بسم الله الرحمن الرحيم محمد مال کا هنده بیار العن شخص علمه الا باناء محمد میل کا هنده بیار العلق بی خود بخود می در دانشكده مهندسي ترق چیپ های قتونیکی SPDC on photonic chips استاد راهنما. دکتر محمدنژاد

ديماه ۹۶



- کوانتوم نوری یک زمینه تحقیقاتی است که از فیزیک کوانتومی و فیزیک نیمه کلاسیک برای بررسی پدیده هایی شامل نور و رفتار آن با ماده در سطوح زیر میکروسکوپی بهره می جوید.
 یکی از نتایج بسیار زیاد از تحقیقات در زمینه کوانتوم نوری نشان دادن در هم تنیدگی کوانتومی است.
- فوتون های در هم تنیده که بصورت زوج تولید شده اند رفتار همبسته ای از خود نشان می دهند و بسیاری از مبانی پایه ای و جنبه های کوانتوم مکانیکی مانند غیر محلی (<u>Stan Seculity</u>) از خود نشان می دهند.
- در هم تنیدگی کوانتومی در علم اندازه گیری کاربرد دارد زیرا برای اجرا کردن اندازه گیری نوری حالت دو فوتون تنیازی به سنجیدن استاندارد قبلی ندارد.
 - یکی از پدیده های کو انتومی که فوتون های در هم تنیده تولید می کند 9DP است.
 - SPDC در او ایل ۱۹۷۰ توسط Burnham و Weinberg توصیف شده است و در سال ۱۹۸۰ مورد آزمایش قرار گرفته است.

مقدمه



SPDC in pr

GPG پدیده ای است که از یک کریستال غیر خطی دو ضریب شکستی بر ای جدا کردن فوتون ها به جفت فوتون هایی که در تطابق با قوانین بقای انرژی و مومنتوم دار ای انرژی ترکیب شده و مومنتوم بر ابر با فوتون اصلی □ استفاده می کند.

در این پدیده از نوری که به کریستال بر خورد می کند طول موج کمتری نسبت به فوتون های دوقلو دارد و فوتون های دوقلو دارای قطبش همبسته ای دارند.

دو نوع 9 9 9 5 وجود دارد. نوع ۶ (فوتون های تولید شده توسط کریستال] دار ای قطبش یکسانی با فوتون بر خور دی هستند. نه ع ۵۵ (دار ای قطنش، دکتیانی نستند)



Direction of propagation

of incident beam

نوع و بقای انرژی و مومنتوم در این سیستم حفظ می <mark>شو</mark>



- √ فوتون های در هم تنیده تولید شده توسط کریستال □ یک مخروطی را بوجود می آورند و وقتی خط مسیر یا گذرگاه فوتون ها را در فضا بر حسب زمان ترسیم شود یک حلقه فوتونی شکل خواهد گرفت.
- √ در گذشته این حلقه های فوتونی توسط دوربین های CD ترسیم می شد و قبل از آن نیز توسط اسکن دوبعدی در فضا شکل می گرفت.
- √ فوتون های در هم تنیده می توانند برای تشخیص و تعیین بازده کوانتومی در یک آشکارساز فوتون بدون استفاده از سنجش استاندارد قبلی و برای اهداف تصویر برداری کوانتومی(فوتون ها یک تصویری از شی تولید خواهند کرد درصورتی که با شی برخورد نداشته اند) و در محاسبات کوانتومی نیز مورد استفاده قرار می گیرند.
 - در گذشته محققان دستگاه الکترونیکی طراحی کردند که وظیفه اتصال ماژول شمارنده تک فوتونی (آشکار کننده فوتون های تبدیل شده) به رابط کامپیوتری ش390% مرجد برای خواندن سیگنال های دریافتی توسط آشکارساز های تک فوتونی را دارد.



- در این آزمایش ای یک ستاپ آزمایشگاهی را نشان می دهیم که با مطالعه برخورد بین فوتون ها از فوتون های در هم تنیده تولید شده به روش OPG نوع O برای بهبود روش سنجش آشکار ساز تک فوتونی و تعیین بازده کوانتومی استفاده می شود. همچنین مشخصاتی مانند نرخ شمارش تاریکی از آشکارساز های تک فوتونی و برخورد تصادفی بین فوتون های در هم تنیده مورد آزمایش واقع می شود. انواع مختلف OPG برای زوایای مختلف بین محور نوری کریستال غیر خطی و جهت انتشار پرتو پمپ بر خوردی مورد مطالعه قرار می گیرد.
- د در $\Im \mathcal{PDC}$ از یک کریستال غیر خطی تک محوری دو ضریب شکستی برای جدا کردن پرتو فوتونی با فرکانس زاویه ای w_p عدد موج k_p و طول موج λ_p استفاده شده است که دو فوتون در هم تنیده به نام های پرتو سیگنال و بیکار تولید می کند.

• تئوری اصلی که 59DC بر مبنای آن بنا شده است معادلات ماکسول و ایده غیر

59DC 399DC



اپتیک غیر خطی∏ شاخه ای از اپتیک است که رفتار نور در محیط غیرخطی که قطبش دی الکتریک Pً از محیط بصورت غیر خطی به میدان الکتریکی Eً از نور پاسخ می دهد را توصیف می کند. غیر خطینگی پارامتری یک بر همکنشی است که حالات کوانتومی مواد غیر خطی توسط برخورد و یا بر همکنش با میدان نوری تغییر نمی کنند که در نتیجه فرآیندهای لحظه ای نتیجه می شود.

 χ بر ای یک محیط غیر خطی چگالی قطبش دی، الکتریک $ec{P}$ که گشتاور دو قطبے در واحد حجم در زمان $ec{E}$ است می توان با توجه به عبار ات $ec{E}$ با $ec{E}$ با $ec{E}$ که گشتاو دا دو قطبے در $ec{P}$ که $ec{E}$

نفوذ پذیری الکتریکی فضای آزاد ϵ_0 امین مرتبه حساسیت یا تاثیر پذیری محیط غیر خطی

$$\begin{split} \begin{split} & (t, t) \\ & (t$$

با جایگذاری مقادیر k_i و k_s با روابط متناظر آن دا

 $n_s \omega_s \sin \theta_s = n_i \omega_i \sin \theta_i.$

لازم است که پرتو های سیگنال و بیکار فرکانس ز اویه ای بر ابری داشته باشند و این بخش ز اویه یکسانی با
ز اویه یکسانی با
جهت انتشار نور دارند بنابر این :
$$\theta_s = \theta_i$$

با این شر ایط داریم:
 $n_p = n_{s,i} cos \theta_{s,i}$
 $n_p \omega_p = 2n_{s,i} \omega_{s,i} cos \theta_{s,i}$
 $n_s = n_i$
روابط بالا به روابط تطبیق فاز موسوم هستند. این نه عان تددیل

در \mathcal{GDC} نوع \mathcal{C} <u>ا</u>فوتون های تولید شده دارای فطبش همبسته هستند. این نوع از تبدیل کاهنده متناظر با پرتو پمپ e_p فوق العاده خواهد بود و پرتو های سیگنال و بیکار معمولی خواهد بود و برتو های سیگنال و بیکار معمولی خواهد بود و بود و بصورت زیر توصیف خواهد شد.

 $e_p - - - \to o_s + o_i$ $n_e \lambda_p = 2 n_o \lambda_{s,i} cos heta_{s,i}$ در $n_e \ \delta P D C$ و ابسته به طول موج λ_p از پرتو و همچنین زاویه ϕ که جهت انتشار پرتو با

ر ابطه بین
$$n_{e,o}$$
 با طول موج $\lambda_{p,s,i}$ در کریستال های مختلف متفاوت است که توسط نوست $\lambda_{p,s,i}$ تجربی سلمیر توصیف می شود.
سلمیر توصیف می شود.
بر ای کریستال های غیر خطی \Box معادلات سلمد. که دیام تحدیث داط تطبیق فاز در 2000 ما $n_o(\lambda) = \left[2.7359 + \frac{0.01878}{\lambda^2 - 0.01822} - 0.01354\lambda^2\right]^{\frac{1}{2}}$

$$n_e(\lambda) = \left[2.3753 + \frac{0.01224}{\lambda^2 - 0.01667} - 0.01516\lambda^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

یک طرح معمولی برای اندازه گیری فوتون های برخوردی استفاده از آشکارساز دوفوتونی (آشکارساز پرتو سیگنال و بیکار) و شمارنده است. آشکار ساز پرتو سیگنال _S برای تحریک شمارنده و اولین آشکارکنندگی نوری توسط آشکارساز پرتو بیکار D_i در تعقیب D_s برای متوقف کردن شمارنده مورد استفاده قرار می گیرد. اگر زمان بین شروع شدن و متوقف شدن شمارنده کمتر از آستانه ای که قبلا به عنوان زمان بر^ریخوردی تعریف کردیم باشد⊡شمارنده یک شماره افزایش پیدا می کند و وقوع برخورد



اگر هیچ فوتونی توسط D_i در زمان حل برخورد داده شده آشکار نشود \Box مکانیزم شمارش برخورد دوباره از سر گرفته خواهد شد و به محض اینکه D_s فوتونی آشکار کند \Box شمارنده تحریک خواهد شد اگر یک فوتون توسط D_s آشکار شود فقط یک برخورد در شمارنده ثبت می شود. D_s آشکار شود ولی چند فوتون توسط D_i اشکار شود فقط یک برخورد در شمارنده ثبت می شود. در فرآیند شمارش فوتون با استفاده از پدیده $\Im D C$ داریم.

 $\mathfrak{N}_{s} = \mathfrak{N}_{s}$ تعدادجفت فوتون های تولید شده در زمان قطع داده شده $N_{s} = N_{s}$ تعداد شمار ش ثبت شده توسط آشکار ساز پرتو سیگنال در همان زمان قطع داده شده $N_{i} = \mathfrak{N}_{i}$ تعداد شمار ش ثبت شده توسط آشکار ساز پرتو بیکار در همان زمان $N_{c} = \mathfrak{D}_{s}$ تعداد برخورد بین $D_{s} = \mathfrak{D}_{i}$

لذا روابط زیر صادق است. $N_i = N\eta_i$ $N_s = N\eta_s$ $N_c = N\eta_s\eta_i$

> با توجه به روابط بالا روابط زیر را داریم. $\eta_i = rac{N_c}{N_s} \qquad \qquad \eta_s = rac{N_c}{N_i}$

از اینرو با استفاده از SPDC به دلیل تعیین بازده کوانتومی از D_s و D_i هیچ آشکارساز از قبل سنجش شده ای نیاز نیست.

ستاپ آزمایشی و روش









ساختار ستاپ مورد از مایش



- کابل های فیبر نوری جدا از هم ابرای هدایت دو فوتون از پورت فیبر به فیلتر های میروی از پورت فیبر نوری جدا از اینکه فقط نور با طول موج ۱۸۰ نانومتر به SPCO می رسد) مورد استفاده قرار می گیرند تا نور هایی که طول موج بین ۷۸۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر ندارند را فیلتر کند و برای ماژول شمارنده تک فوتونی (SPCON) بفرستد.
- از اونجایی که SPCOM فوتونهایی را آشکار کرده است یک پالس TTS از SPCOM به قسمت تطبیق دهنده که روی BCD قرار دارد از طریق یک کابل ۴۰ پینی فرستاده می شود.
- DE2 شامل یک چیپ برنامه ریزی شده GPGG است که به Cab UGE در کامپیوتر متصل است تا سیگنال های دریافتی از GPCM را بخواند.
 - کل ستاپ آزمایشگاهی روی میز اپتیک که هر لرزشی از محیط اطراف را ایزوله می کند قرار گرفته است تا دقت سیستم بالا رود.
 - از آنجا که نور در کریستال و آینه ها جذب می شود درصد کمی از فوتون که از طریق
 آولید شده مورد تحلیل قرار می گیردبنابراین باید حداکثر تلاش برای تراز بودن
 قطعات انجام شود.

تحلیل و نتــــایج



تبت شمارش تاریکی

نرخ شمارش تاریکی از یک آشکار ساز فوتون□ نرخ میانگین شمارش ثبت شده بدون هر نور برخوردی است که حداقل نرخ شمارش برای حالتی که سیگنال در سیستم وجود دارد نیز هست. برای تست شمارش تاریکی برای آسکارسازهای ۱ و ۲ ستاپ مورد نظر ما□ آزمایش را در اتاق تاریک و در غیاب هر نور محیطی انجام می دهیم.



برای تحلیل برخورد تصادفی بین 59CM آشکارساز بطور یکنواخت توسط نور سبز ۱۲۰ ولتی برای مدت ۲۰۰ ثانیه اجرا خواهد شد.

میانگین نرخ فونون های آشکار شده پر ثلثیه پرای هر ۷۹۳۵ ۵۶ ۷۹۳ و ۳۴۳۷ شمارش پر ثلثیه است.



شمارش بر ثانیه ثبت شده بر ای شمارش تاریکی



منحنی نیمه لگاریتمی بر ای نرخ بر خور د تصادفی

12/21



تلبت برخورد برای فوتون های در هم تنیده به روش59D

بله منظور تحلیل نرخ برخورد فوتون های سیگنال و بیکار که توسط 9D% تولید شده اند آشکارساز را به مدت ۵۰۰ ثانیه در یک شرایط کاملا تاریک اجرا می کنیم و نرخ فوتون های متناظر را به عنوان تابعی از زمان ثبت می کنیم

نرخ شمارش متوسط فوتون های در هم تنیده از ۲۶۰ ۵۶۳C9 ۲۶۰ و ۱۹۰ شمارش بر ثانیه بود.



شناسایی محاسباتی شرایط تطبیق فاز در ٥٦٦٥

نرخ شمارش فوتون های در هم تنیده

با تغییر زاویه Ø بین محور نوری از کریستال BBO جهت انتشار نور آبی برخوردی به کریستال در درجه حرارت و طول داده شده کریستال زاویه Bکه هر کدام از پرتو های سیگنال و بیکار که با جهت انتشار پرتو پمپ می سازند با استفاده از نرم افزار FOR TRADT قابل محاسبه است



40-

35-

30

25

20 15.

10

5

0

0

0.5

Half angle (degrees)

(A)

برای سه زاویه مختلف از Φ سه نیم زاویه θ شکل می گیرد. لازم است که .

Optical Axis

NON-LINEAR

CRYSTAL

کلقه فوتونی شکل گرفته توسط روش SPDC که با دوربین

PUMP



Wavelength of the signal beam (µm)



Wavelength of the signal beam (µm)

ر ابطه بین نیم ز او یه شکل گرفته توسط پر تو های سیگنال و بیکار وطول موج پرتو سیگنال

CD گرفته شده است.

0 = خواهد بود

CCD Film

Photon Ring

IDLER O

Δx



نور لیزر مرئی به سمت میکرو حلقه ما توسط موجبر با کانال نازک هدایت می شود.

جفت فوتونهای & تولید شده توسط موجبر بزرگتر به بیرون تزویج می شوند

یک تقسیم کننده طول موج چندتایی (۵۶۵۲) فوتون های ۶۶ را به فیبر نوری به سمت آشکارساز برمیگرداند.

بعد از عبور از یک فیلتر سیلیکونی ☐ باقی مانده فوتون های نور مرئی ورودی مسدود می شوند در حالی که فوتون های && از طریق موجبر وارد ۵۶۶۶۵ شده که در یک چیپ جداگانه و در داخل کرویستات قرار دارد.

تزویج کننده های جهتی موجبر در این چیپ آشکارکنندگی باعث جداسازی ۵۰/۵۰ فوتون ها خواهند شد قبل از آشکار سازی ه۵۶۶۵ و تحلیل سیگنال با شمارنده تک فوتونی همبسته با زمان3059).

۳۹۲ هسته اصلی موجبر را شکل می دهد و از _{Sio}2 به عنوان لایه پوششی با ضریب شکست پایین روی بستر۱۶ سیلیکونی استفاده می شود.



TO

On-chip SPDC photon-pair source. (a) Schematic illustration of an on-chip photon-pair source based on a $\chi^{(2)}$ nonlinearity connected to SSPD on another chip. Higher-energy pump photons (visible wavelengths) are coupled to a microring resonator and the generated lower-energy photon pairs (IR wavelengths) are randomly split on the detector chip for coincidence measurements with integrated SSPDs. A fiber-coupled silicon filter (labeled as off-chip filter) is used to reject the remaining pump light reflected back from the fiber-to-chip interface. (b) Effective refractive indices of modes in microring. The phase-match condition is satisfied with waveguide width around 1.10 µm. Lower-left inset: the cross-section of the AIN waveguide. Insets on the right: The electric field profiles at the cross-section of microring of two phase-matched modes. (c-e) Device images of AIN down-conversion photon-pair source. The white dashed box shows the enlarged region. (c) Optical image of an array of microring photon-pair sources with on-chip WDMs. (d) Enlarged image of a single microring resonator with both IR (top) and visible (bottom) bus waveguides. (e) SEM picture showing the coupling region of visible light bus waveguide (narrow) with microring resonator (wide).



طیف نوری اندازه گیری شده است a)جريان تک فوتون که به چيپ گيرنده مي رسد.

نورى مرئى 3012 1.1 × 1.1 × 10⁵ لیف انتقال نور GR با مودهای JONC باشماره مود سمتی (b

شناسايي مي شود. ضريب كيفيت مود نور $\Re ~ 10^5 imes 2 imes 10^5$







م) اندازه گیری خود همبستگی از پرتو بیکار در نزدیکترین تبدیل کاهنده. شکل داخل، شماتیک هر اندازه گیری را نشان می







مه) نمودار میدان الکتریکی شبیه سازی شده برای ۵٫۵۳ روی چیپ برای نور مرئی و ۶۶ م) بازده تزویج از نور ۶۶ به پورت تقاطع و نور مرئی به پورت دریچه شکل داخلی) بازده تزویج برای محدوده طول تزویج از ۲۰۰ تا ۲۰۰۴ میکرومتر.

تش ایچ و بهینه سازی

- می توان در آینده بجای کریستال استفاده شده در ستاپ که دو درجه آزادی حرکت دارد از کریستال هایی استفاده کنیم که سه درجه آزادی حرکت داشته باشد که در نتیجه آن] تنظیم بهتر زاویه ای در کریستال صورت خواهد گرفت.
- بهینه سازی تراز ستاب پیش رو میتواند کمک کند تا ما
 پرتوهای سیگنال و بیکار را توسط یک آشکارساز تک فوتونی
 آشکار کنیم.

۲ با کاهش شعاع میکرو حلقه ۳۵٫۳ و با افزایش ضریب کیفیت
 ۲۰/۱ تشدیدگر میکرو حلقه می توان به تقویت بیشتر بازده تبدیل
 ۲۰/۱ کاهشی رسید.

[1] محمدنژ اد [1] شهر ام طاهر خانی [معصومه اصول کو انتوم الکتر ونیک و محاسبات کو انتومی نوری تهر ان. دانشگاه علم و صنعت ایر ان ۱۳۹۱ ص. ۳۰۷ تا ۳۱۴

[2] Kok P, Munro WJ, Nemoto K, Ralph TC, Dowling JP et al. Linear optical quantum computing with photonic qubits. Rev Mod Phys 2007; 79: 135-174.

[3] Huang YF, Liu BH, Peng L, Li YH, Li L et al. Experimental generation of an eightphoton Greenberger-Horne-Zeilinger state. Nat Commun 2011; 2: 546.

[4] Schuck C, Guo X, Fan L, Ma X, Poot M et al. Quantum interference in heterogeneous superconducting-photonic circuits on a silicon chip. Nat Commun 2016; 7: 10352

[5] J. L. Catalano, Portland State University, Spontaneous Parametric Down-Conversion, An Undergraduate Hon- ors Thesis, (2014). p. 1-27.

[6] Gibney, E. Entangled Photons Make a Pic-ture From A Paradox. Retrieved October 20, 2014, from http://www.nature.com/news/entangled-photons-make-a-picture-^{21/21} from-a-paradox-1. 15781.

