بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی برق

سمینار درس کوانتوم الکترونیک

بررسی فرآیند تله پورت کردن کوانتومی روی تراشه های فوتونیکی

Quantum teleportation on a photonic chip

استاد راهنما:
پروفسور محمدنژاد

- مقدمه
- اطلاعات کوانتومی
- درهم تنیدگی کوانتومی
- پروتکل انتقال
- تله پورت کردن روی تراشه فتونیکی
- جمع بندی

❖ تعاریف

تله پورت کردن: به معنای انتقال کیوبیت ها از نقطه ای به نقطه دیگر بدون ارتباط فیزیکی

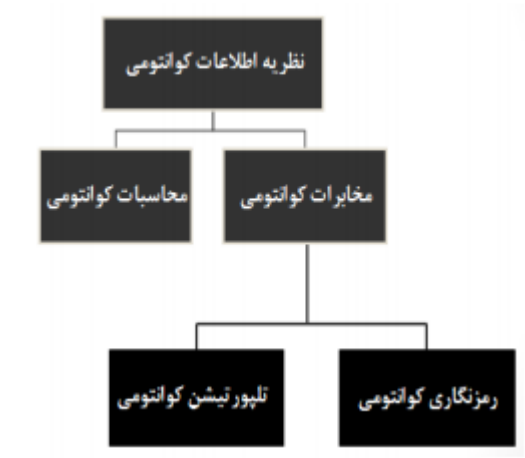
سرعت تله پورت کردن فوتون ها از سرعت نور تجاوز می کند اما در کامپیوترهای کوانتومی این سرعت به سرعت نور محدود می شود

در تلپورتیشن کوانتومی ماده منتقل نمی شود بلکه فوتون ها و اطلاعاتی که بر روی آنها سوار شده انتقال می یابند.

اطلاعات کوانتومی:

در مخابرات کوانتومی اطلاعات در حالت کوانتومی قرار دارند
و اساس مخابرات کوانتومی ارسال و دریافت این حالات کوانتومی است
به همین دلیل متناظر با حالت کلاسیک در پردازش اطلاعات کوانتومی نیز از گیت های کوانتومی استفاده می کنیم

- بیت و کیوبیت
- انتقال کوانتومی
- گیت های کوانتومی



نمای کلی از نظریه اطلاعات کوانتومی

- بیت و کیوبیت

بیت ها واحدهای اطلاعات هستند و با صفر و یا یک نمایش داده می شوندکه گاهی بیت های کلاسیک هم به آنها گفته می شود تا آنها را از بیت های کوانتومی متمایز ساخت.

کیوبیت ها اطلاعات کوانتومی را رمزگذاری می کنند این اطلاعات با اطلاعات کلاسیک بسیار متفاوتند

- انتقال کوانتومی

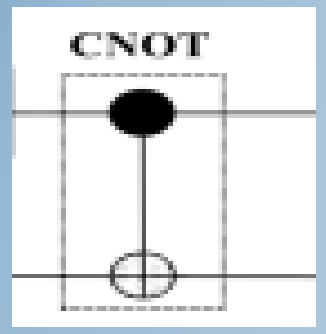
مکانیسمی از حرکت کیوبیت ها از یک محل به محل دیگر بدون نیاز به انتقال فیزیکی ذره ای که کیوبیت به آن متصل است را ارائه می کند

- گیت های کوانتومی

در پردازش اطلاعات اطلاعات کوانتومی چهار گیت اصلی وجود دارد که تمام پردازش های کوانتومی بوسیله این چهار گیت قابل پیاده سازی است

❑ گیت های کوانتومی

$$F=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&0&1\\0&0&1&0\end{bmatrix} \quad CNOT=\begin{cases}|00\rangle\rightarrow|00\rangle\\|01\rangle\rightarrow|01\rangle\\|10\rangle\rightarrow|11\rangle\\|11\rangle\rightarrow|10\rangle\end{cases}$$



شماتیک گیت CNOT

✓ گیت **CNOT**

اگر کیوبیت اول صفر باشد تغییری نمی کند

اگرکیو بیت اول یک باشد کیوبیت دوم را تغییر می دهد

$$|10\rangle=\begin{bmatrix}0\\0\\1\\0\end{bmatrix} \quad |00\rangle=\begin{bmatrix}1\\0\\0\\0\end{bmatrix}$$

$$|11\rangle=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\1\end{bmatrix} \quad |01\rangle=\begin{bmatrix}0\\1\\0\\0\end{bmatrix}$$

✓ گیت هادامارد

این گیت دارای یک ورودی و یک خروجی است

$$H=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1&1\\1&-1\end{pmatrix}$$

$$\hat{H}|0\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1&1\\1&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}=\frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$\hat{H}|1\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1&1\\1&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}=\frac{|0\rangle-|1\rangle}{\sqrt{2}}$$

- ✓ گیت انتقال فاز

این گیت تک کیوبیتی است

اگر ورودی یک باشد فاز آن ۱۸۰ درجه تغییر می کند

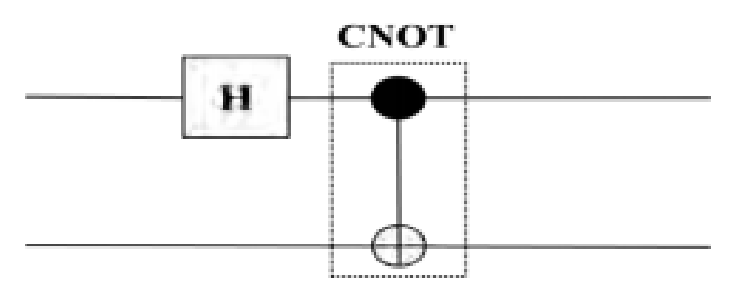
$$Z = \begin{cases} |0\rangle \rightarrow |0\rangle \\ |1\rangle \rightarrow -|1\rangle \end{cases}$$

- ✓ گیت چرخش

این گیت نیز تک کیوبیتی است

$$T = \begin{cases} |0\rangle \rightarrow e^{i\alpha}|0\rangle \\ |1\rangle \rightarrow e^{-i\alpha}|1\rangle \end{cases}$$

درهم تنیدگی کوانتومی
با سری کردن گیت هادامارد و CNOT یک زوج در هم تنیده را به صورت ریاضی می توان مدل کرد



مدار کوانتومی تولید کننده زوج EPR

اکر ورودی این مدار را یکی از حالات زیر در نظر بگیریم
چهار حالت درهم تنیده متفاوت با عنوان حالات بل به این صورت بدست می آید:

$$|00\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = |\phi^+\rangle$$

$$|01\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) = |\psi^+\rangle$$

$$|10\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) = |\phi^-\rangle$$

$$|11\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) = |\psi^-\rangle$$

EPRدارای سه خصوصیت عمده است:

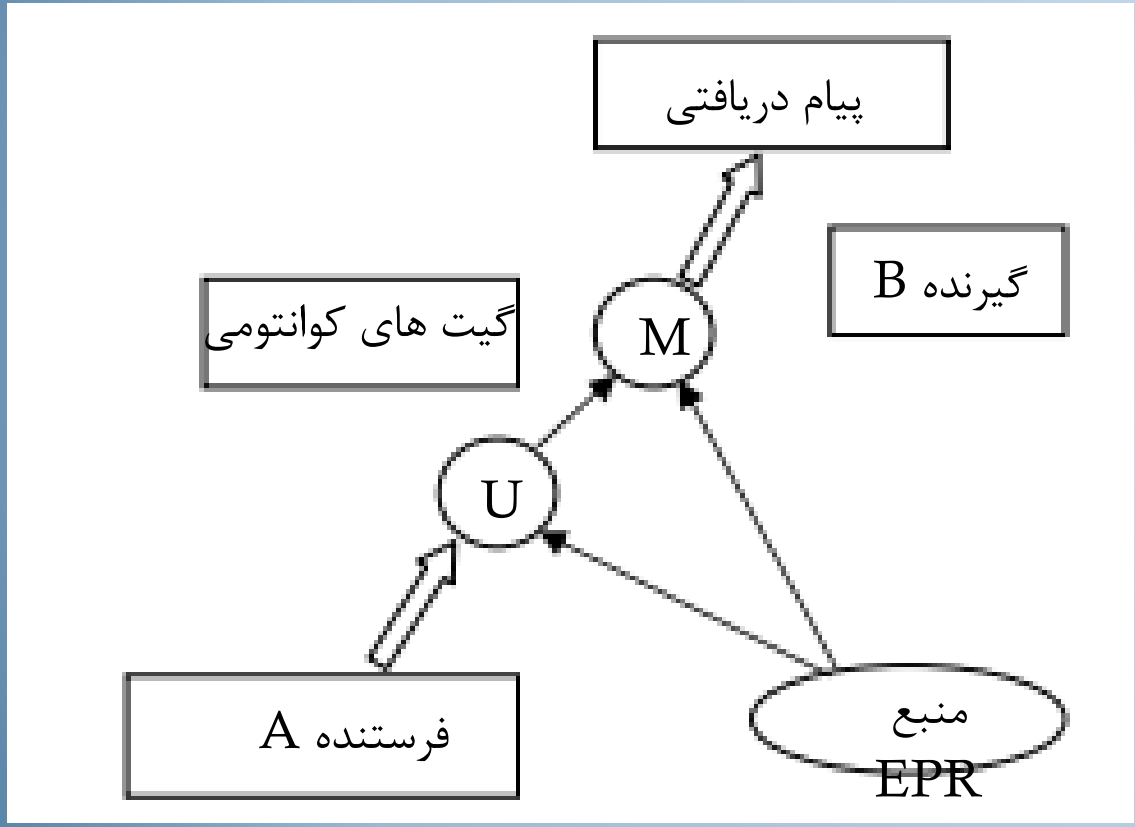
۱-هراصلاح یاتغییری که به ذه اول اعمال شود،زوج آن یعنی ذره دوم نیزدچارآن تغییرات می شود.

۲-تغییرات ذره دوم که ناشی ازتغییرات اعمال شده به ذره اول است وابسته به فاصله میان آنهانیست.

۳-ذره دوم بطورهمزمان تغییرات ذره اول راحس می کند.

❖ پروتکل انتقال

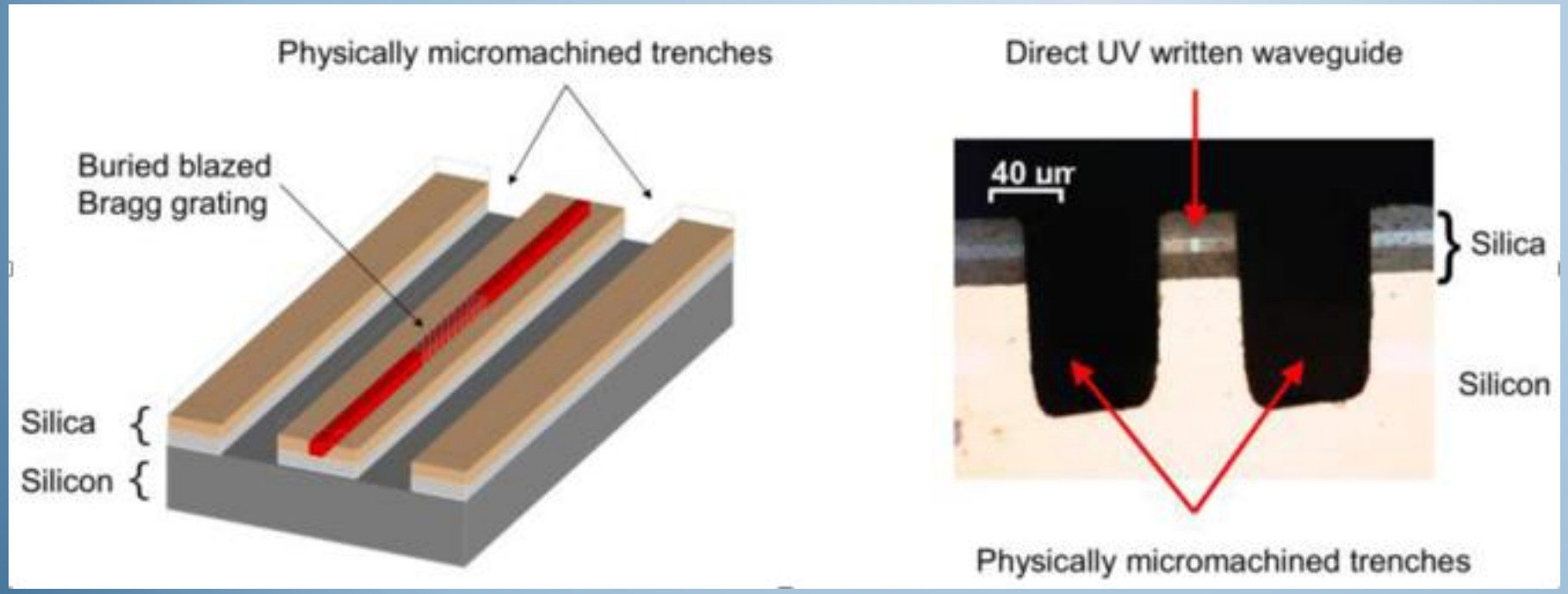
- تولید زوج فوتون EPR
- ارسال یکی از فوتون ها برای A و دیگری برای B
- دو فوتون باید نسبت به محیط اطراف ایزوله باشد تا در هم تنیدگی میان دو فوتون حفظ شود
- فرستنده A تغییرات را با استفاده از گیت U به فوتون اعمال می کند
- این تغییر همان تغییر در قطبش فوتون است
- تاثیر این تغییر بر فوتون گیرنده B نیز اثر می کند
- فرستنده A نتایج اندازه گیری را با یک کانال کلاسیک به B ارسال می کند
- گیرنده B بوسیله گیت کوانتومی M تغییرات زیادی روی فوتون خود انجام می دهد تا پیام ارسالی A را استخراج کند



فرآیند مخابرات کوانتومی

فرآیند تله پورت کردن روی تراشه فتونیکی

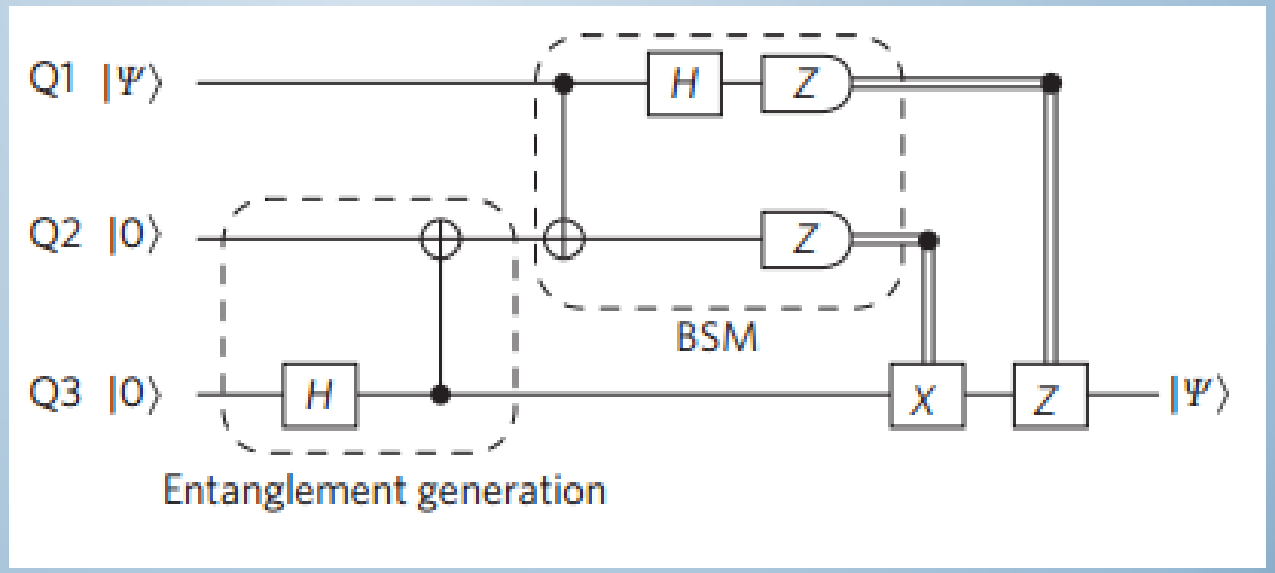
- از یک تراشه فوتونیکی قابل تنظیم برای انجام پروتکل تله پورت کردن استفاده می شود
- انتقال از راه دور یک کیوبیت فوتونیکی بوسیله دستگاه موجبر مجتمع انجام می شود
  - سطح مقطع موجبر ۴,۵ میکرومتر × ۴,۵ میکرومتر است
  - نور پیوسته فرابنفش UV با طول موج 244nm تابانده می شود



موجبر و تکنیک تابش نور فرا بنفش

- در این شکل می خواهیم حالت کوانتومی کیوبیت ورودی Q_1 را به کیوبیت هدف Q_3 منتقل کنیم.
- این فرآیند شامل حالت رمزگذاری، تولید زوج درهم تنیده، آنالیز حالت بل
  و حالت توموگرافی(پرتونگاری) بوده که همه آنها بر روی تراشه انجام می شود.
- این پروتکل با تولید یک منبع فتونی کاملا درهم تنیده، اندازه گیری حالت بل و کدگذاری روی کیوبیت های Q2 و Q3 آغاز می شود.
- سپس اندازه گیری حالت بل (BSM) بر روی ورودی Q1 و یک نیمی از حالت درهم تنیده (Q2) انجام می شود.

State encoding
Entanglement preparation
Bell-state analysis
State tomography



مدار انجام مبادله کوانتومی

- عملیات قطعی تک کیوبیتی :

از نظر فیزیکی نمی توان گیت های دو کیوبیتی قطعی را در کدگذاری دو مسیره و قطبش بسازیم به دلیل اینکه فوتون ها نمی توانند باهم فعل و انفعالاتی داشته باشند

اما همه گیت های تک کیوبیتی با استفاده از شیفت دهنده فاز ترمو اپتیکی و شکافنده پرتوهای خطی قابل ساخت هستند.

همچنین بوسیله گیت های تک کیوبیتی، چرخش های واحد را مجددا می توانیم تنظیم کنیم

$$\hat{U}(\theta,\phi) = e^{-i\phi\,\hat{\sigma}_z/2}\, e^{-i\theta\,\hat{\sigma}_y/2}$$

گیت های کنترل فاز در مدار با استفاده از طرح احتمالاتی آقای رالف اجرا می شود

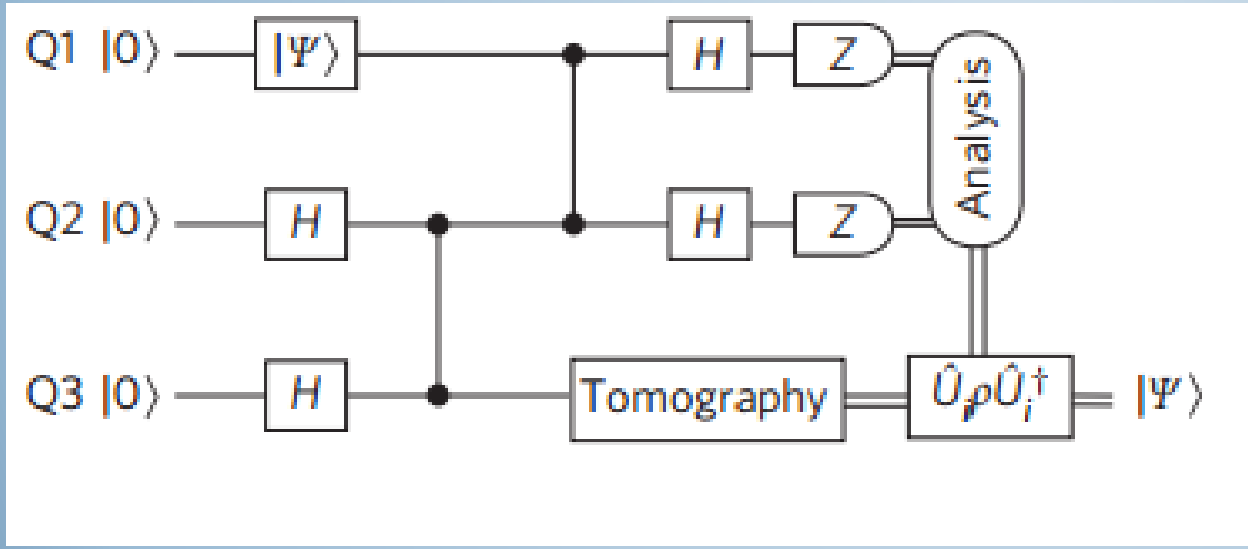
در این طرح اثر متقابل موثر دو فوتون بوسیله تحریک دو فوتون انتخابی در هر مود انجام می شود

single qubit unitary rotations

پیاده سازی با گیت های تک کیوبیتی

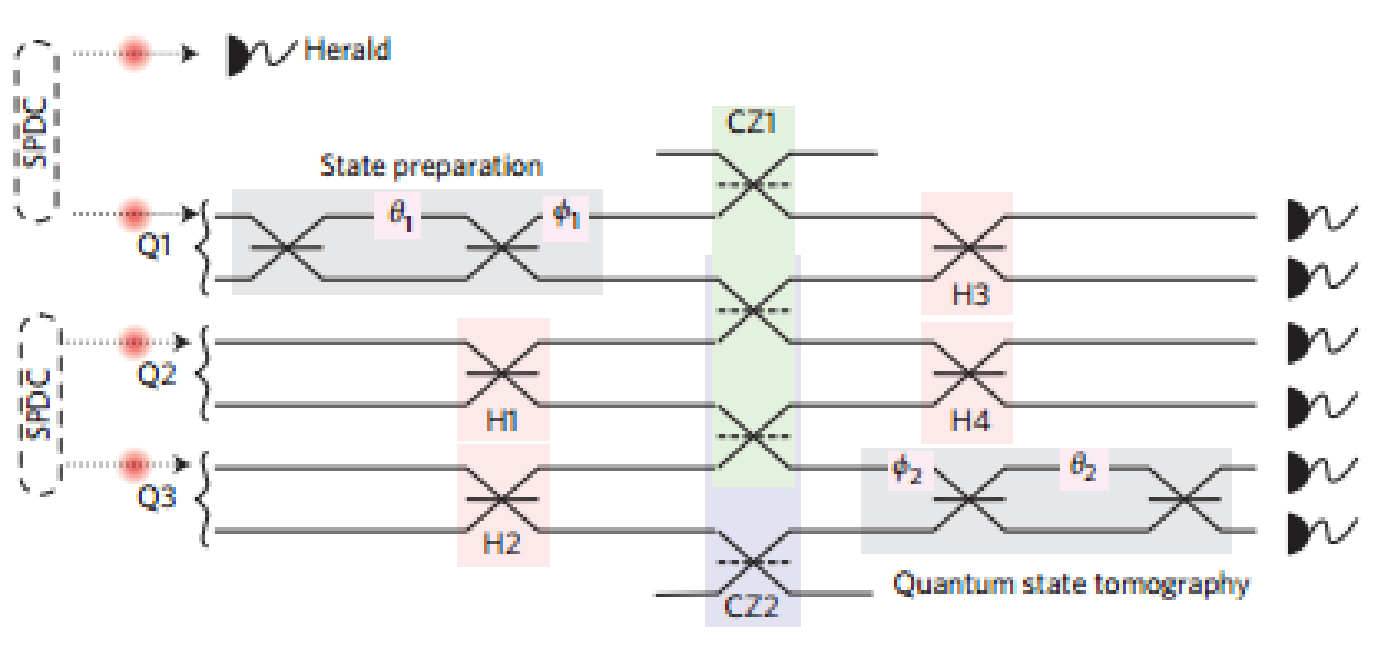
- دو گیت CNOT با دو گیت کنترل شده فاز(C PHASE) و گیت های محلی هادامارد جایگزین می شود.

نتایج حاصل از اندازه گیری حالت بل (BSM) بعد از پردازش به عنوان بخشی از توموگرافی حالت کوانتومی برای بازیابی کیوبیت منتقل شده استفاده می شود.



شماتیک مدار تله پورت کردن کوانتومی با استفاده از گیت های تک کیوبیتی

- عملیات هادامارد محلی (H1تا H4) با استفاده از شکافنده پرتو با نسبت بازتاب ۵۰ درصد (خطوط به هم پیوسته) و دو گیت آبشاری کنترل شده فاز(CZ1، CZ2) با استفاده از چهار شکافنده پرتو با نسبت بازتاب یک به سه (خطوط منقطع) پیاده سازی می شوند.
- حالت آماده سازی و توموگرافی بر روی تراشه با استفاده از فازهای θ و ϕ کنترل شده نوری-حرارتی انجام می شود. Thermo –optically
- مدار موجبر سه کیوبیت دو مسیره تراشه مجتمع سیلیکا - سیلیکن کدگذاری شده است.
- کدگذاری Q1 با θ1 و ϕ1 انجام شده است



شماتیک مفهومی مبادله کوانتومی روی تراشه فتونیکی

$$|\psi_{in}\rangle = \hat{U}(\theta_1, \phi_1)|0_L\rangle$$

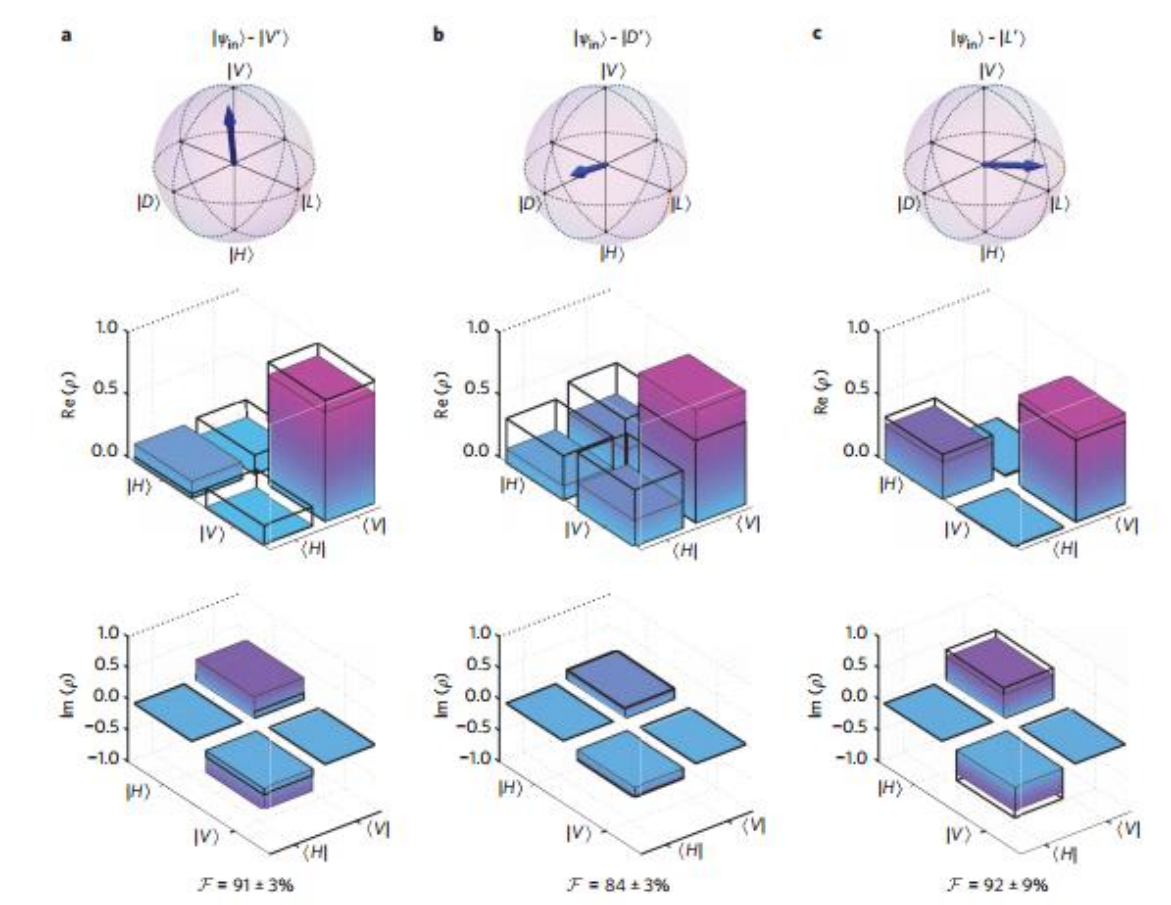
- از یک مدل عددی برای شبیه سازی حالت خروجی تله پورت شده روی Q3 استفاده کردیم

که این مدل در مرحله دقیقا قبل از پرتونگاری حالت کوانتومی (QST) اجرا شد

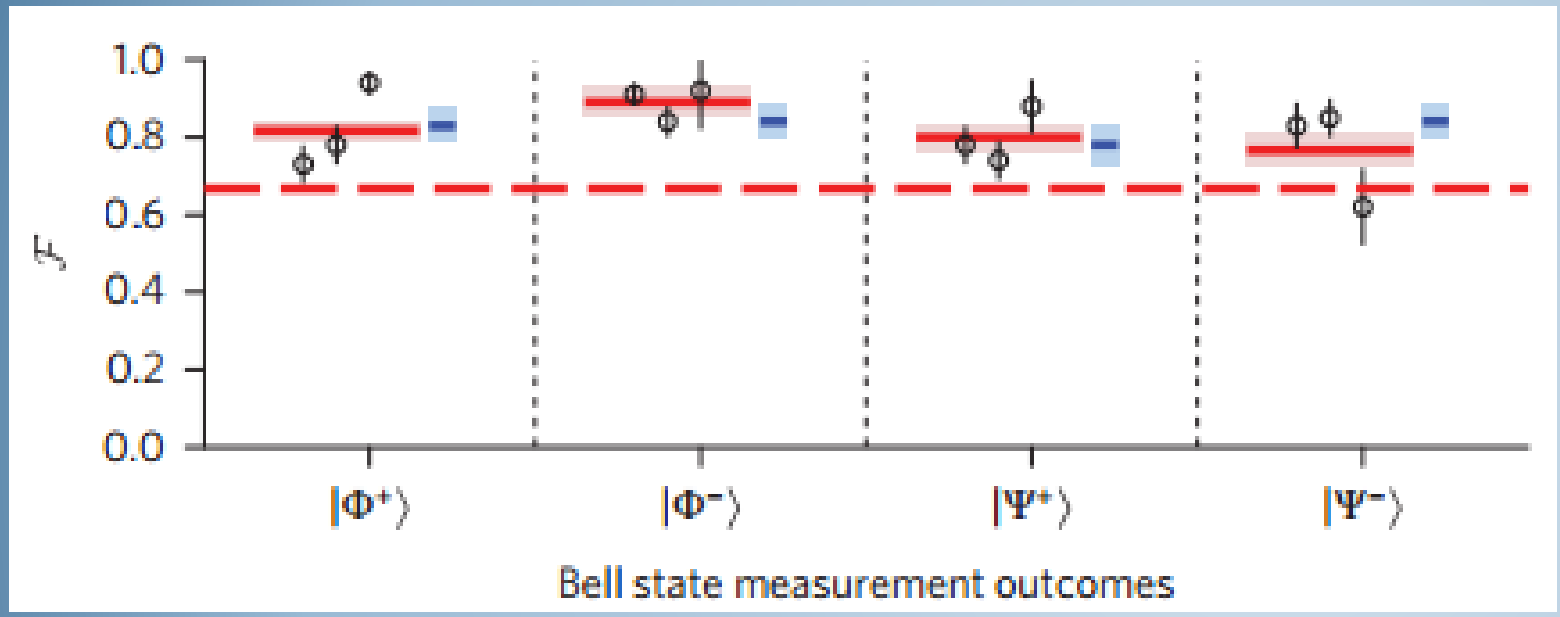
- شبیه سازی با ورودی های حالت فوک غیر قابل تشخیص ایده آل انجام شد و هدف این است که اثرات ناشی از کدگذاری و توموگرافی را از این تحلیل حذف کند
- به منظور راستی آزمایی تله پورت کردن کوانتومی از حالت قبلی چرخش برای بازیابی حالت های Q3 استفاده می کنیم که به آن ρout گفته می شود
- کیفیت حالت های ورودی به صورت زیر محاسبه می شود

$$\mathcal{F} = \langle \psi_{\text{in}} | \hat{U}_i' \, \hat{\rho}_{\text{out}} \, \hat{U}_i'^{\dagger} | \psi_{\text{in}} \rangle$$

- درستی آزمایش ها را با روش post-selective برای هرنتیجه BSM کلاسیک تایید می کنیم
- این آزمایش با استفاده از سه حالت ورودی مستقل خطی روی سه محور متعامد کره بلاخ انجام می شود
- سه حالت مقابل در کره بلاخ به نزدیکترین محورها منطبق شد
- حالت های نهایی تله پورت شده Q3 با استفاده از پرتونگاری روی تراشه فتونیکی بازیابی شده است
- کیفیت در هر سه حالت محاسبه شده است



حالت های کیوبیت اولیه Q1



محاسبه و شبیه سازی کیفیت تلپورتیشن کوانتومی در تراشه فتونیکی

- نمودار ، نتایج حاصل از چهار حالت BSM است
- در هر نمونه، کیفیت متوسط برای هر سه حالت ورودی (منطقه قرمز سایه دار) بالاتر از حد کلاسیک(خط چین قرمز) است
- مناطق سایه دار آبی نشان دهنده کیفیت میانگین پیش بینی شده در میان تمام سه حالت ورودی است
- خطاها با استفاده از روش مونت کارلو محاسبه شدند
- این آنالیز خطا ۳ مانع کلیدی برای اسکیل شدن در آینده را نشان می دهد

منابع فوتونی، تراشه های ناقص فوتونی و تلفات

جمع بندی

- سرعت تله پورت کردن فوتون ها از سرعت نور تجاوز می کند اما در کامپیوترهای کوانتومی این سرعت به سرعت نور محدود می شود
- از یک تراشه فوتونیکی قابل تنظیم برای انجام پروتکل تله پورت کردن استفاده شد
- انتقال از راه دور یک کیوبیت فوتونیکی بوسیله دستگاه موجبر مجتمع انجام شد
- فرآیند تله پورت کردن شامل حالت رمزگذاری، تولید زوج درهم تنیده، آنالیز حالت بل و حالت توموگرافی(پرتونگاری) بوده که همه آنها بر روی تراشه انجام می شود.
- همه گیت های تک کیوبیتی با استفاده از شیفت دهنده فاز ترمو اپتیکی و شکافنده پرتوهای خطی قابل ساخت هستند در حالی که گیت های دو کیوبیتی با این دو قابل پیاده سازی نیستند
- نسبت شکافنده پرتو غیر ایده آل(imperfect) درجه درهم تنیدگی را کاهش می دهد و موجب کاهش کیفیت می شود

با سپاس فراوان از توجه شما