Scientific-Research Quarterly Journal of Technical Science
Khatam Al-Nabieen University
Volume 1, Issue 1, Winter 2024

Quantum nanophotonics and quantum computing: prospects, challenges, proposals

Reza Ebrahimi[1]

Abstract
In this article, the link between nanophotonics and the science of quantum technologies is considered. Such an interdisciplinary approach may serve as a starting point for the development of breakthrough technologies. Several new directions, including strong light-matter coupling, topological photonics, metasurfaces and photon sources, and suspended optomechanics have been addressed in quantum nanophotonics. We hope that this review will foster an enhanced interaction between the nanophotonics and quantum science communities. Such synergy leads to the realization of new communication, sensory and information processing systems. In this article, explanations are given about quantum computing and the applications of computing in various fields, quantum optics, quantum telecommunications, and after introducing Rydberg atoms and their properties, the progress made in the construction of Rydberg quantum computers in the atomic network is reviewed. Then, the application of Rydberg atoms in quantum optics and its use in the production of a single-photon source and a two-photon gate are presented. In the last part of the article, suggestions are also given.

Keywords: nanophotonics, quantum technologies, quantum computing, quantum optics, quantum telecommunications.

[1] Nanophotonics engineering master student, University of Tehran, Tehran, Iran

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

فصلنامه علمی - تحقیقی علوم فنی
دانشگاه خاتم‌النبیین(ص)
سال اول ، شماره‌ی اول، زمستان ۱۴۰۲
صفحه ۱۲۴-۱۰۵

نانوفوتونیک کوانتومی و محاسبات کوانتومی: چشم انداز، چالش‌ها، پیشنهادات

رضا ابراهیمی[۱]

چکیده

در این مقاله پیوند نانوفوتونیک و علم فناوری‌های کوانتومی در نظر گرفته شده است. این رویکرد میان رشته‌ای ممکن است به عنوان نقطه شروعی برای توسعه فناوری‌های پیشگامانه عمل کند. چندین جهت جدید از جمله جفت شدن قوی نور و ماده، فوتونیک توپولوژیکی، فراسطح‌ها و منابع فوتون و اپتومکانیک معلق در نانوفوتونیک کوانتومی مورد توجه قرار گرفته است. امیدواریم این بررسی تعامل تقویت شده بین جوامع نانوفوتونیک و علوم کوانتومی را تقویت کند. این هم‌افزایی منجر به تحقق سیستم‌های ارتباطی، حسی و پردازش اطلاعات جدید می‌شود. در مورد محاسبات کوانتومی و کاربردهای محاسبات در حوزه‌های مختلف، اپتیک کوانتومی و مخابرات کوانتومی توضیحاتی داده شده است و بعد از معرفی اتم‌های ریدبرگی و خواص آن‌ها، پیشرفت‌های حاصل شده در ساخت رایانه‌های کوانتمی‌ریدبرگی در شبکهٔ اتمی‌بررسی می‌شود. سپس کاربرد این اتم‌ها در اپتیک کوانتمی‌و بهره‌گیری از آن در تولید چشمهٔ تک‌فوتون و دروازه دوفوتونی ارائه می‌شود. در بخش آخر مقاله نیز پیشنهاداتی در چشم‌انداز آینده داده می‌شود.

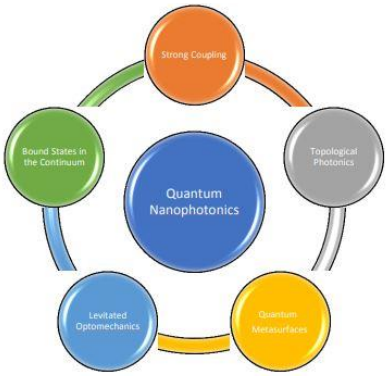
واژگان کلیدی: نانوفوتونیک، فناوری‌های کوانتومی، محاسبات کوانتومی، اپتیک کوانتومی، مخابرات کوانتومی.

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فوتونیک گرایش نانوفوتونیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

۱. مقدمه

فناوری‌های کوانتومی مدرن تغییر بزرگی برای متحول کردن صنعت فعلی ایجاد می‌کنند. این فناوری شامل ارتباطات ایمن، اندازه‌گیری‌های بسیار ظریف، اندازه‌شناسی و محاسبات است. همه این‌ها به دلیل کاوش ویژگی‌های غیرکلاسیک سیستم‌های ویژه آماده شده، امکان پذیر شده است.(Huang et al., 2020) در بیشتر موارد این سیستم‌ها کاملا شکننده بوده و مانند دماهای برودتی برای نشان دادن و حفظ خواص کوانتومی به شرایط خاصی نیاز دارند. نانوفوتونیک یک پلتفرم جذاب برای درک ویژگی‌های کوانتومی مختلف با نور ارائه می‌دهد. نانوفوتونیک کوانتومی یکی از زمینه‌های در حال توسعه است که چگونگی برهمکنش نور با اتم‌ها، مولکول‌ها و ساختارهای مصنوعی را بررسی می‌کند.(So et al., 2020) این سیستم بر تولید، انتشار، دستکاری و تشخیص نور با استفاده از مهندسی و کنترل منسجم سیستم‌های کوانتومی تمرکز دارد که امکان کاوش در جنبه‌های اساسی فیزیک کوانتومی را فراهم می‌کند، در حالی که سیستم‌های کوانتومی موجود را به رژیم‌های جدید سوق می‌دهد. در این مقاله پیشرفت‌های اخیر نانوفوتونیک برای کاربردهای فناوری کوانتومی را پوشش می‌دهیم. این مطالعه شامل اتصال قوی ریزحفره‌های پلاسمونیک، دی الکتریک و مواد دی‌کالکوژنید فلزات واسطه دوبعدی، ساطع‌کننده‌های کوانتومی (اتم‌ها، مولکول‌ها، نقاط کوانتومی و غیره) و حالت‌های محدود در پیوستار، فوتونیک توپولوژیکی، متاسورفای کوانتومی است. هدف ما نشان دادن تطبیق‌پذیری پلتفرم نانوفوتونیک برای اکتشاف اثرات کوانتومی اساسی و توسعه کاربردهای کوانتومی در دنیای واقعی است. ما معتقدیم که نانوفوتونیک نقش مهمی‌در توسعه فناوری‌های کوانتومی پیشرفته داشته باشد.



شکل 1: روند نانوفوتونیک کوانتومی

نانوفوتونیک ابزارهای جدیدی را برای دستکاری توزیع میدان الکترومغناطیسی فراهم می‌کند. این امکان، کنترل موثر چگالی نوری حالت‌ها را فراهم می‌کند. به طور معمول، محصور شدن قوی میدان الکترومغناطیسی در مقیاس نانو با چگالی نوری بالاتر مطابقت دارد. چنین محصور شدن در فضای آزاد معمولاً از نظر پراش محدود است و نمی‌تواند کوچکتر از کسری از طول

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

موج باشد. درک محدودیت نور شدید برای فعال کردن برهمکنش نور-ماده با اتم‌ها و مولکول‌ها ضروری است.(Jang et al., 2023) از آنجایی که سیستم‌ها متشکل از نانوحفره و اتم‌ها یا مولکول‌های منفرد بسیار کوچک هستند، باید آن‌ها را به عنوان سیستم‌های کوانتومی در نظر گرفت و در بسیاری از موارد تقریب دوسطحی به اندازه کافی خوب است. در حالی که نور هنوز می‌تواند به صورت کلاسیک درمان شود. طبق این توصیف اتم‌ها و مولکول‌ها می‌توانند نور را با فرکانس‌های نزدیک به اختلاف انرژی دو سطح جذب یا منتشر کنند. معمولا انتشار در فضای آزاد خود به خود اتفاق می‌افتد و فقط به ویژگی‌های سیستم کوانتومی بستگی دارد. در سال ۱۹٤٦، پورسل بیان کرد که نرخ انتشار خود به خودی را می‌توان با قرار دادن یک سیستم کوانتومی در یک حفره یا نزدیک سطح با بازتاب بالا تغییر داد.(Huang et al., 2020) در واقع برای ساطع کردن نور، سیستم کوانتومی باید بتواند با حالت‌های نوری موجود جفت شود. به نظر می‌رسد که چگالی نوری حالت‌های حفره در مقایسه با فضای آزاد کاملا متفاوت است. بنابراین می‌توان با کنترل چگالی نوری حالت‌ها نرخ انتشار را افزایش یا کاهش داد. این درک در نهایت زمینه جدیدی از الکترودینامیک کوانتومی حفره (c-QED) را به وجود آورد.(Horiuchi, 2013) در اینجا تشدیدگرهای نوری برای تعدیل قدرت جفت‌شدن نور و ماده استفاده می‌شوند. از آنجایی که اندازه تابشگرهای کوانتومی بسیار کوچکتر از طول موج عملیاتی است، برهمکنش نور و ماده نسبتا ضعیف است و با حجم حالت الکترومغناطیسی که از نظر پراش محدود است نسبت معکوس دارد؛ بنابراین برای تقویت یکی شدن، حجم حالت باید کاهش یابد. برای دستیابی به این هدف حفره‌های باکیفیت و نانوساختارهای پلاسمونیک به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در یک کار پیشگام توسط هاروچ و همکارانش در سال ۱۹۸۳ یک حفره مایکروویو با کیفیت بالا و مجموعه‌ای از اتم‌های ریدبرگ برای دستیابی به رژیم جفت قوی استفاده شد.(de Abajo) در محدوده مرئی نانوذرات طلا با شکاف زیر نانومتری اجازه ایجاد یک کانون زیرموج میدان نزدیک با چندین مرتبه افزایش چگالی نوری حالت‌ها را می‌دهد. در چنین مقیاس‌های طولی و سطوح توان، اثرات تونل‌زنی غیرمحلی و کوانتومی ممکن است بر تعامل تابش‌دهنده با حالت پلاسمونیک تاثیر بگذارد و نیاز به توصیف کاملا کوانتومی نور دارد.(Wu, 2023) اخیرا به طور تجربی مشاهده شد که یک مولکول منفرد که به یک حفره پلاسمونیک جفت شده است علائمی‌از اختلاط قوی حالت‌های نوری و اکسایتون را حتی در دمای اتاق نشان می‌دهد. در چنین رژیم‌های جفت شدن قوی، تبادل نوسانی بین سیستم کوانتومی و نور وجود دارد که به نوسانات رابی خلاء معروف است که با نرخ متناسب جفت می‌توان آن را در هر دو طیف پراکندگی و نورتابی مشاهده کرد. در رژیم جفت قوی، تمام تلفات دیگر باید ناچیز باشد. این نشان می‌دهد که برهمکنش نور-ماده انسجام را حفظ می‌کند که امکان توسعه سیستم‌های نوری فعال کم مصرف را فراهم می‌کند و به طور گسترده با استفاده از سیستم‌های نیمه‌هادی و نقاط کوانتومی مورد مطالعه قرار گرفته است.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

کاربردهای بالقوه شامل نانولیزرها، حسگر حفره‌ای تقویت‌شده، ارتباطات نوری کوانتومی دمای اتاق و محاسبات، منابع تک‌فوتونی بیان شده است. همچنین بستری برای برهمکنش موثر فوتون–فوتون فراهم می‌کند. یکی از سوالات باز و هیجان‌انگیز مربوط به امکان اصلاح خواص شیمیایی برخی از مواد با قرار دادن آن‌ها در حفره‌های نوری تحت شرایط برهمکنش قوی نور–ماده است. مطالعات نظری و تجربی اخیر شواهد خاصی از تغییرات انتقال انرژی، انتقال بار، فتوشیمیایی و سینتیک حالت پایه را نشان می‌دهند.(Wu, 2023)

۲. مخابرات کوانتومی

انتقال حالت کوانتومی از یک نقطه به نقطه دیگر را مخابرات کوانتومی گویند. در مخابرات کوانتومی، اطلاعاتی که باید مخابره شوند، روی فوتون‌هایی سوار می‌شوند که هم می‌توانند در فضای آزاد و هم از طریق فیبرهای نوری کم‌اتلاف ارسال شوند. ایجاد، کنترل و اندازه‌گیری اسپین در ساختارهای نانو امکانات جدیدی برای الکترونیک و پردازش اطلاعات از جمله محاسبات و مخابرات کوانتومی فراهم می‌کند. بنیان‌ها و مفاهیم اساسی مخابرات کوانتومی شامل اطلاعات کوانتومی، در هم تنیدگی کوانتومی و تله‌پورت کردن ارائه می‌شود.(Savaresi et al., 2023)

در مخابرات کوانتومی پرتوهای نوری دربردارنده فوتون‌های در هم تنیده هستند، به طوری که صرف نظر از فاصله، اندازه‌گیری فوتونی در یك پرتو، بر اندازه‌گیری‌های زوج فوتون در هم تنیده آن در پرتو دیگر تاثیر می‌گذارد.(Savaresi et al., 2023) اطلاعات را می‌توان روی سیستم‌های کوانتومی نظیر اتم‌ها، فوتون‌ها و ... ذخیره و پردازش کرد. پردازش اطلاعات کوانتومی با پـردازش اطلاعات کلاسیك متفاوت است، زیرا در حالت کوانتومی باید همدوسی کوانتومی در ذخیره‌سـازی و پردازش اطلاعات حفظ شود. عضو اصلی اطلاعات در سیستم‌های کوانتومی بیت کوانتومی یا کیوبیت است.(Savaresi et al., 2023)

۳. اطلاعات کوانتومی

تفاوت اساسی مخابرات کوانتومی در مقایسه با مخابرات کلاسیك نوع اطلاعات مخابره شونده است. در مخابرات کوانتومی اطلاعات در حالات کوانتومی قرار دارند و اساس مخابرات کوانتومی ارسال و دریافت این حالات کوانتومی است. از حالات کوانتومی که در مخابرات کوانتومی قابل استفاده هستند می‌توان به اسپین الکترون و پلاریزاسیون فوتون اشاره کرد. در گیرنده و فرستنده سیستم مخابرات کوانتومی نیازمند پردازش اطلاعات کوانتومی هستیم. برای این منظور متناظر با حالت کلاسیك در پردازش اطلاعات کوانتومی نیز گیت‌های کوانتومی تعریف می شوند.(Horiuchi, 2013) در ادامه علاوه بر مرور مختصری بر مفهوم بیت‌های کوانتومی، گیت‌های کوانتومی نیز معرفی می شوند.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

٤. گیت‌های کوانتومی

در بحث پردازش اطلاعات کوانتومی چهار گیت اصلی وجود دارد که تمام پردازش‌های کوانتومی به وسیله این چهار گیت قابل پیاده‌سازی هستند.

- ۱) گیت CNOT
- ۲) گیت‌هادامارد
- ۳) گیت انتقال فاز
- ٤) گیت چرخش

٥. درهم تنیدگی کوانتومی

انیشتین در سال ۱۹۳۵ به منظور ناقص نشان دادن توانایی واقع‌نمایی نظریه مکانیك کوانتومی با کمك دو تن از شاگردان خود آزمایش فکری مشهوری (EPR) را طراحی کرد که در تحولات بعدی فیزیك جدید در قرن بیستم تاثیر بسزایی داشت. در این آزمایش فرض می‌شد که دو سیستم کوانتومی نظیر دو فوتون در یك محیط عایق شده و مجزا از تاثیرات بیرونی با هم اندرکنش انجام می‌دهند و سپس از هم دور می‌شوند. تا زمانی که این دو فوتون در شرایط انزوا از محیط بیرون باقی بمانند، هر اندازه هم که فاصله میان آن دو زیاد باشد باز هم یك سیستم واحد به شمار می‌آیند، به طوری که اگر یکی از دو فوتون برای شناسایی یکی از برخی از مشخصه‌های آن اندازه‌گیری شود، آزمایشگر می‌تواند بدون آنکه به فوتون دوم دسترسی مستقیم داشته باشد اطلاعات مشابه را در مورد آن کسب کند.(Horiuchi, 2013)

اندرکنش EPR دارای سه خصوصیت عمده است:

- اگر اصلاح یا تغییری به ذره شماره یك اعمال شود، زوج آن یعنی ذره شماره دو نیز دچار آن تغییرات می‌شود.
- تغییرات ذره شماره دو که ناشی از تغییرات اعمال شده به ذره شماره ۱ است، وابسته به فاصله میان دو ذره نیست.
- ذره شماره دو به طور همزمان تغییرات ذره شماره ۱ را حس می‌کند.

٦. تله‌پورت کردن و فرایند مخابرات کوانتومی

در علم فیزیك، تله‌پورت کردن به معنای حمل یا بردن چیزی از نقطه‌ای به نقطه دیگر بدون ارتباط فیزیکی است. انتقال اطلاعات روی فوتون‌ها اساس رایانه‌های کوانتومی را تشکیل می‌دهد. سرعت تله‌پورت کردن فوتون‌ها از سرعت نور تجاوز می‌کند اما با توجه به شیوه‌کار در انتقال اطلاعات، این سرعت در کامپیوترهای کوانتومی به سرعت نور محدود می‌شود.(de Abajo) تله‌پورت کردن یا جابجایی بدون ارتباط فیزیکی، تا حدود زیادی مشابه داستان‌های علمی-تخیلی-فضایی است که فردی از نقطه‌ای ناپدید و در نقطه‌ای دیگر ظاهر می‌شود، با این

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

تفاوت که در آزمایش‌های کنونی، ماده منتقل نمی‌شود، بلکه فقط فوتون‌ها و اطلاعاتی که روی آن‌ها سوار شده، انتقال می‌یابند.

۷. گیرنده مخابرات کوانتومی: آشکارساز نوری اسپینی

در این قطعه از ترکیب تکنولوژی سیلیکون و III-V استفاده شده است. مواد با روش همجوشی ویفر به یکدیگر متصل شده‌اند. این یك فرایند تجاری است و اجازه می‌دهد تا با بازدهی اپتیکی بالا نیمه‌هادی‌های III-V را که طول عمر خیلی طولانی دارند با یکدیگر ترکیب کرده و از میزبانی نیمه‌هادی گروه IV، به خصوص سیلیکون، برای اسپین الکترون بهره برد. الکترون در یك چاه کوانتومی GaAs با ضخامت 10nm که به وسیله InP با ناخالصی نوع p محاط شده است، تولید می‌شود. چاه کوانتومی به صورت اپتیکی محدود است، آنچنان که جذب فوتون نیازمند تقویت به وسیله یك کاواك رزونانس اپتیکی است. حفره، پس از تولید از طریق یك لایه InP نوع+p به سمت زمین حرکت می‌کند. حفره هیچگونه اطلاعات کوانتومی را حمل نمی‌کند زیرا با حالات اسپین الکترون باند هدایت در هم تنیده نیست. الکترون به وسیله یك میدان الکترواستاتیك به بخش حافظه و پردازش گیرنده همدوس اسپینی منتقل می‌شود. این انتقال می‌تواند تا وقتی که همدوسی با درجه خیلی بالایی حفظ می‌شود، انجام شود. بخش حافظه و پردازش آشکارساز در واقع یك پردازنده کوانتومی کوچك است. گیت‌های منطقی در ساختار نامتجانس SiGe وجود دارند. لایه SiGe که با B نشان داده شده است، لایه سد با شکاف باند نسبتا زیاد برای محدود کردن الکترون در ناحیه موردنظر است. میان این لایه‌ها الکترون به یك یون +P31 که در زیر یك گیت الکتریکی کاشته شده است، محدود می‌شود. در آن‌جا الکترون محدود می‌ماند، ولی اطلاعات ذخیره شده در اسپین آن می‌تواند از طریق تبادل اسپین با الکترون‌های محدود به یون‌های ناخالص P31 مشابه که در زیر گیت قرار گرفته است، به کامپیوتر منتقل شود. کنترل مورد نیاز از طریق اعمال ولتاژ به گیت‌ها و این واقعیت که فاکتور g الکترون محدود میان دو لایه سد، مدوله می‌شود، انجام می‌گیرد. در لایه SiGe که لایه تنظیم نیز نامیده می‌شود، فاکتور g در جهت ۱۰۰ برابر ۵۶۳/۱ است. در لایه SiGe یا لایه D (بخشنده) فاکتور g برابر ۹۹۸/۱ است. با مدوله کردن ولتاژ گیت تابع موج الکترون از طریق اثر استارك به سمت الکترود کشیده می‌شود. در حضور یك میدان تشعشعی مایکروویو ثابت، اسپین الکترون می‌تواند از حالت رزونانس بیرون آید. این عمل باعث اندرکنش‌های کیوبیت‌های منفرد می‌شود.(de Abajo)

اندرکنش دو کیوبیت با اعمال ولتاژهای مثبت به گیت مجاور الکترودها صورت می‌گیرد. هر دو الکترون از یون‌ها دور شده و اندرکنش کولنی کاهش یافته باعث افزایش شعاع بوهر می‌شود. این امر باعث افزایش اندرکنش میان الکترون‌های همسایه نیز شده و فعل و انفعال مبادله را آغاز می‌کند. این فعل و انفعال مبادله، عملیات NOT میان کیوبیت‌ها را کنترل می‌کند. چنین اندرکنش یك کیوبیتی و دو کیوبیتی با یکدیگر یك دسته عمومی از گیت‌ها را شکل می‌دهد،

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

آن‌چنان که هر تبدیلی می‌تواند روی اطلاعات کوانتومی ذخیره شده در اسپین‌های الکترون محدود، از قبیل تصحیح خطا و پردازش اطلاعات کوانتومی انجام شود.

۸. فرستنده مخابرات کوانتومی: گسیلنده فوتونی

بعد از تصحیح خطا، تله‌پورت کردن یا دیگر مراحل پردازش اطلاعات کوانتومی، می‌خواهیم اطلاعات کوانتومی را به صورت فوتون انتشار دهیم. این کار با اجرای معکوس فرایند آشکارسازی قابل انجام است زیرا الکترون نیاز دارد تا با یك حفره بازترکیب شود.(Wu, 2023)

فقط یك نوع حفره اجازه دارد با الکترون فعل و انفعال انجام دهد. از آنجا کـه حفره از بالای باند ظرفیـت انتخاب می‌شود، مادامی که تعدادشان به طور طبیعی زیاد باشد، برای بازترکیب مشکلی وجود نخواهد داشت. اطلاعاتی که باید انتقال یابند ابتدا به الکترون محدود به اولـین یون ناخالصی P31 منتقل می‌شوند. با اعمال یك پالس نسبتا قوی به الکترود گیت، این الکترون از یـون جدا شـده و به صورت الکترواستاتیکی به نقطه کوانتومی InGaAs منتقل می‌شود. حفره نیز به همین صـورت بـه نقطه کوانتومی منتقـل شـده و بازترکیب الکترون-حفره صورت می‌گیرد. به محض بازترکیب، اطلاعات کوانتومی به فوتون گسیل شده، منتقـل می‌شـوند. در ساختار گیرنده نیز تغییر کوچکی رخ داده است و نقطه کوانتومی جایگزین چاه کوانتومی شده است. دلیل استفاده از نقطه کوانتومی این است که تابع موج الکترون در فضای کوچکی محدود شود و قبل از گسیل فوتون، آزادانه به محیط اطراف حرکت نکند. در بخش گیرنده، الکترون به محض تولید، از ماده III-V خارج می‌شود. در بخش گسیلنده انتظار می‌رود الکترون با حفره تزریقی اندرکنش داشته باشد. این امر ممکن است چندین نانوثانیه به طول بینجامد. یك الکترون آزاد، تمایل به اسپین‌های مختلف در طول عمر خود دارد و به سرعت ناهمدوس می شود.(Savaresi et al., 2023)

۹. پیشرفت‌های مخابرات کوانتومی و آینده آن

فیزیکدانان فرهنگستان علوم اتریش و دانشگاه وین با استفاده از یك فیبرنوری به طول ۸۰۰ متر، دو آزمایشگاه در دو سوی رود دانوب را به یکدیگر متصل کردند و از این طریق، حالت کوانتومی اجزای نور را از فرستنده به گیرنده انتقال دادند. در کامپیوترهای آینده از این روش برای ایجاد بیت‌های کوانتومی به منظور نمایش صفر و یك دیجیتالی استفاده خواهد شد.

موفقیت آمیز بودن این آزمایش به این معناست که انتقال اطلاعات روی فوتون‌های نور که اساس رایانه‌های کوانتومی را تشکیل می‌دهد، به طور عملی نیز امکان‌پذیر است.(Savaresi et al., 2023; Wu, 2023) در آزمایش دیگری از طریق سیم‌پیچی به طول بیش از دو کیلومتر بیت‌های کوانتومی یا کیوبیت‌ها تله‌پورت شدند، اما در این آزمایش که در محیط طبیعی انجام گرفت، فاصله واقعی میان دو آزمایشگاه، از ۵۵ متر تجاوز نمی‌کرد. گام بعدی برای ارتباطات جهانی کوانتومی، تلاش برای تله‌پورت کردن فوتون‌ها با استفاده از ارتباطات ماهواره‌ای است.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

اکنون باید این نکته روشن شود که آیا تله‌پورت کردن فوتون‌ها در میان نقاطی با فواصل بسیار زیاد، امکان‌پذیر می‌باشد یا خیر؟(Wu, 2023)

در حال حاضر تنها سیستم مناسب برای مخابرات کوانتومی راه دور، فوتون است. سیستم‌های دیگر مثل اتم‌ها و یون‌ها در حال بررسی هستند و به کارگیری آن‌ها در مخابرات کوانتومی در آینده نزدیك محقق نمی‌شود. یکی از مشکلات سیستم‌های مبتنی بر فوتون، تلفات فوتون‌ها در کانال کوانتومی است. این موضوع فاصله قابل عبور برای تك فوتون را با توجه به آشکارسازها و فیبرهای سیلیکایی موجود به ۱۰۰ کیلومتر محدود می‌کند. اصولا این مشکل با تقسیم فاصله به فواصل کوچکتری که بتوان در هم تنیدگی کوانتومی را در آن تله‌پورت کرد، مرتفع می‌شود. کاربرد بعدی که اصطلاحا مبادله در هم تنیدگی و حافظه کوانتومی نامیده می‌شوند، از انتقال در هم تنیدگی به فواصل دور به دست می‌آیند. به علاوه برای حذف ناهمدوسی ناشی از کانال‌های کوانتومی از تکرارکننده کوانتومی استفاده می‌شود.(Savaresi et al., 2023)

برای انتشار فوتون دو محیط فیبرهای نوری و فضای آزاد وجود دارد. هر یک از این دو انتخاب، طول موج مناسب متناظر با خود را نیاز دارد. برای فیبرهای نوری محدوده طول موجی رایج مخابرات معمولی یعنی ۱۳۰۰ تا حدود ۱۵۵۰ نانومتر نیز برای مخابرات کوانتومی استفاده می‌شود. در حالت فضای آزاد طول موج کوتاه‌تر در حدود ۸۰۰ نانومتر با توجه به وجود آشکارسازهای کارآمد و همچنین طول موج‌های خیلی بلندتر ۴ تا حدود ۱۰ میکرومتر که در آنجا اتمسفر شفاف است، برای مخابرات کوانتومی استفاده می‌شود.(Savaresi et al., 2023)

۱۰. محاسبات و ارتباطات کوانتومی

محاسبات کوانتومی (QC) یک پارادایم نوظهور با پتانسیل ارائه مزیت محاسباتی قابل توجهی نسبت به محاسبات کلاسیک معمولی با بهره‌برداری از اصول مکانیکی کوانتومی مانند در هم تنیدگی و برهم‌نهی است. پیش‌بینی می‌شود که این مزیت محاسباتی QC به حل بسیاری از مسائل پیچیده و حل نشدنی در چندین حوزه کاربردی مانند طراحی دارو، علم داده، انرژی پاک، مالی، توسعه شیمیایی صنعتی، ارتباطات ایمن و شیمی کوانتومی کمک کند. در سال‌های اخیر پیشرفت فوق‌العاده در توسعه سخت‌افزار کوانتومی و نرم‌افزار / الگوریتم کوانتومی، QC را بسیار به واقعیت نزدیک‌تر کرده است.(Wu, 2023) در واقع نشان دادن برتری کوانتومی نقطه عطف مهمی در عصر کوانتوم با مقیاس متوسط پر سروصدا (NISQ) است. مرحله منطقی بعدی مزیت کوانتوم است که به موجب آن رایانه‌های کوانتومی یک مشکل دنیای واقعی را بسیار کارآمدتر از محاسبات کلاسیک حل می‌کنند. از آنجایی که انتظار می‌رود دستگاه‌های کوانتومی در چند سال آینده به‌طور پیوسته افزایش یابند، ناهمدوسی کوانتومی و اتصال کیوبیتی دو چالش اصلی برای دستیابی به مزیت کوانتومی در عصر NISQ هستند. QC یک زمینه تحقیقاتی بسیار موضوعی و سریع است که پیشرفت قابل توجهی در تمام جنبه‌ها دارد.(Wu, 2023) بررسی

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

سیستماتیک ادبیات موجود در مورد QC برای درک وضعیت مدرن این زمینه نوظهور و شناسایی چالش‌های باز برای این جامعه که در سال‌های آینده باید به آن‌ها رسیدگی کند بسیار ارزشمند خواهد بود. (Chen & Segev, 2021) طبقه‌بندی پیشنهادی برای نقشه‌برداری از مطالعات مختلف مرتبط برای شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی استفاده می‌شود. مروری دقیق بر ابزارها و فناوری‌های نرم‌افزار کوانتومی، رمزنگاری پس‌کوانتومی و توسعه سخت‌افزار رایانه‌های کوانتومی، وضعیت فعلی را در حوزه‌های مربوطه به تصویر می‌کشد.

۱۱. محاسبات کوانتومی در مهندسی نرم‌افزار

محاسبات و برنامه‌نویسی کامپیوتر کوانتومی مباحث بسیار پیشرفته و نوپا می‌باشند . محاسبات کوانتومی مرز مشترکی میان فیزیک کوانتومی و علم کامپیوتر است. در واقع هدف محاسبات کوانتومی، یافتن روش‌هایی برای طراحی مجدد قطعات شناخته شده محاسبات مانند گیت‌ها و ترانزیستورها، به گونه‌ای است که بتوانند تحت اثرات کوانتومی که در ابعاد نانومتری بروز می‌کنند، عمل نمایند.(Kim et al., 2022) از کاربردهای محاسبات کوانتومی می‌توان به محاسبات موازی، تجزیه اعداد، مرتب‌سازی و شبیه‌سازی کوانتومی اشاره کرد. در نگاه اول، برنامه‌نویسی یک کامپیوتر کوانتومی کار ساده‌ای به نظر می‌رسد در حالی که طراحی یک زبان برنامه‌نویسی کوانتومی، کاری دقیق و ماهرانه می‌باشد و نیاز به افراد متخصص در این زمینه دارد. در نتیجه، مهندسی نرم‌افزار کوانتومی به عنوان یک چالش مهم برای تکنیک‌های پیشرفت کامپیوترهای کوانتومی مطرح است. از این رو، الگوریتم‌های کوانتومی و برنامه‌نویسی کوانتومی نقش کلیدی در استفاده از قدرت کامپیوترهای کوانتومی دارند. در رابطه با کامپیوترهای کوانتومی، الگوریتم‌های کوانتومی و تکنیک‌های نوین زبان‌های برنامه‌نویسی کوانتومی برای کامپیوترهای کوانتومی بحث‌هایی شده است.(Scully & Zubairy, 1999)

۱۲. اُپتیک کوانتومی

تئوری‌های پیشرفته اپتیک کوانتومی از اپتیک کلاسیک سرچشمه می‌گیرند، با این سوال که چگونه مرزهای زمانی ناهمسانگرد می‌توانند خواص زاویه‌ای اثر تقویت خلاء را کنترل کنند. نویسندگان، چندین مثال برای توزیع زاویه‌ای فوتون‌های تولید شده ارائه می‌کنند؛ که مهار تولید فوتون در امتداد یک جهت خاص، تقویت مستقیم رزونانسی، تولید شانه‌های زاویه‌ای و تغییر سریع بین مهار و تقویت تشدید می‌باشند.(Scully & Zubairy, 1999) چائو و همکاران یک چارچوب بهبودیافته را برای ارزیابی حداکثر چگالی محلی حالت‌های یکپارچه طیفی (LDOS) که می‌توان در یک رسانه ساختاریافته به دست آورد، گزارش کرد. این عمل به طور تحلیلی قانون مقیاس‌بندی بین کران بالای LDOS، حساسیت مواد و پهنای باند منبع را استخراج می‌کند.(Scully & Zubairy, 1999) فنگ و همکاران نفوذ کوانتومی را معرفی کرده و نمایش تجربی آن را با استفاده از شبکه‌های موج‌بر نمونه اولیه ارائه می‌کند. شبکه‌های

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

موج‌بر با احتمال اشغال متفاوت به عنوان پیکربندی روی تراشه با استفاده از تکنیک نوشتن لیزر مستقیم ساخته شدند. این رویکرد برای مشاهده مستقیم پدیده‌های انتقال کوانتومی برای اکتشاف آماری در مطالعات آینده در مورد دینامیک نفوذ کوانتومی مفید خواهد بود.(Blais et al., 2020)

از زمان اولین مشاهده رفتار کوانتومی منسجم در یک کیوبیت ابررسانا در حال حاضر بیش از ۲۰ سال پیشرفت‌های اساسی در زمینه مدارهای کوانتومی ابررسانا صورت گرفته است. یکی از این پیشرفت‌ها معرفی مفاهیم الکترودینامیک کوانتومی حفره (QED) به مدارهای ابررسانا است تا آنچه را که اکنون به عنوان مدار QED شناخته می‌شود، ارائه دهد. این رویکرد در یک معماری واحد الزامات اساسی برای محاسبات کوانتومی را محقق می‌کند که پیش از این برای اجرای الگوریتم‌های کوانتومی ساده و کار همزمان ده‌ها کیوبیت ابررسانا استفاده شده است. به این دلایل مدار QED یکی از معماری‌های پیشرو برای محاسبات کوانتومی است. به موازات این پیشرفت‌ها به سمت پردازش اطلاعات کوانتومی، مدار QED فرصت‌های جدیدی را برای اکتشاف فیزیک غنی اپتیک کوانتومی در رژیم‌های پارامتری جدید ارائه می‌کند که در آن اثرات غیرخطی قوی به راحتی در سطح فوتون‌های مایکروویو منفرد قابل مشاهده است.(Scully & Zubairy, 1999)

الکترودینامیک کوانتومی حفره (QED) برهمکنش نور و ماده را در اساسی‌ترین سطح آن مطالعه می‌کند که برهمکنش منسجم اتم‌های منفرد با فوتون‌های منفرد است. در طول ٤٠ سال گذشته این اکتشاف منجر به پیشرفت‌هایی در تکنیک‌های تجربی به مرحله‌ای رسیده است که کنترل حالت کوانتومی اتم‌های منفرد در حال حاضر امکان‌پذیر است؛ پیشرفت‌هایی که ابزارهای بسیار دقیقی را برای بررسی ماهیت ضدشهودی فیزیک کوانتومی فراهم کرده‌اند. برای رسیدن به رژیمی‌که در آن جفت شدن منسجم نور و ماده بر همه نرخ‌های فروپاشی غلبه می‌کند، به طوری که اثرات کوانتومی مهم می‌شوند، QED حفره‌ای به اتم‌هایی با گشتاور دوقطبی الکتریکی اتمی بزرگ و حفره‌هایی که میدان الکترومغناطیسی را در ناحیه کوچکی از فضا محدود می‌کنند، متکی است.(You & Nori, 2011) با این حال پیوستگی کوانتومی به اتم‌های طبیعی محدود نمی‌شود و اولین نشانه‌های قطعی برهم‌نهی منسجم دو حالت در یک سیستم کوانتومی مهندسی شده است. دو دهه پیش از طریق تکنیک‌های فیزیک اتمی نوسانات رابی و حاشیه‌های تداخل رمزی مشاهده شد. در قلب چنین آزمایشاتی یک دستگاه مبتنی بر اتصال جوزفسون قرار دارد که به عنوان یک اتم مصنوعی عمل می‌کند. با این حال برخلاف اتم‌های طبیعی اتم‌های مصنوعی ابررسانا با طراحی و عملکرد مناسب در دماهای برودتی باید تا حدودی مجبور به رفتار مکانیکی کوانتومی شوند. در طول ۲۰ سال گذشته پیشرفت چشمگیری در این مسیر حاصل شده است و بر اساس برخی معیارها اتم‌های مصنوعی اکنون هم تراز یا حتی از همتایان طبیعی خود بهتر هستند. علاوه بر این مدارهای کوانتومی ابررسانا را می‌توان به شدت و به طور قابل کنترلی با میدان‌های الکترومغناطیسی محدود شده در عناصر

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

مدار مانند سلف‌ها و خازن‌ها جفت کرد. به عبارت دیگر با استفاده از فیزیک QED می‌توان به طور طبیعی حفره‌ای را در مدارها کاوش کرد، مشاهده‌ای که زمینه مدار QED7-9 را باز کرده است. فراتر از اپتیک کوانتومی، مدار QED در یک معماری واحد به الزامات ضروری برای محاسبات کوانتومی جهانی دست می‌یابد و اکنون یک معماری پیشرو برای تحقق یک کامپیوتر کوانتومی مقیاس پذیر است.(Scully & Zubairy, 1999)

این کار بررسی می‌کند که چگونه درجه کنترل و اتصال اتم‌های مصنوعی فعال شده توسط مدار QED را می‌توان برای کشف فیزیک QED حفره و اپتیک کوانتومی روی یک تراشه و همچنین ساخت فناوری‌های کوانتومی امیدوارکننده مورد بهره‌برداری قرار داد. ما ابتدا مفاهیم اساسی مدار QED را معرفی می‌کنیم و اینکه چگونه رژیم‌های پارامتر جدیدی که می‌توان در مدار QED به دست آورد در مقایسه با QED حفره‌ای به امکانات جدیدی برای اپتیک کوانتومی منجر می‌شود. در مرحله بعد مدار QED را در زمینه پردازش اطلاعات کوانتومی مورد بحث قرار می‌دهیم. سپس دیدگاه‌هایی را در مورد گام‌های بعدی در زمینه مدار QED به سمت محاسبات کوانتومی ابتدا با تصحیح خطای کوانتومی (QEC) و سپس با بحث در مورد برخی از چالش‌های مرتبط با مقیاس‌بندی به سیستم‌های بزرگتر ارائه می‌کنیم.(Wu, 2023)

به طور خلاصه در این بخش نظریه پایه مدار QED را خلاصه می‌کنیم. آن‌ها شامل یک کیوبیت ابررسانا (سبز) تعبیه شده در یک نوسانگر مایکروویو با کیفیت بالا (آبی) مانند یک تشدیدکننده خط انتقال هم‌سطح ابررسانا، یک سلف و مدار خازن (LC) یا یک حفره سه‌بعدی (D^3) با عنصر توده‌ای هستند. هنگام کار با یک تشدیدکننده خط انتقال، کیوبیت در نزدیکی هادی مرکزی تشدیدکننده ساخته می‌شود. این هادی مرکزی توسط شکاف‌هایی قطع می‌شود که منجر به اتصال خازنی به پورت‌های ورودی و خروجی تشدید کننده می‌شود. در این نقاط، جریان ناپدید می‌شود و این شرایط مرزی باز منجر به حالت‌های عادی با فرکانس‌های کاملا جدا شده می‌شود. هنگام کار با رزوناتورهای یک سانتی‌متری، فرکانس اصلی در رژیم مایکروویو است و معمولا بین ۵ تا ۱۵ گیگاهرتز انتخاب می‌شود. این فرکانس‌ها به اندازه‌ای بالا هستند که از جمعیت فوتون‌های حرارتی در دمایی که این دستگاه‌ها در آن کار می‌کنند جلوگیری می‌شود، اما هنوز در یک محدوده مناسب برای الکترونیک کنترل مایکروویو هستند.(Scully & Zubairy, 1999)

مدارهای ابررسانا با اتصالات جوزفسون می‌توانند مانند اتم‌های مصنوعی رفتار کنند. در این مدارهای کوانتومی، اتصالات جوزفسون به عنوان عناصر مدار غیرخطی عمل می‌کنند. چنین غیرخطی بودن در یک مدار فاصله نابرابر بین سطوح انرژی را تضمین می‌کند به طوری که پایین‌ترین سطوح را می‌توان به صورت جداگانه با استفاده از میدان‌های خارجی مورد بررسی قرار داد. به طور تجربی، این مدارها در مقیاس میکرومتری ساخته می‌شوند و در دمای میلی‌کلوین کار می‌کنند. به دلیل کاهش ابعاد و به لطف ابررسانایی، اتلاف و نویز ناشی از

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

محیط تا حد زیادی سرکوب می‌شود، بنابراین مدارها می‌توانند به صورت مکانیکی کوانتومی رفتار کنند.(Kim et al., 2022)

مدارهای ابررسانای مبتنی بر اتصالات جوزفسون اخیرا به موضوع تحقیقات زیادی تبدیل شده‌اند؛ زیرا می‌توانند به عنوان کیوبیت (سیستم‌های کوانتومی دوسطحی قابل کنترل) برای محاسبات کوانتومی مورد استفاده قرار گیرند. حتی اگر زمان‌های ناهمدوسی معمولی این مدارها از الزامات محاسبات کوانتومی کمتر است، انسجام کوانتومی ماکروسکوپی آن‌ها برای نشان دادن رفتار کوانتومی قابل توجه کافی است. این مدارها می‌توانند تعدادی حالت ویژه ابررسانا با مقادیر ویژه گسسته کمتر از سطوح انرژی تحریکات شبه ذره‌ای داشته باشند که شامل شکستن جفت کوپر می‌شود. این ویژگی به این مدارها اجازه می‌دهد تا مانند اتم‌های مصنوعی ابررسانا رفتار کنند. در واقع تشابه عمیقی بین اتم‌های طبیعی و اتم‌های مصنوعی ساخته شده از مدارهای ابررسانا وجود دارد. هر دو دارای سطوح انرژی گسسته هستند و می‌توانند نوسانات کوانتومی منسجمی را بین این سطوح نشان دهند. در حالی که اتم‌های طبیعی را می‌توان با استفاده از فوتون‌های مرئی یا مایکروویو که الکترون‌ها را از حالتی به حالت دیگر برمی‌انگیزد، کنترل کرد. اتم‌های مصنوعی در این مدارها توسط جریان‌ها، ولتاژها و فوتون‌های مایکروویو هدایت می‌شوند که سیستم را از یک حالت کوانتومی ماکروسکوپی به حالت دیگر برانگیخته می‌کنند.(Scully & Zubairy, 1999)

تفاوت‌های بین مدارهای ابررسانا و اتم‌های طبیعی شامل مقیاس‌های مختلف انرژی در دو سیستم و میزان قوی بودن هر سیستم با محیط خود است. کوپلینگ برای اتم‌های طبیعی ضعیف و مدارها قوی است. برخلاف اتم‌های طبیعی، اتم‌های مصنوعی را می‌توان با ویژگی‌های خاصی طراحی کرد و با استفاده از فناوری‌های لیتوگرافی استاندارد روی یک تراشه ساخت. با توجه به کاربردها این درجه از تنظیم‌پذیری یک مزیت مهم نسبت به اتم‌های طبیعی است. بنابراین می‌توان به شیوه‌ای قابل کنترل، مدارهای ابررسانا را برای آزمایش اصول مکانیک کوانتومی در مقیاس ماکروسکوپی و همچنین نشان دادن فیزیک اتمی و اپتیک کوانتومی روی یک تراشه استفاده کرد. علاوه بر این اتم‌های مصنوعی را می‌توان به گونه‌ای طراحی کرد که دارای ویژگی‌های عجیب و غریبی باشند که در اتم‌های طبیعی وجود ندارد.

۱۳. مدارهای ابررسانا به عنوان اتم‌های مصنوعی

دو مقیاس مهم انرژی رفتار مکانیکی کوانتومی مدار اتصال جوزفسون را تعیین می‌کنند؛ یعنی انرژی جفت جوزفسون (E_J) و انرژی الکترواستاتیک کولن ($Ec = (2e)^2/2C$) برای یک جفت کوپر که e بار الکترونیکی است و C یا ظرفیت C_J یک اتصال جوزفسون یا ظرفیت یک جزیره ابررسانا به نام جعبه کوپر جفت (یعنی مجموع ظرفیت گیت C_g و ظرفیت اتصال مربوطه) بسته به مدار است.(Folk et al., 2003) علاوه بر این، کیوبیت‌های ابررسانای ترکیبی امکان‌پذیر است. به عنوان مثال یک جعبه جفت کوپر می‌تواند زمانی که $E_J / E_c \approx ۱$

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

مانند یک کیوبیت شارژ رفتار کند. در مورد کیوبیت شار، با کاهش نسبت E_J/E_C، نویز شارژ می‌تواند بر نویز شار و مدار غالب شود. سپس بیشتر شبیه کیوبیت شارژ عمل می‌کند. در این مدار وقتی $\alpha < 0.5$ (α نسبت انرژی جفت جوزفسون بین اتصالات کوچکتر و بزرگتر در حلقه است) پتانسیل دو چاه به یک پتانسیل تک‌چاه تبدیل می‌شود و مدار مانند یک کیوبیت فاز عمل می‌کند.(Braunstein et al., 1992) می‌توان یک ظرفیت خازنی بزرگ را برای سرکوب نویز شارژ در این مدار به محل اتصال کوچک انتقال داد. همچنین می‌توان برای کاهش نویز شارژ در جعبه کوپر جفت از این ظرفیت بزرگ که به اتصال جوزفسون متصل شده است، استفاده کرد تا مدار را در رژیم فاز پیاده‌سازی کند. در ادامه چند جنبه از پدیده‌های فیزیک اتمی و اپتیک کوانتومی موجود در مدارهای ابررسانا را برجسته می‌کنیم.(Kim et al., 1999)

یک میدان الکترومغناطیسی کوانتیزه می‌تواند انرژی را به طور منسجم با یک سیستم دوسطحی معمولا در یک حفره کوچک (در مقیاس میکرومتر) مبادله کند. این فرایند تبادل انرژی شامل یک پدیده اساسی به نام نوسان رابی است. سیستم دوسطحی و میدان کوانتومی از انرژی را با فرکانس مشخصی که فرکانس رابی نامیده می‌شود به عقب و جلو مبادله می‌کنند. هنگامی که میدان در رزونانس با سیستم است، فرکانس رابی با قدرت جفت شدن سیستم میدان متناسب است.(Kim et al., 1999) ابتدایی‌ترین حالات چنین فرایندهای منسجمی شامل برهمکنش یک سیستم دوسطحی با یک فوتون منفرد در حفره است. تبادل انرژی بین سیستم و فوتون منفرد زمانی قابل مشاهده است که فرکانس رابی بزرگتر از نرخ فروپاشی سیستم دوسطحی و حفره باشد. این جفت شدن فوتون-اتم برای انواع مختلفی از اتم‌ها که با میدان نوری در یک حفره تعامل دارند به دست آمده است و اساس الکترودینامیک کوانتومی حفره (QED) را تشکیل می‌دهد.(Schaub et al., 1999) حفره QED با مدارهای ابررسانا پیشنهاد شد و به طور تجربی در سیستم‌هایی که کیوبیت‌های ابررسانا به عنوان اتم‌های مصنوعی دوسطحی استفاده می‌شوند، به دست آمد. برای حفره یک تشدید کننده القایی/ خازن تک حالته (LC) و یک تشدید کننده موج‌بر هم‌سطح چند حالته استفاده شده است. به طور قابل توجهی، حد جفت قوی برای یک کیوبیت ابررسانا در یک حفره می‌تواند بسیار راحت‌تر از یک اتم طبیعی در یک حفره با طراحی مناسب پارامترهای سیستم به دست آید. برای مثال این امکان را می‌دهد تا تغییر را برای یک کیوبیت ابررسانا در حفره مشاهده کنیم. علاوه بر این کیوبیت ابررسانا و حفره را می‌توان روی یک تراشه ساخت.(Braunstein et al., 1992)

مدارهای کوانتومی ابررسانا را می‌توان با پارامترهای سیستمی خاص طراحی کرد تا به رژیم به اصطلاح کوپلینگ فوق قوی، که در آن قدرت جفت کیوبیت فوتون با مقیاس انرژی کیوبیت و فوتون قابل مقایسه و مناسب هستند؛ دستیابی پیدا کرد. در واقع تعدادی مطالعات نظری در مورد این سیستم وجود داشته است که برخی از خواص استاتیکی و دینامیکی غنی آن را تجزیه و تحلیل می‌کنند. همچنین جفت بسیار قوی بین یک کیوبیت شار ابررسانا و یک موج‌بر

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

هم‌سطح یا یک تشدیدگر LC اخیرا در آزمایش‌ها نشان داده شده است. می‌توان انتظار داشت که پدیده‌های جدیدی در این رژیم جفت‌کننده فوق قوی پیدا شود که در رژیم‌های جفت ضعیف معمولی و نسبتا قوی وجود ندارد. علاوه بر این حالت‌های پوشانده شده از یک کیوبیت بار ابررسانا و یک میدان مایکروویو شدید به صورت تجربی با تعبیه مدار در یک نوسانگر LC مشاهده شد. قابلیت تنظیم این حالت‌های پوشیده این امکان را می‌دهد تا هر دو رژیم جفت رزونانس و پراکنده کشف شود.(Loss & DiVincenzo, 1998)

حالت الکترونیکی در اتم‌های طبیعی دارای تقارن برابری کاملاً تعریف شده زوج یا فرد در هر سطح مداری است. در اثر تقریب دوقطبی، برهمکنش همیلتونی بین اتم و میدان الکتریکی وابسته به زمان دارای برابری فرد است؛ بنابراین برای داشتن یک عنصر ماتریس انتقال دوقطبی غیر صفر علاوه بر محدودیت‌های روی اعداد کوانتومی آزیموتالی و مغناطیسی حالت‌های الکترونیکی باید جایی که هیچ گذار دوقطبی بین حالت‌های الکترونیکی با برابری یکسان وجود ندارد یک تغییر برابری بین حالت اولیه و نهایی وجود داشته باشد. با این حال قوانین انتخاب می‌تواند برای اتم‌های مصنوعی ابررسانا متفاوت باشد. به عنوان مثال در تقریب دوقطبی برهمکنش همیلتونی بین یک مدار کیوبیت شار و یک میدان مغناطیسی وابسته به زمان برابری مشخصی وجود ندارد مگر در نقطه‌ای با شار مغناطیسی ساکن جایی که Φ شار مغناطیسی ساکن به حلقه و Φ_0 کوانتوم شار مغناطیسی اعمال شده است. در این مقدار شار خاص برهمکنش همیلتونی دارای برابری فرد است.(Chen & Segev, 2021)

لیزر از یک محیط تقویت‌کننده در داخل یک حفره نوری تشدید کننده تشکیل شده است. هنگامی که سیستم رانده می‌شود وارونگی جمعیت حالت (SPI) را می‌توان برای اتم‌ها یا مولکول‌های موجود در محیط تقویت‌کننده به دست آورد. علاوه بر این بازخورد مثبتی بین نور ساطع شده و محیط تقویت‌کننده وجود دارد. به دلیل این بازخورد مثبت و ماهیت گسیل فوتون تحریک شده لیزر دارای بهره نوری خالص بزرگی است و فوتون‌های ساطع شده دارای جهت، فاز و قطبش یکسان هستند. این مزایا به این معنی است که لیزر کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف دارد. اخیرا چندین مطالعه با استفاده از تنها یک اتم مصنوعی، لیزر را از نظر تئوری و تجربی بررسی کرده‌اند.(Vrijen & Yablonovitch, 2001)

کیوبیت‌های ابررسانا این مزیت را دارند که حالت‌های کوانتومی را به شیوه‌ای قابل کنترل دستکاری می‌کنند. اگر این کیوبیت‌های ساکن به صورت مکانی از هم جدا شوند، می‌توان از فوتون‌های منفرد تولید شده در یک حفره گسترده به‌عنوان یک گذرگاه کوانتومی شبیه به یک کیوبیت پرنده برای اجرای ارتباطات کوانتومی بین آن‌ها استفاده کرد. از نظر فناوری، این امر مستلزم تولید تک فوتون‌ها با دستکاری یک کیوبیت ابررسانا و انتقال اطلاعات بین کیوبیت‌های ابررسانا و فوتون‌ها است. دستیابی به این فرایند ارتباط کوانتومی روی یک تراشه با استفاده از یک حفره روی تراشه امکان‌پذیر می‌شود.(Vrijen & Yablonovitch, 2001)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

۱۴. چالش‌ها

چالش‌های عملی پردازش اطلاعات کوانتومی با مدار QED به سرعت در حال انتقال از حوزه کنجکاوی علمی به آستانه واقعیت فنی است. انجام این کار انتقال چالش‌های عملی متعددی را ارائه می‌کند که دقیقا در حوزه موضوعی مهندسی کوانتومی قرار دارند. رشته‌ای در حال توسعه که در خدمت ایجاد پلی بین علوم کوانتومی سنتی و مهندسی کلاسیک در حمایت از ساخت ماشین‌های کوانتومی قابل توسعه است.(Jang et al., 2023) اگرچه انتزاعات مهندسی مرتبط با مقیاس‌پذیری سیستم مانند آنالوگ‌های کوانتومی مقیاس دنارد یا قانون مور به دلیل اینکه بسیار نابالغ هستند هنوز برای پردازشگرهای اطلاعات کوانتومی توسعه نیافته‌اند، اما ضمن درک چالش‌های فعلی می‌توانیم آن‌ها را بیان کنیم. امروزه در گسترش عملکرد فعلی به سیستم‌ها و برنامه‌های کاربردی در مقیاس بزرگتر نگاه می‌شود. نیازهای عمومی یک پردازنده اطلاعات کوانتومی را می‌توان در خطوط زیر خلاصه کرد. پردازنده‌های کوانتومی باید از موادی با پیوستگی بالا و با استفاده از فرایندهای ساخت قابل تجدید و توسعه ساخته شوند. آن‌ها پس از ساخت باید کنترل شوند و با دقت بالا خوانده شوند چالشی که با افزایش تعداد کیوبیت‌ها سخت‌تر می‌شود.(Schaub et al., 1999) نیاز به ورود و خروج تعداد بیشتری از سیگنال‌های کنترل و بازخوانی به پردازنده و همچنین ظلم اتصالات در مسیریابی آن سیگنال‌ها در پردازنده وجود دارد. نیاز به کالیبره کردن فرکانس‌های کیوبیت و حفره منفرد و کوپلینگ‌های آن‌ها با یکدیگر برای کنترل و بازخوانی مناسب پردازنده و همچنین حذف گفتگوی متقاطع کلاسیک و دینامیک ناخواسته همیلتونی منسجم وجود دارد. علاوه بر این باید پردازنده و تمام خطوط کنترل آن و احتمالا وسایل الکترونیکی برودتی را به شیوه‌ای سازگار با عملکرد بالا در یخچال رقیق‌سازی با ظرفیت کنترل حرارت محدود در دمای میلی‌کلوین قرار داد و حرارت داد و باید مجموعه‌ای از الکترونیک و یک مجموعه نرم‌افزاری برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های داده شده در مقیاس ایجاد کرد.(Loss & DiVincenzo, 1998)

چالش‌های برآورده کردن این نیازها تا حدی به دو دوره متمایز مقیاس‌گذاری مرتبط است. اولی یک دوره کوتاه‌تر یعنی عصر brute-force است که در آن هر کیوبیت به طور جداگانه برای کنترل و بازخوانی سیم‌کشی می‌شود. پردازنده‌های کیوبیت امروزی با حداکثر چند ده کیوبیت در این دسته قرار می‌گیرند. چنین رویکردهای brute-force تا حدود ۱۰۰۰ کیوبیت قابل اجرا هستند. یک تخمین ضعیف عمدتا با بسته‌بندی، مسیریابی سیگنال و اندازه یخچال رقیق‌سازی که کسی مایل به تولید آن است محدود می‌شود. دومی را می‌توان به عنوان عصر مقیاس‌پذیری نام‌گذاری کرد که در آن روش‌های یکپارچه مانند مالتی‌پلکس کردن سیگنال و الکترونیک برودتی هم‌مکانی برای فعال کردن کنترل و بازخوانی کیوبیت‌های بیشتر با سیم‌های کمتر به قیمت پیچیدگی بالاتر معرفی می‌شوند.(Myers et al., 2005) بار حرارتی دو نوع مدار کیوبیت ابررسانا که در اینجا مورد بحث قرار گرفت، مدار مسطح QED و کیوبیت‌های

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

بوزونی مایکروویو در بسیاری از این چالش‌ها هرچند به درجات متفاوت مشترک هستند. با رویکرد مسطح، کیوبیت‌های ابررسانا خود اطلاعات کوانتومی را نگه می‌دارند که از حفره‌های مایکروویو برای خواندن حالت‌های کوانتومی یا در برخی موارد واسطه جفت و کنترل کیوبیت استفاده می‌شود. چنین پردازنده‌های مسطحی از روش‌های ساخت نیمه‌رسانا از جمله قابلیت توسعه لیتوگرافی، قابلیت ساخت روی تراشه‌های سیلیکونی و عوامل شکل نسبتا کوچک بهره می‌برند. در حفظ انسجام، چالش‌ها بسیار است زیرا فرایندهای ساخت برای برآوردن نیازهای ذکر شده پیچیده‌تر می‌شوند. در رویکرد بوزونی کیوبیت، حفره‌های مایکروویو نسبتا بزرگ (در مقیاس سانتی‌متری) برای نگهداری حالت‌های کوانتومی فوتونیک در بلوک‌های آلومینیومی ماشین‌کاری می‌شوند و کیوبیت‌های ترانسمون برای کنترل این حالت‌ها استفاده می‌شوند. مزیت اصلی این رویکرد درجه ای از مدولار بودن و طول عمر بالاتر حفره–فوتون بالاتر که به قیمت ردپای بسیار بزرگ‌تر تمام می‌شود. همانطور که قبلا ذکر شد، امروزه هر دو رویکرد تقریبا به یک سطح از گیت دست می‌یابند، حدود ۹۹٫۹ درصد برای دروازه‌های تک‌کیوبیتی و ۹۹ درصد برای دروازه‌های دو کیوبیتی. هر دو رویکرد مسطح کیوبیت و حفره– فوتون به یکپارچگی سه‌بعدی برای تسهیل توسعه‌پذیری تکیه می‌کنند. رویکرد bosonic qubit طبیعتا به طور یکپارچه سه‌بعدی است، در حالی که رویکرد مسطح کیوبیت دوبعدی از فناوری‌های یکپارچه‌سازی سه‌بعدی در یک زمینه مرسوم‌تر استفاده می‌کند. با حرکت از زنجیره‌های یک‌بعدی کیوبیت به آرایه‌های دو بعدی بزرگتر، مسیریابی سیگنال به کیوبیت‌های داخلی عملا بدون استفاده از بعد سوم برای فعال کردن اتصالات متقابل و دور زدن یکدیگر ممنوع می‌شود. اگرچه ممکن است ساخت چندین لایه سیم‌کشی در کنار کیوبیت‌ها در یک فرایند واحد تصور شود، چنین رویکردی عموما دی‌الکتریک‌های با اتلاف را بین لایه‌های سیم‌کشی ترکیب می‌کند و انسجام کیوبیت را کاهش می‌دهد. در حالی که ساخت یکپارچه با دی الکتریک‌های با کیفیت بالا ممکن است روزی یک رویکرد قابل قبول و سودمند برای کیوبیت و الکترونیک کنترل یکپارچه باشد. در این میان یک رویکرد جایگزین این است که تراشه‌های جداگانه‌ای را که مطابق با عملکرد مربوطه آن‌ها ساخته می‌شوند به یکدیگر متصل کنیم، به عنوان مثال یک تراشه کیوبیت با انسجام بالا، یک تراشه چندلایه برای مسیریابی سیگنال و یک تراشه از طریق سیلیکون از طریق (TSV) که آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند، در حالی که تراشه کیوبیت بسیار حساس را از دی الکتریک‌های با اتلاف در تراشه اتصال جدا می‌کند. (Folk et al., 2003)

اگرچه ادغام سه‌بعدی به رفع ظلم ارتباطات متقابل کمک می‌کند اما به تنهایی آن را حل نمی‌کند. با افزایش تعداد کیوبیت‌ها تقاضا برای تعداد خطوط سیگنالی که باید به بسته کیوبیت (Housing) متصل شوند، افزایش می‌یابد. امروزه آن سیگنال‌ها با استفاده از وسایل الکترونیکی در دمای اتاق تولید می‌شوند و در امتداد سیم‌کشی کواکسیال به یخچال رقیق‌کننده

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

وارد می‌شوند که باید به درستی حرارت داده شوند. پیشرفت‌ها شامل استفاده از کابل‌های انعطاف‌پذیر برای کاهش بار حرارتی یخچال و افزایش تراکم سیم‌کشی است. آوردن الکترونیک کنترل به یخچال به عنوان مثال با استفاده از نیمه‌هادی فلز- اکسید- مکمل برودتی (CMOS) یا منطق کوانتومی تک‌شار (SFQ)، به کوتاه کردن طول سیم‌های سیگنال کمک می‌کند، اما این کار را انجام نمی‌دهد.(Folk et al., 2003) تعداد سیم‌های متصل به بسته را کاهش می‌دهند مگر اینکه الکترونیک برودتی مستقیما با کیوبیت‌ها یکپارچه شود. در عمل CMOS کرایوژنیک انرژی زیادی را تلف می‌کند که در مجاورت کیوبیت‌ها در مرحله میلی‌کلوین یخچال‌های امروزی قابل دوام است. الکترونیک مبتنی بر SFQ یا مشتقات آن ممکن است راه حلی را ارائه دهد؛ اما در حال حاضر نسبت به همتای CMOS خود بالغ‌تر است. این مشکلات ممکن است در دوران brute-force منع‌کننده نباشند، اما باید در دوره مقیاس‌بندی مورد توجه قرار گیرند.(Braunstein et al., 1992)

۱۵. پیشنهاداتی در چشم‌انداز آینده

حوزه نانوفوتونیک‌های مبتنی بر مواد دو بعدی با سرعتی سریع در حال رشد است که توسط توانایی طراحی سیستم‌های نانوفوتونیک با کنترل تعداد بی‌سابقه درجات آزادی و ساخت ساختارهای ناهمسان مواد از پایین به بالا آغاز شده است. با دقت اتمی پالت وسیعی از کلاس‌های پلاریتونیک شناسایی شده‌اند که شامل میدان‌های نوری فوق‌العاده محدود حتی نزدیک شدن به مقیاس‌های طول مشخصه یک اتم است. این پیشرفت‌ها یک تقویت واقعی برای حوزه نوظهور نانوفوتونیک کوانتومی بوده است، جایی که ماهیت مکانیکی کوانتومی الکترون‌ها و پلاریتون‌ها و برهمکنش‌های آن‌ها مرتبط می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به اثرات غیرمحلی کوانتومی برهمکنش‌های نور و ماده فوق قوی تابش چرنکوف، دسترسی به انتقال‌های ممنوعه، اثرات هیدرودینامیکی، غیرخطی‌های تک‌پلاسمونی، کوانتیزاسیون پلاریتونیک، اثرات توپولوژیکی و غیره اشاره کرد. علاوه بر این پدیده‌های ذاتی نانوفوتونیکی کوانتومی سیستم‌های مواد دو بعدی نیز می‌توانند به عنوان کاوشگرهای حساس برای خواص کوانتومی موادی که حالت‌های نانوفوتونیکی یا مواد کوانتومی را در مجاورت خود حمل می‌کنند، استفاده شوند. در اینجا پلاریتون‌ها به‌عنوان کاوشگر برای تحریک‌های نامرئی در ابررساناها یا به عنوان ابزاری جدید برای نظارت بر وجود انحنای بری در مواد توپولوژیکی و اثرات ابرشبکه در مواد دوبعدی پیچ خورده عمل می‌کنند. در این چشم‌انداز ما یک نمای کلی از حوزه نوظهور نانوفوتونیک کوانتومی مواد دو بعدی ارائه می‌کنیم و چشم انداز آینده را در مورد چشم‌انداز پدیده‌های نوظهور اساسی و فناوری‌های کوانتومی نوظهور مانند سنجش کوانتومی، منابع تک‌فوتون و دستکاری تابشگرهای کوانتومی ارائه می‌کنیم. ما به چهار مفهوم اصلی می‌پردازیم: (۱) سنجش کوانتومی دارای پلاریتون‌ها برای کاوش ابررسانایی و کشف رفتارهای هیدرودینامیکی حمل و نقل الکترونیکی جدید (۲) فناوری‌های کوانتومی که تولید تک‌فوتون، دستکاری و تشخیص را با

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

استفاده از مواد دوبعدی مهار می‌کنند (۳) مهندسی پلاریتون با مواد کوانتومی با زاویه پیچش و کنترل ترتیب انباشته شدن در ساختارهای ناهمسان واندروالس و (٤) برهمکنش‌های شدید نور–ماده که توسط محصور شدن شدید نور در سطح اتمی توسط مواد دوبعدی فعال می‌شوند که ابزارهای جدیدی برای دستکاری میدان‌های نور در مقیاس نانو فراهم می‌کنند. (به عنوان مثال شیمی‌کوانتومی).

۱۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله ما نانوفوتونیک کوانتومی، اپتیک کوانتومی، محاسبات کوانتومی و کارهای تحقیقاتی که چشم اندازه‌های آینده و پیشرفت‌های اخیر را تا به حال انجام داده‌اند، شرح دادیم. در مخابرات کوانتومی، اطلاعاتی که باید مخابره شوند، روی فوتون‌هایی سوار می‌شوند که هم می‌توانند در فضای آزاد و هم از طریق فیبرهای نوری کم تلف ارسال شوند. محاسبات کوانتومی (QC) یک پارادایم نوظهور با پتانسیل ارائه مزیت محاسباتی قابل توجهی نسبت به محاسبات کلاسیک معمولی با بهره‌برداری از اصول مکانیکی کوانتومی مانند در هم تنیدگی و برهم‌نهی است. پیش‌بینی می‌شود که این مزیت محاسباتی QC به حل بسیاری از مسائل پیچیده و محاسباتی حل‌نشدنی در چندین حوزه کاربردی مانند طراحی دارو، علم داده، انرژی پاک، مالی، توسعه شیمیایی صنعتی، ارتباطات ایمن و شیمی‌کوانتومی کمک کند. اپتیک کوانتومی شاخه‌ای از فیزیک است که رفتار نور را به عنوان یک موجود کوانتومی با رفتاری کاملا کوانتومی بررسی می‌کند. اپتیک کوانتومی در واقع به مطالعه جنبه‌هایی از نور در حوزه مکانیک کوانتوم می‌پردازد. تئوری‌های پیشرفته اپتیک کوانتومی از اپتیک کلاسیک سرچشمه می‌گیرند. لیزر یکی از پرکاربردترین روش‌های اپتیک کوانتومی است. نور منتشر شده از این دستگاه‌ها در یک حالت منسجم قرار دارد که یعنی نور بسیار شبیه به یک موج سینوسی کلاسیک است. در این حالت منسجم، عملکرد موج مکانیکی و درنتیجه عدم قطعیت مکانیکی کوانتومی به طور مساوی توزیع می‌شود. بنابراین نور ناشی از لیزر به شدت توصیه می‌شود و عموما به حالت یکسان انرژی (همان فرکانس و طول موج) محدود می‌شود.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]

فهرست منابع

Blais, A., Girvin, S. M., & Oliver, W. D. (2020). Quantum information processing and quantum optics with circuit quantum electrodynamics. Nature Physics, 16(3), 247-256.

Braunstein, S. L., Mann, A., & Revzen, M. (1992). Maximal violation of Bell inequalities for mixed states. Physical Review Letters, 68(22), 3259.

Chen, Z., & Segev, M. (2021). Highlighting photonics: looking into the next decade. ELight, 1(1), 2.

de Abajo, F. J. G. Nanophotonics in Two-dimensional Materials.

Folk, J., Potok, R., Marcus, C., & Umansky, V. (2003). A gate-controlled bidirectional spin filter using quantum coherence. Science, 299(5607), 679-682.

Horiuchi, N. (2013). Versatile nanophotonics. Nature Photonics, 7(6), 432-432.

Huang, L., Xu, L., Woolley, M., & Miroshnichenko, A. E. (2020). Trends in quantum nanophotonics. Advanced Quantum Technologies, 3(4), 1900126.

Jang, J., Jeong, M., & Rho, J. (2023). Quantum nanophotonics. In (Vol. 12, pp. 335-337): De Gruyter.

Kim, J., Benson, O., Kan, H., & Yamamoto, Y. (1999). A single-photon turnstile device. Nature, 397(6719), 500-503.

Kim, M., Park, N., Lee, H. J., & Rho, J. (2022). The latest trends in nanophotonics. In (Vol. 11, pp. 2389-2392): De Gruyter.

Loss, D., & DiVincenzo, D. P. (1998). Quantum computation with quantum dots. Physical Review A, 57(1), 120.

Myers, R., Ku, K., Li, X., Samarth, N., & Awschalom, D. (2005). Optoelectronic control of spin dynamics at near-terahertz frequencies in magnetically doped quantum wells. Physical Review B, 72(4), 041302.

Savaresi, M., Martínez-Suárez, A., Tedeschi, D., Ronco, G., Hierro-Rodríguez, A., McVitie, S., Stroj, S., Aberl, J., Brehm, M., & García-Suárez, V. M. (2023). Strain-induced dynamic control over the population of quantum emitters in two-dimensional materials. arXiv preprint arXiv:2301.10273.

Schaub, J., Li, R., Schow, C., Campbell, J., Neudeck, G., & Denton, J. (1999). Resonant-cavity-enhanced high-speed Si photodiode grown by epitaxial lateral overgrowth. IEEE Photonics Technology Letters, 11(12), 1647-1649.

Scully, M. O., & Zubairy, M. S. (1999). Quantum optics. In: American Association of Physics Teachers.

So, S., Park, N., Lee, H. J., & Rho, J. (2020). New trends in nanophotonics. In (Vol. 9, pp. 983-985): De Gruyter.

Vrijen, R., & Yablonovitch, E. (2001). A spin-coherent semiconductor photo-detector for quantum communication. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 10(4), 569-575.

Wu, W. (2023). A quantum circuit architecture based on the integration of nanophotonic devices and two-dimensional molecular network. Quantum Technology: Driving Commercialisation of an Enabling Science III,

You, J.-Q., & Nori, F. (2011). Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits. Nature, 474(7353), 589-597.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-04]