بازخوانی کوتاه بر فیزیک گرافین[1]

رضا عسگری*

پیشرفت بشر و توسعه‌ی صنعت همواره بر پایه‌ی شناخت و کنترل مواد بوده است. از دوره‌های قبل از تاریخ، دوران سنگ، برنز و آهن، بشر همواره اطراف خود را جستجو می‌کرده است تا بتواند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از مواد اطراف استفاده‌ی مفید کند و زندگیِ راحت‌تر و بهتری داشته باشد.

در قرن بیستم پیشرفت در علمِ مواد بسیار چشم‌گیر و مهم بوده است. چنین جهش‌هائی اثر بسیار زیادی در زندگی روزمره‌ی ما دارد به‌طوری‌که تصور زندگی و دنیا بدون هواپیما، کامپیوتر و اینترنت بسیار سخت و دشوار است. لازم به ذکر است که چنین انقلابی با شناخت و پیشرفت فیزیک کوانتومی از اوایل قرن بیستم حادث شده است و فیزیک کوانتومی و شیمی اساس دانش ما در فهمیدن رفتار الکتریکی و ساختاری مواد است.

در نیمه‌ی دوم قرن بیستم سیلیسیوم پا به این عرصه گذاشت و تحولات اخیر مدیون نیم‌رساناهاست. کامپیوترهای فوق‌سریع و ارتباطات، هسته‌ی ارتباطی جامعه‌ی ما را می‌سازند که به‌سرعت در کل جهان گسترش یافته‌اند. علی‌رغم تحول عظیم در دوران سیلیسیوم، بر پایه‌ی نیم‌رساناهای سیلیسیوم، استفاده از آن در حال افول است. سیلیسیوم که اساسِ تمام قطعات الکترونیکی و تراشه‌های الکترونیکی است به علت افت‌وخیزهای حرارتی در ابعاد کوچکتر از ۱۰ nm قابل استفاده نیست و ساختار بلوری آن به حالتی بی‌شکل تبدیل می‌شود. علاوه بر این کاهش حجم میکروتراشه‌ها به نصفِ اندازه‌ی اولیه، نیاز به سرمایه‌گذاری ۱۰ برابر دارد که هزینه‌ئی بسیار بالاست [۱].

به نظر می‌آید که زیرساختارهای بر پایه‌ی کربن، مثلاً نوارهای گرافین، از نقطه‌نظر علم و فناوری برای گرفتن جای ترانزیستور اثر میدان اکسید-فلز-نیم‌رسانا (MOSFET) نقاط قوت بسیار زیادی دارند. دلایل زیادی برای این نتیجه‌گیری وجود دارد. اولاً از نقطه‌نظر دورنمای تاریخی، کربن عنصر بعدی برای میکروالکترونیک است. اولین ترانزیستور در دهه‌ی ۱۹۵۰ در آزمایشگاه بل بر پایه‌ی ژرمانیوم ساخته شد و کمی بعد، از سیلیسیوم با درجه‌ی خلوص بالا استفاده کردند. علت ترجیح Si به Ge این است که بعد از کمی فرآوری Si بسیار خالص‌تر از Ge به‌دست می‌آید که افت انرژی کمتری نسبت به Ge دارد و هزینه‌ی ساخت قطعات الکترونیکی با سیلیسیوم نیز بسیار کمتر از Ge است. با نگاهی سریع به ستون چهارم جدول تناوبی، مواد متحول‌کننده از پایین به بالای این ستون در حرکت بوده‌اند و حال نوبت اتم کربن است که تحول بزرگی ایجاد کند [۲].

حرکت به سمت بالا در ستون چهارم جدول تناوبی دلایل فیزیکی و شیمیایی مهمی دارد. مثلاً Si دارای ۸ الکترون بیشتر از کربن است که باعث می‌شود ابرِ الکترونی بزرگی در فرآیند برهم‌کنش کولنی نقش داشته باشد. به همین دلیل نوار شیمیایی Si ضعیف‌تر و کوچک‌تر از بلور کربن است و نقطه‌ذوب کربن (۳۵۰۰°C) بسیار بالاتر از نقطه ذوب Si (۱۷۰۰°C) است.

یکی دیگر از خصوصیات شیمیایی مهم اتم کربن تنوع ترکیبات آن است که شدیداً به ابعاد سیستم موردنظر وابسته است. تغییر در بُعد مؤثر، باعث تغییر خواص فیزیکی می‌شود و تغییر فیزیکی باعث تغییر خواص الکترونی و شیمیایی در اتم‌های کربن خواهد شد [۳].

بدون شک کربن عنصر اصلی حیات در کره‌ی زمین است و تمامی موجودات زنده از ترکیبات آلی (کربنی) تشکیل یافته‌اند. دسته‌بندیِ این ساختارهای متشکل از کربن از نظر ابعادی این سؤال را در ذهن محقق به‌وجود می‌آورد که چرا تاکنون ساختار دوبعدی کربن از دید آزمایشگران

* پژوهشکده‌ی فیزیک، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

به دور مانده است؟ در پی این سؤال این تفکر به‌وجود می‌آید که در صورت امکانِ وجود چنین ساختاری، چه خواصی خواهد داشت. پاسخ متداول به این سوال بیانی از قضیه‌ی مرمین و واگنر است که بنا بر آن نظم بلندبرد بلوری در دو بعد نمی‌تواند وجود داشته باشد که نتیجه‌ی ناپایداریِ ساختار بلور ایده‌ال دو بعدی در برابر برانگیختگی‌های فونونی سیستم است [۶،۵،۴]. این پاسخ نظری و هم‌چنین نبودِ امکانات بسیار پیشرفته‌ی آزمایشگاهی از قبیل میکروسکوپ نیروی اتمی که می‌توان در آن گرافیت را به صورت سوزن کاونده به‌کار برد، از عوامل اصلی دور از دست‌رس ماندن این ساختار دوبعدی تا سال ۲۰۰۴ میلادی است [۸،۷]. بدیهی است که دورازانتظار بودن وجود چنین ساختاری تنها علت این توجهات نبوده بلکه بسیاری از خواص الکترونیکی چنین ساختاری منحصربه‌فرد بوده و پیش‌بینی می‌شود که چنین خواصی موجب خواهد شد که به‌زودی ترانزیستورهای با پایه‌ی گرافین (تک‌لایه یا دو لایه، و یا ترکیبات آنها) جایگزین بسیار مناسبی برای انواع متداول امروزی شوند [۹]. از مهم‌ترین این خواص تحرک‌پذیری الکترونی بسیار بالاست که آزمایشات اخیر منجر به کشف چنین خواص بی‌همتایی شده است [۱۰]. گرافین (کربن دوبعدی) لایه‌ای از گرافیت به ضخامت یک اتم است که اتم‌های کربن روی شبکه‌ای لانه‌زنبوری (شش‌ضلعی منتظم) قرار گرفته‌اند . جالب است بدانیم این ماده‌ی تک‌اتمی همانند الماس در برابر تغییرمکان اتم‌ها در صفحه مقاوم است و دارای تحرک‌پذیری الکترونی حدود هزار برابر بیشتر از بهترین فلز در دمای اتاق است.

آزمایشگران تا کنون با استفاده از چندین روش، موفق به تولید گرافین شده‌اند. روش اول استفاده از گرافیت به عنوان سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی است که در واقع به‌طور شهودی ایجاد یک مداد در ابعاد نانومتری است. با کشیدن این نانومداد بر روی سطح منظم امکان بر جای ماندن تنها یک لایه در سطح این کریستال فراهم می‌شود که با روش‌های اپتیکی و با بهره‌گیری از اثر اپتیکی تک‌لایه‌ی گرافین روی سطح می‌توان آن را شناخت و کشف کرد. در چنین روش ساختی، گرافین تولیدشده می‌تواند ابعاد متنوعی در صفحه‌ی دوبعدی داشته باشد که دامنه‌ی تغییرات آن از چندین نانومتر تا چندین میکرومتر است. روش دیگر ساخت این نانوساختارِ دوبعدی رویاندن آن روی سطح است که دانشمندان تجربی در دانشگاه فناوری جورجیا در ایالات متحده، با این روش، موفق به ساخت چنین ساختاری شده‌اند. سؤال اساسی در هر آزمایش این است که آیا نمونه‌ی ساخته‌شده رفتار ویژه‌ی گرافین را داراست؟ برای این منظور گرافین حضور میدان مغناطیسیِ اعمال‌شده مورد آزمایش قرار می‌گیرد و مشاهده‌ی رفتار خاص الکترون‌ها دلیل بر وجود گرافین در ابعاد بزرگ است [۱۱].

از گرافین در زمینه‌های مختلف می‌توان بهره برد: یک زمینه‌ی خاص ابزارهای ذخیره‌کردن هیدروژن و باتری‌هاست؛ کاربرد گرافین در صنعت الکترونیک می‌تواند انقلاب الکترونیکی به راه بیاندازد چون با استفاده از گرافین می‌توان به ترانزیستورهای سریع‌تر و کوچک‌تر با مصرف انرژی کمتر و پراکندگی حرارتی بیشتر نسبت به ترانزیستور سیلیسیومی دست یافت [۱۲]؛ کاربردهای دیگر گرافین شامل ساخت آشکارگرهای شیمیایی و فیلم‌های شفاف رسانا برای استفاده در سلول‌های خورشیدی [۱۳] و ابزارهای بلور مایع است [۱۴]. توانایی آشکارگرهای شیمیایی به علت حساسیت فوق‌العاده‌ی گرافین در شناسایی تک‌مولکول‌هاست. صفحه‌های گرافین اصلاح‌شده‌ی شیمیایی، برای ساخت زیست‌ابزارهای تک‌باکتریایی DNA برچسب‌گذاری‌نشده استفاده شده‌اند [۱۵]. گرافین برای ساخت ابرخازن‌ها بسیار مناسب تشخیص داده شده است. هم‌چنین گرافین نویددهنده‌ی ایجاد سیگنال‌هایی با بس‌آمد تراهرتز است که خواص در خور توجهی برای فوتونیک دارد [۱۶].

پس از ساخته‌شدن گرافین در آزمایشگاه در سال ۲۰۰۴ به‌خاطر رفتار شگفت‌آور و غیرمعمول این سیستم دوبعدی و کاربردهای عملی بالقوه‌ی این ماده، تحقیقات گسترده‌ای بر روی این ماده صورت گرفته است. من نیز در پژوهشکده‌ی فیزیک پژوهشگاه دانش‌های بنیادی به فیزیک گرافین پرداخته‌ام که نتایج علمی آن به صورت بیش از ۲۵ مقاله‌ی علمی در مجلات خارجی و تعدادی دیگر در مجلات علمی داخلی به چاپ رسیده است [۱۷].

هدف اصلی ما دست‌یابی به فهم بهتر فیزیک برهم‌کنش‌های الکترون ـ الکترون در ساختارهای گرافین است و به این منظور از سه جنبه به مسئله نگاه کرده‌ایم: ۱) با دو نفر از دانشجویان دکترا خواص بس‌ذره‌ای الکترون‌های دیراک را مطالعه می‌کنیم. ۲) با یک پسادکترای پژوهشکده و یک همکار هیئت علمی و عضو پاره‌وقت پژوهشکده اثرات ناخالصی‌ها در انواع ساختارها را مطالعه می‌کنیم و ۳) با همکاری عضو پسادکترای پژوهشکده خواص مکانیکی و حرارتی گرافین را بررسی می‌کنیم. اهداف ما مطالعه‌ی

۱ ساختارهای تک‌لایه‌ای گرافین،

۲ ساختارهای دولایه‌ای گرافین،

۳ نوار باریک گرافین،

۴ نقطه‌های کوانتومی بر پایه‌ی گرافین،

۵ مطالعه‌ی وسیع خواص مکانیکی-حرارتی گرافین با رهیافت شبیه‌سازی،

۶ اسپینترونیک در گرافین،

۷ مطالعه‌ی اتصالات p-n و رفتار ترابردی آنها

است.

در کار تحقیقاتی اخیر که در شماره‌ی ۳۲۵ مجله *ساینس* (صفحه‌ی ۹۹۹) به چاپ رسید [۱۸] ما با اندازه‌گیری تابعِ طیفی حامل‌های بار در لایه‌ی گرافینِ تقریباً معلق، از راه طیف‌سنجی گسیل فوتونی با تفکیک زاویه‌ای (ARPES) و محاسبه‌ی نظری تابع بس‌ذره‌ایِ خود-انرژیِ حاصل از برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ایِ الکترون-الکترون و الکترون-فونون، نشان داده‌ایم در گرافینِ آلاییده، طیف خطی که از مدل ساده‌ی هامیلتونی به‌دست می‌آید[۲] برای توصیفِ کامل شبه‌ذرات کافی نیست. وجود شبه‌ذرات پلاسمارون

(شبه‌ذرات باردار مقیدشده به مُود دسته‌جمعیِ نوسانیِ الکترون‌ها)[۳] که در محاسبات ما پیش‌بینی شده بود به طور تجربی نیز تأیید شد. در نهایت چه به‌شکل تجربی و چه به‌شکل نظری نشان داده‌ایم که تک‌نقطه‌ی متعارف دیراک در فضای فاز، به نقطه‌ی تلاقی دیراک برای نوار انرژی شبه‌ذرات باردار، نقطه‌ی تلاقیِ نوار انرژی شبه‌ذرات پلاسمارون، و هم‌چنین حلقه‌ی بسته‌ای که بین نوارهای بار و پلاسمارون تشکیل می‌شود، تفکیک می‌شود.

پس از پیش‌بینی‌های اولیه‌ی نظریِ گروه ما [۱۹] تصمیم گرفته شد که نظریه به بوته‌ی آزمایش گذاشته شود از این رو پس از مشورت با گروه تجربی در برکلی که یکی از قوی‌ترین گروه‌های تجربی در دنیاست به بررسیِ مشکلات احتمالیِ آن نیز پرداختیم. یکی از مشکلات تجربی وجود احتمالیِ گاف انرژی در اثر برهم‌کنش الکترون‌ها در گرافین با اتم‌های ناهمگون زیرلایه بود که در این مورد به همراه یکی از دانشجویان دکترای خود (ایشان به‌تازگی فارغ‌التحصیل شدند) به‌طور جداگانه‌ای نشان دادیم که وجود زیرلایه، برهم‌کنش ذرات آزاد با مد نوسانی الکترون‌ها را مختل می‌کنند و بنابراین در چنین موادی شبه‌ذرات پلاسمارون تشکیل نمی‌شود [۲۰]. در طراحیِ آزمایشی که از حدود یک‌ونیم سال پیش در دانشگاه برکلی آمریکا آغاز شد، تلاش کردیم صفحه‌ی گرافین تا حد امکان از زیرلایه‌ی خود جدا باشد. گروه تجربی با ایده‌ی بسیار جالبی توانست گرافینِ تقریباً معلق بسازد که قابلیت اندازه‌گیری تابع طیفی را داشته باشد.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد [۱۸] که اولاً تصور قبلی ما از گرافین کامل نبود و حال شناخت درست‌تری از ماهیت اصلیِ الکترون‌ها در گرافین داریم، و دوم اینکه دریچه‌ی جدیدی از کاربردهای بیشتر گرافین به روی دانشمندان گشوده شد. به‌طور مثال گرافین را با چنین خصوصیات جدیدی می‌توان در صنعت فوتونیک برای ساخت لیزرهایی با بس‌آمد تراهرتز به‌کار گرفت. در حقیقت با به‌کارگیریِ شبه‌ذرات پلاسمارونی می‌توان ادوات بسیار ریزی ساخت که از ویژگی‌های الکترونی و فوتونی هم‌زمان پیروی می‌کند و بدون شک این مهم، تحول عظیمی در صنعت، ارتباطات راه دور، کامپیوترهای نسل آینده که بر مبنای محاسبات کوانتومی کار می‌کنند و صنعت الکترونیک‌ـفوتونیک خواهد داشت.

بنابراین بر اساس نتایج به‌دست آمده در این مقاله، ما گرافین را به صورت نامزد بسیار خوبی برای هم‌بستگی بین صنعت فوتونیک و الکترونیک بر اساس شبه‌ذرات پلاسمارونی مطرح کرده‌ایم.

آنچه از دورنمای این ماده جدید قابل درک است استفاده وسیع آن در صنعت فوتونیک است که هم‌اکنون IBM سرمایه‌گذاری وسیعی را در جهت تحقیقات تکمیلی آن اختصاص داده است.

یادداشت‌ها

۱. به‌نظر ویراستار تلفظ صحیح این واژه با توجه به کلمات ethane و ethene و ethyne که در فارسی به‌ترتیب اتان، اتِن، و اتین تلفظ می‌شوند، باید گرافِن باشد. اما نویسنده‌ی مقاله اصرار به استفاده از تلفظ انگلیسیِ کلمه داشتند که ما پذیرفتیم.

۲. منظور رابطه‌ی پاشندگی خطی است که به‌صورت دو مخروط سربه‌سر قرار گرفته‌اند و دانشگران همیشه فکر می‌کردند در حضور برهم‌کنش کولنی بین ذرات تغییر نمی‌کند.

۳. حامل بار معمولاً به ذره‌ی متحرک دارای بار الکتریکی اطلاق می‌شود. گروهی از پدیده‌های مستقل با نوعی از ذرات منفرد (شبه‌ذرات) توصیف می‌شوند که نماینده‌ی ترکیب حامل بار با تأثیرات موضعی محیط اطراف هستند.

مراجع

1. **H. Castro Neto**, Material Today **13** (2010), 1.
2. *The international technology roadmap for semicondutors (ITRS)* www.itrs.net .
3. **A. H. Castro Neto** *et al.*, Rev. Mod. Phys. **81** (2008), 109.
4. **L. D. Peierls**, *Quelques proprietes typiques des corpses solides*, Ann. I. H. Poincare **5** (1935), 177.
5. **L. D. Landau**, **E. M. Lifshitz**, *Statistical Physics*, Part I, Pergamon Press, Oxford (1980).
6. **D. R. Nelson**, **T. Piran**, **S. Weinberg**, Eds., *Statistical Mechanics of Membranes and Surfaces*, World Scientific, Singapore (2004).
7. **L. S. Novoselov** *et al.*, Science **22** (2004) 666; **K. S. Novoselov** *et al.*, Nature **438** (2005), 197.
8. **Y. Zhang**, **U. W. Tan**, **H. L. Stormer**, **P. Kim**, Nature **438** (2005), 10.
9. **Y. M. Lin**, **C. Dimitrakopoulos**, **K. A. Jenkins**, **D. B. Farmer**, **H. Y. Chiu**, **A. Grill**, **Ph. Avouris**, Science **324** (2010), 1530.
10. **A. K. Geim**, Science **324** (2009), 1530.
11. **K. S. Kim**, *et al*, Nature **457** (2009), 706.
12. **Ravi Prasher**, Science **328** (2010), 185.
13. **T. O. Wehling**, *et al*, Nano Lett., **10** (2010), 420.
14. **Peter Blake**, *et al*, Nano Lett., **8** (2008), 1704.
15. **Henk W. Ch. Postma**, Nano Lett., **10** (2010), 420.
16. **F. Bonaccorso**, **Z. Sun**, **T. Hasan**, **A. C. Ferrari**, http://arxiv.org/abs/1006.4854 (2010).
17. See http://www.ipm.ac.ir/personalinfo.jsp?PeopleCode=IP030004#papers .
18. **A. Bostwick**, **F. Speck**, **T. Seyller**, **K. Horn**, **M. Polini**, **R. Asgari**, **A. H. MacDonald**, **E. Rotenberg**, Science **328** (2010), 999.
19. **M. Polini, R. Asgari, G. Borghi, Y. Barlas, T. Pereg-Barnea** and **A. H. MacDonald**, Phys. Rev. B (R) **77**, 081411(2008).
20. **A. Qaiumzadeh** and **R. Asgari**, New J. Phys. **11**, 095023(2009).