

上转换单光子探测器的研究及技术进展

李依桐¹, 余建国¹, 李嘉恒¹, 王任凡², 罗 彪²

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2. 武汉电信器件有限公司, 武汉 430074)

摘要:总结了上转换探测技术的基本原理,对探测器的结构、材料、性能以及前沿应用等方面作了介绍,指出探测器的性能提升、集成化、小型化和非线性材料的多元化等是未来上转换技术发展的新趋势。

关键词:单光子探测;上转换;周期性极化铌酸锂;探测效率;暗计数

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2018)03-0017-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.005

Research and technology progress of up-conversion single-photon detector

LI Yitong¹, YU Jianguo¹, LI Jiaheng¹, WANG Renfan², LUO Biao²

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. Wuhan Telecommunication Devices Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, basic principles of up-conversion detection technology are summarized. The structure, material, performance and front application of the detector are presented. It proposes that the performance improvement, integration, miniaturization and the diversification of nonlinear materials of detectors will be the new trend of the up-conversion technology in the future.

Key words: single-photon detection; up-conversion; periodically polarized lithium niobate; detection efficiency; dark count

0 引言

单光子探测技术是在光探测方面对灵敏度要求最高的探测技术,能够对单个光能量实现有效的感应,具有极限灵敏度的探测能力。其作为一种新型的探测技术,已经成为目前量子光学和量子信息领域一个热点研究课题。常用的单光子探测器多种多样,如光电倍增管(PMT)、单光子雪崩二极管(APD)、超导纳米线单光子探测器(SNSPD)、超导临界温度跃迁光电子探测器(TES)、基于频率上转换(frequency up-conversion)技术的单光子探测器和可见光单光子计数器等。PMT和APD在红外波段探测效率较低,暗计数很高。SNSPD和TES单光子探测器都具有超导结构,在低温环境中才能正常工作,需液氮制冷设备,导致系

统体积庞大、成本昂贵。相比之下,上转换单光子探测器不需要制冷设备,易于集成化批量制作,且转换效率较高,在单光子探测领域显示出良好的前景。但是在实际应用中,该探测器还存在着非线性噪声大、波导耦合损耗大和需要大块非线性晶体材料等问题。目前,科学家们在探测系统结构和器件材料的选择等方面不断创新,致力于解决这些问题,进一步提高其性能。

本文将结合国际最新研究成果,从上转换单光子探测技术的基本原理入手,对上转换探测系统进行介绍。

1 频率上转换技术

1.1 基本原理

上转换单光子探测器主要根据非线性光学中的和频效应,将低能量光子转换为高能量的可见光子,这个过程可以用图1来表示。

收稿日期:2017-05-24。

基金项目:国家863项目(2015AA016901)资助。

作者简介:李依桐(1992-),女,博士研究生,主要从事光通信与光电器件方面的研究。

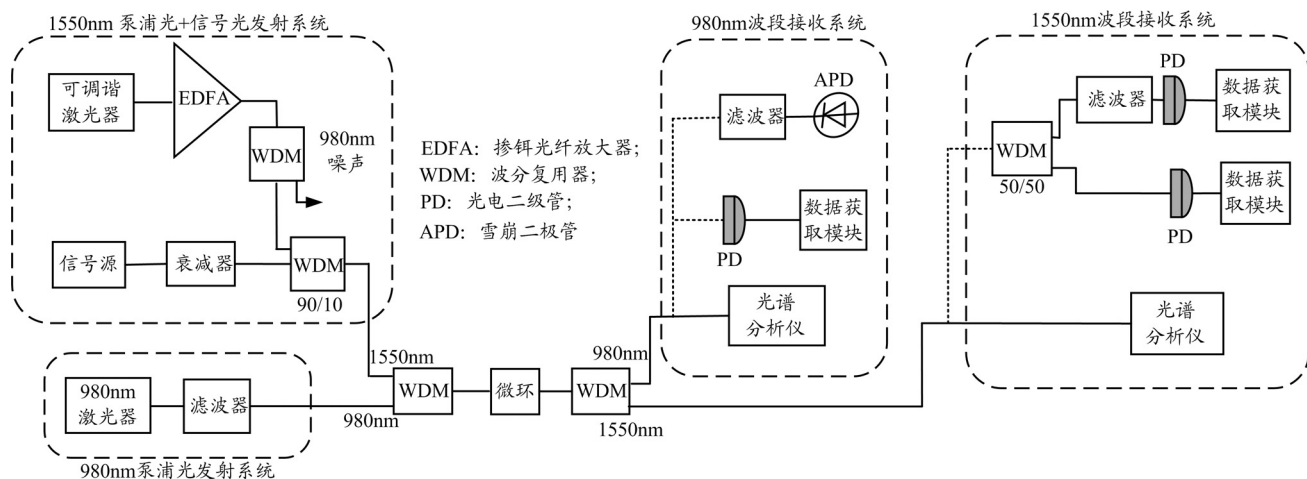


图4 基于微环谐振腔的频率上转换单光子探测系统

如图4所示,1550nm的信号经过衰减器,连同1550nm泵浦光通过90/10的WDM。980nm泵浦光滤波后与1550nm波段的光经过WDM。三束光进入微环谐振腔,发生四波混频-布喇格散射效应,1550nm波段的信号光被复制到980nm波段。从微环结构出来的光分为980nm和1550nm两个波段,分别由光谱分析仪、数据获取模块、APD探测和接收,再通过计算APD的雪崩触发概率,可以得到探测系统的转换效率。

这种单光子探测器利用微环谐振腔结构和四波混频-布喇格散射效应相结合,实现通信波段的高效率低噪声频率转换,入射光进入谐振腔后,可以增强光场强度,使得谐振腔内的非线性效应更易产生。

目前,国内外对上转换单光子探测技术的研究都处于初步阶段,虽然取得了一些成果,但是还都只是在实验室中进行验证,系统庞大而复杂,并没有制作成小型器件,也无从进行批量生产。现有技术中,常使用谐振腔来增强有效入射泵浦光功率,而谐振腔也往往结构庞大,进一步增加了系统的体积;若使用波导来集成,可以有效聚集泵浦光能量,减少谐振腔带来的结构复杂弊端,更利于对系统集成,方便对芯片进行批量生产,提高了实用性。

如图5所示,将非线性光子晶体波导与滤波片集成在一个芯片上,利用波导将红外单光子信号上转换为可见光单光子信号,利用滤波片过滤可见光单光子信号携带的噪声,再用可见光单光子计数模块对过滤后的可见光单光子进行探测。这种集成

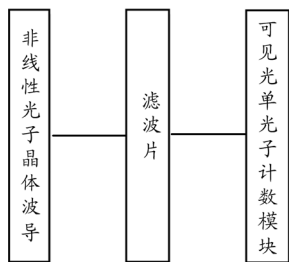


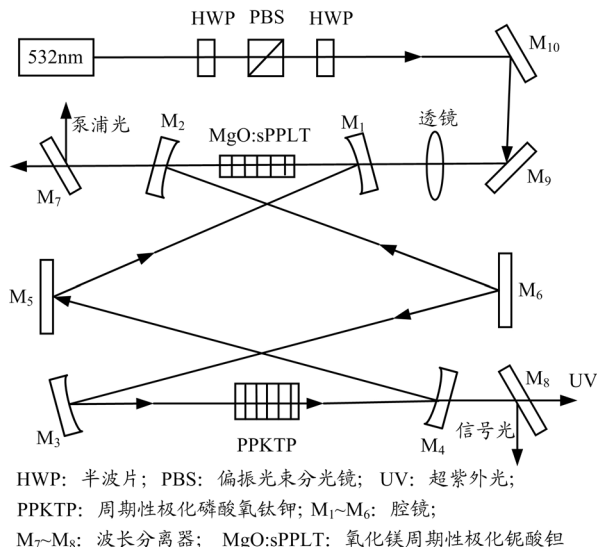
图5 上转换系统集成结构

结构使上转换系统得到简化,体积小、可批量生产和方便携带,将大大增强上转换技术在实际中的应用,在光通信、光雷达、激光测距、激光制导、量子信息学和物质检测与分析等应用中发挥更重要的作用。

2.2 器件材料

上转换单光子探测器的核心部分是实现和频转换的非线性材料,PPLN是上转换实验中使用最广泛的非线性材料。除此之外,有许多非线性材料渐渐被人们发现,并逐步应用到上转换探测技术中来,成为一种提高探测器性能的新趋势。

目前,国际上最新的实验显示,利用铌酸钽晶体掺杂氧化镁的周期性极化和一个联合多个周期的周期性极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体制成的光源结构系统,可以实现从绿色光到超紫外光的上转换。该成果来自印度的A.Aadhi小组^[4],实验装置如图6所示。

图6 紫外线生成的实验装置示意图^[4]

该系统结构紧密,使用连续的绿色光源作为泵浦光,另有一个单共振参量振荡器(SRO)提供了波长为 1541.61nm、最大功率为 840mW 的光以及波长为 812.33nm、实际功率为 108nW 的信号光,且透过整个高反射腔镜。该结构中使用的非线性晶体为一个掺 MgO 的周期性极化以及化学计量制作反转周期为 $8.5\mu\text{m}$ 的 MgO:sPPLT 晶体,长度大约为 25mm,还包含一个为实现倍频的联合多个周期的 PPKTP 晶体,长度为 5mm。系统中还包含一个环形腔、两个分别用来分离泵浦光和超紫外光的波长分离器。

紫外光强度在整个调谐范围的变化如图 7 所示,可以看出通过整个系统上转换生成的超紫外线在波长为 398.94nm 时的功率强度为 336mW,而此时对应输入的绿光上转换为超紫外光的转换效率是 6.7%。文献[4]记录了调谐范围内两种不同波长(399.37nm 和 405.02nm)的绿色光源与上转换生成的超紫外光线对应的输出功率的变化,如图 8 所示,输出的紫外线功率与输入的绿光泵浦功率呈线性正比关系。

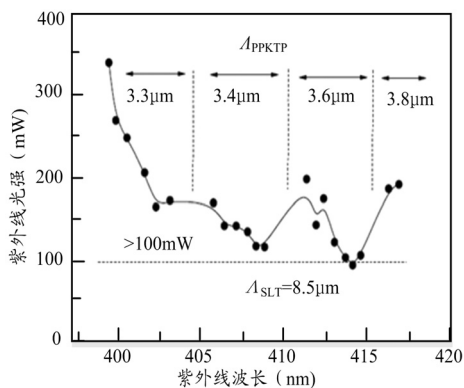


图 7 紫外线光强在整个调谐范围的变化^[4]

3 发展进程及趋势

1990 年,美国西北大学的 Prem Kumar 提出了频率上转换量子理论,当时是利用磷酸钛氧钾(KTP)晶体作为介质材料进行验证的。但 KTP 晶体非线性效应不明显,限于非线性材料的选择问题,上转换技术一直没有进展。直到 2003 年,麻省理工大学的 N.C. Wong 才找到一种高非线性系数的非线性材料,即

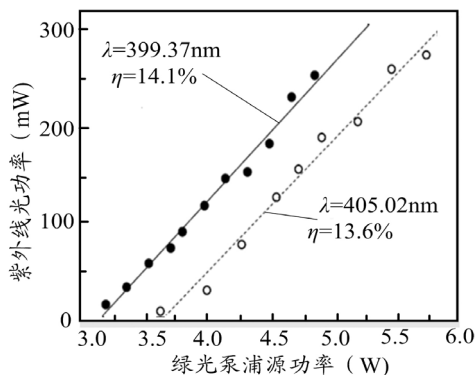


图 8 两种不同波长的绿光泵浦源与紫外线源对应的输出功率的变化^[4]

PPLN 作为介质,实现了超过 90% 的高效率转换,整体探测效率达到了 55%^[1,2],这一发现极大促进了这个领域的发展。后来,美国伊利诺伊斯大学的 A.P VanDevender 等人同样使用 PPLN 晶体,完成了上转换探测的实验,其转换效率为 80%^[5]。

由于波导相对晶体来说,有着更强的集聚泵浦光的能力,可以有效提高系统和频转换的效率。2004 年,美国斯坦福大学的科学家将 PPLN 制成 PPLN 波导,在 1550nm 波段实现了高达 46% 的探测效率^[6];在 1560nm 和 1320nm 波段得到了探测效率分别为 40% 和 46% 的实验结果^[3]。

以上的研究中,科学家一直致力于提高系统的整体探测效率,但是没有解决系统噪声明显的问题。2008 年,日本 NTT H.Kamada 为了降低系统噪声,在系统中加入了单色仪来滤波,使得系统的噪声得以下降,但也大幅降低了探测效率^[7]。瑞士科学家 R.T.Thew 团队则致力于实现泵浦光和信号光的可调谐,扩大了探测带宽的范围,但其转换效率也很低(12%),且该系统对温度敏感,限制了其在实际中的应用^[8]。

21 世纪初,美国国家标准与技术研究所加入了上转换技术的研究,他们利用多种方式改善了上转换系统的性能,包括在 PPLN 波导中掺杂氧化镁提高灵敏度(探测效率为 32%,每秒可探测 1563 个光子^[9])、掺杂氧化锌实现信号光的可调谐(转换效率为 $5.8 \times 10^{-2}\%$ W⁻¹^[10])、改善时间分辨率(探测效率为 7%^[11])、利用两种单光子源实现和频(探测效率为 26%、转换效率为 80%^[12])和低温冷却 InAs 量子点(探测效率为 21%,转换效率为 75%^[13])等方式。

德国科学家在 2014 年验证了自由载波光压缩真空态的外部量子频率上转换^[14]。同年,丹麦的 Ole Bjarlin Jensen 等人提出了基于和频在耦合环形腔产生单色蓝色激光的方法,实验的转换效率达 25%^[15]。

我国对于上转换单光子探测技术的研究起步较晚,但发展速度很快,目前已经取得不少成果。其中,华东师范大学在该领域做出了杰出的贡献,提高了系统的稳定性,且相对实现了小型化^[16],暗计数较低(最低 200 个/s),最高的探测效率达 70%^[17]。上海交通大学科研人员利用掺杂 MgO 的 PPLN 晶体完成了上转换的试验^[18]。中科大的团队也实现了一种超低暗计数的频率上转换探测,探测效率为 30%,暗计数达到了硅雪崩二极管的水平^[19]。但是,与国际上水平相比,我国研制的单光子探测器性能仍需提高,探测效率不高,结构也比较单一。

为了研制高效率低噪声的上转换单光子探测器,在今后国内外的研究过程中,各研发团队势必将围绕以下几个方面开展工作:

◆更高性能的上转换单光子探测器。目前的上转换单光子探测器在量子效率、暗计数和低时间抖动等方面的性能已经比较优良,但是仍然有很大的提升空间。因此,如何进一步提升这些性能是未来发展的一个主要方向。这些性能的提升将会大大扩展上转换单光子探测器的应用。

◆小型化、集成化。现阶段国内外对于上转换单光子探测技术的研究还停留在实验阶段,各种设备体积大,成本高,可制造性不强。随着微波光子集成技术的发展,高度集成的硅基探测芯片将是未来研究的热点。

◆非线性介质材料多元化。PPLN为现阶段最常见的非线性介质材料,相信之后会有更多的非线性材料渐渐被人们发现,并逐步应用到上转换探测技术中来。在这些材料(PPKTP、PPLT、周期性极化磷酸钛氧铯等)里,掺杂氧化物制成非线性晶体或者波导来提高转换效率将成为一种新趋势。

◆可用波段的扩展。在可见波段,有更加成熟的半导体单光子探测器的存在,使得国际上针对上转换单光子探测的研究主要集中在通信波段。在红外和近红外波段,上转换单光子探测器也确实体现了良好的性能。目前已有针对可见光的上转换技术的一些报道,随着上转换技术的不断成熟,相信上转换单光子探测器的可用波段将得到扩展,并发展成一种从可见光到远红外全覆盖的单光子探测技术。

4 结束语

本文介绍了一种基于上转换技术的新型单光子探测器,分析了上转换单光子探测技术的发展进程和实际应用,并总结了目前国际上最新的研究进展,提出了上转换探测技术在结构上趋于集成化、小型化的观点。未来的探测器势必会进一步简化其结构系统,在材料的选择上趋于掺杂化、多元化,可用波段也会不断扩展,从而逐步改善探测器的性能。

参考文献:

- [1] ALBOTA M A, WONG F N. Efficient single-photon counting at 1.55 microm by means of frequency upconversion [J]. Optics Letters, 2004, 29 (13): 1449-1451.
- [2] ALBOTA M A, WONG F N C. Efficient single-photon counting at 1.55 μ m via frequency upconversion [C]// Quantum Electronics and Laser Sci-

ence(QELS), June 6, 2003, Baltimore, USA. Piscataway: IEEE, 2003.

- [3] PAN H, WU E, DONG H, et al. Single-photon frequency up-conversion with multimode pumping[J]. Physical Review A, 2008, 77(3): 033815-1-033815-6.
- [4] AADHI A, CHAITANYA N A, JABIR M V, et al. All-periodically poled, high-power, continuous-wave, single-frequency tunable UV source [J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 33-36.
- [5] VANDEVENDER A P, KWIAT P G. High efficiency single photon detection via frequency upconversion [J]. Journal of Modern Optics, 2004, 51 (9-10): 1433-1445.
- [6] LANGROCK C, KURZ J R, FEJER M M, et al. Periodically poled lithium niobate waveguide sum-frequency generator for efficient single-photon detection at communication wavelengths [J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1518-1520.
- [7] KAMADA H, ASOBE M. Efficient and low-noise single-photon detection in 1550nm communication band by frequency upconversion in periodically poled LiNbO_3 waveguides[J]. Optics letters, 2008, 33(7): 639-641.
- [8] THEW R T, ZBINDEN H, GISIN N. Tunable upconversion photon detector[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(7): 071104-071106.
- [9] MA L, SLATTERY O, TANG X. Experimental study of high sensitivity infrared spectrometer with waveguide-based upconversion detector (1)[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 14395-14404.
- [10] NEELY T W, NUGENTGLANDORF L, ADLER F, et al. Broadband mid-infrared frequency up-conversion and spectroscopy with an aperiodically poled LiNbO_3 waveguide[J]. Optics Letters, 2012, 37(20): 4332-4334.
- [11] MA L, BIENFANG J C, SLATTERY O, et al. Up-conversion single-photon detector using multi-wavelength sampling techniques[J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5470-5479.
- [12] MA L, RAKHER M T, STEVENS M J, et al. Temporal correlation of photons following frequency up-conversion [J]. Optics Express, 2011, 19 (11): 10501-10510.
- [13] RAKHER M T, MA L, SLATTERY O, et al. Quantum transduction of telecommunications-band single photons from a quantum dot by frequency up-conversion[J]. Physics, 2011, 4(11): 786-791.
- [14] VOLLMER C E, BAUNE C, SAMBLOWSKI A, et al. Quantum up-conversion of squeezed vacuum states from 1550 to 532 nm[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(7): 073602-1-073602-5.
- [15] JENSEN O B, PETERSEN P M. A new approach to sum frequency generation of single-frequency blue light in a coupled ring cavity [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2014, 8964(2): 896404-896410.
- [16] GU X, HUANG K, LI Y, et al. Temporal and spectral control of single-photon frequency up-conversion for pulsed radiation [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(13): 131111-131113.
- [17] GU X, HUANG K, PAN H, et al. Photon correlation in single-photon frequency upconversion.[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2399-2407.
- [18] DANG W, CHEN Y, GONG M, et al. Competition between SFG and two SHGs in broadband type-I QPM [J]. Applied Physics B, 2013, 110(4): 477-482.
- [19] SHENTU G L, PELC J S, WANG X D, et al. Ultralow noise up-conversion detector and spectrometer for the telecom band [J]. Optics Express, 2013, 21(12): 13986-13991.