

نقص‌های سیلیسیوم کربید و نوید کیوبیت‌های مناسب برای ساخت ابزار/ آشلی جی. اسمارت

منبع: Physics Today (January 2012) 10-11.

تراشه‌های تجاری این نیم‌رسانای پراستفاده
حالت‌های اسپین خاصی در بر دارند که
به آسانی در دمای اتاق و به شکل هم‌دوس
قابل کنترل است.

عنصر اصلی در هر طرح برای محاسبات کوانتومی سیستم دوحالتی شبیه به اسپین الکترون است. طی محاسبه‌ی کوانتومی، حالت کیوبیت دست‌خوش تغییرات گوناگون می‌شود و هنگامی که محاسبه به آخر می‌رسد باید حالت کیوبیت معلوم شود یعنی معلوم شود که اسپین حالت رو به «بالا»ست یا «پایین». از بخت بد، کیوبیت با محیط نیز برهم‌کنش دارد که می‌تواند حالت کوانتومی‌ش را نابود یا ناهم‌دوس کند. مناسب بودن کیوبیت برای محاسبه‌ی کوانتومی نیاز به آن دارد که کیوبیت در زمانی که محاسبه و تغییرات حالت کوانتومی در جریان است در برابر ناهم‌دوسی مقاوم باشد. تاکنون چندین سیستم برای این منظور در نظر گرفته شده‌اند از جمله پیوندگاه‌های جوزفسون (فیزیکس تودی، ژوئیه‌ی ۲۰۰۹، صفحه‌ی ۱۹) و نقطه‌های کوانتومی (فیزیکس تودی، مارس ۲۰۱۱، صفحه‌ی ۱۹). اما تقریباً دمای همه‌ی سیستم‌های حالت جامد که به‌این منظور پیش‌نهاد شده‌اند باید به دماهای زم‌ایشی رسانده شود تا زمان هم‌دوسی مناسب به‌دست دهند.

ناخالصی الماس در مقیاس اتمی معروف به مرکز NV^۱ یک استثناست. در این نوع ناخالصی یک تهی‌جا^۲ و یک اتم نیتروژن به‌جای دو اتم همسایه می‌نشینند. حالت اسپین الکترون مرکز NV در دمای اتاق می‌تواند بیش از یک میلی‌ثانیه هم‌دوس بماند و می‌توان آن را با میکروموج دست‌کاری کرد و با فلئورسانسی معمولی حالت را معلوم کرد.

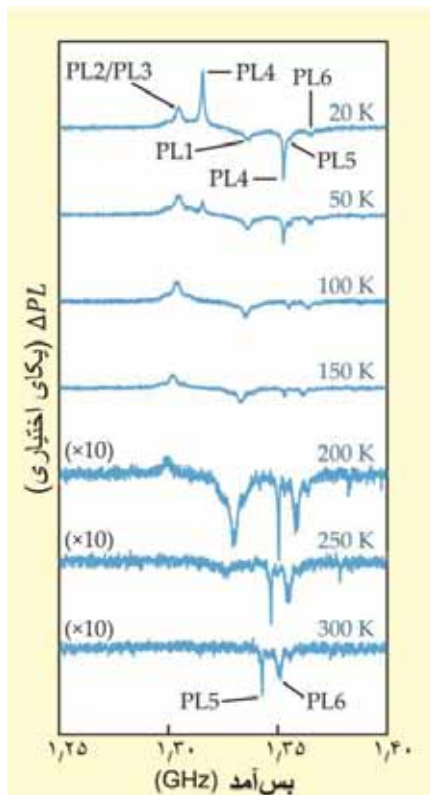
از این رو مرکز NV در الماس به‌دلایل زیاد کیوبیت ایده‌آل است اما هنوز نتوانسته طرح‌های محاسبات کوانتومی را از محدودیت‌های زم‌زا خلاص کند. مهم‌ترین دلیل، مشکلی عملی‌ست: در محاسبات کوانتومی نیاز به رودررو کردن

کیوبیت‌ها با یک‌دیگر از راه گیت‌های منطقی و همچنین ارتباط دادن آنها با شمار زیاد ابزارهای جانبی‌ست. الماس را نمی‌توان با روش‌های ساده و ارزان در چنین ابزارهای پیچیده‌ئی ادغام کرد. اما چه چیز الماس را ویژه می‌کند؟ سال پیش پژوهشگران دانشگاه کالیفرنیا در سانتا باربارا (UCSB)^۳ به رهبری دیوید آوشالوم^۴ و کریس وان‌دوال^۵ این را از خود پرسیدند [۱]. پهنابودن شکاف نوار نسبت به اختلاف انرژی حالت‌های الکترونی پایه و انگیخته‌ی مرکز NV یکی از این ویژگی‌هاست. این پهنای امکان می‌دهد مرکز NV نهفته در الماس را با روش‌های فلئورسانسی کاوید بی‌آن که الکترون وارد کپه‌ی الماس شود و از دست برود. علاوه بر این جفت‌شدگی ضعیف اسپین-مدار در الماس و اسپین صفر بیشتر هسته‌های اتم کربن اثر محیط را بر حالت کیوبیت کمینه می‌کند.

گروه پژوهشی UCSB متوجه شدند که این خصوصیت‌ها منحصر به الماس نیست و جست‌وجو برای یافتن مواد دیگری که بتوانند میزبان این کیوبیت‌های دراززی^۶ باشند آغاز کردند. اینک آنها درون تراشه‌های معمولی سیلیسیوم کربید که در الکترونیک پرتوان فراوان کاربرد دارد نامزدهای نویدبخشی یافته‌اند [۲]. گرچه هنوز روشن نیست که کیوبیت‌های تازه‌یافته همه مراکز NV باشند اما همه‌شان نقص‌هایی در مقیاس اتمی هستند و دو نوع‌شان در دمای اتاق حالت‌های اسپینی دراززی دارند.

در جست‌وجوی نقص‌ها

سیلیسیوم کربید جانشین طبیعی الماس است؛ در جدول تناوبی Si درست زیر C است و ساختار و خواص الکترونیکی دو ماده مشابه است. اما محاسبات کتی تیم پژوهشی نشان داد که مرکز NV در دو ماده یک فرق اساسی خواهد داشت: پیش‌بینی شد که فاصله‌ی بین تراز پایه و تراز انگیخته‌ی NV در SiC حدوداً نصف این فاصله در الماس باشد بنابراین در حالی که نقص‌های الماس در طول موج‌های مرئی فلئورسان می‌شوند انتظار می‌رفت که نقص‌های NV در



شکل ۱- میکروموج‌دهی به نمونه‌ی سیلیسیوم کربید باعث تغییر زیاد شدت نورخشان‌ی P در بس امدهای تشدید اسپین شش نقص (PL1-PL6) می‌شود. (شکافگی بر خاسته از برهم‌کنش اسپین-اسپین در نقص متناظر با PL4 منجر به دو بس آمد تشدید برای آن نقص شده است. سیگنال‌های تشدید اسپین با افزایش دما ضعیف می‌شوند اما سیگنال‌های PL5 و PL6 تا دمای اتاق دوام می‌آورند. (بر گرفته از مرجع ۲ با برخی تغییرات)

فروسرخ نزدیک فلئورسان شوند. در واقع در آزمایش در طیف فلئورسانسی نمونه‌های SiC شش خط گسیل تیز با طول‌موج‌های ۱۰۳۵ تا ۱۱۳۵ نانومتر مشاهده شد. معلوم شد خاستگاه چهار قله که PL۱ تا PL۴ نامیده شدند مرکز NV نیست بلکه نقص دیگری معروف به تهی‌جای دوتایی، یعنی نبود زوج اتم‌های C و Si در جایگاه‌های همسایه، است. دو قله‌ی دیگر PL۵ و PL۶ بیش از این آشکار نشده بودند و نقص‌هایی که خاستگاه آنان است شناسایی نشده‌اند.

چه‌گونه دو تهی‌جای (یعنی کمی هیچ) را می‌توان کیوبیت انگاشت؟ در واقعاً کیوبیت را مجموع اتم‌ها در همسایگی تهی‌جای

ماده‌ای انجام دهید که تاکنون برای الکترونیک در بس‌آمدهای مخابرات راه دور به کار می‌رفته است - و هم‌چنین در دمای اتاق.»

پِرگ وراشتروپ^۱ (دانشگاه اشتوتگارت، آلمان) که دست‌کاریِ اسپینِ تک‌نقص را در الماس آغاز کرد برای نقص‌های SiC کاربردهای بالقوه‌ای فرای محاسبات کوانتومی می‌بیند. او اشاره می‌کند که این نقص می‌تواند به‌صورت مغناطیس‌سنج فوق حساس عمل کند (فیزیکس تودی، اوت ۲۰۱۱، ص ۱۷) وراشتروپ می‌گوید: «می‌توانم روزی را تصور کنم که بلورهای بسیار کوچک سیلیسیوم کربید کار تصویرسازی از یاخته‌های و دیگر سیستم‌های زیست‌شناختی را به‌روش تشدید مغناطیسی در مقیاس میکرون و نانومتر انجام دهند. چنین چیزی درها را به روی کاربردهای علمی باز خواهد کرد که خودشان دنیای جدیدی خواهد بود.»

Silicon carbide defects hold promise for device-friendly qubits
Ashley G. Smart

مترجم: نادر حیدری

[1] J. R. Weber et al., Proc Natl. Acad. Sci., USA 107 (2010) 8513.
[2] W. F. Koehl et al., Nature 479 (2011) 84.

1. NV center
2. vacancy
3. University of California at Santa Barbara
4. David Awschalom
5. Chris Van de Walle
6. long-lived
7. photoluminescence
8. probe
9. entanglement
10. Jörg Wrachtrup

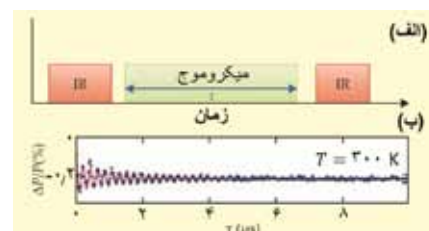
مجموعه نقص را قطبیده کرده‌اند، با تپ میکروموج همه‌ی اسپین‌های این مجموعه را چرخانده‌اند، و نوسانات در راستاگزینیِ اسپین را با کاوندی فلونورسانی آشکار کرده‌اند. با اعمال دنباله تپ‌های پیچیده‌تر آنها نشان دادند که می‌توانند اسپین‌ها را در نمونه‌های خنک‌شده به مدت ۱۰۰ میکروثانیه و در دمای اتاق به مدت ۴۰ میکروثانیه به شکل هم‌دوس کنترل کنند. اگر اسپین نقص‌های SiC را بتوان با همان سرعت که برای مراکز NV در الماس ممکن است وارون کرد (تقریباً یک بار در هر نانوثانیه) آن‌گاه هر کیوبیت SiC می‌تواند در دمای اتاق هزارها عمل در محاسبه‌ی کوانتومی را دوام بیاورد.

در همه آزمایش‌های تیم پژوهشی، مجموعه‌های نقص نقش داشته‌اند؛ نمونه‌های SiC میلی‌متری حدود ۱۰۰ نقص در هر میکرون مکعب دارد. نکته‌ی حیاتی برای اثبات این که اسپین نقص‌ها را می‌توان به‌صورت کیوبیت به کار برد این است که نشان داده شود هر اسپین را می‌توان به تنهایی کنترل کرد. یکی از چالش‌ها به گفته‌ی آوشالوم آشکار کردنِ گسیل تک فوتون است. در طیف مرئی این کار نسبتاً سراسر است اما برای فروسرخ کار مشکل‌تر است. در این باره پژوهشگران با NIST در بولدر کلرادو آغاز به همکاری کرده‌اند. هم‌چنین برای دست‌یابی به ابزار کوانتومی نیاز است نشان داده شود که درهم‌تافتگی^۹ بین کیوبیت‌های متعدد و ادغام آنها با ساختارهای فوتونیک، الکترونیک، و میکرومغناطیسی ممکن است.

این که نقص‌های SiC تابش فروسرخ گسیل می‌کنند در نهایت ممکن است مزیتی مهم باشد. آوشالوم می‌گوید: «معنی‌ش این است که می‌توانید دست‌کاری کوانتومی را در همان

می‌سازند. الکترون‌هایی که در بلور کامل در بند Si یا C می‌بودند زوج‌ناشده می‌مانند و در تهی‌جای دوتایی جای می‌گزینند. مانند مرکزهای NV، حالت اسپینی این الکترون‌ها و همین‌طور حالت‌های اسپینی نقص‌های هنوز شناسایی نشده را می‌توان از راه فلونورسانی اپتیکی اندازه گرفت و خواند. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد قراردادن SiC تحت تابش میکروموج باعث افزایش زیاد شدت نوررخشانی^۷ در بس‌آمدهای تشدیدی اسپین نقص‌ها می‌شود. گرچه سیگنال‌های تشدیدی اسپین در اثر افزایش دما ضعیف می‌شوند، قله‌های متناظر با PL۵ و PL۶ تا K۳۰۰ بر جای می‌مانند بنابراین حالت اسپین این نقص‌ها را در دمای اتاق نیز می‌توان خواند.

مانند مراکز NV در الماس، راستای اسپین نقص‌های SiC را هم با روش‌هایی که از تشدید مغناطیسی هسته‌ای به عاریت گرفته شده است می‌توان تغییر داد. شکل ۲ یک نمونه را نشان می‌دهد: پژوهشگران با تپ فروسرخ اسپین‌های یک



شکل ۲ - کنترل هم‌دوس: اعمال دنباله تپ‌های (الف) - تپ فروسرخ، سپس تپ میکروموج به زمان T میکروثانیه و به دنبال آن تپ فروسرخ دوم - به نمونه‌ی سیلیسیوم کربید، اسپین نقص‌ها را قطبیده می‌کند، می‌چرخاند، و سپس منجر به گسیل نوردرخشش می‌شود که اطلاعاتی در باره راستاگزینی نهایی اسپین‌ها دارد. تکرار این دنباله تپ‌ها به ازای T های مختلف داده‌ها (نقاط آبی) و منحنی برازیده (خط سرخ) (ب) را به دست می‌دهند. از نوسان‌های شدت نوردرخشش، P ، بر می‌آید که اسپین مجموعه اسپین‌ها به شکل هم‌دوس دوران می‌کند. داده‌ها نوسان‌های مربوط به یکی از نقص‌های شناسایی نشده‌ی سیلیسیوم کربید را نشان می‌دهد [برگرفته از مرجع ۲].

شرایط اشتراک نسخه‌ی چاپی یا الکترونیک «فیزیک روز» در وبگاه آمده است.

www.psimag.ir