

테이퍼드 편광유지 광섬유에서 생성된 광자쌍의 스펙트럼 상관관계에 따른 순수도에 관한 이론적 연구

이경택, 김지환, 이주한
서울시립대학교

j.h.lee@ieee.org

A Theoretical Study on the Spectral Correlation of Photon-pair Generated from Tapered Polarization-maintaining Optical Fiber

Kyungtaek Lee, Jeehwan Kim, Ju Han Lee
University of Seoul.

요 약

테이퍼드 편광유지 광섬유에서 비선형 광학 현상인 자발적 사 광파 변환에 의해 생성되는 광자쌍의 스펙트럼 상관관계 (Spectral Correlation)에 따른 순수도 (Purity)를 계산하였다. 테이퍼 직경이 7.2 μm 일 때 1057 nm 펄프 하에 중심파장을 1358 nm 와 866 nm 가지는 순수도가 0.80 인 광자 쌍이 생성됨을 확인하였다.

I. 서 론

양자 정보 처리와 통신 (Quantum information processing and communication)에서 단일 광자 광원이 사용되기 위해서는 사용되는 광자가 구별 불가능성 (Indistinguishability)을 가질 뿐만 아니라 양자역학적으로 순수한 상태 (Pure state)이어야 한다. 예고된 단일 광자 광원은 비선형 광학현상으로 생성되는 광자 쌍 중에 하나의 광자를 예고하는 광자로 사용하는 방법으로 1986 년 처음 보고된 이후 활발히 연구되어 왔다 [1]. 광자 쌍을 생성하기 위한 방법으로는 대표적으로 자발적 매개 하향 변환 (Spontaneous parametric down-conversion)과 자발적 사 광파 변환 (Spontaneous four-wave mixing)이 있다. 이러한 방법을 통해 생성되는 광자쌍은 일반적으로 높은 스펙트럼 상관관계 (Spectral correlation)을 가지게 된다. 광자쌍이 높은 스펙트럼 상관관계를 가지게 되면, 광자 쌍 중 하나의 광자를 측정하게 되면 광자 상태는 혼합 상태 (Mixed state)가 된다 [2]. 이를 극복하기 위하여 협대역의 스펙트럼 필터를 사용하여 순수도 (Purity)를 높이게 되는데, 이는 광자 쌍의 밝기를 낮추게 된다. 자발적 사 광파변환에 의해 생성되는 광자 쌍의 순수도를 높이기 위해서 광섬유의 광학적 특성을 변화시키는 방법이 고안되었다 [3,4].

또한 예고된 단일 광자 광원이 양자 정보학에서 응용되기 위해서는 예고된 단일 광자 광원이 높은 예고 효율 (Heralding efficiency)을 가져야 한다. 이때 예고 효율을 높이기 위해서는 예고하는 광자를 단일 광자의 검출 효율이 높은 파장대역에서의 생성하는 것이다. 현재 실리콘 기반 단일 광자 검출기는 600 에서 800 nm 대역 사이에서 검출효율이 대략 70%로, 해당 파장대역에서 예고하는 광자를 생성하는 연구들이 이루어지고 있다 [5].

본 연구에서는 테이퍼드 편광유지 광섬유에서 자발적 사 광파 변환을 통하여 생성되는 광자 쌍의 중심파장과 순수도를 Joint Spectral Intensity 를 통하여 계산하였다.

편광유지 광섬유의 테이퍼 직경이 7.2 μm 이고 펄프 광의 중심파장이 1057 nm 일 때 자발적 사 광파 변환에 의해 생성된 광자 쌍의 파장은 각각 866 nm 와 1358 nm 으로 실리콘 기반 단일 광자 검출기의 최대 검출효율 대역 (600-800 nm)과 광섬유의 전송구간 (1300 nm)에서 광자 쌍을 생성하였다. 이때 생성된 광자 쌍의 순수도는 0.8 이다.

II. 본 론

비선형 광학적 특성을 가지고 있는 매질에서 두개의 펄프광에 의해 자발적 사 광파 변환에 의해 생성되는 광자 쌍은 위상정합 조건 (Phase-matching condition)을 만족해야 한다 [6]. 위상정합 조건을 만족하는 광자 쌍의 중심파장은 광섬유의 광학적 특성에 따라 달라지게 되는데, 광섬유를 테이퍼링하여 광섬유의 광학적 특성이 변화하게 되면 생성되는 광자 쌍의 중심파장을 변화시킬 수 있다. 또한 일반적으로 자발적 사 광파 변환에 의해 생성되는 광자 쌍은 스펙트럼의 상관관계가 높아 순수도가 낮다. 생성되는 광자 쌍의 순수도를 높이기 위해 광섬유의 테이퍼링을 통하여 특정 조건을 만족시키면 높은 순수도를 가지는 광자 쌍을 생성할 수 있다.

테이퍼드 편광유지 광섬유에서 위상정합 조건을 계산하기 위하여 테이퍼 직경이 7.2 μm 일 때의 전파 상수를 유한차분 시간영역법 (Finite difference time domain) 기반 상용 소프트웨어를 통하여 계산하였다 (그림 1).

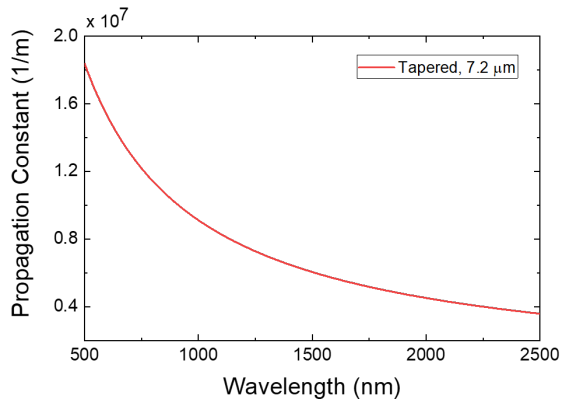


그림 1. 테이퍼드 편광유지 광섬유와 편광유지 광섬유의 파장에 따른 전파 상수.

테이퍼드 편광유지 광섬유 (테이퍼 직경: $7.2 \mu\text{m}$)의 전파상수를 활용하여 펌프 광원의 중심파장이 1057 nm 일 때 위상정합 조건을 계산하여 얻은 광자 쌍의 파장은 각각 1358 과 866 nm 이다. 또한 테이퍼드 편광유지 광섬유 (테이퍼 직경: $7.2 \mu\text{m}$)에서 생성된 광자 쌍의 순수도를 얻기 위하여 Joint Spectrum Intensity 를 계산하였다 (그림 2).

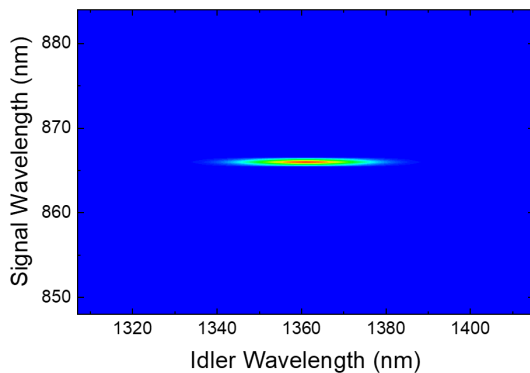


그림 2. 테이퍼드 편광유지 광섬유에서의 Joint Spectral Intensity.

펌프 광원의 중심파장이 1057 nm 이고 테이퍼드 편광유지 광섬유의 테이퍼 직경이 $7.2 \mu\text{m}$ 일 때의 순수도를 그림 2 의 Joint Spectral Intensity 를 통하여 계산하였다. 예고된 단일 광자 광원의 순수도는 0.80 으로 계산되었다.

III. 결 론

본 연구에서는 테이퍼드 편광유지 광섬유의 테이퍼 직경이 $7.2 \mu\text{m}$ 일 때 위상정합 조건을 계산하여 생성되는 광자 쌍의 중심파장을 계산하였다. 광자 쌍의 중심파장은 각각 866 nm 와 1358 nm 이다. 생성된 광자 쌍의 스펙트럼 상관관계를 계산하여 얻은 광자 쌍의 순수도는 0.80 이었다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2022-2021-0-01810).

참 고 문 헌

- [1] C. Hong and L. Mandel, "Experimental realization of a localized one-photon state," *Phys. Rev. Lett.* **56**, 58 (1986).
- [2] S. Du, "Quantum-state purity of heralded single photons produced from frequency-anticorrelated biphotons," *Phys. Rev. A* **92**, 043836 (2015).
- [3] K. Garay-Palmett, H. McGuinness, O. Cohen, J. Lundeen, R. Rangel-Rojo, A. U'ren, M. Raymer, C. McKinstrie, S. Radic, and I. Walmsley, "Photon pair-state preparation with tailored spectral properties by spontaneous four-wave mixing in photonic-crystal fiber," *Opt. Express* **15**, 14870-14886 (2007).
- [4] Y. S. Ihn, Z. Kim, and S. Lee, "Optical Wave Guiding and Spectral Properties of Micro/Nanofibers Used for Quantum Sensing and Quantum Light Generation," *Appl. Sci.* **10**, 715 (2020).
- [5] F. Kaneda, K. Garay-Palmett, A. B. U'ren, and P. G. Kwiat, "Heralded single-photon source utilizing highly nondegenerate, spectrally factorable spontaneous parametric downconversion," *Opt. Express* **24**, 10733-10747 (2016).
- [6] R. W. Boyd, *Nonlinear optics* (Academic press, 2020).