن به چنین سطح متراکمی از یکپارچه سازی راه زیادی پیش رو دارند: پیچیده‌ترین مدار مجتمعی که تا کنون نمایش داده شده است، یک ریزپردازنده ۱ بیتی شامل ۱۱۵ ترانزیستور یکپارچه نازک اتمی است. این ریزپردازنده می‌تواند برنامه‌های تعریف شده توسط کاربر که در یک حافظه خارجی ذخیره شده را اجرا نماید، عملیات منطقی را انجام دهد، و داده‌ها را به اطراف دستگاه منتقل کند. (شکل. ۱)

آندریا فراری از طرح گرافن فلگشیپ می‌گوید: "ما به یک ماژول یکپارچه سازی گرافن سازگار با CMOS نیاز داریم که شامل یک سری از مراحل پردازش در ابزار معمولی CMOS باشد و سازگاری با استانداردها، قابلیت اعتماد صنعت نیمه هادی را تضمین می‌کند."

علاوه بر این‌ها، یکپارچه سازی دستگاه (شکل. ۲) باید با ملزومات مراحل پایانی تولید (BEOL) سازگار باشد؛ این مراحل بخشی از جریان تولید است که در آن دستگاه‌ها بر روی یک ویفر و به وسیله‌ی سیم‌های فلزی به یک‌دیگر متصل هستند. توسعه فلزاتی که به عنوان رابط با گرافن مورد استفاده قرار می‌گیرند بسیار حیاتی است. برخی فلزات با محیط تولیدی CMOS سازگار نیستند – جزئیات آن در راهنمای بین‌المللی فناوری برای شرکت‌های نیمه هادی بیان شده است (http://www. itrs2.net/) – چرا که استفاده از برخی از آن‌ها بر قابلیت اعتماد و بازدهی دستگاه تاثیر دارد. معمولاً تنها آلومینیوم، تنگستن، مس، نیکل، کبالت، مولیبدن، تیتانیوم و تانتال برای تولید CMOS مناسب هستند. مطالعاتی که به گزارش یکپارچه سازی گرافن بر روی ویفر می‌پردازد، اساساً به مثال‌هایی محدود هستند که گرافن در آخرین مرحله

یکپارچه سازی معرفی می‌شود و یا از طریق جذب آهن‌ربایی با اتصالات فلزی ترکیب می‌شوند. جذب آهن‌ربایی با یکپارچه سازی در مقیاس بسیار بالا، که از الزامات تولید تراشه‌های مدرن است، سازگار نیست چراکه دارای محدودیت‌هایی همچون لایه‌نشانی فلز، تشکیل گوشه در لبه‌های فلز و نگهداری جزئی فلز می‌باشد. برای صدور مجوز یکپارچه سازی دستگاه‌های مبتنی بر گرافن که به صورت ناهمگن با فناوری سیلیکونی بسته‌بندی شده‌اند، گرافن بایستی از طریق ماژول‌هایی شبیه به ماژول‌های مورد استفاده در یکپارچه سازی دستگاه‌های نیمه هادی، یکپارچه شود. در حال حاضر، اتصالات میان دستگاه‌ها در طرح‌های نیمه هادی، معمولاً توسط ماژول‌ها با پوشش مس ایجاد می‌شود. در این فرآیند، به واسطه‌ی اچ کردن خشک با ترانشه یا ویاس یک عایق شکل می‌گیرد که در آن فلز رسانا بعداً لایه نشانی می‌شود. فلزی که ترانشه را بیش از حد پر می‌کند، بر روی عایق لایه نشانی می‌شود. سپس برای حذف فلز سنگین از روی عایق، از صیقل مکانیکی شیمیایی استفاده می‌گردد. در کارخانه گرافن نیز فرآیندهای مشابهی صورت می‌گیرد.

برای افزایش فعال‌سازی طرح‌های سازگار با مرحله‌ی پایانی تولید، باید محدودیت بالایی برای دمای مشخص شده تنظیم شود (میزان انرژی گرمایشی منتقل شده به ویفر در طول پردازش آن). با توجه به این نکته، هم برای لایه نشانی و هم برای انتقال مواد اتمی نازک، از ابتدا باید یک پروتکل کم دما ایجاد شود. از دیگر اهداف مرتبط با مرحله‌ی پایانی تولید (BEOL)، طراحی بسته‌بندی دستگاه الکترونیکی به صورتی است که امکان کپسوله سازی قطعات مدار مجتمع در وضعیت اتلاف گرما را فراهم نماید. در این صورت، تست قابلیت اعتماد را می‌توان هم برای دستگاه و هم برای بسته‌بندی آن اجرا نمود. دیگر نقطه عطف مهم از منظر یکپارچه سازی، شامل توسعه کیت طراحی فرآیند می‌باشد (مجموعه پروتکل‌های مدل‌سازی برای طراحی یک مدار مجتمع خاص). این کیت را شرکت‌هایی به وجود می‌آورند که در حوزه‌ی فناوری‌های خاصی کار می‌کنند و از آن برای پشتیبانی از طرح نهایی محصول استفاده می‌کنند، که نتیجه نهایی فرآیند طراحی و آماده برای تولید می‌باشد.

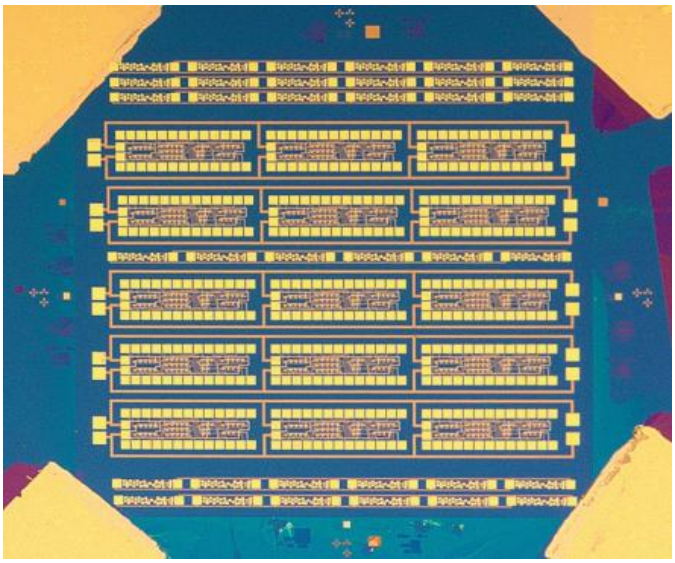
این فراخوان شرکتی در واقع شامل مجموعه‌ای از ملزومات تکنیکی با جزئیات از مراحل انتقال تا طراحی اتصالات پوشیده شده می‌باشد، که باید توسط داوطلبان پوشش داده شود تا فرآیند یکپارچه سازی بتواند از پس چالش‌های موجود مواد اتمی نازک برآید. میندا‌گاس لوکوسیوس، دانشمند محقق مواد در زمینه نوآوری میکروالکترونیک‌ها با کارآیی بالا می‌گوید: "این فراخوان عمومی، فرصتی ایده‌آل برای شناخت تلاش‌های صورت گرفته در جهت یکپارچه سازی گرافن با خط تولید CMOS و ارزیابی پتانسیل آن در پلتفرم ۲۰۰ میلیمتری با فناوری سیلیکونی است. تحولات ماژول پردازش، همچون ترکیب مواد سازگار با سیلیکون، لایه نشانی غیر مخرب مواد عایق و اتصالات صفحه گرافنی، و همچنین مجموعه کاملی از جنبه‌های مرتبط با یکپارچه سازی بر یک ویفر ۲۰۰ میلیمتری قابل بررسی هستند."

با اینکه تمامی این پروتکل‌ها در صنعت میکروالکترونیک‌های نیمه هادی رایج هستند، تبدیل بی‌نقص آن‌ها به یک پلتفرم جدید موادی مفهومی ناآشنا است. اما تضمین سازگاری کامل با فرآیندهای CMOS برای دستیابی به هدف اصلی انتقال

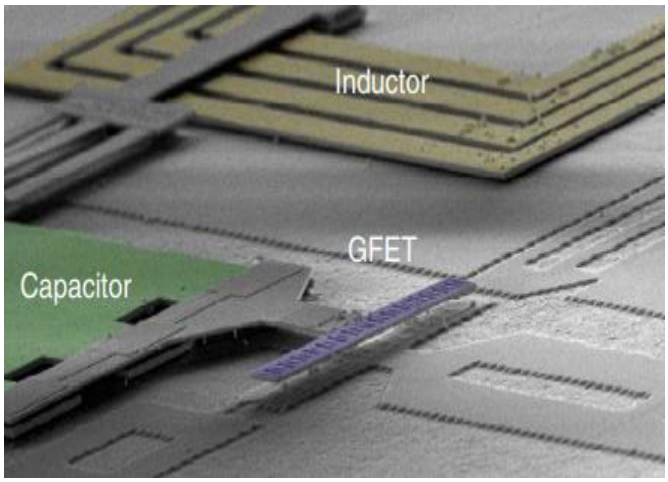
گرافن از آزمایشگاه‌های دانشگاهی به صنعت، مرحله ای مهم است که می تواند منفعتی چشم‌گیر بـرای جامعـه بـه همـراه آورد.

منبع

Milana, S. The lab-to-fab journey of 2D materials. Nat. Nanotechnol. 14 (2019) 919–921. https://doi.org/10.1038/s41565-019-0554-3



شکل ۱- یک ریزپردازنده کاملا کاربردی بر اساس مواد با ضخامت اتمی - پردازنده متشکل از ۱۱۵ ترانزیستور یکپارچه شده است.



شکل ۲- معماری چیپ. تصویر میکروسکوپ الکترونی از چیپ مبتنی بر ترانزیستورهای اثر میدانی گرافنی به عنوان یک گیرنده فرستنده رادیویی