

Research Paper

The Experimental Investigation of Filter Effect on Visibility of Fringes in Quantum Single Photon Interferometry¹

Hoda Sadat Lotfipour^{*2}, Zahra Bagheri³ and Majid Khodabandeh⁴

Received: 2022.09.11

Revised: 2022.12.13

Accepted: 2023.01.24

Abstract

This study investigates the effect of the filter on the visibility of fringes in single-photon interference. A pair of photons by spontaneous parametric down-conversion is produced using a nonlinear crystal. One of them passes through a Mach-Zehnder interferometer due to the principle of indistinguishability of the paths, which interferes with itself. By changing the length of the paths of the Mach-Zehnder arms with the help of a stage, the interference happens in the coincidence pattern. In order to align the optical elements and minimize the optical path difference in the interferometer arms, interferometry with laser and white light has been used before single photon interferometry. By placing filters with different bandwidths in the signal and idler photons path, we see interference fringes with different visibility. An interference pattern is obtained by recording the coincidence between the correlated photons. The results show that the frequency bandwidth of filters affects the coherence length of generated photons and so the visibility of interference fringes.

Keywords: *Spontaneous Parametric Down Conversion, Single Photon Interferometry, Mach-zehnder Interferometer, Correlated Photons, Visibility.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2023.41718.1296

² Assistant Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: hodalotfipour@gmail.com

³ Ph. D. Graduated, Quantum Biophotonic Group, Iranian Center for Quantum Technologies (ICQTs), Tehran, Iran. Email: bagheri.zahra110@gmail.com

⁴ Ph. D. Student, Quantum Biophotonic Group, Iranian Center for Quantum Technologies (ICQTs), Tehran, Iran. Email: majidkh92@gmail.com

بررسی تجربی اثر فیلتر بر روی نمایانی فریزها در تداخل سنجی کوانتومی تک فوتون^۱

هدی سادات لطفی پور*^۲، زهرا باقری^۳ و مجید خدابنده^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال سیزدهم، پیاپی ۳۳، تابستان ۱۴۰۲

صص ۴۶ - ۵۵

چکیده:

در این مطالعه، اثر فیلتر در تغییر نمایانی فریزهای تداخلی کوانتومی تک فوتون بررسی می‌شود. ابتدا در یک چیدمان آزمایشگاهی به کمک یک بلور غیرخطی و تحت تبدیل پایین پارامتری خودبه خودی، جفت فوتون‌های همبسته سیگنال و ایدلر تولید می‌شوند. تک فوتون سیگنال پس از عبور از یک تداخل سنج ماخ زندر به دلیل اصل تمایزناپذیری مسیرهای طی شده در بازوهای تداخل سنج، با خودش تداخل می‌کند. به منظور هم‌خط کردن المان‌های اپتیکی و کمینه کردن اختلاف مسیر اپتیکی در بازوها از تداخل سنجی با منابع لیزر قرمز و نور سفید پیش از تداخل سنجی تک فوتون استفاده شده است. با قرار دادن فیلترها با پهنای بسامدی مختلف در مسیر فوتون‌های سیگنال و ایدلر شاهد فریزهای تداخلی با نمایانی‌های متفاوت هستیم. طرح تداخلی با ثبت همزمانی بین فوتون‌های همبسته بدست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد، پهنای نوار بسامدی فیلترها در تغییر طول همدوسی فوتون‌های تولیدی و در نتیجه نمایانی فریزهای تداخلی اثر قابل توجهی دارند.

واژگان کلیدی: تبدیل پایین پارامتری خودبه خودی، تداخل تک فوتون، تداخل سنج ماخ زندر، فوتون‌های همبسته، نمایانی.

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2023.41718.1296

^۲ استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: hodalotfipoor@gmail.com

^۳ دانش‌آموخته دکترا، گروه بایوفوتونیک کوانتومی، مرکز فناوری‌های کوانتومی ایران، تهران، ایران. Email: bagheri.zahra110@gmail.com

^۴ دانشجوی دکترا، گروه بایوفوتونیک کوانتومی، مرکز فناوری‌های کوانتومی ایران، تهران، ایران. Email: majidkh92@gmail.com



۱. مقدمه

تداخل یک تک فوتون با خودش، پدیده‌ای است که درک آن چالش برانگیز می‌باشد. تا پیش از ظهور مکانیک کوانتومی، در علم فیزیک بنا بر این شده بود که همه چیز یا ذره است و یا موج. اما پس از مدتی، فیزیک کلاسیک ناگزیر شد که برای درک تابش در بعضی موارد نظیر "اثر فوتوالکتریک" به الگوی ذره‌ای و در دیگر موارد مثل "پراش پرتوهای ایکس"، به الگوی موجی توسل جوید. پس از آن بود که اصل دوگانگی موج-ذره برای کوانتاهای نور یعنی فوتون مطرح شد. تا پیش از کشف منبعی که بتواند تک فوتون را تولید کند، خروجی دوشکاف یک طرح تداخلی مشتمل بر نوارهای تاریک و روشن بود. انتظار می‌رفت با شلیک تک فوتون به سمت دو شکاف، فوتون‌ها دیگر چون موج رفتار نکرده، رفتار ذره‌ای از خود نشان داده و طرح تداخلی از بین رود. اما برخلاف انتظار در خروجی، یک طرح تداخلی ثبت شد. در سال‌های کنونی، پژوهشگران تداخل تک فوتون را با انجام دو نوع آزمایش، تداخل از دو شکاف [۱] و تداخل از دو مسیر مختلف در تداخل سنج ماخزندر [۴-۲] دنبال کردند. در این مقاله نتایج تجربی آزمایش تداخل سنجی کوانتومی تک فوتون، برای اولین بار در ایران گزارش شده است. برای این منظور، در یک چیدمان آزمایشگاهی با استفاده از فرآیند تبدیل پایین پارامتری خود به خودی^۱ در یک بلور غیرخطی، ابتدا یک تک فوتون جازنده تولید می‌شود [۶-۳]. سپس در مسیر تک فوتون یک تداخل سنج ماخزندر قرار می‌گیرد که در نهایت منجر به تداخل تک فوتون با خودش می‌شود. در ادامه اثر پهنای نوار بسامدی فیلترها در مسیر فوتون‌های سیگنال و ایدلر، بر روی نمایش فریزهای تداخلی بررسی می‌گردد.

۲. بحث و بررسی

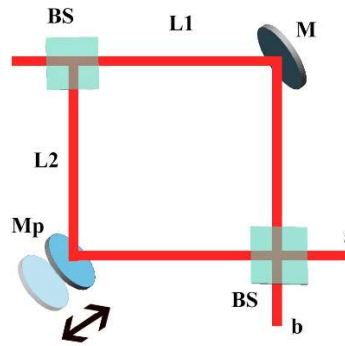
مکانیک کوانتومی نشان می‌دهد در چیدمان تداخل سنجی ماخزندر اگر مسیرها غیرقابل تشخیص^۲ باشند، وضعیت فوتونی که از تداخل سنج خارج می‌شود، برهم نهی از حالت‌هایی است که از دو مسیر عبور می‌کند. در حقیقت، یک فوتون با حالت $|S\rangle$ وارد تداخل سنج شده و به شکافنده پرتو اول وارد می‌شود (شکل ۱). شکافنده پرتو حالت فوتون ورودی را به حالت زیر تغییر می‌دهد:

$$|S\rangle = t|l_r\rangle + r|l_l\rangle \quad (1)$$

¹ Spontaneous Parametric Down Conversion (SPDC)

² Indistinguishable

به صورتی که، $|l_r\rangle$ و $|l_s\rangle$ نشان‌دهنده حالت فوتون در بازوهای تداخل سنج و t و r به ترتیب دامنه عبور و بازتاب از شکافنده پرتو است.

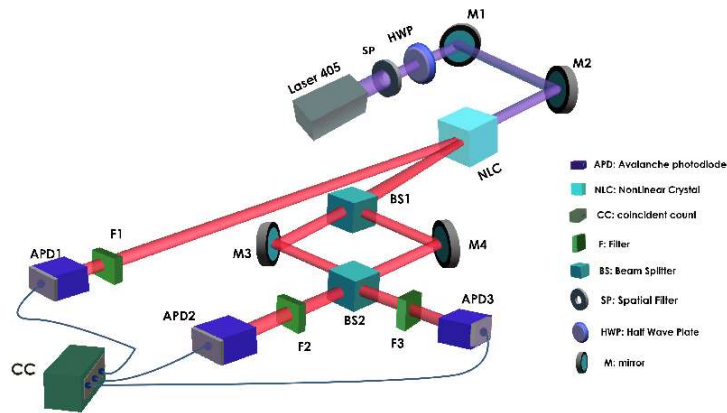


شکل ۱ تداخل سنج ماخ‌زندر متشکل از دو تقسیم کننده پرتو (BS) و دو آینه (M و Mp).

اگر $|a\rangle$ و $|b\rangle$ حالت فوتون سیگنال در خروجی‌های a و b تداخل سنج باشد، آن‌گاه:

$$|l_s\rangle = e^{i\delta_s} (r|a\rangle + t|b\rangle) \quad (2)$$

$$|l_r\rangle = e^{i\delta_r} (t|a\rangle + r|b\rangle) \quad (3)$$



شکل ۲ شماتیک چیدمان تجربی فرآیند تولید تک فوتون به روش SPDC و تداخل تک فوتون در تداخل سنج ماخ‌زندر و ثبت همزمانی آن‌ها.

با ترکیب روابط بالا، برای حالت $|s\rangle$ خواهیم داشت:



$$|s\rangle = rt(e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2})|a\rangle + (tte^{i\delta_1} + rre^{i\delta_2})|b\rangle \quad (4)$$

از این رو، طرح تداخلی ناشی از احتمال آشکارسازی یک فوتون در حالت $|a\rangle$ برابر است با [۳]:

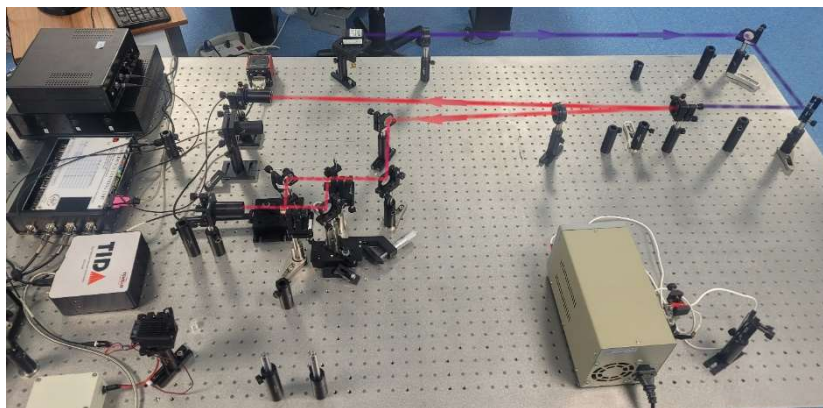
$$p(\delta) = |\langle a|s\rangle|^2 = rRT(1 + \cos\delta) \quad (5)$$

که در رابطه بالا، $R = rr^*$ و $T = tt^*$ به ترتیب احتمال بازتاب و عبور و $\delta = \delta_1 - \delta_2$ اختلاف فاز ناشی از اختلاف راه دو بازوی تداخل سنج می‌باشند.

شکل ۲ و ۳ به ترتیب چیدمان شماتیک و آزمایشگاهی تولید و تداخل تک فوتون را نشان می‌دهد. در این چیدمان با برآوردن شرط هماهنگی فازی بلور BBO، جفت فوتون همسته سیگنال و ایدلر تولید می‌شوند. فوتون ایدلر به صورت مستقیم به کمک آشکارساز حساس به ثبت تک فوتون، ثبت شده و فوتون سیگنال وارد یک تداخل سنج ماخزندر می‌گردد. همچنین، در خروجی‌های تداخل - سنج آشکارسازهای تک فوتون قرار داده می‌شوند. این سه آشکارساز به یک برد الکترونیک همزمانی وارد شده که با استفاده از یک برنامه LabView شمارش هر سه آشکارساز و همزمانی دو به دوی آن‌ها هدایت می‌شود. در انجام آزمایش، شمارش همزمانی بین ایدلر (آشکارساز ۱) و یکی از خروجی‌های ماخزندر (چون آشکارساز ۲ یا ۳) ثبت می‌گردد.

۳. نتایج تجربی

در ابتدا باید چیدمان SPDC تنظیم شود. اگر نور لیزر پمپ با طول موج ۴۰۵ نانومتر کاملاً عمود به بلور برخورد کند و جهت‌گیری بلور برای برقراری شرط هماهنگی فازی درست باشد، دو فوتون با زاویه ۳ درجه نسبت به لیزر فرودی در طول موج ۸۱۰ نانومتر تولید می‌شوند [۳-۶]. پس از تنظیمات اولیه، آشکارسازها را روشن، و سعی کردیم بالاترین شمارش تک فوتون را در آشکارسازها ثبت کنیم. انتظار داریم که آشکارسازها شمارش فوتون یکسانی را ثبت نمایند. هر فوتون خروجی از فرآیند تبدیل پایین پارامتری که از چیدمان تداخل سنجی عبور می‌کند با ایدلر همتای خود برچسب‌گذاری شده است.



شکل ۳ چیدمان آزمایشگاهی فرآیند تولید و تداخل تک فوتون.

در این مرحله پیش از انجام آزمایش تداخل سنجی، باید قرار داشتن در روش تک فوتون جارزننده مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور افزون بر ثبت همزمانی آشکارسازها، درجه همدوسی مرتبه دوم $g^2(0)$ به کمک سه آشکارساز، محاسبه شده است. فاکتور $g^2(0)$ نشان دهنده همبستگی بین شدت هاست که با محاسبه آن ماهیت منبع نور (کلاسیکی یا کوانتومی بودن) و همچنین تک فوتون بودن آن مشخص می گردد. اگر $g^2(0)$ عددی بیش از ۱ بدست آید، در روش کلاسیک قرار داریم. برای نور غیر کلاسیک $g^2(0)$ کمتر از ۱ بدست می آید و هر چه این عدد به سمت صفر میل کند، به حالت آرمانی کوانتومی تک فوتون نزدیک تر می شویم. $g^2(0)$ در این آزمایش مقدار 0.117 ± 0.027 اندازه گیری شد که تایید می کند منبع استفاده شده در این آزمایش یک منبع تک فوتون جارزننده^۱ می باشد. به این معنی که اندازه گیری یک فوتون در یک بازو وجود فوتون در بازوی دیگر را اعلام می کند [۴ و ۷-۹].

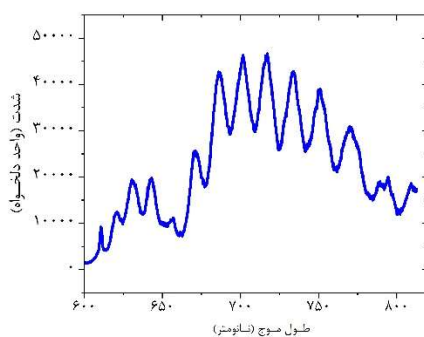
یکی از چالش های مهم برای هم خط کردن و تنظیم چیدمان ماخزندر در یکی از بازوهای خروجی از بلور این است که شدت فوتون های تولید شده از فرآیند SPDC بسیار پایین بوده و از طرفی طول موج آن ها در ناحیه مادون قرمز نزدیک قرار دارد، در نتیجه این فوتون ها با چشم قابل دیدن نیستند. برای مشخص کردن مسیر فوتون های همبسته سیگنال و ایدلر از دو دیافراگم استفاده می شود تا با حضور آن ها نرخ همزمانی فوتون ها به بیشینه مقدار خود برسد. از این رو برای تنظیم تداخل سنج ابتدا با یک لیزر ۶۳۵ نانومتر، ماخزندر تنظیم شده و فریزهای تداخلی بر روی یک صفحه در خروجی تداخل سنج مشاهده می شود. پس از کمینه کردن تعداد فریزها، منبع نور سفید با پهنای طیفی بالا،

^۱ Heralded single photon source



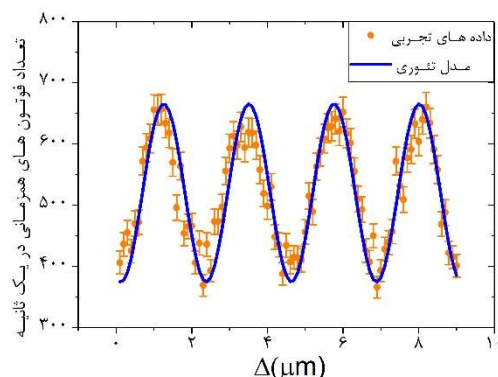
جایگزین لیزر مرئی شد. قرار دادن نور سفید و تنظیم دوباره تداخل سنج ماخ زندر از آن روست که دیدن فریزهای تداخلی با نور لیزر ۶۳۵ نانومتر اختلاف دو بازو را به اندازه کافی کمینه نمی کند. برای مشاهده تداخل تک فوتون ناگزیریم اختلاف بازوها را از مرتبه طول همدوسی فرآیند SPDC کم کنیم. طول همدوسی فوتونهای همبسته به طول موج آنها و پهنای نوار فیلتر پیش از آشکارساز بستگی دارد ($l_c = \lambda^r / \Delta\lambda_{filter}$) که در آن λ طول موج فوتونهای تولیدی و $\Delta\lambda_{filter}$ پهنای بسامدی فیلتر است). هر چه پهنای نوار فیلتر باریک تر باشد طول همدوسی فوتونهای تولید شده بیشتر است. در این آزمایش از فیلترهایی با پهنای نواری ۵ و ۱۲ نانومتر استفاده شده است. در این حالت طول همدوسی فوتونهای تولیدی به ترتیب حدود ۵۴ و ۱۳۱ میکرومتر بدست می آید. از آنجا که طول موج فوتونهای همبسته تولید شده در محدوده مرئی قرار نمی گیرد، لازم است با نور سفید که در دسترس و در عین حال دارای طول همدوسی بسیار کم می باشد، تنظیمات دوباره تکرار شود. برای تولید نور سفید از منبعی استفاده شد که دارای طول همدوسی زیر ۱ میکرون بود. بنابراین کاستن اختلاف راه بین دو بازو و مشاهده فریزهای تداخلی در این مرحله بسیار دشوار می باشد [۱۰].

برای دیدن فریزهای تداخلی از طیف سنج (Teksan TIDA spectrometer) با دقت ۰/۱ نانومتری استفاده شد. فریزهای تداخلی این بار بر روی طیف پهن نور سفید نمایان می شود (شکل ۴). زمانی که اختلاف دو بازو در تداخل سنج کمتر از طول همدوسی است، در تمام فرکانسهای تشکیل شده در نور سفید تداخل رخ می دهد و در طیف سنج شاهد حرکت همزمان طیف به بالا و پایین به صورت نوسانی هستیم. مسیر حرکت جابه جاگر را تا جایی ادامه می دهیم که تعداد فریزهای تداخلی کم شده و شاهد یک تک فریز تداخلی در نور سفید باشیم. در این حالت اختلاف راه دو بازوی تداخل به کمینه مقدار خود رسیده است.



شکل ۴ فریزهای تداخلی با منبع نور سفید.

در مرحله پایانی، دوباره لیزر پمپ ۴۰۵ نانومتر روشن شده و دو فوتون همبسته در دو بازو از بلور خارج می‌شوند. اگر آشکارساز ایدلر را A و آشکارساز خروجی ماخ زندر را B و B' بنامیم، همزمانی بین AB و یا AB' رفتار کسینوسی رابطه (۴) را نشان خواهد داد. برای این منظور، جابه‌جاگر متصل به آینه M2 را به کمک جابه‌جاگر پیزوالکتریک Thorlabs با گام‌های ۰/۱ میکرومتر روبش می‌کنیم. با این کار آگاهانه بین دو بازوی ماخ زندر اختلاف راه هدایت شده ایجاد می‌کنیم تا بتوانیم طرح تداخلی را در همزمانی ثبت کنیم.



شکل ۵ طرح تداخلی تک فوتون (نرخ شمارش همزمانی بین دو آشکارساز بر حسب اختلاف راه) با حضور فیلترها با پهنای بسامدی ۱۲ نانومتر.

نمونه‌ای از طرح تداخل ایجاد شده در همزمانی بین دو آشکارساز A و B در شکل ۵ آمده است. کمیت Δ در این شکل متناسب با اختلاف راه دو بازوی تداخل است. داده‌های تجربی در این نمودار با نقاط نارنجی همراه با خط مشخص شده‌اند که به روش کمینه مربعات^۱ [۱۱] به معادله زیر برازش شده است:

$$N_c = N \cdot [1 + V \cos \delta] \quad (۶)$$

که در آن N و δ کمیت‌های برازش شده هستند. کیفیت طرح تداخلی یا نمایانی فریزها (V) با عبارت زیر تعریف می‌شود:

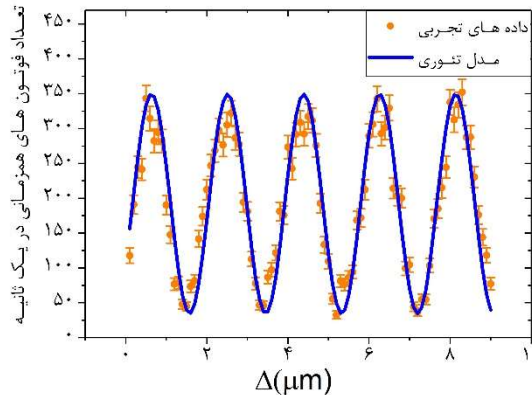
$$V = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \quad (۷)$$

که در آن N_{min} و N_{max} تعداد بیشینه و کمینه در نوسانات تداخلی است. نمایانی عددی بین صفر و ۱ است و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد تداخل کامل‌تر انجام شده است [۳-۵].

^۱ Least square



در شکل ۵ طرح تداخلی تک فوتون مشاهده می‌شود که در آن قله‌ها و دره‌ها نمایانگر فریزهای تداخلی تاریک و روشن هستند. در این شکل فیلترها با پهنای نواری ۱۲ نانومتر در مسیر فوتون‌های سیگنال و ایدلر قرار گرفته‌اند. میزان نمایانی بدست آمده از این نمودار بعد از برازش با رابطه نظری مقدار ۲۸ درصد بدست می‌آید. شکل ۶ نیز طرح تداخلی تک فوتون در حضور فیلترهای ۵ نانومتری را نشان می‌دهد که نمایانی بدست آمده از آن $V = 12 \pm 0.5$ درصد است. در آزمایش دیگری پس از حذف فیلترها، شاهد از بین رفتن طرح تداخلی بودیم. فریزهای تداخلی زمانی مشاهده می‌شوند که اختلاف راه دو مسیر در ماکزندر کوچک‌تر از طول همدوسی منبع باشد. با حذف فیلترها طول همدوسی به شدت کاهش پیدا کرده در نتیجه شرط بالا دیگر برقرار نیست. از سویی هر چه پهنای فیلترها باریک‌تر باشند، طول همدوسی فوتون‌های تولیدی بزرگ‌تر بوده و شرط بالا را کامل‌تر برآورده می‌کنند و میزان نمایانی فریزها افزایش قابل توجهی خواهد داشت.



شکل ۶ طرح تداخلی تک فوتون (نرخ شمارش همزمانی بین دو آشکارساز بر حسب اختلاف راه) با حضور فیلترها با پهنای بسامدی ۵ نانومتر.

یکی از نکات مهم آن است که از دیدگاه فیزیکی تداخل تک فوتون زمانی رخ می‌دهد که تنها یک فوتون در هر لحظه در بخش ماکزندر چیدمان حضور داشته باشد. اگر اثرات قطع‌اِپتیکی، فیلترها و آشکارساز را در نظر بگیریم، بازده آشکارسازی را می‌توان به اندازه $\eta_{det}=0/1$ تخمین زد [۳]. با در نظر گرفتن طول بازوی تداخل به اندازه $l = 20$ سانتی‌متر و متوسط تعداد فوتون‌های سیگنال ($N_s = 1729675^{-1}$)، تعداد متوسط فوتون‌ها در تداخل سنج در هر زمان بیش از مقدار $\frac{IN_s}{\eta_{det}C} = 4/1 \times 10^{-7}$ بدست نمی‌آید. همچنین، تنها تعداد فوتون‌هایی در همزمانی ثبت

می شوند که با جفت همبسته خود به آشکارساز برسند، در نتیجه تعداد حقیقی فوتون‌های مورد نظر از این تعداد محاسبه شده نیز کمتر است. پس شرط حضور یک فوتون در هر لحظه در تداخل سنج در این آزمایش برآورده می گردد.

پس از اندازه گیری نرخ فوتون‌ها به کمک دو آشکارساز، بهسازی‌هایی در داده‌ها باید صورت گیرد که ناشی از انواع نوفه‌ها (چون؛ جریان تاریک^۱، نرخ همزمانی تصادفی^۲ و زمان مرده^۳ آشکارسازها) است [۱۲]. تعداد همزمانی تصادفی، تعداد فوتون‌هایی است که به شکل تصادفی بدون داشتن همبستگی، همزمان به آشکارساز می‌رسند [۷]. این نرخ همزمانی تصادفی برای دو آشکارساز با رابطه $\Delta t \frac{N_s N_i}{T}$ نشان داده می شود [۴ و ۳]. بازه زمانی پنجره همزمانی، در این آزمایش برابر با ۷/۱ نانوثانیه است. همچنین N_s و N_i نرخ فوتون‌ها در شاخه سیگنال و ایدلر و T زمان داده‌گیری است. نرخ همزمانی تصادفی در فرآیند SPDC جزء کمیت‌هایی است که هرچه مقدار کوچک‌تری داشته باشد ورود به روش کوانتومی را ساده‌تر می‌کند. برای کم شدن این کمیت می‌توان پنجره همزمانی را کاهش داد، (برای کاهش آن با محدودیت‌های سخت افزاری روبرو هستیم.) و یا شدت لیزر پمپ ورودی را کاهش داد [۴ و ۳].

برای اعمال بهسازی‌های ناشی از جریان تاریک باید نرخ فوتون‌ها در هر آشکارساز را از نرخ جریان تاریک کم کرد. از طرفی با در نظر گرفتن زمان مرده آشکارساز (τ_{dead}) به اندازه ۵۰ نانوثانیه، پارامتر تصحیح ناشی از زمان مرده ($\gamma = 1 - N \frac{\tau_{dead}}{T}$) که در آن N نرخ فوتون‌های آشکارسازی شده است.) باید در نرخ فوتون‌ها ضرب شود که در این آزمایش مقدار ۰/۹ بدست می‌آید [۸ و ۱۲].

۴. نتیجه گیری

در این مقاله اثر پهنای بسامدی فیلترها در پدیده تداخل تک فوتون به صورت تجربی بررسی شد. برای این منظور لازم بود در مسیر یکی از فوتون‌های همبسته تولید شده از فرآیند تبدیل پایین پارامتری خودبه‌خودی یک تداخل سنج قرار گیرد. با تنظیم دقیق چیدمان SPDC و ماخ‌زندر و اعمال اختلاف راه از مرتبه ۰/۱ میکرون به کمک یک جابه‌جاگر، ثبت نرخ همزمانی آشکارسازها،

¹ Dark Count

² Accidental Coincidence

³ Dead Time



تداخل تک فوتون مشاهده شد. در ادامه فیلترها با پهنای بسامدی مختلف در دو شاخه سیگنال و ایدلر پیش از آشکارسازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان دهنده آن بود که نمایانی فریزهای تداخلی در چیدمان با فیلترهای نازک نوار بیشتر از نمایانی با حضور فیلترهای با پهنای نوار بیشتر بود. از راه فیلتر می توان پهنای بسامدی فوتون‌ها و در نتیجه طول همدوسی آن‌ها را هدایت کرد. از طرفی با بالا رفتن طول همدوسی شرط ایجاد تداخل مطمئن تر برآورده می گردد.

منابع

- [1] Dimitrova T. L., Weis A., Lecture demonstrations of interference and quantum erasing with single photons, *Physica Scripta*, 2009.T135, 014003, 2009.
- [2] Dimitrova T. L., Weis A., A double demonstration experiment for the dual nature of light, *14th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*, Vol. 6604. SPIE, 2007.
- [3] Pearson B. J., Jackson D. P., A hands-on introduction to single photons and quantum mechanics for undergraduates, *American Journal of Physics*, 78.5, 471-484, 2010.
- [4] Galvez E. J., Holbrow C.H., Pyscher M.J., Martin J.W., Courtemanche N., Heilig, L. and Spencer J., Interference with correlated photons: Five quantum mechanics experiments for undergraduates, *American Journal of Physics*, 73.2, 127-140, 2005.
- [5] Thorn J. J., Neel M.S., Donato, V.W., Bergreen, G.S., Davies, R.E. and Beck, M., Observing the quantum behavior of light in an undergraduate laboratory, *American Journal of Physics*, 72.9, 1210-1219, 2004.
- [6] Couteau C., Spontaneous parametric down-conversion. *Contemporary Physics*, 59.3, 291-304, 2018.
- [7] Lotfipour H., khodabandeh M., bagheri Z., Sobhani H., Investigation the Second Order Degree of Coherence and Experimental verification of Heralded Single Photon Generation, *ICOP & ICPET_ INPC_ ICOFS*, 28, 189- 192, 2022.
- [8] Lotfipour H., Sobhani H., and Khodabandeh M., Quantum diagnosis of cancer with heralded single photons, *Laser Physics Letters*, 19.10, 105603, 2022.
- [9] Grangier P., Roger G., and Aspect A., Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: A new light on single-photon interferences, *Europhysics Letters (EPL)*, 1.4, 173, 1986.
- [10] Kumar V., and Rao D.N., Using interference in the frequency domain for precise determination of thickness and refractive indices of normal dispersive materials, *JOSA B* 12.9, 1559-1563, 1995.
- [11] Kemmer G., and Keller S., Nonlinear least-squares data fitting in Excel spreadsheets, *Nature protocols*, 5.2, 267-281, 2010.
- [12] Brida G., Genovese M., And Novero C., An application of two-photon entangled states to quantum metrology, *Journal of modern optics*, 47.12, 2099-2104, 2000.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

